

LUCAS SAMPAIO LOPES

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO  
ENERGÉTICA DE LODO E BIOGÁS PROVENIENTES DE  
REATORES UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO NO  
ESTADO DO PARANÁ**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de  
Viçosa, como parte das  
exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola, para obtenção do  
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

L864a  
2018  
Lopes, Lucas Sampaio, 1987-  
Avaliação do potencial de recuperação energética de lodo e  
biogás provenientes de reatores UASB tratando esgoto  
doméstico no estado do Paraná. / Lucas Sampaio Lopes. –  
Viçosa, MG, 2018.  
xv, 114 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: André Pereira Rosa.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Esgotos - Paraná. 2. Energia -Fontes alternativas.  
3. Biogás. 4. Lodo residual. 5. Águas residuais - Purificação -  
Paraná. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola. II. Título.

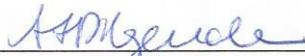
CDD 22. ed. 628.3098162

LUCAS SAMPAIO LOPES

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE LODO  
E BIOGÁS PROVENIENTES DE REATORES UASB TRATANDO ESGOTO  
DOMÉSTICO NO ESTADO DO PARANÁ

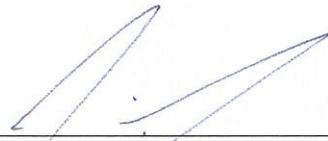
Dissertação apresentada à Universidade  
Federal de Viçosa, como parte das  
exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola, para  
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de fevereiro de 2018.



---

Ana Augusta Passos Rezende



---

Gustavo Rafael Collere Possetti  
(Coorientador)



---

André Pereira Rosa  
(Orientador)

*“A resiliência é a habilidade que uma pessoa desenvolve para resistir, lidar e reagir de modo positivo em situações adversas”.*

*Aos meus pais e ao meu irmão Gustavo, minha essência.  
À Júlia, luz destinada por Deus a minha vida. E aos  
grandes amigos.*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu senhor, Deus, sem ele as coisas não são possíveis, por me dar força para lutar, esperança e tranquilidade para trilhar o caminho do sucesso. Aos momentos de paz nos encontros na Associação Cristã Espiritualista Allan Kardec.

Aos grandes incentivadores desta realização profissional, meus pais Paulo e Ilva pela base, o carinho, a compreensão, o ensinamento, além de todo o aporte necessário. Ao meu irmão Gustavo que mesmo longe não mede esforços para ajudar, apoiando e dando sugestões. Meu eterno agradecimento, pois com palavras não conseguirei expressar a devida gratidão que merecem. Dedico a vocês minhas conquistas

Ao meu avô João Augusto (in memoriam), que durante a caminhada sempre esteve presente contando causos e tendo paciência das minhas inúmeras brincadeiras.

A Júlia, minha companheira, amiga e confidente, que esteve ao meu lado dando carinho, amor, conforto, coragem e conselhos, além de agregar os meus sonhos aos dela. Eterna gratidão por estar em todos os momentos durante esta caminhada.

Ao professor Doutor André Rosa, além de ser um exemplar orientador, tornou-se um grande amigo, dividindo tanto momentos bons quanto ruins durante este trajeto. Obrigado pela paciência, empenho, dedicação e por todo conhecimento adquirido durante este período.

Agradeço a toda equipe da Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, pela ajuda, apoio científico e técnico para a elaboração deste projeto. Especialmente ao Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti pela sábia orientação, a Mariana pelas ricas discussões, correções e ensinamentos.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola - DEA pelas ricas contribuições durante a minha formação profissional e científica.

Aos meus grandes amigos, mesmo longe por não medirem esforços para proferir sempre palavras de apoio e momentos de descontração, pois sem estes o

trabalho não se tornaria tão gratificante. Em especial ao Augusto, amigo de república, por dedicar seu valioso tempo para ajudar a destrinchar esta dissertação e pela amizade. Ramon e Pablo, por sempre acreditarem no meu potencial. Ao Jefferson pelos sábios conselhos, broncas e companheirismo. Edinho e Rayssa pelas longas conversas e ensinamentos, além das inúmeras confraternizações geridas de aprendizados.

E a todos que por mais que tenham dispendido um pequeno gesto durante um dia qualquer, influenciaram de maneira positiva para que eu pudesse chegar aqui de maneira sábia e madura.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE SIGLAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xv</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
OBJETIVO GERAL .....	3
OBJETIVO ESPECÍFICO.....	3
<b>1 PANORAMA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO DO BRASIL .....</b>	<b>4</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	4
1.2 PANORAMA DO TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL .....	7
1.3 USO DE ENERGIA NO TRATAMENTO DE ESGOTO .....	9
1.4 APLICAÇÃO DE SISTEMAS ANAERÓBIOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL .....	11
1.5 REATORES UASB.....	13
1.6 PRODUÇÃO DE ENERGIA EM REATORES ANAERÓBIOS.....	14
1.7 ASPECTOS RELATIVOS AO USO DO BIOGÁS COMO FONTE ENERGÉTICA .....	16
1.8 ASPECTOS RELATIVOS AO USO DO LODO COMO FONTE ENERGÉTICA .....	20
1.9 SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS .....	25
1.10 INCENTIVOS NA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL PARA A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA.....	29
1.11 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS NAS ETES DO BRASIL .....	32
1.11.1 <i>Estimativa do Potencial Máximo e Atual do biogás para os estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná.....</i>	35
1.12 CONCLUSÕES .....	38
1.13 REFERÊNCIAS.....	39
<b>2 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS SUBPRODUTOS LODO E BIOGÁS EM ETES OPERADAS POR REATORES UASB NO ESTADO DO PARANÁ - BRASIL.....</b>	<b>53</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	53

2.2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	56
2.2.1	Área de estudo .....	56
2.2.2	Avaliação do potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás) gerados em reatores UASB no estado do Paraná. ....	59
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	61
2.3.1	Potencial Energético do Biogás.....	61
2.3.2	Potencial Energético do Lodo.....	67
2.3.3	Comparação do potencial energético dos subprodutos .....	72
2.4	CONCLUSÃO .....	73
2.5	REFERÊNCIAS.....	73
<b>3</b>	<b>ESTUDOS DE ALTERNATIVAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO EM ETES OPERADAS POR REATORES UASB: UM ESTUDO DE CASO DO ESTADO DO PARANÁ, BRASIL .....</b>	<b>78</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	78
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	82
3.2.1	Área de estudo .....	82
3.2.2	Determinação da energia elétrica produzida nas ETES .....	84
3.2.3	Determinação da demanda energética das ETES em atividades operacionais e administrativas.....	85
3.2.4	Estudo da Energia Livre das ETES.....	85
3.2.5	Determinação da demanda de energia para secagem térmica do lodo nas ETES. ....	86
3.2.6	Utilização da energia livre para secagem térmica do lodo nas ETES. ....	86
3.2.7	Mapas Temáticos .....	86
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	86
3.3.1	Energia elétrica gerada nas ETES.....	86
3.3.2	Demanda de energia elétrica nas atividades operacionais e administrativas das ETES .....	92
3.3.3	Energia Elétrica Livre das ETES.....	94
3.3.4	Demanda de energia para secagem térmica do lodo nas ETES.....	100
3.3.5	Energia remanescente após a produção de eletricidade para atender às demandas energéticas das ETES e promover a secagem térmica do lodo. ....	103
3.3.6	Balanço Energético das ETES.....	107
3.4	CONCLUSÕES .....	108
3.5	REFERÊNCIAS.....	108
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	113
3.7	RECOMENDAÇÕES .....	114

## LISTA DE SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas  
ANEEL - *Agência Nacional de Energia Elétrica*  
CEPAL - *Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe*  
CONAMA - *Conselho Nacional do Meio Ambiente*  
COPASA - *Companhia de Saneamento de Minas Gerais*  
ESRI – *Environmental Systems Research Institute (Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais)*  
ETA - *Estação de Tratamento de Água*  
ETE - *Estação de Tratamento de Esgoto*  
FMI - *Fundo Monetário Internacional*  
GEE - *Gases de Efeito Estufa*  
IAP - *Instituto Ambiental do Paraná*  
IBGE - *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*  
IDH - *Índice de Desenvolvimento Humano*  
IEKP - *Programa de Energia Integrada e do Clima*  
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*  
PAC - *Programa de Aceleração do Crescimento*  
PIB - *Produto Interno Bruto*  
PLANSAB - *Plano Nacional de Saneamento Básico*  
PNMC - *Política Nacional sobre Mudança do Clima*  
PNRS - *Política Nacional sobre Resíduos Sólidos*  
PNSB - *Política Nacional de Saneamento Básico*  
PROSAB - *Programa de Pesquisa em Saneamento Básico*  
SABESP - *Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo*  
SANEPAR - *Companhia de Saneamento do Paraná*  
SIG - *Sistema Informações Geográficas*  
SIN - *Sistema Interligado Nacional*  
SNIS - *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento.*  
UASB - *'Upflow Anaerobic Sludge Blanket' (Reator anaeróbio de manta de lodo)*  
UE - *União Europeia*

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ENERGIA CONSUMIDA NOS PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO.	10
FIGURA 2 - PANORAMA DOS PROBLEMAS DETECTADOS EM REATORES UASB.	14
FIGURA 3 - ETAPAS DE CONVERSÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA POR MEIO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA	15
FIGURA 4 - MATÉRIA PRIMA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.	17
FIGURA 5 - COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO EM REATORES ANAERÓBIOS.	19
FIGURA 6 - ETAPAS DO TRATAMENTO DO LODO E SEUS RESPECTIVOS OBJETIVOS.	22
FIGURA 7 - POTENCIAL ENERGÉTICO ATUAL E MÁXIMO DO BIOGÁS GERADO EM ETES OPERADAS POR REATORES UASB POR ESTADO CONSIDERANDO TRÊS CENÁRIOS: (A) PIOR, (B) TÍPICO E (C) MELHOR.	37
FIGURA 8 - LOCALIZAÇÃO DAS ETES QUE OPERAM POR REATORES UASB NO ESTADO DO PARANÁ DE ACORDO COM CLASSIFICAÇÃO DOS PORTES DAS ESTAÇÕES.	58
FIGURA 9 - POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS NAS ETES DO PARANÁ.	61
FIGURA 10 - POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PARA O PIOR, TÍPICO E MELHOR CENÁRIO NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO-SE AS ETES DE. (A) PEQUENO PORTE, (B) MÉDIO PORTE E (C) GRANDE PORTE.	63
FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO EM REATORES UASB DO ESTADO DO PARANÁ.	65
FIGURA 12 - POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO EM REATORES UASB NAS ETES DO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO LEITO DE SECAGEM COMO UNIDADE DE DESIDRATAÇÃO.	67
FIGURA 13 - POTENCIAL ENERGÉTICO DE LODO GERADO EM REATORES UASB NAS ETES DO ESTADO DO PARANÁ CONSIDERANDO CENTRÍFUGA UNIDADE DE DESIDRATAÇÃO.	68
FIGURA 14 - POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO NAS ETES OPERADAS COM REATORES UASB NO ESTADO DO PARANÁ COM DESIDRATAÇÃO POR LEITO DE	

SECAGEM PARA O PIOR, TÍPICO E MELHOR CENÁRIO. (A) PEQUENO PORTE, (B) MÉDIO PORTE E (C) GRANDE PORTE.	69
FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO EM REATORES UASB DO ESTADO DO PARANÁ.	71
FIGURA 16 - RELAÇÃO DO POTENCIAL DO BIOGÁS E LODO DAS ETES DO PARANÁ. (A) PEQUENO PORTE, (B) MÉDIO PORTE E (C) GRANDE PORTE	72
FIGURA 17 - LOCALIZAÇÃO DAS ETES QUE OPERAM POR REATORES UASB NO ESTADO DO PARANÁ DE ACORDO COM O PORTE.	83
FIGURA 18 - CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO OS PORTES DAS ETES E OS CENÁRIOS PIOR, TÍPICO E MELHOR.	87
FIGURA 19 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DO BIOGÁS EM ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO O PIOR CENÁRIO.	89
FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DO BIOGÁS EM ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO O CENÁRIO TÍPICO.	90
FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DO BIOGÁS EM ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO O MELHOR CENÁRIO.	91
FIGURA 22 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DAS ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ.	93
FIGURA 23 – ENERGIA ELÉTRICA LIVRE DAS ETES DE PEQUENO PORTE CONSIDERANDO O POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS E O CONSUMO DE ELETRICIDADE PARA OS CENÁRIOS: (A)PIOR, (B) TÍPICO E (C) MELHOR.	94
FIGURA 24 - ENERGIA ELÉTRICA LIVRE DAS ETES DE MÉDIO PORTE CONSIDERANDO O POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS E O CONSUMO DE ELETRICIDADE PARA OS CENÁRIOS: (A)PIOR, (B) TÍPICO E (C) MELHOR.	94

FIGURA 25 - ENERGIA ELÉTRICA LIVRE DAS ETES DE GRANDE PORTE CONSIDERANDO O POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS E O CONSUMO DE ELETRICIDADE PARA OS CENÁRIOS: (A)PIOR, (B) TÍPICO E (C) MELHOR.	95
FIGURA 26 - ENERGIA ELÉTRICA LIVRE EM ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO O PIOR CENÁRIO.	97
FIGURA 27 - ENERGIA ELÉTRICA LIVRE EM ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO O CENÁRIO TÍPICO.	98
FIGURA 28 - ENERGIA ELÉTRICA LIVRE EM ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO O MELHOR CENÁRIO.	99
FIGURA 29 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA GERAÇÃO DE LODO DAS ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ.	101
FIGURA 30 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA A SECAGEM DO LODO GERADO NAS ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ.	102
FIGURA 31 - ENERGIA EXCEDENTE EM ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO O PIOR CENÁRIO.	104
FIGURA 32 - ENERGIA EXCEDENTE EM ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO O TÍPICO CENÁRIO.	105
FIGURA 33 - ENERGIA EXCEDENTE EM ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO ESTADO DO PARANÁ, CONSIDERANDO O MELHOR CENÁRIO.	106
FIGURA 34 - BALANÇO ENERGÉTICO DAS ETES OPERADAS POR REATOR UASB NO PARANÁ.	107

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RANKING DOS PAÍSES LATINO-AMERICANOS EM TERMOS DE SANEAMENTO.	8
TABELA 2 - ÍNDICE DE SANEAMENTO NO BRASIL E EM SUAS REGIÕES ADMINISTRATIVAS.	8
TABELA 3 - NÚMERO DE ETES POR ESTADOS BRASILEIROS E SEUS RESPECTIVOS SISTEMAS DE TRATAMENTO.	12
TABELA 4 - VALORES DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATORES UASB	18
TABELA 5 - PRODUÇÃO DE LODO ANUAL EM ALGUNS PAÍSES.	21
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DO LODO DESIDRATADO EM ETES OPERADAS POR REATOR UASB SEGUIDO DE LAGOAS AERADAS.	22
TABELA 7 - DIFICULDADES ENCONTRADAS PARA O REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM ETES NOS EUA.	28
TABELA 8 - INCENTIVOS PRATICADOS NOS PAÍSES MEMBROS DA UNIÃO EUROPEIA PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS.	30
TABELA 9 - CARACTERÍSTICAS DAS ETES BRASILEIRAS GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS.	33
TABELA 10 - CONSIDERAÇÕES E RELAÇÃO UNITÁRIAS PROPOSTO NO MODELO DE LOBATO (2011).	36
TABELA 11 - DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO PIOR E MELHOR CENÁRIOS PARA O MODELO MATEMÁTICO RELATIVO AO LODO E BIOGÁS GERADOS EM REATORES UASB.	59
TABELA 12 - DADOS DE ENTRADA PARA ELABORAÇÃO DO MODELO PROPOSTO POR ROSA (2013) E LOBATO (2011).	60
TABELA 13 - EQUAÇÕES PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO E BIOGÁS (EIXO Y) A PARTIR DA VAZÃO AFLUENTE EM ETES (EIXO X) OPERADAS POR REATORES UASB.	60

TABELA 14 - MICRORREGIÕES DO ESTADO DO PARANÁ COM POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS ACIMA DE 500 GJ.DIA <sup>-1</sup> .	66
TABELA 15 - MICRORREGIÕES DO ESTADO DO PARANÁ COM POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO ACIMA DE 300 GJ.DIA <sup>-1</sup> .	70
TABELA 16 - DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO PIOR E MELHOR CENÁRIOS PARA O MODELO MATEMÁTICO RELATIVO AO LODO E BIOGÁS GERADOS EM REATORES UASB.	84
TABELA 17 - DADOS DE ENTRADA PARA ELABORAÇÃO DO MODELO PROPOSTO LOBATO (2011).	85
TABELA 18 - EQUAÇÃO UTILIZADA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM ETES OPERADAS POR REATORES UASB.	85

## RESUMO

LOPES, Lucas Sampaio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Avaliação do potencial de recuperação energética de lodo e biogás provenientes de reatores UASB tratando esgoto doméstico no estado do Paraná.** Orientador: André Pereira Rosa. Coorientador: Gustavo Rafael Collere Possetti.

Os reatores UASB são amplamente empregados no tratamento de esgoto do Brasil e geram lodo e biogás como subprodutos. Normalmente, o lodo é enviado para aterros sanitários e o biogás é queimado, desperdiçando assim o valor energético agregado a estes subprodutos. Nesse contexto, a pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial de recuperação energética de lodo e biogás provenientes de reatores UASB tratando esgoto doméstico no estado do Paraná. O total de 182 ETEs foi avaliado neste estudo e o potencial energético dos subprodutos foi estimado por um modelo matemático. Os dados foram espacialmente classificados utilizando o ArcGIS®, considerando as diferentes características do efluente, os sistemas de desidratação do lodo (leito de secagem e centrífuga) e os portes das ETEs (pequeno, médio e grande). A energia elétrica gerada foi estimada considerando-se a conversão do potencial do biogás em energia elétrica por um equipamento motogerador com eficiência de 30% e a energia demandada para secagem térmica do lodo até 10% de umidade considerando um coeficiente. O biogás foi o principal subproduto gerado pelos reatores UASB no Paraná e, se usado em todo o estado, poderia suprir a demanda de energia de uma cidade com 111 mil habitantes. O biogás correspondeu a 66%, 65% e 75% do potencial total (lodo e biogás) para as pequenas, médias e grandes ETEs, respectivamente. Considerando o cenário típico, 32% das ETEs possuem capacidade de gerar energia elétrica até 10000 kWh.dia<sup>-1</sup>. As ETEs do Paraná possuem potencial energético para gerar energia elétrica suficiente para suprir a demanda energética e realizar a secagem térmica do lodo até uma umidade de 10%. Para este estudo, pode-se destacar a notável energia potencial de lodo e biogás de reatores UASB para explorar, em que o biogás é o principal subproduto energético. A associação entre modelos matemáticos e SIG é relevante para a tomada de decisões das empresas de saneamento no que tange o aproveitamento energético do lodo e biogás.

## ABSTRACT

LOPES, Lucas Sampaio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Evaluation of the energy recovery potential from sludge and biogas originated from UASB reactors treating domestic sewage in the state of Paraná.** Advisor: André Pereira Rosa. Co-Advisor: Gustavo Rafael Collere Possetti.

The UASB reactors are widely used in sewage treatment in Brazil, generating sludge and biogas as byproducts. Normally, the sludge is sent to landfills, and the biogas is burned, thus wasting the accumulated energy value of these byproducts. The energetic use of sludge and biogas allows the reduction of energy costs in sewage treatment plants (STPs). In this context, the objective of the research was to evaluate the potential for recovery of sludge and biogas from UASB reactors treating domestic sewage in the state of Paraná. The total of 182 STPs were assessed in this study and the energy potential of the byproducts was estimated by a mathematical model. Data were spatially classified using ArcGIS®, considering the different effluent characteristics, sludge dehydration systems (drying bed and centrifuge) and STP sizes (small, medium and large). The electric energy generated was estimated considering the conversion of the biogas potential into electric energy by a motor-generator equipment with 30% efficiency and the energy demanded for thermal drying of the sludge to 10% of humidity considering a coefficient. Biogas was the main byproduct generated by UASB reactors in Paraná, and if used in the entire state, it could supply the energy demand of a city with 111,000 inhabitants. Biogas corresponded to 66%, 65% and 75% of the total potential (sludge and biogas) for small, medium and large STPs, respectively. Considering the typical scenario, 32% of the STPs have the capacity to generate electricity up to 10000 kWh.dia<sup>-1</sup>. The STPs of Paraná have sufficient energetic potential to supply the energy demand and to perform the thermal drying of the sludge to a humidity of 10%. For this study, it can be highlighted the remarkable potential energy of sludge and biogas from UASB reactors to explore, where biogas is the main energy byproduct. The association between mathematical models and GIS is relevant for the decision-making of sanitation companies regarding the energetic use of sludge and biogas.

## INTRODUÇÃO

Atualmente, no Brasil, a temática saneamento básico vem chamando atenção dos governantes. A ausência ou ineficiência no setor de saneamento causam impactos ambientais e perda de qualidade de vida da sociedade, aumentando a proliferação de agentes causadores de endemias, poluição das águas, mau cheiro, contaminação do solo, dentre outros. Os investimentos em coleta e tratamento do esgoto torna-se fundamental para o meio ambiente e sociedade.

Os países em desenvolvimento, principalmente da América Latina, na maioria das vezes empregam sistemas anaeróbios para o tratamento de esgoto por apresentarem características ímpares como baixo custo e reduzidas áreas para implantação, facilidade de operação, baixa produção de sólidos, reduzido consumo de energia para operação do sistema e possibilidade de aproveitamento energético do lodo e biogás

O Brasil apresenta grande número de estações de tratamento de esgoto com sistemas anaeróbio, devido a características peculiares do país e do próprio sistema. Atualmente, os reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) são os sistemas anaeróbios mais adotados no Brasil. Dentre os estados brasileiros, o Paraná assume destaque pelo maior número de reatores UASB empregados no tratamento de esgoto doméstico, contando com 258 unidades.

O tratamento de esgoto demanda grande quantidade de energia para alcançar efluente com a qualidade exigida na legislação brasileira. Os gastos com energia pelas concessionárias de saneamento brasileiras impactam diretamente em seus orçamentos prejudicando investimentos em outras áreas do setor de saneamento. Neste contexto, a redução das despesas com energia elétrica pelas companhias de saneamento faz-se necessário e o aproveitamento energético do biogás e lodo gerados nos reatores UASB surgem como alternativas.

No Brasil a maioria das vezes o lodo é enviado para o aterro sanitário e o biogás é queimado em queimadores abertos, desperdiçando assim o valor energético agregado a estes subprodutos.

Os estudos da utilização do aproveitamento energético do lodo e biogás gerado em reatores UASB não possuem informações georreferenciadas a fim de diagnosticar o potencial energético desses subprodutos, assim como o cruzamento dessas informações com outros aspectos operacionais e locais.

Esses estudos tornam-se importantes para propor novas alternativas para a destinação do lodo e biogás, além de impulsionar o aproveitamento energético desses subprodutos. Diante disso, possibilitará a redução de custos com energia nas ETEs, favorecendo a sustentabilidade em termos energéticos, além de outras vantagens econômicas e ambientais.

A pesquisa teve como intuito contribuir para o aprimoramento de estudos do aproveitamento energético do lodo e biogás gerados em reatores UASB nas ETEs do Paraná, georreferenciando e organizando as informações por mapas temáticos para auxiliar tomadas de decisões futuras no setor de saneamento.

Essa dissertação se estruturou em quatro capítulos independentes, para serem publicados posteriormente. Após esta introdução é apresentado o objetivo geral e específicos do trabalho. O primeiro capítulo buscou realizar um panorama brasileiro frente ao aproveitamento energético do lodo e biogás nas estações de tratamento de esgoto e perspectivas futuras. O segundo capítulo estimou o potencial energético do biogás e lodo nas ETEs operadas por reator UASB no Paraná. Já o terceiro capítulo buscou avaliar o emprego do biogás na geração de energia elétrica com o intuito de suprir as demandas energéticas das ETEs. No quarto capítulo são apresentadas as considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

# **OBJETIVOS**

## **OBJETIVO GERAL**

Avaliar o potencial de recuperação energética de lodo e biogás provenientes de reatores UASB tratando esgoto doméstico no estado do Paraná.

## **OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Apresentar o estado da arte do aproveitamento energético do biogás gerado em reatores UASB para as condições brasileiras;
- Estimar e georreferenciar o potencial energético do lodo e biogás em ETEs operados por reatores UASB no estado do Paraná;
- Avaliar alternativas de aproveitamento energético do biogás gerado em ETEs operadas por reatores UASB no estado do Paraná.

# 1 PANORAMA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO DO BRASIL

## 1.1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico é um dos quesitos utilizados para avaliar a qualidade de vida, integrando o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Dentre outras causas, o Brasil apresenta reduzido IDH em função da inadequada oferta de saneamento básico, contemplando a baixa oferta a adequadas condições de esgotamento sanitário. Fatores de origem educacional, cultural, política e financeira são apontados como barreiras para a melhoria da qualidade e expansão do saneamento básico no País (ROCHA, 2004).

Milhares de pessoas por todas as regiões do País sofrem com a falta de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto, ficando expostas a riscos como a propagação de endemias e epidemias, contaminação das águas e do solo, deslizamentos e inundações. Apesar dessa situação, o saneamento básico é um direito assegurado pela Constituição e definido pela Lei nº 11.445/2007.

O Atlas Esgotos - Despoluição das Bacias Hidrográficas elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), em parceria com a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, revela que o Brasil possui 43% da população com esgoto coletado e tratado, 12% utilizam de fossa séptica, totalizando 55% da população com tratamento de esgoto considerado adequado. Porém, 18% tem seu esgoto coletado e não tratado, sendo considerado um atendimento precário e 27% não possuem nenhum tipo de serviço sanitário.

O Brasil precisaria investir R\$ 149,5 bilhões até 2035 para universalizar os serviços de saneamento e aumentar a segurança hídrica das cidades em termos de qualidade da água. Atualmente, o País gera mais de 9 mil toneladas de esgoto diariamente, sendo removida 39% da carga orgânica destes, aquém dos 60% de remoção mínima exigidos pela legislação vigente. No País, 3.738 municípios não apresentam estação de tratamento de esgotos (ANA, 2017).

Diante desse contexto, alternativas tecnológicas no tratamento de esgoto, com especial destaque para sistemas anaeróbios, agregam vantagens em termos de eficiência, baixo custo e adequação à realidade brasileira. Estes sistemas podem

gerar subprodutos com um enorme potencial energético a ser explorado, o que implicaria na redução de despesas e na expansão do saneamento no País.

Dentre as alternativas tecnológicas para o tratamento de esgoto sanitário, os reatores anaeróbios de UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), as lagoas de estabilização e os lodos ativados são os sistemas de tratamento anaeróbio mais empregados atualmente no país. Esses reatores tratam esgotos gerados por cerca de 58,1 milhões de habitantes produzindo diariamente biogás. Assim, as ETEs brasileiras possuem potenciais significativos de produção de biogás (MOREIRA, 2017; RIBEIRO et al., 2016).

Devido a sua compactidade e por apresentar maturidade tecnológica, os reatores UASB estão consolidados para tratar esgoto no Brasil, tornando alternativa para cidades populosas. Além disso, esses reatores geram lodo e biogás que possuem potenciais energéticos (NOYOLA et al., 2012). Segundo Ribeiro et al. (2016), no Brasil são contabilizadas 658 estações em escala real operadas por reatores UASB, com uma capacidade de tratamento de esgoto de aproximadamente 21,9 milhões de habitantes de uma amostra de aproximadamente 74 milhões de habitantes, o equivalente a uma vazão tratada da ordem de  $43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Proveniente da decomposição da matéria orgânica, o biogás é uma fonte de energia renovável, que representa uma alternativa de geração de energia para abastecer comunidades próximas como proporcionar um aumento de eficiência operacional das estações de tratamento de esgoto (ETEs). Na geração de energia elétrica por meio do biogás ocorre a conversão da energia química do gás em energia mecânica. A energia mecânica pode acionar geradores e produzir energia elétrica (SILVEIRA et al., 2015).

A destinação final considerada mais sustentável e adequada do biogás advindo de aterro sanitário e de tratamento de esgoto é o seu aproveitamento energético. Isto evitaria que o gás metano, importante gás de efeito estufa (GEE) com GWP 28 vezes maior que  $\text{CO}_2$ , seja liberado para a atmosfera contribuindo para a redução dos GEE emitidos pelas ETEs. Nos Estados Unidos as emissões de metano proveniente do tratamento de águas residuárias ocuparam a oitava

colocação dentre as fontes antropogênicas emitindo cerca de 12,8 milhões de t.m<sup>-3</sup> de CO<sub>2</sub> equivalente (SHEN et al., 2015; IPCC, 2006).

Várias frentes de atuação têm sido desenvolvidas para melhor explorar o potencial do biogás como: pesquisas que relacionam a geração de energia de eletricidade por meio do biogás, sua utilização *in situ* nas atividades operacionais das ETEs e contribuições para o gerenciamento integrado de outros subprodutos do tratamento anaeróbio (CABRAL, 2016; ROSA et al., 2016; ROSENFELDT et al., 2015; VALENTE, 2015; SHEN et al., 2015; LIMA, 2012; LOBATO, 2011; MC CARTY et al., 2011; PÖSCHL et al., 2010; BALAT, 2009; CAMARGO, 2009; BOUGRIER et al., 2006).

Antevendo estes estudos, a utilização do biogás em ETEs como forma de energia deverá ser precedida de análises de viabilidade técnica, econômica e ambiental no momento da concepção da estação, ou seja, nas fases de projeto, de construção e de operação desses sistemas. Entretanto, a qualificação dos profissionais do setor é imprescindível dentro desse processo nos sistemas de tratamento de esgoto (MOREIRA, 2017).

Outra fonte de energia encontrada nas ETEs seria a utilização do potencial energético do lodo. Considerado como rejeito indesejado no processo de tratamento de esgoto, o lodo é uma complexa mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas, e de microrganismos. Normalmente, esse subproduto tem como destinação final o aterro sanitário e aplicação agrícola por ser fontes de nutrientes, desperdiçando assim seu potencial energético (MANARA e ZABANIOTOU, 2012).

Entretanto, a utilização do lodo como combustível é viável apenas com reduzidos teores de umidade. A recuperação energética do lodo seco é fundamental para obtenção da autossustentabilidade energética no processo de secagem dos materiais e para redução de resíduos sólidos encaminhados para a destinação final (POSSETTI, 2016).

Nesse contexto, o objetivo geral do capítulo foi realizar um panorama do saneamento no Brasil, enfatizando a situação atual e perspectivas futuras para o aproveitamento energético dos subprodutos lodo e biogás em reatores UASB.

## **1.2 PANORAMA DO TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL**

As estações de tratamento de esgotos são unidades projetadas para o tratamento de águas residuárias de origem doméstica e industrial com o objetivo da redução da carga poluidora a ser disposta no meio ambiente. O lançamento desses efluentes nos corpos receptores sem prévio tratamento pode acarretar prejuízos ambientais tanto na qualidade da água, alterando suas propriedades físicas, químicas e biológicas, quanto comprometer a biota natural do local.

O Brasil, mesmo tendo leis mais rígidas e uma maior preocupação quanto ao tratamento, destino final do esgoto e seus impactos no meio ambiente, na área de saneamento apresenta um retardo na cobertura e tratamento. (VALENTE, 2015; MARQUES, 2014).

Em 2007, o governo brasileiro de posse das suas atribuições instituiu a Lei nº 11.445 a qual definiu o conceito de saneamento básico como o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais urbanas. Por meio desta lei, atribuiu-se ao Ministério da Cidade a responsabilidade da elaboração do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), tendo como objetivo levantar um diagnóstico do saneamento no Brasil e propor para as próximas décadas um aumento no atendimento e acesso aos serviços de saneamento.

De acordo com previsões do Fundo Monetário Internacional (FMI), o Brasil ocupou a oitava maior economia do mundo em 2017, tendo um Produto Interno Bruto (PIB) em valores correntes de US\$ 2,015 trilhões. Contudo, nações com menor notabilidade na economia latino-americana, em se tratando de saneamento básico, figuram na frente do país. O estudo da Comissão Econômica para a América Latina (CEPAL, 2015), conforme apresentado na Tabela 1, apontou o Brasil apenas na décima posição, atrás de países com PIB per capita menor que 10 mil como Colômbia, Peru, Equador e Bolívia.

**Tabela 1 - Ranking dos países latino-americanos em termos de saneamento.**

Posição	País	População com coleta de esgotos (%)	PIB per capita 2014
1	Venezuela	94,1	12.771,6
2	Chile	93,6	14.528,33
3	México	88,4	10.325,65
4	Colômbia	87,2	7.903,93
5	Equador	75,8	6.345,84
6	Peru	74,9	6.541,03
7	Argentina **	69	12.509,53
8	Uruguai	65,9	16.806,77
9	Bolívia	63,1	3.124,08
10	Brasil	62,6 (49,8 - SNIS)	11.384,42
11	Costa Rica	50,7	10.415,44
12	Honduras	45,3	2.434,83
13	EL Salvador	45	4.119,99
14	Guatemala	43,9	3.673,14
15	República Dominicana	40,1	6.163,58
16	Nicarágua	23,3	1.963,05
17	Paraguai	22,7	4.712,82

**Fonte:** CEPAL 2015, SNIS 2014 e Banco Mundial. Elaboração própria. \* PIB per capita de 2012. \*\* No caso da Argentina o estudo trazia apenas valores de atendimento urbano de esgoto. No caso do Brasil, são utilizados os dados do SNIS 2014, que são inferiores aos dados da CEPAL para o país (62,6%).

Nesse estudo, a Venezuela apresentou o maior índice, atendendo 94% da sua população por sistemas de coleta e tratamento de esgoto. Outros países como Chile, México e Colômbia alcançaram índices de atendimento superiores a 80%.

Todavia, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e o Atlas Esgotos - Despoluição das Bacias Hidrográficas elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), em parceria com a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, apenas 43% do esgoto do país são tratados conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Índice de saneamento no Brasil e em suas regiões administrativas.**

País/ Regiões	População (milhões) IBGE 2016	Rede de água (%)	Coleta de Esgoto (%)	Tratamento de Esgoto (%)	Investimento (milhões, R\$)	(%)
BRASIL	206,0	83,3	61	43	1.2175,1	100
Norte	17,7	56,9	16	12	377	3,1
Nordeste	56,9	73,4	43	32	1.933,1	15,9
Sudeste	86,3	91,2	83	54	7.262,6	59,7
Sul	29,4	89,4	54	40	1.722,4	14,1
Centro Oeste	15,6	89,6	51	49	880	7,2

**Fonte:** Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2015) e (ANA, 2017).

Como observado, as regiões mais populosas e desenvolvidas do país possuem maior cobertura de rede de água, coleta de esgoto e tratamento. A região Sudeste, possui maiores IDH e PIB per capita do país e atingiu o maior índice em termos de instalação de rede de distribuição de água e coleta de esgoto em virtude de maiores investimentos realizados. Segundo SNIS (2015), a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) maior empresa de saneamento do país, contribuiu com R\$ 3.481,81 milhões (47,9% do total da região e 28,6% do total do país) investido na região Sudeste.

O Nordeste é a segunda região mais populosa do Brasil obteve baixos índices em tratamento de esgoto em relação à região Centro Oeste e Sudeste, porém é a segunda que mais investe no setor totalizando 1.933,1 milhões de reais investidos no ano de 2015. O menor investimento ocorreu na região Norte, tendo assim o pior desempenho, destaque para o campo de coleta de esgoto, a qual conseguiu resultado de apenas 8,7%. Ainda o SNIS (2015) relata que entre as 100 maiores cidades brasileiras a média de tratamento dos esgotos foi de apenas 50,2%.

Diante desse cenário, o Brasil ainda tem muito que investir no setor, mesmo havendo uma meta traçada pelo governo de universalizar os serviços de saneamento básico até o ano de 2033. Entretanto, o País, além de universalizar os serviços é necessário promover o saneamento ambiental proporcionando condições favoráveis à saúde da população urbana e rural e do meio ambiente.

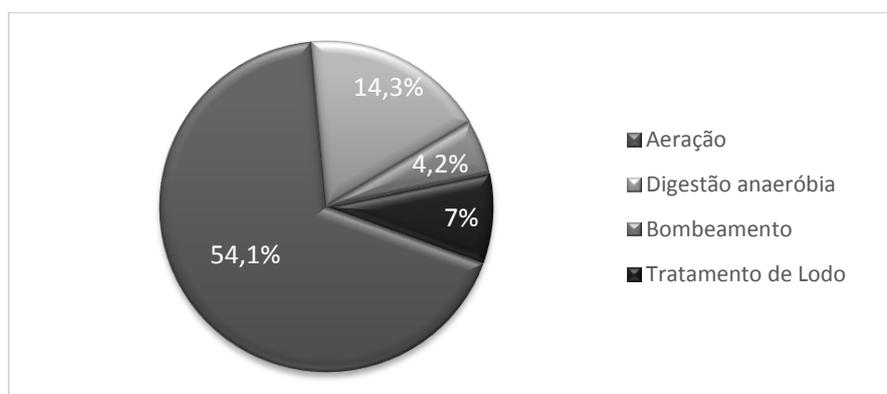
### **1.3 USO DE ENERGIA NO TRATAMENTO DE ESGOTO**

Atualmente, o segundo maior custo operacional das prestadoras de serviços de saneamento advém da energia, perdendo apenas para as despesas com a mão de obra como divulgado no Plano Nacional de Eficiência Energética elaborado pelo Ministério de Minas e Energia em 2011.

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2015) divulgou que o Brasil no ano de 2015 gastou R\$ 5,14 bilhões com despesas de energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento, sendo consumidos 11 TWh com abastecimento de água e 1,2 TWh com esgotamento sanitário. Caso esta energia demandada pelas companhias fosse utilizada no setor doméstico, seria possível abastecer anualmente uma população de 19 milhões de habitantes.

Ainda, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estima que o Brasil nos próximos dez anos possuirá um aumento médio de 4,3% ao ano no consumo de energia elétrica (VALENTE, 2015; EPE, 2013).

Gu et al. (2017) e Metcalf e Eddy (2016) citam que a quantidade de energia demandada nas ETEs está associada a fatores como: vazão; características do afluente; localização; tamanho e idade das plantas; tipo de processo de tratamento e sistema de aeração; qualidade do efluente requerida e conhecimento dos operadores. A Figura 1 apresenta as atividades e a porcentagem demandada de energia no processo de tratamento de esgoto para ETEs convencionais, de acordo com Shen et al. (2015) e Panepinto et al. (2016).



**Figura 1 - Energia consumida nos processos de tratamento de esgoto.**

Segundo Rosa (2016), o consumo médio de energia elétrica na ETE Laboreaux que possui oito unidades de reatores UASB, no período de outubro de 2010 a outubro de 2011, foi de 1.586 kWh.d<sup>-1</sup> (5.709 MJ.d<sup>-1</sup>), considerando os gastos energéticos na estação com iluminação, consumo administrativo e laboratorial, operação do filtro prensa, bombas e demais equipamentos.

Apesar da geração de eletricidade do Brasil ser de uma fonte renovável, 76,5% (BRASIL, 2016) proveniente de hidrelétricas, períodos de escassez de chuva, como o que foi observado no ano de 2015, contribuiu para o aumento das tarifas do setor de eletricidade em até 40% em função do acionamento de termoelétricas (PERES, 2015; PORTAL BRASIL, 2011).

A partir do aumento das tarifas e das incertezas futuras sobre a disponibilidade de energia, reduzir custos operacionais e as despesas com a energia, além de buscar novas fontes energéticas e melhorar a qualidade do efluente tratado se torna prerrogativa para as companhias de saneamento. Panepinto et al. (2016)

ainda salientam que a maior parte desses custos operacionais com o consumo de energia pode ser minimizado com melhores projetos estruturais e um sistema de gerenciamento dos subprodutos.

As companhias de saneamento podem aprimorar a oferta de energia às ETEs, na forma térmica ou elétrica, mediante o aproveitamento energético contido nos efluentes. Segundo Metcalf e Eddy (2016) os efluentes contêm três tipos de energia (i) energia química contida nas moléculas orgânicas liberadas nas reações químicas; (ii) energia hidráulica a qual é a soma das energias potenciais, pressão e cinética relacionadas a elevação, carga de pressão e velocidade do efluente e (iii) energia térmica contida no calor retido no efluente.

O tratamento anaeróbio de esgoto doméstico ganha força neste cenário e, atualmente, tem sido amplamente empregado no Brasil. Além disso, grande parte da população brasileira não tem serviços básicos de saneamento, esta tecnologia de tratamento pode vir a ser usada como forma de propagação e expansão do setor (ROSA, 2013; McCARTY et al., 2011).

#### **1.4 APLICAÇÃO DE SISTEMAS ANAERÓBIOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL**

Países em desenvolvimento como Brasil, Colômbia, México, Egito, Índia e Chile investem no uso do tratamento anaeróbio, pois é considerada uma solução para tratar os efluentes domésticos pelo baixo custo (McCARTY et al., 2011).

Em um estudo realizado recentemente por Ribeiro et al. (2016) foram caracterizadas 1.667 ETEs no Brasil de acordo com os sistemas de tratamento, contemplando o estudo as regiões Sudeste, Sul e Centro Oeste. Nesse estudo, foram coletados dados dos estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Santa Catarina, Paraná, Distrito Federal e Mato Grosso do Sul. A Tabela 3 apresenta o número de ETEs por estado, classificados por tipo de sistema de tratamento: UASB, Lagoas de estabilização, Lodos ativados e outros.

**Tabela 3 - Número de ETEs por estados brasileiros e seus respectivos sistemas de tratamento.**

Unidades Federativas	UASB	Lagoas de Estabilização	Lodos Ativados (LA)	Outros
São Paulo	76	539	135	121
Minas Gerais	170	29	6	14
Rio de Janeiro	31	4	34	24
Distrito Federal	11	1	4	0
Santa Catarina	43	9	26	5
Paraná	258	23	8	1
Mato Grosso do Sul	69	24	1	1
Total	<b>658</b>	<b>629</b>	<b>214</b>	<b>166</b>

**Fonte:** adaptado de *Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas Ribeiro et al. (2016).*

Cerca de 40% das ETEs brasileiras analisadas realizam o tratamento de esgoto doméstico por meio de reatores UASB seguido pelas Lagoas de Estabilização. O Paraná possui a maior concentração de reatores UASB do Brasil, cerca de 89% (258 unidades) de ETEs construídas no estado (290 unidades) utilizam esta tecnologia. Minas Gerais é o segundo estado em número de reatores UASB em operação, perfazendo 78% (170 unidades) do total de ETEs (219 unidades construídas). As lagoas de estabilização são os principais sistemas de tratamento implantados em São Paulo representando 62% do total de estações do estado (871 unidades).

Segundo Silva (2014), os reatores UASB por meio de recursos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) entre 2007 e 2014, predominaram no cenário nacional entre outros sistemas de tratamento. Das 539 ETEs construídas neste período 64% possuem tratamento primário anaeróbio e 35% possuem reatores UASB.

Diante da grande aplicação de sistemas anaeróbio para tratamento de esgoto, McCarty et al. (2011) ressaltam que mesmo reduzindo custos com o emprego deste sistema outras questões de interesse devem ser solucionadas, tais como (i) minimizar as perdas de metano para atmosfera diminuindo assim as emissões de GEE; (ii) evitar que ocorra a redução de sulfato em sulfeto, comprometendo a produção de CH<sub>4</sub>, além da produção de ácido sulfúrico que é um gás tóxico e corrosivo; (iii) e por último devido aos impactos ambientais que pode vir causar nas águas receptoras é fundamental a remoção de nutrientes.

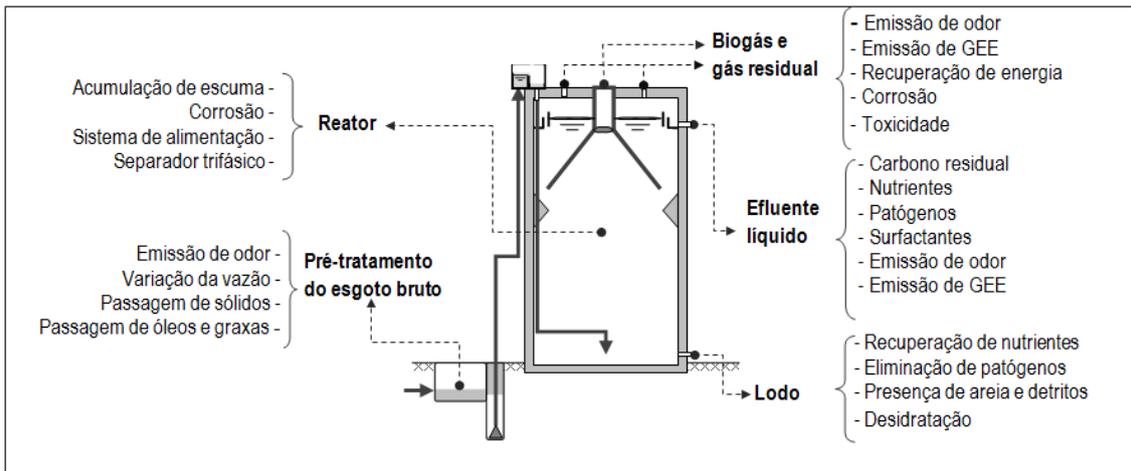
No entanto, a aplicação de reatores anaeróbios tem como vantagens: o reduzido consumo de energia para a operação do sistema, potencial de geração de energia por meio da utilização do biogás e a baixa geração de lodo que se encontra estabilizado. Por meio dessas e outras vantagens como temperatura favorável, disponibilidade de área e com o intuito de potencializar a produção de energia e reduzir custos no tratamento global, as estações de tratamento de esgoto no Brasil utilizam em seus processos de tratamento reatores anaeróbios (SHEN et al., 2015; GUEST et al., 2009).

## **1.5 REATORES UASB**

Os reatores UASB são bastante empregados na América Latina para o tratamento de esgoto doméstico, sendo responsável para a expansão do saneamento nessa região (CHERNICHARO et al., 2015). No Brasil é o sistema de tratamento anaeróbio mais utilizado nas ETEs. O clima tropical do País é uma grande vantagem para seu uso, pois favorece as reações de biodegradação que ocorrem no reator, reduzindo assim a carga orgânica do efluente de forma mais eficiente. Outra vantagem se deve à facilidade de instalação em municípios populosos e a associação de vários sistemas em um único processo (SOARES, 2011).

Essas unidades de tratamento anaeróbio ganham destaque por sua aplicação em relação a outros sistemas, pois ocupam menores áreas e demandam menor energia em relação a sistemas mecanizados e aeróbios convencionais. Os reatores UASB se tornam ainda mais atraente devido sua compactidade, baixo custo operacional e baixa produção de lodo (ROSA, 2013).

Porém, apesar do bom desempenho em grande parte das estações, os reatores UASB ainda apresentam algumas limitações, não completamente solucionadas até o momento. A Figura 2 apresenta um panorama das limitações operacionais atuais encontradas em reatores UASB empregados no Brasil.



**Figura 2 - Panorama dos problemas detectados em reatores UASB.**

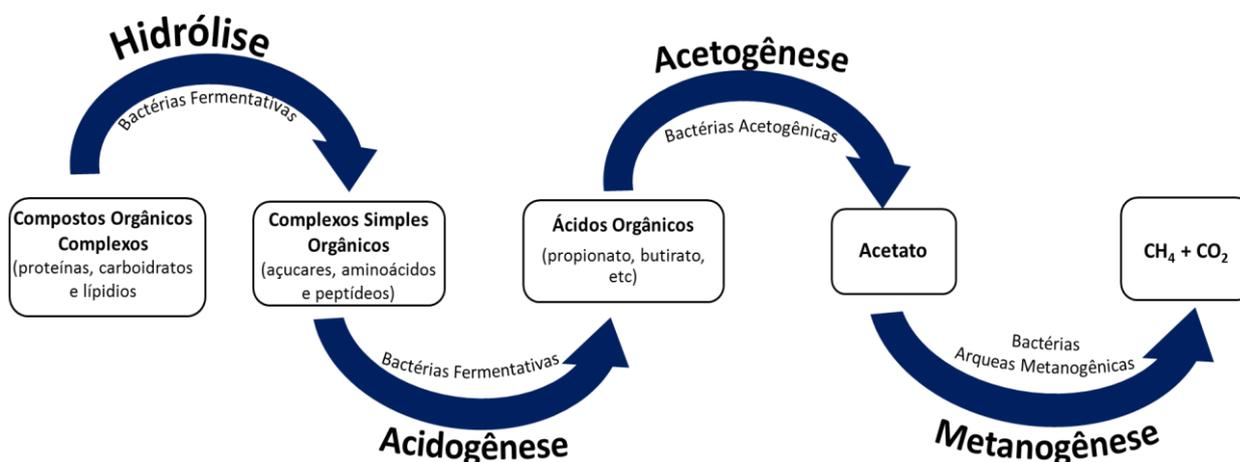
**Fonte: Chernicharo e Suetz (2008).**

Lobato (2011) e o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB, 2011) enumeram alguns aperfeiçoamentos possíveis, levando em consideração a expertise brasileira, a respeito do projeto e operação dos reatores UASB tratando esgoto doméstico, (i) melhorar a remoção de resíduos sólidos; (ii) regularizar a vazão afluyente; (iii) reduzir o acúmulo de espuma na câmara de gás dos reatores; (iv) reduzir as perdas de metano dissolvido no efluente do reator e (v) diminuir os vazamentos e perdas de biogás nas estruturas dos separadores de fase. A maioria dos reatores UASB no Brasil não tem queimadores de gás em funcionamento contínuo e nem coleta de gás, além de não terem sido projetados para exercer a coleta de biogás sistematicamente (CABRAL, 2016).

De forma geral, os reatores UASB além de promover o tratamento de esgoto, os subprodutos gerados neste sistema podem ser utilizados energeticamente (ROSA, 2013; LOBATO, 2011).

## 1.6 PRODUÇÃO DE ENERGIA EM REATORES ANAERÓBIOS

A digestão anaeróbia é um processo de degradação na ausência de oxigênio, em que a matéria orgânica é convertida em metano, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e demais subprodutos. As principais etapas envolvidas no processo de digestão anaeróbia são hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, conforme apresentadas esquematicamente na Figura 3.



**Figura 3 - Etapas de conversão da matéria orgânica por meio da digestão anaeróbia**

**Fonte: adaptado de Chernicharo (2007).**

As etapas em equilíbrio dinâmico potencializam a metanogênese contribuindo para um aumento na taxa de metano. Esse equilíbrio é conservado por meio da disponibilidade de  $H_2$  e a natureza do substrato, sendo o  $H_2$  e o ácido acético responsáveis por 70% do gás metano produzido em reatores anaeróbios (CASSINI, 2003).

No processo de degradação a atividade das bactérias redutoras de sulfatos, podem competir pelos compostos intermediários formados durante o processo da digestão anaeróbia com as bactérias fermentativas, acetogênicas, arqueas e metanogênicas. Diante desse fato, sulfetogênese é indesejável durante o processo uma vez que a produção de metano pode vir a ser prejudicada (CHERNICHARO, 2007).

A extração do biogás contendo metano ( $CH_4$ ) por meio do tratamento anaeróbio e da digestão de sólidos coletados e gerados em água residuária é uma forma simples de recuperação de energia. Cerca de 50 a 70% da matéria orgânica biodegradável contida no efluente é convertida em metano em sistemas anaeróbios (CHERNICHARO, 2007).

O biogás produzido em reatores anaeróbios pode ser usado para o aquecimento do digestor, queimado no local para geração de calor ou eletricidade, limpo e vendido a um fornecedor local de gás natural ou usado como combustível para veículos, além de extração de calor latente para aquecimento e resfriamento de edifícios e células de combustível microbiano (GUEST et al., 2009).

Zanette (2009) aponta que o Brasil tem uma capacidade de produção de biogás por meio do tratamento anaeróbio de esgotos de 7,3 milhões de  $\text{m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{dia}^{-1}$  levando em consideração 100% de esgoto tratado devido a elevada população e sua aglomeração em centros urbanos.

Shen et al. (2015) relatam que a maioria das ETEs que possuem digestão anaeróbia sem tecnologias combinadas, apenas queima o biogás em caldeiras, desperdiçando assim o potencial energético deste subproduto. Diante disso, considerando as despesas com implantação, as características locais e regionais e a eficiência dos processos, as ETEs que possuem reatores anaeróbios deverão ser automatizadas para realizar o aproveitamento energético do metano (FARIA, 2012).

Além disso, Jenicek et al. (2012) sugerem como forma de maximizar a produção de biogás nas ETEs o aumento da matéria orgânica tratada por digestores anaeróbios, realização do pré-tratamento do material de entrada afim de aumentar a biodegradabilidade anaeróbia e otimização das condições tecnológicas do processo de degradação anaeróbia.

No entanto, o reequipamento de ETEs com tratamento aeróbio para instalações anaeróbias pode ser oneroso, ainda que os sistemas anaeróbios completos disponham de elevado potencial para captar o conteúdo de energia nos efluentes. Em caso aplicado para novos sistemas de tratamento a inserção de reatores anaeróbios como os UASB pode vir a ser benéfico, diante da ampla experiência nestes sistemas e as vantagens já conhecidas (McCARTY et al., 2011).

## **1.7 ASPECTOS RELATIVOS AO USO DO BIOGÁS COMO FONTE ENERGÉTICA**

Subproduto advindo da degradação anaeróbia da matéria orgânica, o biogás é um gás combustível empregado para geração de calor, geração de eletricidade ou até mesmo combustível veicular.

De acordo com a Figura 4, vários tipos de matérias-primas podem ser utilizadas na produção de biogás.



**Figura 4 - Matéria prima utilizada na produção de biogás.**

**Fonte: França Junior (2008).**

Outrora o biogás era pouco aproveitado, sendo apenas queimado na maioria dos locais geradores. Com o passar do tempo houve um crescimento no interesse em utilizar energias renováveis, fato este creditado ao aumento do preço dos combustíveis proporcionado por esgotamento das fontes, pelo acelerado crescimento populacional e pela preocupação com emissões de gases poluidores para atmosfera, abrindo perspectivas futuras para o desenvolvimento de tecnologias que aproveitem o potencial energético deste gás (ROSA, 2013; ZANETTE, 2009).

As estações de tratamento de esgoto possuem grande potencial de produção de biogás. De acordo com Shen et al. (2015), apesar da menor publicidade em relação a outras fontes de combustíveis renováveis, o biogás é um combustível confiável, sustentável e de baixo custo. Além disso, proporciona a redução de emissões de gases do efeito estufa nas operações da ETEs e pode suprir a demanda energética das ETEs quando houver a conversão à energia elétrica (ZÁBRANSKÁ et al., 2009; WETT et al., 2007).

A produção de biogás prevista em estações de tratamento de esgoto que possuem unidades de tratamento anaeróbio do efluente e a digestão anaeróbia de lodo é de  $0,4 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{kg DQO}^{-1}_{\text{removida}}$  e  $0,75 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{kg SSV}^{-1}_{\text{removida}}$ , respectivamente (METCALF e EDDY, 2016).

Lopes et al. (2011) apontam que a produção de biogás por pessoa em uma ETE varia entre  $5 \text{ a } 20 \text{ L.pessoa}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ . Por meio de uma metodologia proposta por Lobato (2011) para estimativa de produção de biogás em ETEs utilizando o

balanço de massa da DQO em reatores UASB foi estimada que a produção de metano variou de 0,11 a 0,19 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.kg.DQO<sup>-1</sup> removida. A produção de biogás em reatores UASB tratando esgoto doméstico para diferentes autores é apresentada na Tabela 4.

**Tabela 4 - Valores da produção de biogás em Reatores UASB**

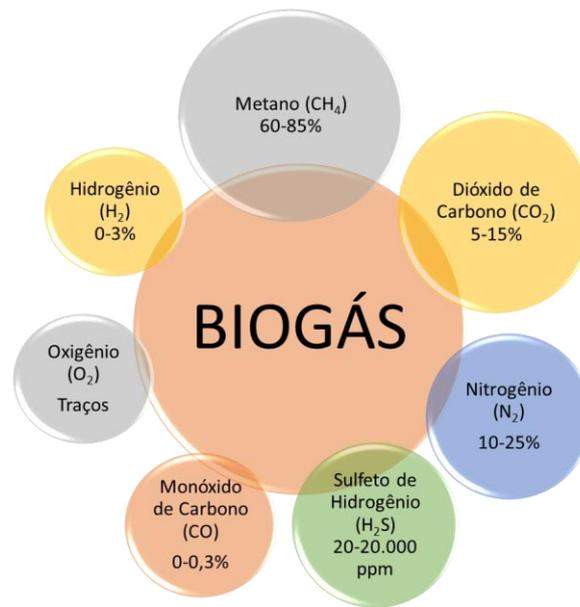
Referência	Temperatura (°C)	Produção de biogás (m <sup>3</sup> .kg <sub>DBO<sub>apr</sub></sub> <sup>-1</sup> )	Metano (%)
Grin et al. (1983) <sup>a</sup>	20	0,12-0,16	-
Lettinga et al. (1980) <sup>a</sup>	9,5-10	0,17-0,24	30-55
Bogte et al. (1993)	>12	300 <sup>b</sup>	-
Soto et al. (1995) <sup>a</sup>	20	-	-
Khan (1995)	-	0,15	75-80
Lima (2012)	23	0,38	85
Rosa (2013)	25	0,16-0,24	78,2
Cabral (2016)	17-23	0,179	70-80%

<sup>a</sup> apud Tauseef et al. (2013) and Rosa (2013), <sup>b</sup> em L.d<sup>1</sup>.

De acordo com Noyola et al. (2006), o metano apresenta potencial calorífico de (35,9 MJ.m<sup>-3</sup>) sendo inferior ao do gás natural (39 MJ.m<sup>-3</sup>). Já o poder calorífico do biogás com uma concentração de 60% de metano (21,45 MJ.m<sup>-3</sup>) é 45% inferior ao gás natural.

Segundo Lobato (2011), o biogás produzido em estações de tratamento de esgoto doméstico é constituído de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), nitrogênio (N<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>) com as seguintes variações demonstradas na Figura 5. Entretanto, essa composição pode variar por meio das características físico-química do efluente e das condições de operação da ETE.

De acordo com Van Hanndel e Lettinga (1994) e Noyola et al. (2006), o biogás advindo de reatores UASB possui alto teor de metano (70 a 80%) e em menor concentração o nitrogênio (10 a 25%) e gás carbônico (5 a 10%). A presença elevada de nitrogênio na composição do biogás é devido ao N<sub>2</sub> dissolvido no esgoto doméstico.



**Figura 5 - Composição do biogás produzido em reatores anaeróbios.**

*Fonte: adaptado de Lobato (2011).*

A geração deste subproduto nas ETEs depende principalmente do teor de matéria orgânica biodegradável existente no efluente e das características do sistema de tratamento. De forma geral, quanto maior a eficiência das unidades de tratamento biológico, maior será a produção de biogás e maior o potencial de recuperação energética (CABRAL, 2016; DENG et al., 2014; JIANG et al., 2013).

De acordo com Lobato (2011), os principais fatores que influenciam a produção e a composição do biogás em reatores UASB estão relacionados à população contribuinte; contribuição per capita de esgoto; contribuição per capita de DQO; eficiência de remoção de DQO; concentração de sulfato no afluente; eficiência de redução de sulfato; temperatura operacional do reator; e, percentual de  $\text{CH}_4$  no biogás. Em adição, Possetti (2013), avaliando a produção de biogás em uma ETE de grande porte, observou que os eventos significativos de chuva influenciam diretamente na produção de biogás nos reatores UASB.

Apesar de se identificar que para a realidade brasileira a principal alternativa de recuperação do biogás é a geração de eletricidade, aponta-se ainda a recuperação do calor com a queima do biogás, sendo mais utilizadas para a manutenção da temperatura nos reatores em países que possuem temperaturas ambientes baixas e para a higienização de lodo. Nos EUA, menos de 10% das ETEs utilizam biogás para aquecimento e/ou geração de eletricidade (SHEN et al., 2015; TRICASE e LOMBARDI, 2008).

A produção de energia elétrica por meio do biogás possibilita a (i) geração descentralizada reduzindo o custo pela proximidade dos centros consumidores; (ii) a exploração de novas fontes de renda como a comercialização do excedente gerado com empresas energéticas; (iii) redução do consumo de energia pela ETE; (iv) utilização de processos para a cogeração de calor e eletricidade e (v) redução das emissões de gases poluentes para a atmosfera (SALOMON e LORA, 2009; CENBIO, 2001).

Os Estados Unidos, Reino Unido e Alemanha despontam no cenário mundial como geradores de eletricidade por meio do biogás. A Alemanha produz 40% de todo o biogás da União Europeia, gerando 24419 GWh de eletricidade em 9035 plantas. Em 2011 produziu 1TWh por ano, suprimindo a necessidade energética de 50% das ETEs. Já nos Estados Unidos são gerados 190 MW em 104 ETEs, sendo que o aproveitamento energético possui viabilidade em mais de 1351 unidades operante no país (EPA, 2011; USEPA, 2010).

França Junior (2008), Garcilasso et al. (2008a), Garcilasso et al. (2008b), Deng et al. (2014) apresentam benefícios econômicos da utilização de biogás para produção de energia em pequenas e grandes cidades. A conversão do biogás em biometano e hidrogênio seria uma alternativa com alta eficiência energética de conversão (VALENTE, 2015).

Portanto, o aproveitamento energético do biogás em ETEs está alinhada com o conceito de sustentabilidade, apoiada nos seus três pilares (ambiental, social e econômico), a qual pode vir a ser uma oportunidade para impulsionar o setor de esgotamento sanitário do Brasil (POSSETTI, 2016).

## **1.8 ASPECTOS RELATIVOS AO USO DO LODO COMO FONTE ENERGÉTICA**

Com o crescimento populacional e o aumento da geração de esgotos domésticos houve uma maior preocupação com os impactos ambientais causados pelo lançamento de efluentes em corpos hídricos, atrelado às exigências legais e ao interesse de melhoria da qualidade da água para diversos usos. Várias cidades brasileiras têm implantado ETEs, em que o tratamento anaeróbio se destaca. Durante o processo é gerada nessas unidades um resíduo de caráter

semissólido, pastoso e constituída predominantemente de compostos orgânicos, chamado lodo.

Andreoli et al. (2001) divide o lodo em dois componentes: sólidos advindos da remoção da matéria orgânica chamados de sólidos biológicos e os sólidos recalcitrantes que são acumulados nos sistemas sendo denominado de sólidos inertes. Pedroza et al. (2010) estima que por ano o Brasil produza entre 150 a 220 mil toneladas de lodo seco advindo das ETEs. A Tabela 5 apresenta a produção de lodo anual de alguns países.

**Tabela 5 - Produção de Lodo anual em alguns países.**

Países	Produção de Lodo (milhões m <sup>3</sup> /ano)	Referência
Reino Unido	1	Hossain et al. (2009)
Alemanha	50	Hossain et al. (2009)
Suíça	4,2	Hossain et al. (2009)
Singapura	0,17	Hossain et al. (2009)
Espanha	1,12 <sup>a</sup>	Barneto et al. (2009)
Austrália	0,25 <sup>a</sup>	Molloy et al. (2005)
Brasil	0,15-0,22 <sup>a</sup>	Soares. (2004)

**Fonte:** Pedroza et al. (2010). <sup>a</sup> toneladas/ano.

O conhecimento das características do lodo faz-se necessário para antever o tratamento ou o aproveitamento deste subproduto gerado nas estações de tratamento de esgoto. Essas propriedades sofrem variações de acordo com a sua origem, o tempo entre a sua geração e o processamento e o tipo de processamento a qual o lodo irá ser submetido. Diante desse contexto, afim de realizar o aproveitamento energético do lodo torna-se necessário conhecer as características químicas e térmicas do lodo. De acordo com Obernberger et al. (2006), os teores de hidrogênio e carbono, umidade e oxigênio influenciam diretamente no poder calorífico do lodo.

A Tabela 6 são apresentados valores da composição típica dos lodos de estações de tratamento de esgoto com reatores UASB seguido de lagoa aerada (ROSA, 2015).

**Tabela 6 - Características do lodo desidratado em ETEs operadas por reator UASB seguido de Lagoas aeradas.**

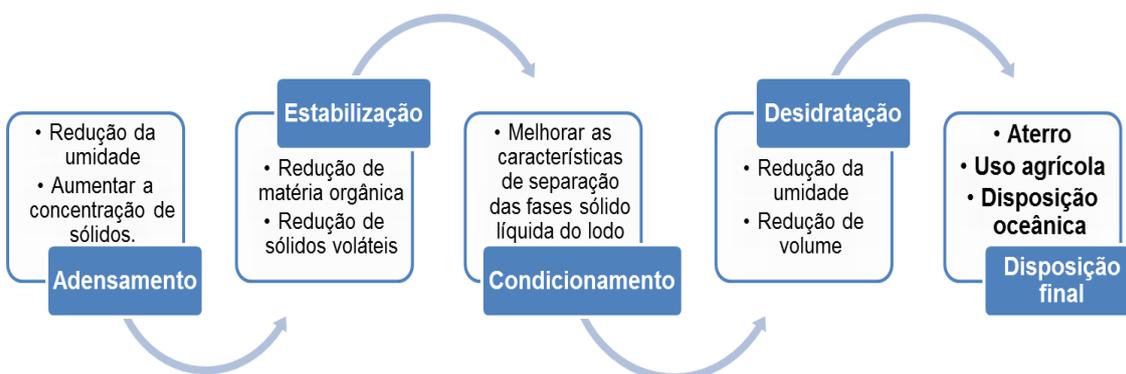
Origem do Lodo	Composição Elementar %, b.s					Composição Imediata %, b.s			Potencial Energético (MJ.kg <sup>-1</sup> ), b.s		Fonte
	C	H	N	S	O	SV	A	w	PCS	PCI	
UASB + Lagoa Aerada	27,5	4,3	4,04	0,9	15	43,3	48	9,1	20,1	18,5	Borges (2008)
	17,4	6,7	3,8		20		52	31,7			Ginoris (2010)
	32,8	4,5	4,4	1,7	19		38	20	9,9c	8,8c	Faaij et al.(1999)
	25,6	4,4	4,6	1,1	22		42	15	14c		GroB (2008)
	22,7	3,3	3,1	1,6	13	44,5	56	3,9	9,5		Otero et al. (2008)

Fonte: adaptado de Rosa (2015).

Nota: SV: sólidos voláteis, SF: sólidos fixos, A: cinzas, w: umidade, PCS: poder calorífico superior, PCI: poder calorífico inferior, N.d: não detectado, (-) não analisado, b,s: base seca, c: base de trabalho.

O lodo de esgoto requer tratamento antes de qualquer alternativa que virá a ser aplicada para a destinação final. Este tratamento objetiva a estabilizar o lodo e reduzir seu volume facilitando assim seu manuseio e reduzindo custos. Segundo Wett et al. (2007), a digestão anaeróbia é bastante empregada no tratamento de lodos, tanto em pequenas como em grandes ETEs.

O tratamento de lodo constitui das etapas de adensamento, estabilização, condicionamento, desidratação e de higienização quando se quer utiliza-lo para fins agrícolas. A Figura 6 apresenta as etapas conforme seus objetivos.



**Figura 6 - Etapas do Tratamento do lodo e seus respectivos objetivos.**

O adensamento tem como vantagens a redução do consumo de produtos químicos no desaguamento e a diminuição das despesas com energia no aquecimento de digestores (MIKI et al., 2006). Já a etapa de desidratação promove o aumento da concentração de sólidos e redução do volume de lodo,

com impactos positivos sobre os gastos com o transporte e disposição final do subproduto.

Luduvic (2001) cita a digestão aeróbia, digestão anaeróbia, compostagem, estabilização química e estabilização térmica como processos empregados para a estabilização do lodo. Essa etapa visa a mineralização da fração biodegradável da matéria orgânica, reduzindo a concentração de patógenos e os riscos de putrefação (METCALF e EDDY, 2016).

A fim de melhorar as propriedades de separação das fases sólido-líquida do lodo faz uso da etapa de condicionamento, sendo realizado por meios físicos e químicos. A via química promove o auxílio e a redução da umidade do lodo de 90 a 99% para 65 a 80% dependendo da natureza dos sólidos. A inserção do tratamento térmico, o condicionamento físico pode gerar lodo com menores taxas de umidade (VAN HAANDEL, 2006).

Os processos térmicos, atualmente, destacam-se para o tratamento do lodo, em que o processamento do lodo ocorre pela destruição química dos polímeros a elevadas temperaturas, sob condições controladas de temperatura, pressão, teor de oxigênio, tempo de reação, entre outros fatores. Os processos térmicos mais utilizados são a gaseificação, pirólise e combustão (ROSA, 2014).

Três fatores podem influenciar e melhorar a qualidade do tratamento de lodo consequentemente aumentando a produção de biogás: (i) pré-tratamento do material de entrada aumentando assim a biodegradabilidade anaeróbia, (ii) maior quantidade de matéria orgânica de entrada para a digestão anaeróbia e (iii) otimização das condições tecnológicas do processo de degradação anaeróbia. Todavia, identifica-se a baixa biodegradabilidade das paredes celulares resistentes e a presença de biopolímeros extracelulares produzidos nos lodos ativados como causa para o baixo rendimento de biogás nos resíduos de lodos (ZÁBRANSKÁ e JENICEK, 2009).

Com o intuito de atender critérios ambientais, técnicos e econômicos, estudos que englobam as características do esgoto, as tecnologias de tratamento disponíveis, as taxas de produção de lodo, a legislação ambiental e os tipos de solos e agricultura regional devem antever a soluções propostas para o gerenciamento e disposição final do lodo (FERNANDES et al., 2001).

Atualmente, observa-se uma maior adoção de sistemas de gerenciamento de lodo mais eficazes devido ao maior rigor empregado nas legislações ambientais. Pedroza et al. (2010) e Andreoli et al. (2001) ressaltam que negligências cometidas no gerenciamento do lodo podem prejudicar os benefícios ambientais e sanitários, pois esta atividade é bastante complexa e onerosa para as ETEs.

No Brasil, o destino final do lodo, normalmente, é o envio para aterros sanitários o que resulta no não aproveitamento deste subproduto para fins agrícolas ou energéticos, como destaca Rosa (2013). Em 2010, a Lei 12.305, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que dispõe diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, estimulando assim, a redução na quantidade de lodo destinada para aterros e um aumento do seu uso agrícola e como fonte de energia. Adicionalmente, a Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB) e Política Nacional de Mudanças Climáticas (PMMC) foram importantes para estimular a promoção de uma melhor eficiência energética no setor de tratamento de esgotos, reduzindo custos operacionais, melhoria na gestão do lodo e na queima eficiente e uso energético do biogás produzido no processo (MOREIRA, 2017).

Aproximadamente cerca de 1 a 2% do volume do esgoto tratado se torna lodo. No entanto, o tratamento e a disposição final do lodo correspondem cerca de 20% a 60% do custo operacional da ETE (ANDREOLI et al., 2001).

Na Europa reduzir a produção do lodo nas ETEs é a prioridade em seu gerenciamento, subsequente a minimização, reciclagem, aproveitamento térmico e como última opção o envio para o aterro sanitário. Ressalta-se que a utilização na agricultura como acondicionamento final do lodo encontra-se alguns fatores que limitam sua aplicação como a presença de metais pesados, patógenos e poluentes orgânicos que podem vir a acumular no solo (WERLE e WILK, 2010). Kelessidis e Stasinakis (2012) estimaram que até o ano de 2020 o uso de processos térmicos no gerenciamento do lodo na União Europeia terá um acréscimo de 100% visando o uso energético deste subproduto. Essa alternativa passará a ser a segunda mais empregada para a destinação final do lodo correspondendo 37%.

Caso o lodo gerado fosse capturado e gerido eficientemente, de acordo com Werle e Wilk (2010), as estações de tratamento de esgoto poderiam suprir sua demanda de energia. Nesse contexto, a recuperação energética do lodo torna-se uma nova área de estudos a ser explorada concomitantemente ao aproveitamento do biogás nas ETEs. Estas pesquisas poderão a vir revelar várias possibilidades de uso individual ou combinado, com o objetivo de produzir energia a fim de suprir as demandas energéticas da própria ETE ou até mesmo repassar a terceiros (ROSA, 2013).

### **1.9 SUSTENTABILIDADE ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS**

Segundo Barufi et al. (2006), o tema mais preocupante entre os governos de todo mundo é a segurança energética, sendo estratégico que os países possuam fontes próprias de energia. Embora as energias não renováveis como: petróleo, carvão e gás natural sejam as mais utilizadas atualmente são encontradas na natureza em quantidades limitadas e se extinguem com sua utilização. Rojas e Zhelev (2012) afirmam que diante da oscilação do mercado nos preços do petróleo e de energia, além da crise econômica atual, os investimentos em fontes energéticas renováveis e sustentáveis evidenciam uma garantia no futuro de uma economia sustentável.

Devido as recentes preocupações no âmbito climático, a conservação de energia, a melhoria da eficiência energética e a busca de fontes alternativas de energia configuram requisitos importantes para o desenvolvimento sustentável global (GU et al., 2017).

Os conceitos de sustentabilidade são amplos e divergentes, mas tem como essência alcançar o bem-estar econômico e social aliado à proteção do meio ambiente e o uso dos recursos naturais de forma equilibrada (MUGA e MIHELICIC, 2008).

A redução de custos em escala microeconômica, o esgotamento previsível das fontes de energia não renováveis e a emissão de gases do efeito estufa a nível global são propulsores para o uso mais eficiente da energia no tratamento de águas residuária (WETT et al., 2007; ROJAS e ZHELEV, 2012).

Diante desse cenário, as empresas de saneamento, além de promover o abastecimento da população com água tratada, coletar e tratar o esgoto sanitário para atender os padrões de qualidade da água e lançamento em corpos hídricos devem atentar-se para a sustentabilidade energética em suas estações de tratamento. Segundo Possetti (2016), para que possa exercer tal papel de forma eficiente é preciso que a ETE seja tratada como indústria: com gestão, sustentabilidade e otimização de seus processos.

As águas residuária a fim de atingir a sustentabilidade das ETEs, devem ser vistas como um recurso renovável, pois além de promover o tratamento de efluentes, outros recursos podem ser obtidos, tais como a produção fertilizantes, bioplásticos e energia (GUEST et al., 2009).

Metcalf e Eddy (2016) afirmam que em teoria as ETEs possuem mais energia do que necessitam para realizar o tratamento podendo se tornar até mesmo fornecedora de energia. De acordo com Shen et al. (2015), para atingir o nível de tratamento exigido pelas normas de lançamento de efluentes, o esgoto doméstico apresenta dez vezes mais energia do que realmente é consumido neste processo.

Segundo Gu et al. (2017), recuperar a energia oriunda de diferentes fontes e reduzir o consumo de energia nos processos unitários são condições para a sustentabilidade energética das ETEs, em que o atendimento desta condição é condicionado à geração de energia a partir dos subprodutos, minimizando, assim, o consumo de energia externa (McCARTY et al., 2011).

Em adição, Metcalf e Eddy (2016), apontam que as ETEs ao se tornarem autossustentáveis tanto na produção quanto na utilização da energia aumentam significativamente a sua rentabilidade mesmo em situações de quedas de energia. ETEs com sustentabilidade energética atingem uma economia de até 100.000 dólares por ano na China. Nos EUA apenas 10% das ETEs produzem energia excedente para uso comercial (GU et al., 2017).

Atualmente, as empresas de saneamento vêm investindo em centros de pesquisas e desenvolvimento tecnológico com o intuito de melhorar a eficiência na recuperação de recursos. A recuperação de recursos, tanto em termos de efluentes, nutrientes e energia deverá ser o novo foco das ETEs, deixando de

ser apenas ambientes de remoção de impurezas e se tornando ETEs indústrias (WETT et al., 2007).

Entretanto, as ETEs se deparam com problemas estruturais e de gestão para se tornarem unidades de recuperação de recursos. Problemas como a falta de manutenção em equipamentos, contribuição da água pluvial na rede de esgoto, comportamento hidrodinâmico incomum, rachaduras nas superfícies das unidades e problemas de vedações são obstáculos para este objetivo (PANEPINTO, 2007).

De acordo com Rojas e Zhelev (2012), Tao e Chengwen (2014), Panepinto et al. (2016) e Gu et al. (2017) as unidades não contemplam as demandas e ofertas energéticas quando projetadas, muito menos em sua gestão operacional, sendo apenas arquitetadas para atenderem os padrões estabelecidos quanto à qualidade da água. No entanto Longo et al. (2016), afirmam que as empresas de saneamento são potenciais consumidores de energia, pois para atender toda sua demanda e alcançar seus objetivos, requerem grande quantidade de energia nas unidades como também fora delas, devido à produção e transporte de materiais de construção e produtos químicos utilizados no tratamento. Sendo assim, a otimização energética torna-se fator principal para as empresas de saneamento (PANEPINTO et al., 2016).

Guest et al. (2009) acrescentam o despreparo das empresas de saneamento para gerir questões fora do domínio da engenharia clássica, além da ausência de metas e de sistemas globais de projeto, assim como os que incorporam aspectos sociológicos. Particularmente nos países em desenvolvimento, as barreiras tecnológicas e os altos custos de investimento são outros entraves para a criação de unidades autossustentáveis (GU et al., 2017).

Várias barreiras econômicas, sociais, técnicas e legislativas são empecilhos para a produção e utilização de biogás no que tange o aproveitamento energético nas ETEs dos Estados Unidos (SHEN et al., 2015). A Tabela 7 apresenta resumidamente as principais limitações encontradas no país.

**Tabela 7 - Dificuldades encontradas para o reaproveitamento energético do biogás em ETEs nos EUA.**

<b>TÉCNICO</b>
Falta de conhecimento sobre os aspectos da produção de biogás
Desafios de na operação e manutenção de digestores anaeróbios
Impacto nas operações de fluxo líquidos
Necessidade de tratamento de líquidos reciclados a partir de digestores
Capacidade da instalação
Problemas de segurança
Necessidade de pessoal técnico especializado e experiência
Disponibilidade de outros métodos de tratamento de lodos
Exigência de processos e operações de limpeza e modernização de biogás de energia intensiva
Relutância dos concessionários de gás e eletricidade para trabalhar com a ETEs
<b>ECONÔMICO</b>
Retorno Inadequado
Falta de capital disponível
Falta de incentivos
Tamanho da planta
Falta de conhecimento sobre aspectos financeiros da produção e utilização de biogás
Custo do equipamento
Baixos preços da eletricidade e do gás natural para justificar o investimento
Quantidade e qualidade do biogás
Condições de mercado imprevisíveis
<b>SOCIAL</b>
Falta de interesse da comunidade e / ou da concessionária em energia renovável
Percepção pública
Apoio político
Desejo de manter o status quo
Queixas de odor
<b>LEGISLAÇÃO</b>
Discrepâncias entre agências governamentais
Taxas e tarifas reguladas
Problemas de interconectividade
Desafios no cumprimento dos limites de descarga de efluentes, como a conformidade com o
Desafios em satisfazer as permissões de ar
Desafios na obtenção de permissões de ar (Clean Air Act Título V)

**Fonte:** Shen et. al. (2015).

No Brasil, Moreira (2017), aponta como principais entraves (i) a falta de base de dados e monitoramento, (ii) capacitação – visão pontual e apenas de saneamento, (iii) resistência dos operadores e responsáveis, (iv) falta de política clara que favoreça soluções eficientes, (v) problemas com a entrega de energia excedente à concessionária de energia e (vi) tecnologias locais para garantia de conteúdo mínimo nacional; (vii) inexistência de modelos de negócios claros para o uso energético de biogás; (viii) falta de conhecimento do setor e de informações sobre as reais potencialidades do aproveitamento energético de biogás; (ix) falta

de massa crítica qualificada e articulada; (x) qualificação de mão-de-obra e da prestação de serviços

Diante disso, o desenvolvimento de legislações que estimule e incentive a recuperação de energia e recursos, a otimização de processos, mudanças operacionais e sistemas descentralizados de tratamento de efluentes são fundamentais para o melhor aproveitamento de recursos nas ETEs tornando-as mais sustentáveis e também gerando mais qualidade de vida para a população.

### **1.10 INCENTIVOS NA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL PARA A RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA**

Nas ETEs em virtude do maior rigor da legislação ambiental em termos dos padrões de lançamento de efluentes, os sistemas de tratamento têm demandado um maior controle operacional com vistas à manutenção da qualidade da água. O que pode contribuir para o desenvolvimento de ETEs mais sustentáveis (VALENTE, 2015).

A União Europeia é referência em termos de regulamentação e incentivo no uso do biogás, por meio da diretiva 2009/28/CE prevê a meta de que, até 2020, 20% da energia da UE seja suprida pelo uso de fontes de energias renováveis, principalmente advindas da agricultura e silvicultura. A preocupação de utilizar outras fontes de energia nos estados membros é antiga. Em 1999, a diretiva 1999/31/CE limitou o envio de resíduos biodegradáveis a aterros sanitários estimulando assim a reciclagem. A diretiva 2006/12/CE foi promulgada com o intuito de incentivar o uso de resíduos como fonte de energia. De forma complementar, a diretiva 2009/28/CE fomentou a geração de biometano na Europa estabelecendo regras para o mercado interno de gás natural para distintas fontes. Com o estabelecimento do uso de biogás na Europa em 2014, a UE promulgou a diretiva 2014/94/EU, a qual autoriza a implantação de infraestrutura para combustíveis alternativos.

A Alemanha destaca-se em relação aos países membros criando o Programa de Energia Integrada e do Clima (IEKP) que estabelece uma meta maior de redução das emissões de gases de efeito estufa de 40% considerando-se o padrão de lançamento no ano de 1990 a ser implementado até 2020. Já a Suécia possui o *Climate Investment Program Klimp* a qual proporciona uma contrapartida de até

30% do valor do investimento total para cada unidade de biogás construída no país, além disso, os proprietários de veículo movido à biogás recebem um subsídio financeiro (NORDBERG, 2016).

A Tabela 8 demonstra os incentivos praticados para estimular a produção de biogás na Alemanha, Espanha e Suécia, de acordo com Capodaglio et al. (2016).

**Tabela 8 - Incentivos praticados nos países membros da União Europeia para a produção de biogás.**

Medidas de cunho Econômico	Alemanha	Espanha	Suécia
Subsídios ao investimento	SIM	SIM	SIM
Empréstimos para investimento em condições especiais	SIM	SIM	NÃO
Tarifas especiais	SIM	SIM	NÃO
Certificados verdes	NÃO	NÃO	SIM
Suporte indireto (taxa de carbono)	SIM	NÃO	SIM
Suporte adicional para pequenas instalações	SIM	SIM	NÃO
Incentivos ao uso de estrume como matéria-prima	SIM	SIM	SIM
Taxa de entrega para tratamento de resíduos	NÃO	SIM	NÃO
Incentivos para o uso de culturas energéticas	SIM	NÃO	NÃO
<b>Suporte orientado para o conhecimento</b>			
Apoio através de ações de informação	SIM	SIM	SIM
Biogás como parte das estratégias de desenvolvimento rural	SIM	SIM	SIM
Biogás como parte das estratégias de tratamento de estrume	SIM	SIM	SIM
<b>Medidas de apoio adicionais</b>			
Acesso prioritário à rede elétrica nacional	SIM	SIM	NÃO
Acesso prioritário à rede nacional de gás	SIM	NÃO	NÃO
Condições preferenciais para carros a gás	NÃO	NÃO	SIM
Redes de aquecimento urbano extensas	NÃO	NÃO	SIM

**Fonte:** Capodaglio et al. (2016).

O Brasil observando o crescimento da produção de energia descentralizada e o uso de fontes alternativas renováveis de energia no mundo promulgou em 2001, o Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativa de Energia Elétrica (PROINFA) por meio da Lei nº 10.438, incentivando o uso da biomassa para geração de energia elétrica. O programa proporcionou a adição de 3300 MW de potência instalada ao sistema elétrico brasileiro gerado por fontes de energia renováveis e garantiu aos produtores de energia a venda por um prazo de 15 anos com um valor de referência compatível com as características técnica-econômica de cada projeto (PECORA, 2006).

No ano de 2009 foi implantada a Lei nº 12187/2009, a qual instituiu a Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC) que dentre outras providências prioriza a redução de emissão de gases efeito estufa. E, em 2010, houve a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) por meio da Lei nº 12305/2010 criando diretrizes para o gerenciamento de resíduos sólidos incluindo os perigosos, desestimulando a disposição inapropriada do lodo advindo das estações de tratamento.

Em 2011 e 2012 foi aprovado o Plano Nacional de Eficiência Energética e a Resolução 482 da ANEEL de incentivo a micro e geração distribuída (ANEEL, 2012). Posteriormente, em 2015, o governo federal a fim de reduzir custos com as despesas de energia e água em órgãos públicos promulgou a portaria nº 23, a qual também recomenda a geração própria de energia optando pelo uso das fontes renováveis (BRASIL, 2015).

No sentido de incentivar a geração e aproveitamento de eletricidade a partir do biogás, a Resolução 482/2012 e 687/2015 da ANEEL dá diretrizes para a compensação de energia elétrica, intitulado “*net metering*” em analogia a sistemas implantados em países desenvolvidos, a qual consiste em gerar créditos ao invés de autorizar a venda do excedente da energia produzida (SILVA, 2015).

Em nível estadual, o Rio de Janeiro promulgou a Lei Estadual nº 6361, a qual autoriza o incremento de até 10% de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos na rede de distribuição de gás canalizado. Em São Paulo a lei estadual nº 13798 instituiu a Política Estadual de Mudanças Climáticas e os decretos estaduais nº 58.659/2012, 60.00/2013, 59.039/2013 e 60.298/2014 que buscam (i) regular o Programa Paulista de Biogás e Biometano de São Paulo; (ii) regular a base de cálculo do imposto incidente nas saídas internas de biogás e biometano; (iii) regular para o tratamento e disposição dos resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica e (iv) outorgar a produção de biogás ou biometano e geração de energia elétrica e térmica a partir de biogás ou biometano e térmica respectivamente.

Além disso, a NBR 12.209/2011 foi elaborada visando aspectos de segurança, poluição ambiental e a possibilidade de aproveitamento do biogás, a fim de

recomendar a redução da queima do mesmo quando não utilizado (JORDÃO & PESSOA, 2014).

### **1.11 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS NAS ETES DO BRASIL**

Anteriormente as estações de tratamento de esgoto tinham como enfoque a remoção de sólidos sedimentáveis, flotáveis e matéria orgânica, além de eliminar nutrientes e maus odores. Já no século XXI, o setor de saneamento valoriza os subprodutos do tratamento como potenciais fontes renováveis de energia. (TCHOBANOGLIOUS et al.,2009).

Nos anos de 2013 a 2015, a região Sudeste do Brasil enfrentou uma crise hídrica, proveniente da baixa precipitação, ocasionando uma redução de nível dos reservatórios das hidrelétricas. Fato este que comprometeu a principal fonte geradora de eletricidade, incentivando o acionamento de termoelétricas tornando o custo de produção maior e produzindo maiores impactos ambientais. A diversificação da matriz energética brasileira, no intuito de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, assim como outras fontes renováveis, tais como o biogás gerado em sistemas de digestão anaeróbia indicam grande potencial de geração de energia elétrica.

Rosa (2013), EPE (2013), SNIS (2012), e Salomon e Lora (2009) indicam que fatores como o aumento nos serviços de coleta e tratamento de esgoto sanitário, coleta e destinação de resíduos sólidos urbanos, aumento da fiscalização dos órgãos ambientais e aumento do consumo de energia elétrica no país são fatores que estimulam a produção e o interesse de energia por meio do biogás. Zanetti (2009) estima que se o Brasil tratasse 100% do esgoto gerado utilizando o tratamento anaeróbio seria produzido cerca de 7,3 milhões de  $m^3CH_4.dia^{-1}$ .

No Brasil, todavia, o biogás é, em geral, apenas queimado em queimadores abertos. Salomon e Lora (2009) citam como entraves para a expansão da recuperação energética do biogás o reduzido aporte em investimento no setor, falta de incentivos e políticas governamentais, dificuldades em comercializar créditos de carbono, em adição, destaca-se a inadequação de tecnologias e dificuldades no suporte técnico para a operacionalização dos sistemas de cogeração. Para o destino do lodo, o seu aproveitamento como fonte de energia

é pouco explorado, sendo encaminhado na grande maioria dos casos para aterros sanitários.

Em termos energéticos, o país possui apenas 13MW de potência outorgada em operação, 0,6 MW em fase de construção e 1,5MW em empreendimentos cuja construção não foi iniciada, o emprego de outras fontes renováveis poderia contribuir para a expansão do setor (ANEEL, 2014).

No que se refere o aproveitamento energético do biogás gerado em ETEs no Brasil são contabilizadas apenas onze estações de tratamento de esgotos geradoras de energia elétrica a partir do biogás (Tabela 9), o qual é proveniente de reatores UASB, ou gerado a partir de digestores de lodo em sistemas de lodos ativado. Como observado na Tabela 9, a grande maioria das ETEs se encontra nas regiões Sul e Sudeste.

A maior produtora de energia elétrica situa-se em São Paulo na ETE Barueri, onde, o aproveitamento do biogás corresponde a 25% da demanda mensal de energia da estação (COSTA, 2006).

**Tabela 9 - Características das ETEs brasileiras geradoras de energia elétrica a partir do biogás.**

Localização	Companhia de Saneamento	ETEs	Sistema de Tratamento	População de Projeto (hab.)	Vazão da ETE (L/s)
MINAS GERAIS	COPASA	Arrudas	Lodo Ativado	1.343.867	3375
		Betim	UASB	266.495	500
		Ibirité	Lodo Ativado	115.604	140
		Vieira/Montes Claros	UASB	326.931	500
SÃO PAULO	SABESP	Barueri	Lodo Ativado	4.400.000	8177
		Franca	Lodo Ativado	4.100.000	1051
	SEMABE	São José do Rio Preto	UASB	438.000	1050
		Ribeirão Preto	Lodo Ativado	620.000	1505
PARANÁ	SANEPAR	Belém	Reator Aeróbio	600.000	840
		Ouro Verde	UASB	29.500	70

Fonte: COPASA 2017; SABESP 2014, 2015 e 2017; AMBIENT, 2012 e SANEPAR 2016.

A ETE de São José do Rio Preto é considerada o projeto mais inovador no cenário nacional, ao promover a secagem e queima do lodo com resíduos de

poda do município além de realizar o aproveitamento energético do biogás (VILLANI Jr., 2014).

A ETE Arrudas, situada em Minas Gerais, operada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), é a segunda estação que mais gera energia no país totalizando  $4.158 \text{ tCH}_4.\text{d}^{-1}$ , suprimindo 70% da demanda energética da estação. A maior parte desta energia é utilizada para aquecimento dos digestores de lodo. A ETE Montes Claros, também operada pela COPASA aproveita o biogás para a secagem térmica do lodo e gera  $1134 \text{ tCH}_4.\text{d}^{-1}$ . Já a ETE Betim reaproveita os subprodutos do tratamento para gerar eletricidade em uma caldeira com uma produção de  $1.152 \text{ tCH}_4.\text{d}^{-1}$  (ARAÚJO, 2014).

No Estado do Paraná apenas duas ETEs realizam o aproveitamento energético do biogás, destaque para a ETE Ouro Verde que utiliza reatores UASB, situada no município de Foz do Iguaçu, a qual foi precursora no país a utilizar o biogás como fonte de energia. Além disso, foi a primeira ETE brasileira a ser conectada à rede de distribuição de energia elétrica e cadastrada junto a Agência Nacional de Energia Elétrica. Na ETE Belém, a qual emprega reatores aeróbios no tratamento de esgoto, situada no município de Curitiba é prevista a produção de eletricidade por meio de uma usina com potência instalada de 2,8 mega-watts (MW) (ZILOTTI, 2012).

Nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná estão situadas as ETEs brasileiras que atualmente realizam o aproveitamento energético do biogás no país, com perspectivas de aumento da capacidade de geração de eletricidade a partir do biogás. Utilizando a relação unitária de  $133,8 \text{ MJ.hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  proposta por Lobato (2011) para estimar o potencial energético unitário do biogás em reatores UASB em uma situação típica, São Paulo, Minas Gerais e Paraná são responsáveis por produzirem juntos cerca de  $227589 \text{ GJ.hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  perfazendo apenas 10% do seu potencial total estimado de produção.

Apesar dos exemplos de sucesso no aproveitamento energético do biogás está não é uma prática no país. De acordo com Moreira (2017), apesar dos avanços alcançados nos últimos anos, principalmente por meio do Probiogás (Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no

Brasil), o biogás ainda é queimado e/ou liberado à atmosfera, desperdiçando assim o potencial energético desse subproduto.

Além disso, diante desse baixo aproveitamento energético do biogás gerado em ETEs no Brasil, a necessidade de disseminação e de sensibilização de conhecimento técnico e de informações que deem suporte à tomada de decisão e à transição para uma prestação de serviço mais sustentável torna-se preponderante para consolidar a recuperação energética desse subproduto nas estações (MOREIRA, 2017).

Neste contexto Metcalf e Eddy, (2016) apontam dentre alguns desafios e oportunidades no tratamento de efluentes para o futuro, destaca-se a necessidade de projetar e adaptar a operação das estações de tratamento de esgoto para a recuperação de energia e outros recursos.

#### **1.11.1 Estimativa do Potencial Máximo e Atual do biogás para os estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná.**

##### **1.11.1.1 Materiais e Método**

A fim de diagnosticar o potencial energético atual do biogás nas ETEs operadas por reatores UASB nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná considerou-se como premissas a população de projeto das ETEs instaladas com reatores UASB que realizam o aproveitamento energético do biogás, conforme apresentado na Tabela 9.

O potencial energético máximo do biogás para ETEs operadas por reatores UASB nos três estados pôde ser estimado considerando-se as populações passíveis de atendimento (capacidade instalada de tratamento) obtidos a partir de Ribeiro et al. (2016). Diante destes dados e a partir das relações unitárias propostas por Lobato (2011) apresentadas na Tabela 10, efetuou a estimativa do potencial real e máximo. Em adição, considerou-se ainda três diferentes cenários propostos por Lobato (2011) para esta estimativa, (i) pior cenário; (ii) cenário típico; e (iii) melhor cenário, conforme detalhado na Tabela 10, os quais foram propostos visando caracterizar diferentes condições do efluente em

tratamento que influenciam no potencial energético dos subprodutos do tratamento anaeróbio em reatores UASB.

**Tabela 10 - Considerações e relação unitárias proposto no modelo de Lobato (2011).**

Cenário	Descrição	Potencial energético (MJ.hab <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )
<b>Pior</b>	É atribuída a um potencial energético menor, em que engloba sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano	89,7
<b>Típico</b>	utilizou dados intermediários para os dados de entrada	133,8
<b>Melhor</b>	Considera-se sistemas operando com esgoto mais concentrado, menores concentrações de sulfato, maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano, portanto tendo um potencial energético maior	179,3

*Fonte: Lobato (2011).*

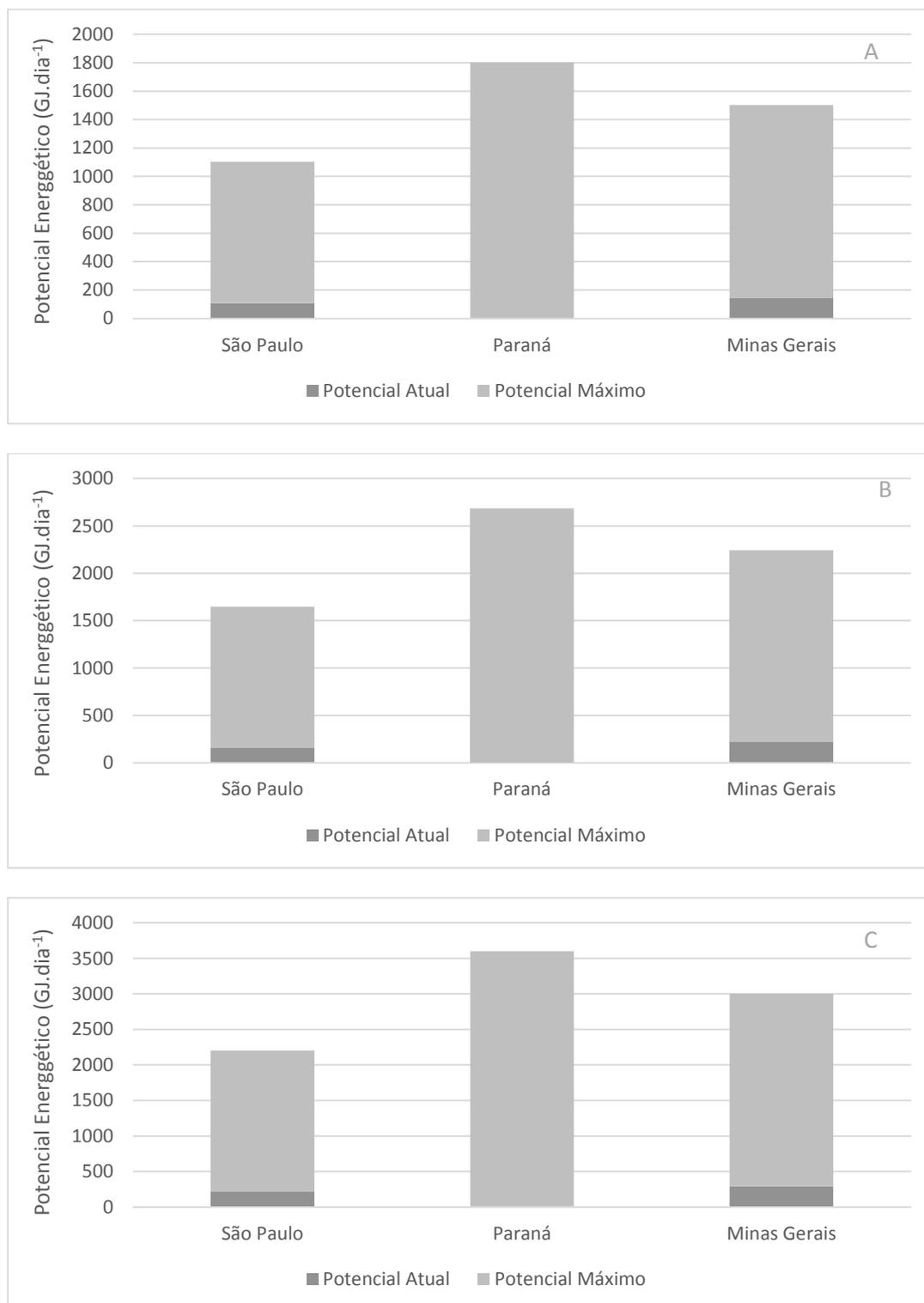
#### **1.11.1.2 Resultados**

A Figura 7 apresenta uma comparação do potencial energético atual do biogás e do potencial energético máximo deste subproduto, considerando-se as premissas já apresentadas. Como observado, o estado de São Paulo para os cenários pior, típico e melhor apresenta um potencial máximo diário de 995, 1484, 1989 GJ.dia<sup>-1</sup>, respectivamente. O potencial energético atual do biogás para a ETE (São José do Rio Preto) corresponde a um aproveitamento para o estado de São Paulo de 11 % para os cenários avaliados.

O estado de Minas Gerais utiliza o potencial energético do biogás nas ETEs (Betim e Vieira/Montes Claros), o que corresponde a um índice de aproveitamento de 11% para os cenários avaliados. O potencial energético máximo para Minas Gerais no pior, típico e melhor cenário foi de 1357, 2024 e 2712 GJ.dia<sup>-1</sup>, respectivamente.

O estado Paraná é o estado com maior potencial máximo para os três cenários, podendo chegar a 3586 GJ.dia<sup>-1</sup> no melhor cenário. Este resultado é atribuído ao grande uso de reatores UASB em suas estações de tratamento de esgoto e a maior população atendida com este tratamento. O índice de aproveitamento

do potencial do biogás no Paraná está na ordem de 0,4%, ao se considerar a recuperação energético do biogás nas ETE Ouro Verde.



**Figura 7 - Potencial Energético atual e máximo do biogás gerado em ETEs operadas por reatores UASB por estado considerando três cenários: (a) pior, (b) típico e (c) melhor.**

Apesar dos esforços para o aproveitamento energético do biogás como fonte de energia nas ETEs dos três estados que mais promovem a recuperação deste

subproduto, observa-se um índice de recuperação muito reduzido indicando ainda um enorme potencial a ser explorado.

## **1.12 CONCLUSÕES**

- O Brasil por ser considerada uma potência econômica na América do Sul e exemplo para os países vizinhos, ainda carece de muitos avanços no setor de saneamento básico. As regiões Norte e Nordeste são muito carentes neste quesito, prejudicando ativamente a qualidade de vida da população.
- A opção por reatores anaeróbios (reatores UASB) no tratamento de esgoto já é uma realidade no cenário nacional, sendo considerada uma alternativa para a expansão do saneamento no país.
- Os estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná possuem a maior concentração de ETEs operadas por reatores UASB que promovem a recuperação energética do biogás, entretanto, ainda é reduzida sua contribuição em termos do potencial a ser explorado.
- As ETEs brasileiras possuem grande potencial de recuperação energética do biogás em relação a outros subprodutos, apesar de ainda não ser efetivamente explorado.
- O Brasil precisa avançar em termos legais para incentivar e promover o reaproveitamento energético dos subprodutos gerados no tratamento de esgoto, através de políticas e subsídios governamentais, assim como pelo incentivo das companhias de saneamento em pesquisas que promovam o aproveitamento energéticos dos subprodutos e recursos gerados ao longo do tratamento do esgoto sanitário.
- Atualmente a região Sul e Sudeste possuem ETEs com reaproveitamento energético. O Paraná é o estado com o maior potencial energético máximo de biogás no Brasil, mas aproveita apenas 0,4% deste potencial.
- Apesar do estado do Paraná estar na vanguarda da recuperação de energia de biogás e lodo, apresenta ainda baixos níveis de sustentabilidade energética das ETEs.
- Por fim, o Brasil deverá investir nos sistemas de coleta e tratamento de esgoto para melhorar a qualidade de vida das pessoas e possibilitar o

crescimento econômico. Com este intuito, os reatores UASB podem contribuir substancialmente para esta expansão.

### 1.13 REFERÊNCIAS

ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil). 2017. Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas/Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017. 88 p. il.

ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds) Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2001. 484 p., (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2012a. Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012 – In: Resoluções, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 20/12/2017.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2015a. Resolução Normativa N° 687, de 24 de novembro de 2015 – In: Resoluções, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 20/12/2017.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2014a. Chamada Estratégica N° 014/2012, Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração de Energia Elétrica a Partir de Biogás Oriundo de Resíduos e Efluentes Líquidos na Matriz Energética Brasileira”. Brasília, julho de 2012. Disponível em:<[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD-2012-Chamada%20PE%2014\\_23-07-12.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD-2012-Chamada%20PE%2014_23-07-12.pdf)>. Acesso em: 20/12/2017.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2014b. Micro e mini geração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica, Cadernos Temáticos ANEEL. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>>. Acesso em: 20/12/2017.

ARAÚJO, V.D.S.F. PROJETO ETE IBIRITÉ – MG. Viabilidade Econômica e Financeira. COPASA. 3º Workshop sobre aproveitamento energético de biogás de ETE. Curitiba-PR. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulicos sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

AZEVEDO NETTO, J. M. D. Aproveitamento do gás de esgotos. Revista DAE, nº 41, p. 30, 1977.

BALAT, M.; BALAT, H. Biogas as a Renewable Energy Source - A Review. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. v. 31, nº 14, p.1280-1293, 2009.

BARUFI, C.; SANTOS, E.; IDE, C. Autossuficiência Energética e Desenvolvimento: o Comércio de Gás Natural entre Brasil e Bolívia. Cadernos PROLAM/USP, ano 5, vol. 2, p. 183- 208, 2006.

BOGTE, J.; BREURE, A.; VAN ANDEL J.; LETTINGA, G. Anaerobic treatment of domestic wastewater in small scale UASB reactors. Water Science and Technology. v. 27 (9). p.75–82, 1983.

BOUGRIER, C.; DELGENES, J.P.; CARRERE, H. Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield. Trans IChemE, Part B. Process Safety and Environmental Protection, 84(B4), p. 280-284, 2006.

BRASIL. Lei 11.445 de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 29 dez. 2009.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, D. F., n. 53, 3 ago. 2010.

BRASIL. Portaria nº 23, 12/02/2015. D.O.U. MP, 2015. Disponível em: <[http://www.planejamento.gov.br/secretarias/upload/Legislacao/Portarias/2015/150213\\_port\\_23.pdf](http://www.planejamento.gov.br/secretarias/upload/Legislacao/Portarias/2015/150213_port_23.pdf)>. Acesso em: 05/11/2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375 de 29 ago 2006. Brasília: Governo Federal, 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em: 20 abr 2013. 12h30.

CABRAL, C. B. G. Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 139. 2016.

CAMARGO, E. B. Aproveitamento do metano do gás de esgoto em veículos. Revista DAE, nº 129, p. 5, 2009.

CAPODAGLIO, A.G.; CALLEGARI, A.; LOPEZ, M.V. European Framework for the Diffusion of Biogas Uses: Emerging Technologies, Acceptance, Incentive Strategies, and Institutional-Regulatory Support. Sustainability 2016, 8, 298; doi:10.3390/su8040298.

CASSINI, S. T. Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 210 p., 2003.

CENBIO - Centro Nacional De Referência Em Biomassa. Estimativa do Potencial de Geração de Energia a Partir do Biogás Proveniente da Criação de Suínos nos Municípios da Região Sul. Atlas de Biomassa: Biogás - Suínos, 2007. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/download/mapasbiomassa/Suinos>>. Acesso em: 20/01/2018.

CEPAL - Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Anuário Estadístico de América Latina y el Caribe, 2015 (LC/G.2656-P), Santiago, 2015, pg 59. Disponível em: <<http://repositorio.cepal.org/handle/11362/39867>>. Acesso em: março 2017.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. Vol. 5. 2ª. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

CHERNICHARO, C.A.L.; STUETZ, R.M. Energy Recover from Biogas in Anaerobic Wastewater Treatment Plants. 2008. In: CHERNICHARO, C.A.L. Limitações e Possíveis Melhorias Futuras no Projeto, na Construção e na

Operação de Reatores UASB Tratando Esgotos Domésticos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2009. Relatório final de atividades referente a pós-doutorado.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Reviews In Environmental Science And Bio/technology*, [s.l.], v. 14, n. 4, p.649-679, 21 set. 2015. Springer Science + Business Media. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11157-015-9377-3>>. Acesso em: 20/12/2017.

COSTA, D. F. Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás de Tratamento de Esgoto. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

COMUNIDADE EUROPEIA. CE. Diretiva 1999/ 31/ CE, de 26 de abril de 1999. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 182/1, 16.9.1999. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:182:0001:0019:PT:PDF>>. Acesso em: 29/01/2018.

COMUNIDADE EUROPEIA. CE. Diretiva 2006/ 12/ CE, de 05 de abril de 2006. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 114/9, 27.4.2006. Disponível em:<<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0009:0021:pt:PD>>. Acesso em: 29/01/2018.

COMUNIDADE EUROPEIA. CE. Diretiva 2009/ 28/ CE, de 23 de abril de 2009. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 140/16, 5.6.2009. Disponível em:<<http://www.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/pt/eu/eu212pt.pdf>>. Acesso em: 29/01/2018.

COMUNIDADE EUROPEIA. CE. Diretiva 2014/ 94/ UE, de 22 de outubro de 2014. *Jornal Oficial da União Europeia*, L 307/1, 28.10.2014. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex%3A32014L0094>>. Acesso em: 29/01/2018.

DENG, Y.; XU, J.; LIU, Y.; MANCL, K. (2014) Biogas as a sustainable energy source in China: Regional development strategy application and decision making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 35, p. 294-303.

EPA. Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities: Market Analysis and Lessons from the Field. EPA, U.S. Environmental Protection Agency. U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership. [S.l.]. 2011.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2022. Brasília. MME/EPE, 2013. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pdee/forms/epeestudo.aspx>>. Acesso em: 09/12/2017.

FARIA, R.A.P. (2012) Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – Estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

FERNANDES, F.; LOPES, D.D.; ANDREOLI, C.V.; SILVA, S.M.C.P. (2001) Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Cap. 7, p. 299-317.

FRANÇA JUNIOR, A. T. Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 148p. 2008.

Guest, Jeremy S, Steven J Skerlos, James L Barnard, M Bruce Beck, C H M Hill, North Carolina, Steven J Jackson, Linda Macpherson, and C H M Hill. A New Planning and Design Paradigm to Achieve Sustainable Resource Recovery from Wastewater 1. Environmental Science & Technology, v. 43, n. 16, 2009.

GARCILASSO, V.P.; FIGUEIREDO, N.J.V.; COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G. (2008a) Potencial de geração de energia elétrica e iluminação a gás por meio do aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário. In: Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, 7 Anais... 2008a. Fortaleza: Universidade de Fortaleza.

GARCILASSO, V.P.; FIGUEIREDO, N.J.V.; COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G. (2008b) Biogás e o mercado de créditos de carbono. In: RIO Oil & Gas Expo and Conference, 3 Anais... 2008b. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustível.

GRIN, P. C.; ROERSMA, R. E.; LETTINGA, G. Anaerobic treatment of raw sewage at lower temperatures. In: Proceedings of the BVC the European symposium on anaerobic wastewatertreatment, Noordwijkerhout, The Netherlands, 1983. p. 335–47. apud TAUSEEF, S. M.; TASNEEM, A. ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 19, p. 704–741, 2013.

GU, Y.; LI, Y.; LI, X.; LUO, P.; WANG, H.; ROBINSON, Z.; WANG, X.; WU, J.; LI, F. The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants. Applied Energy, v. 204, p.1463-75, 2017.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Japão. 2006.

ITB – Instituto Trata Brasil. Ociosidade das Redes de Esgotamento Sanitário no Brasil (2015). Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/estudos/ociosidade/relatorio-completo.pdf>> Acesso em: Maio/2017.

JENICEK P.; BARTACEK J.; KUTIL J.; ZABRANSKA J.; DOHANYOS M. Potentials and limits of anaerobic digestion of sewage sludge: energy self-sufficient municipal wastewater treatment plant? Water Sci Technol; 66:1277–81, 2012.

JIANG, X.; HAYASHI, J.; SUN, Z.Y.; YANG, L.; TANG, Y.Q.; OSHIBE, H.; OSAKA, N.; KIDA, K. (2013) Improving biogas production from protein-rich distillery wastewater by decreasing ammonia inhibition. Process Biochemistry, v. 48, p. 1778-1784.

JORDÃO, E.P e PESSÔA, C.A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 7ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

KELESSIDIS, A. & STASINAKIS, A.S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. Waste Management, v. 32, p. 1186-1195, 2012.

KHAN A. Municipal waste water treatment and energy recovery. In: Khanna S, Mohan K, editors. Wealth from waste. New Delhi: Tata Energy Research Institute; 1995. Apud TAUSEEF, S. M.; TASNEEM, A. ABBASI, S. A. Energy recovery from

wastewaters with high-rate anaerobic digesters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 19, p. 704–741, 2013.

KONRAD, O.; HEBERLE, A.N.A.; CASARIL, C.E.; KAUFMAN, G. B.; LUMI, M.; DALL’OGLIO, M.; SCHMITZ, M. Avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes e glicerina residual. *Revista Destaques Acadêmicos*, Lajeado, ano 2, n. 4, 2010.

LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A. F. M.; HOBMA, S. W.; DE ZEEUW. W.; KLAPWIJK, A. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, v.22 (4), p.699–734, 1980. apud TAUSEEF, S. M.; TASNEEM, A. ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 19, p. 704–741, 2013.

LIMA, A.; PASSAMANI, F. Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. 2012. 106 p. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

LOBATO, L.C.S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LONGO, S.; MIRKO, A.; BONGARDS, M; CHAPARRO, A.; CRONRATH, A.; FATORE, F; LEMA, J.; IGLESIAS, M.; SOARES, A.; HOSPIDO, A. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Applied Energy*, v.179, p. 1251-1268, 2016.

LOPES, Alexandre O.; PORTUGAL, Nilton S.; PORTUGAL, Pedro S. J.; GUEDES, Luiz C. V. Produção de Metano em estações de tratamento de esgotos e cogeração de energia elétrica: Um estudo de caso na ETE e passos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 31, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, 2011.

LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: *Lodos de Esgotos – Tratamento e Disposição Final*. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 484p.

MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.16, p. 2566-2582, 2012.

MARQUES, L.S. Avaliação dos benefícios ambientais e econômicos do aproveitamento do biogás do digestor anaeróbio para tratamento de lodo de esgoto. 2014. 53 p. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2014.

McCARTY, P.L.; BAE J.; KIM, J. Domestic wastewater treatment as a net energy producer can this be achieved? *Environ. Sci. & Technol.*, v. 45, p. 7100- 7106, 2011.

METCALF e EDDY. INC. Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos. 5. ed. New York, McGraw - Hill Book, 1815p., 2016.

MIKI, M. K.; ALEM SOBRINHO, P.; VAN HA- ANDEL, A. C. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: *Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento*. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MOREIRA, H.; POSSETTI, G; SOUZA, R.; KNOPKI, R.; ZAWADZKI, R. Diretrizes de capacitação para o uso de biogás de esgoto no Brasil. *Revista DAE*, v.66, nº 209, p. 134-150, 2017.

MUGA, H.E.; MIHELICIC, J.R. Sustainability of wastewater treatment technologies. *J Environ Manage* 2008; 88:437–47.

NORDBERG AKE. Review of European policies affecting implementation of anaerobic digestion. JTI - Swedish University of Agricultural Sciences. 2016. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/267415853>. Accessed on 10.11.2017.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J.M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J.E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology*, v. 5, p. 93-114, 2006.

NOYOLA, A.; PADILLA-RIVERA A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M. L.; GUERECA, L.P.; HERNANDEZ-PADILLA, F. Typology of Municipal Wastewater

Treatment Technologies in Latin America Clean – Soil, Air, Water, 40 (9), 926–932, 2012.12.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. Biomass & Bioenergy, v. 30, p.973-982, 2006.

PANEPINTO D, FIORE S, ZAPPONE M, GENON G, MEUCCI L. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. Applied Energy 2016; 161:404–11.

PECORA, V. Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEDROZA, M.M.; VIEIRA, G.E.G.; SOUSA, J.F.; PICKLER, A.C.; LEAL, E.R.M.; MILHOMEN, C.C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v.11, n. 16, p. 89-188, jul./dez. 2010.

PERES, L. Tarifas de Energia podem aumentar até 40%. Jornal Valor Econômico, p. Seção A3, 14 Janeiro 2015. Disponível em: <<https://www1.fazenda.gov.br/resenhaeletronica/MostraMateria.asp?cod=1014611>>. Acesso em: 20/01/2018.

PLANSAB. Plano Nacional de Saneamento Básico. Disponível em: <[http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos\\_PDF/plansab\\_06-12-2013.pdf](http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab_06-12-2013.pdf)>. 2013. Acesso em dez. 2017.

PORTAL BRASIL. Brasil é destaque global no uso de biomassa. 2011. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/brasil-e-destaque-global-no-uso-de-biomassa>>. Acesso em 28/11/2017.

PORTAL BRASIL. Capacidade instalada de geração de energia atinge 142.610 MW em março. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/05/capacidade-instalada-de-geracao-de-energia-atinge-142-610-mw-em-marco>. Acesso em 28/11/2017.

PÖSCHL, M.; WARD, S.; OWENDE, P. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy*, v. 87, p. 3305-3321, 2010.

POSSETTI, G. R. C. Probiogás: Resumo técnico do 4º Workshop Internacional sobre aproveitamento energético de biogás de ETEs. Probiogás; organizadores, Sanepar, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Hélinah Cardoso Moreira ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. 77 p.: il.

POSSETTI, G. R. C.; JASINSKI, V. P.; MESQUITA, N. C.; KRIGUEL, K.; CARNEIRO, C. Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico. In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária, Anais ... Goiânia – GO, 2013.

PROSAB. Reatores Anaeróbios – Proposta de Ação Conjunta entre Pesquisadores e Empresas de Saneamento apoiada pela FINEP. PROSAB. Encontro realizado durante o 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre - RS. 2011.

RIBEIRO, T.B., CHERNICHARO, C.A.L, GARCIA, G.B. (2016). Overview of sewage treatment in the South, Southeast and Midwest regions of Brazil: most employed technologies (Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas). *Revista DAE*, submitted. [in Portuguese].

RIO DE JANEIRO. Lei nº 6361, de 18 de dezembro de 2012. Dispõe sobre a política nacional de gás natural renovável - GNR, e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, 19 dez. 2012. Disponível em: Acesso em: 27/12/2017.

ROCHA, J.C., ROSA, A.H., CARDOSO, A.A (2004). *Introdução a química ambiental*. Porto Alegre: Bookman, 2004.

ROJAS, J.; ZHELEV, T. Energy efficiency optimization of wastewater treatment: study of ATAD. *Comput Chem Eng* 2012;38: 52–63.

ROSA, A. P. Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto. 172 f.

Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ROSA, A. P; CHERNICHARO, C.A.L.; A., MELO, G.C.B. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. Revista DAE, jan-abr. de 2015. 8 p.

ROSA, A. P; CONESA, J.A.; FULLANA; A., MELO G.C.B.; BORGES, J.M.; CHERNICHARO, C.A.L. Energy potential and alternative usages of biogas and sludge from UASB reactors: case study of the Laboreaux wastewater treatment plant. Water Science & Technology 73.7, 2016.

ROSENFELDT, S. et al. Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais 2015.

SALOMON, K.R.; LORA, E.E.S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. Biomass and Bioenergy, v.33, p.1101-1107. 2009.

SÃO PAULO. Lei Estadual no 13.798, de novembro de 2009. Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC). São Paulo: Assembleia Legislativa, 2009.

SHEN, Y.; LINVILLE, J.L.; URGUN – DEMIRTAS, M.; MINTZ, M.M.; SNYDER, S.W. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. Renewable and Sustainable Energy Reviews v. 50, p. 346–362, 2015.

SILVA, G. P. Tendências e Debates I - Tecnologias de Tratamento de Esgoto. Um Breve Comparativo. Ministério das Cidades. Apresentação feita drante a 44º Assembléia Nacional da ASSEMAE – UberlândiaMG. 2014.

SILVEIRA, B. et al. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, DF.: Ministério das Cidades, 183 p., 2015.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2007. Brasília: Ministério das Cidades, publicado em 2015. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2007>>. Acessado em: 15/07/2017.

SNIS – Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. (2012) Ministério das Cidades. Diagnóstico dos serviços de água e esgoto. 18ª ed. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=103>>. Acesso em: 24 maio 2017.

SNIS - Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. Ministério das Cidades. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2014. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento 2014. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br>>. Acesso em: março 2017.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2015. Brasília: SNSA/MCIDADES. Disponível em: <[www.snis.gov.br](http://www.snis.gov.br)>. Acesso em: março 2017.

SOARES, Camila Ferreira. Análise da viabilidade do uso de biogás gerado em reator UASB para geração de energia elétrica. 2011. 65 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Faculdade Itabirana de Desenvolvimento das Ciências e Tecnologias - Fatec, Itabira, 2011.

SOTO, M.; RUIZ, I.; FERREIRO, M.J.; VEIGA, M. C.; VEGAER, B. Anaerobic treatment of domestic and industrial (Low concentration) wastewaters. In: Proceedings of the 3rd international conference appropriate waste management technologies for developing countries, NERRI, Nagpur, 1995. p.3–11. apud TAUSEEF, S. M.; TASNEEM, A. ABBASI, S. A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 19, p. 704–741, 2013.

TAO, X; CHENGWEN, W. Energy consumption in wastewater treatment plants in China. World Congress on Water, Climate and Energy, 4 p. Ireland, 2014. DOI:10.13140/2.1.1228.9285

TCHOBANOGLIOUS, G., LEVERENZ, H. Impacts of New Concepts and Technology on the Energy Sustainability of Wastewater Management.

Conference Climate Change, Sustainable Development, and Renewable Energy Sources. Thessaloniki, 2009.

TRICASE, C.; LOMBARDI, M. State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: technical-economic considerations. *Renewable Energy*, v. 34 (3), p.477– 85, 2008.

USEPA, U.S. Environmental Protection Agency. 2010. Disponível em: <[http://www.epa.gov/ttn/chief/efpac/ghg/GHG\\_Biogenic\\_Report\\_draft\\_Dec1410.pdf](http://www.epa.gov/ttn/chief/efpac/ghg/GHG_Biogenic_Report_draft_Dec1410.pdf)>. Acesso em: 14/10/2017.

VALENTE, V. B. Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil. 182f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgoto: um manual para regiões de clima quente. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994.

VAN HAANDEL. A.; KATO, M.T.; CAVALCANTI, P.F.F; FLORENCIO, L. Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 5, p. 21–38, 2006.

VAN HAANDEL, A.C.; ALEM SOBRINHO, P. (2006). Produção, composição e constituição de esgoto. In: *Biossólidos – Alternativas de Uso de Resíduos de Saneamento*. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 417p.

VILLANI JR., W. Gestão energética em ETEs. Um novo paradigma. SeMAE São José do Rio Preto. 44º Assembleia Nacional da ASSEMAE. Uberlandia. 2014.

WETT, B., BUCHAUER K., FIMML C. Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems. In: *IWA leading edge technology conference*. Singapore: Asian Water; 2007. p. 21–4.

ZABRANSKA, J., JENICEK, P., KUTIL, J. & DOHANYOS, M. 2009 Intensification of anaerobic sludge digestion towards the energy self-sufficiency of municipal wastewater treatment. In: *Proceedings of the 12th IWA Sludge*, 8–10 August 2009, Harbin, China.

ZANETTE, A. L. Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. 2009. 97 p. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZILOTTI, H.A.R. Potencial de produção de biogás em uma Estação de tratamento de esgoto de cascavel para a geração de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

## **2 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS SUBPRODUTOS LODO E BIOGÁS EM ETEs OPERADAS POR REATORES UASB NO ESTADO DO PARANÁ - BRASIL.**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

O setor de saneamento no Brasil ainda carece de significativos avanços, principalmente no tratamento de esgotos. Ainda, o setor de saneamento é um grande consumidor de energia elétrica, sendo o segundo maior custo operacional das companhias de saneamento. O investimento em saneamento promove mitigação de impactos ambientais e qualidade de vida à população. Para isso, as estações de tratamento de esgoto (ETEs) atuais deverão ser ampliadas e outras deverão ser construídas (MOREIRA, 2017). Diante disso, a preocupação com a gestão, a sustentabilidade e a otimização dos processos são de grande importância para a eficiência do tratamento (SILVA, 2015; SHIRADO, 2014).

As ETEs são unidades projetadas para o tratamento de águas residuárias de origem doméstica e industrial com o objetivo da remoção de sólidos sedimentáveis, flotáveis e matéria orgânica, além de eliminar nutrientes e maus odores, reduzindo a carga poluidora a ser disposta no meio ambiente. Atualmente, as ETEs são vistas como potenciais fontes de energia renováveis (PANEPINTO et al., 2016; VERA et al., 2015; AHMETOVIC et al., 2014; TCHOBANOGLIOUS et al., 2009).

Neste contexto, destaca-se o emprego dos reatores anaeróbios de UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) dentre as alternativas tecnológicas para o tratamento de esgoto, por apresentar capacidade de gerar subprodutos lodo e biogás com potenciais energéticos, além de ser de baixo custo de implantação e operação, baixa demanda de área e baixo nível de consumo energético (CHERNICHARO, 2008).

De acordo com Metcalf e Eddy (2016), o reator UASB é o processo anaeróbio mais utilizado para o tratamento de esgoto doméstico em escala mundial. Segundo Ribeiro et al. (2016) no Brasil são contabilizadas 658 estações em escala real operadas por reatores UASB, com uma capacidade de tratamento de

esgoto de aproximadamente 21,9 milhões de habitantes, o equivalente a uma vazão tratada da ordem de  $43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Embora ainda existam algumas limitações de projeto, construção e operação, é senso comum que o tratamento anaeróbio de esgoto tem se consolidado, com um enorme potencial para contribuir com estações de tratamento de esgoto mais sustentáveis em termos energéticos (RIBEIRO et al., 2016).

Segundo Valente (2015), o principal subproduto em termos energéticos nos reatores UASB é o biogás, o qual pode contribuir com geração de energia elétrica para uso em benefício da própria ETE ou inserida na rede de distribuição. Em adição, a recuperação da energia térmica liberada com a queima do biogás pode conferir benefícios em termos da redução da quantidade de lodo destinado ao aterro sanitário no processo de secagem.

O biogás é uma fonte de energia renovável advindo da degradação da matéria orgânica que, caso venha a ser recuperado contribui para o aumento da eficiência operacional das ETEs, além de proporcionar a redução das emissões de gases do efeito estufa e contribuir para diminuição de maus odores ao redor das ETEs (SILVEIRA et al., 2015; ICLEI, 2010; IPCC, 2006; NOYOLA et al., 2006).

O lodo pode vir a ser outra fonte de energia renovável nas ETEs. O tratamento e a disposição final do lodo são tópicos na engenharia sanitária como o grande desafio futuro no âmbito do saneamento. O Andreoli et al. (2001) aponta que o tratamento do lodo representa de 20% a 60% dos custos operacionais das ETAs e ETEs. Porém, as empresas de saneamento são obrigadas por legislação ambiental a destinar de forma correta este subproduto do tratamento. Rosa et al. (2016) diz que apesar das inseguranças sanitárias e ambientais, alternativas tem sido proposta, porém todas apresentam ressalvas.

Atualmente o destino final do lodo mais comum em vários países, inclusive no Brasil, são os aterros sanitários, o que pode ocasionar a contaminação dos solos e emissão de odores desagradáveis, além dos elevados gastos com o transporte, desperdiçando assim o potencial dos nutrientes e/ou energético do lodo desidratado (ROSA, 2013). Entretanto, segundo Metcalf e Eddy (2016), a demanda de energia das ETEs, em muitas ocasiões, pode ser suprida pela

digestão anaeróbia do lodo. Houdková et al. (2008), analisa na perspectiva do gerenciamento do lodo, a autossuficiência energética de um ETE pode ser assegurada por meio de estudos e escolhas de alternativas mais vantajosas.

O estado do Paraná (Brasil) apresenta uma situação de destaque em termos de esgotamento sanitário, com uma população de 11,2 milhões de habitantes, em que 96,3% dos domicílios são atendidos com coleta e 67,7% com o tratamento de esgoto (IBGE, 2016).

A companhia de saneamento do estado do Paraná a partir da década de 1970, optou pelo tratamento de esgoto utilizando sistemas anaeróbios, sendo destaque no cenário brasileiro pela intensa atividade de inovação tecnológica, atualmente das 235 ETEs em funcionamento no estado, 182 são operadas por reatores UASB, com vazões variando de 3 L.s<sup>-1</sup> a 4032 L.s<sup>-1</sup> (SANEPAR, 2016).

No Estado do Paraná apenas duas ETEs realizam o aproveitamento energético do biogás, destaque para a ETE Ouro Verde que utiliza reatores UASB, situada no município de Foz do Iguaçu, a qual foi precursora no país a utilizar o biogás como fonte de energia. Além disso, foi a primeira ETE brasileira a ser conectada à rede de distribuição de energia elétrica e cadastrada junto a Agência Nacional de Energia Elétrica. Na ETE Belém, a qual emprega reatores aeróbios no tratamento de esgoto, situada no município de Curitiba é prevista a produção de eletricidade por meio de uma usina com potência instalada de 2,8 mega-watts (MW) (ZILOTTI, 2012).

Destaca-se a dificuldade nas ETEs brasileiras de se realizar o monitoramento das características qualitativas e quantitativas dos subprodutos biogás e lodo nos reatores UASB em escala plena devido à limitação operacional, recursos e programas de monitoramento. Segundo Silva (2015), esse fato é justificado devido à complexidade para tal determinação, métodos onerosos, necessidade de coletas em campo e realização de ensaios laboratoriais. Diante das limitações nas medições da produção dos subprodutos *in situ* em reatores UASB, o emprego de modelos matemáticos para prever a geração e o potencial energético dos subprodutos é de grande interesse. Avanços dentro deste contexto são apresentados pelas metodologias já validada e calibradas,

propostas por Lobato (2011) e Rosa (2013) para o biogás e lodo, respectivamente.

Outra ferramenta de destaque dentro dos estudos de concepção, projeto e tomada de decisão no setor de Saneamento Básico é o Sistema de Informações Geográficas (SIG), a qual é capaz de auxiliar de forma simples e eficiente, favorecendo a economia de recursos, com a proposta de unir dados espaciais e alfanuméricos do cadastro técnico e comercial juntamente com informações do uso e ocupação do solo, geologia, geomorfologia, pedologia, hidrografia e outros, promovendo análises de ocupação do solo, caracterização de demandas, visualização de áreas de interesse e de ocupação, pontos de vazamento e elementos do sistema de abastecimento (RIBEIRO, 2012).

A fim de valorizar e beneficiar a recuperação de energia de subprodutos, o uso de modelos matemáticos e do SIG configuram ferramentas úteis para estimar e avaliar o potencial energético dos subprodutos em reatores UASB, além de incentivar a sustentabilidade energética em ETEs e contribuir para a tomada de decisões nas companhias de saneamento para o gerenciamento dos subprodutos. Com o objetivo de contribuir com esse assunto, este capítulo teve como objetivo estimar e espacializar o potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás) em ETEs operados por reatores UASB no estado do Paraná/Brasil.

## **2.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.2.1 Área de estudo**

O estudo foi realizado em 182 estações de tratamento de esgoto do estado do Paraná que operam com reatores UASB, das quais 158 utilizam o leito de secagem como unidade de desidratação, 8 utilizam a centrífuga e 16 não possuem unidades em operação.

O Paraná é uma unidade federativa do Brasil, localizado na região Sul do país, com uma área aproximadamente 435,036 km<sup>2</sup> e 399 municípios. O estudo do potencial energético dos subprodutos lodo e biogás foi realizado a partir de dados secundários fornecidos pela companhia de saneamento estadual do Paraná no ano de 2016. O banco de dados para as ETEs compreendeu dentre

outras informações, a vazão, a indicação das unidades de desidratação e localização das ETEs.

As ETEs foram classificadas de acordo com o Instituto Ambiental do Paraná (IAP) e a Resolução CONAMA nº 377/2006, a qual considerou-se os portes em função das faixas de vazão, a saber: (i) pequeno porte com vazão até  $56 \text{ L.s}^{-1}$ ; (ii) médio porte com vazão de 57 até  $463 \text{ L.s}^{-1}$  e (iii) grande porte acima de  $464 \text{ L.s}^{-1}$ . A Figura 8 ilustra espacialmente as ETEs que operam por reatores UASB no estado do Paraná, classificadas de acordo com o seu porte.

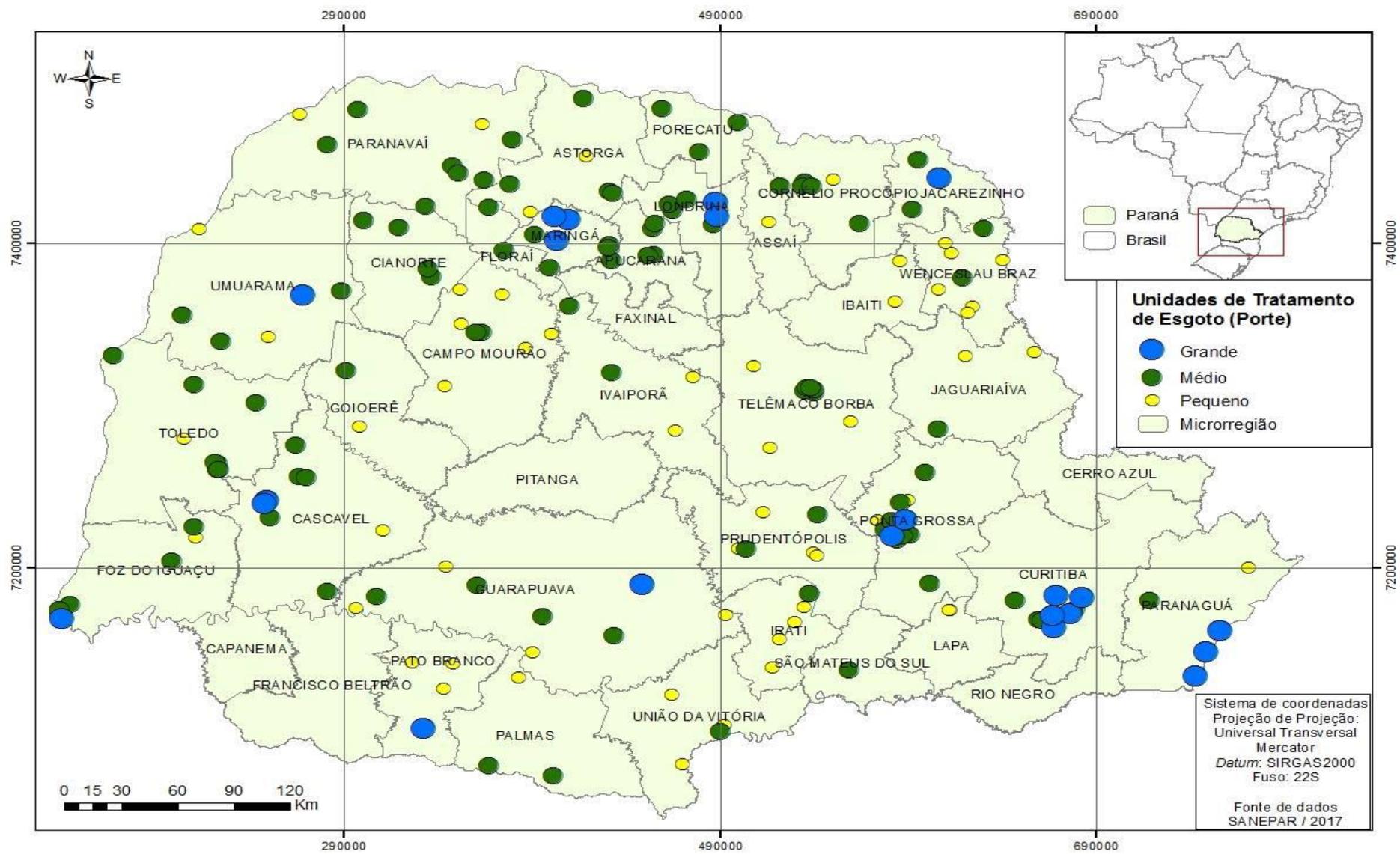


Figura 8 - Localização das ETEs que operam por reatores UASB no estado do Paraná de acordo com classificação dos portes das estações.

## 2.2.2 Avaliação do potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás) gerados em reatores UASB no estado do Paraná.

O modelo empregado para a estimativa do potencial energético do lodo e do biogás nos reatores UASB foi elaborado de acordo com três cenários (i) pior; (ii) típico e (iii) melhor como descrito na Tabela 11, a qual consideram os potenciais de geração dos subprodutos para diferentes características do esgoto bruto, o cenário típico correspondente às condições intermediárias para os dois cenários apresentados. A avaliação do potencial energético do lodo e do biogás para as ETEs foi realizada pelo emprego do modelo matemático proposto por Rosa (2013) e Lobato (2011), respectivamente.

Os mapas temáticos utilizados para representar o potencial energético dos subprodutos foram elaborados utilizando o *software* ArcGIS® 10.2, da Environmental Systems Research Institute (ESRI).

**Tabela 11 - Descrição das características do pior e melhor cenários para o modelo matemático relativo ao lodo e biogás gerados em reatores UASB.**

	Pior	Melhor
Aspectos relacionados ao biogás <sup>1</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas operando com esgoto mais diluído</li> <li>• Maiores concentrações de sulfato no afluente</li> <li>• Menor eficiência de remoção de DQO</li> <li>• Maiores índices de perda de metano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas operando com esgoto mais concentrados</li> <li>• Menores concentrações de sulfato no afluente</li> <li>• Maior eficiência de remoção de DQO</li> <li>• Menores índices de perda de metano</li> </ul>
Aspectos relacionados ao lodo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada presença de cinzas</li> <li>• Baixa concentração de hidrogênio</li> <li>• Baixo teor de sólidos fixos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzida presença de cinzas</li> <li>• Elevada concentração de hidrogênio</li> <li>• Elevado teor de sólidos fixos</li> </ul>

**Fonte:** Lobato (2011) e Rosa (2013)

A Tabela 12 apresenta os dados de entrada e as condições previstas para os cenários avaliados considerando-se o modelo de Rosa (2013) e Lobato (2011).

**Tabela 12 - Dados de entrada para elaboração do modelo proposto por Rosa (2013) e Lobato (2011).**

Componente	Parâmetro	Unidade	Cenário		
			Pior	Típica	Melhor
<b>BIOGÁS</b>	População contribuinte (Pop)	hab.	1.000 a 1.000.000		
	Contribuição per capita de esgoto (QPC)	L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	120 a 220		
	Contribuição per capita de DQO (QPC <sub>DQO</sub> )	L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	90 a		
	Eficiência de remoção de DQO (E <sub>DQO</sub> )	%	60	65	70
	Concentração de sulfato no afluente (C <sub>SO4</sub> )	kgSO <sub>4</sub> .m <sup>-3</sup>	80	60	40
	Eficiência de redução de sulfato (E <sub>SO4</sub> )	%	80	75	70
	Temperatura operacional do reator (T)	°C	20 a 30		
	Percentual de CH <sub>4</sub> no biogás (C <sub>CH4</sub> )	%	70	75	80
<b>Lodo gerado no reator UASB</b>					
	Massa específica	kg.m <sup>-3</sup>	1.020 a 1.030		
	Concentração de sólidos secos	%	3 a 6		
	Coefficiente de produção de sólidos	kg SS.kgDQO <sub>aplicada</sub> <sup>-1</sup>	0,18		
<b>Lodo gerado na unidade de desidratação (filtro prensa, leito de secagem e centrífuga)</b>					
<b>LODO EXCEDENTE</b>	Captura de sólidos – centrífuga	%	90 a 95		
	Captura de sólidos – filtro prensa	%	90 a 98		
	Concentração do lodo desidratado -	%	20 a 25		
	Concentração do lodo desidratado – filtro	%	29 a 35		
	Massa específica do lodo desidratado	kg.m <sup>-3</sup>	1.050 a 1.080		
	Carbono (C) <sup>1</sup>	%	18	30	38
	Hidrogênio (H) <sup>1</sup>	%	3,6	4,4	6,1
	Nitrogênio (N) <sup>1</sup>	%	1,6	1,9	2,5
	Enxofre (S) <sup>1</sup>	%	0,8	1,2	1,4
	Oxigênio (O) <sup>1</sup>	%	21	22	24
Cinzas <sup>1</sup>	%	55	40,5	28	

Fonte: Rosa (2013) e Lobato (2011).

Considerando a vazão média afluente o principal parâmetro de monitoramento para as ETEs monitoradas, a Tabela 13 apresentam um resumo das equações propostas no modelo proposto por Rosa (2013) e Lobato (2011) para a estimativa do potencial energético disponível do biogás e do lodo, respectivamente.

**Tabela 13 - Equações para a estimativa do potencial energético do lodo e biogás (eixo y) a partir da vazão afluente em ETEs (eixo x) operadas por reatores UASB.**

Unidade	Relação	Cenário					
		Pior		Típico		Melhor	
		Equação	(R <sup>2</sup> )	Equação	(R <sup>2</sup> )	Equação	(R <sup>2</sup> )
<b>Biogás</b>	L.s <sup>-1</sup> x MJ.d <sup>-1</sup>	y = 116,37x	0,52	y = 181,74x	0,70	y = 214,68x + 38.417	0,78
<b>L.S</b>	L.s <sup>-1</sup> x MJ.d <sup>-1</sup>	y = 34,26x	0,72	y = 103,08x	0,85	y = 146,88x + 0,341	0,85
<b>C</b>	L.s <sup>-1</sup> x MJ.d <sup>-1</sup>	y = 0	-	y = 9,7312x	0,87	y = 22,594x + 2.589,6	0,87

C: centrífuga, L.S: Leito de secagem.

Fonte: Rosa (2013) e Lobato (2011).

Para a confecção dos mapas temáticos e realização da análise espacial qualitativa e quantitativa considerou-se todo o estado do Paraná, sendo utilizada

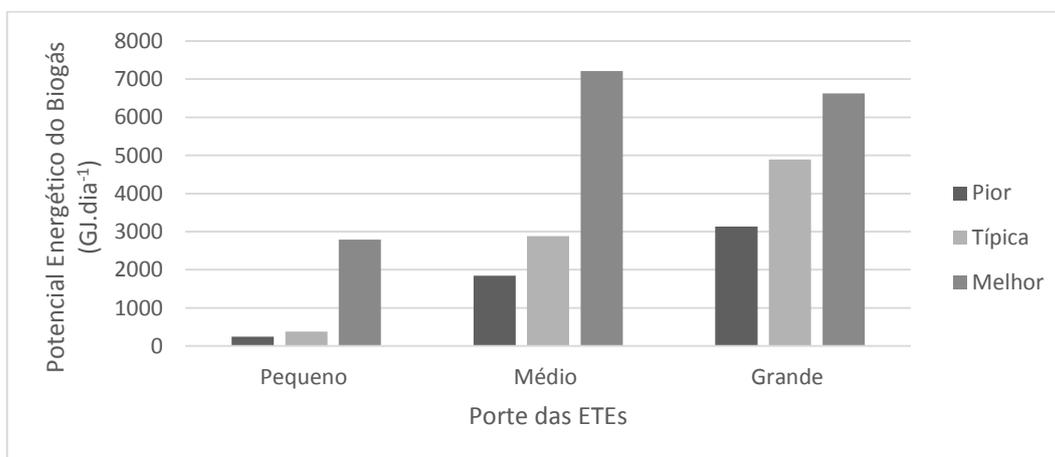
as microrregiões de planejamento disponibilizado pelo sistema de bases e referenciais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Com o auxílio do *software* ArcGIS® 10.2 os dados de localização geográfica, vazão e potencial energético das ETEs, foram convertidas em arquivo vetorial do tipo ponto no formato *shapefile* (\*.shp) utilizando a ferramenta Add XY data. Por meio da extensão *Analysis Tools (Spatial Join)* os elementos espaciais da planilha com a tabela de atributos do *shapefile* foram associados às microrregiões do Paraná. Para a classificação dos potenciais foi utilizado a ferramenta *Symbology* em *layer properties*.

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 2.3.1 Potencial Energético do Biogás

Na Figura 9 é apresentado o potencial energético total do biogás para as ETEs do Paraná para diferentes portes, considerando-se o pior, típico e melhor cenários.



**Figura 9 - Potencial energético do biogás nas ETEs do Paraná.**

O estado do Paraná possui 33% (61 unidades) das ETEs que operam por reatores UASB classificadas como pequeno porte. Como observado na Figura 8, o potencial energético destas ETEs é o menor dentre os portes das estações avaliadas. Para o cenário típico este potencial foi de 381 GJ.dia<sup>-1</sup>, representando apenas 13% e 7% do potencial energético das ETEs de médio e grande porte, respectivamente, para esse cenário.

A maioria das ETEs do estado do Paraná, cerca de 54% (99 unidades) são de médio porte. Considerando o cenário típico, o potencial energético total do

biogás para as ETEs de médio porte é de 2883 GJ.dia<sup>-1</sup>. Em contrapartida, as ETEs de grande porte representam apenas 12% (22 unidades) das estações e detêm um potencial de 4893 GJ.dia<sup>-1</sup> considerando o cenário típico.

Considerando o cenário típico, o potencial energético das ETEs de pequeno, médio e grande convertidos em energia elétrica por meio da instalação de equipamentos de conversão com eficiência média de 30%, geraria 680 MWh.dia<sup>-1</sup>, com a capacidade de atender a 111 mil residências tendo como valor de referência um consumo de energia per capita de 0,0061 MWh.d<sup>-1</sup> (EPE, 2017)

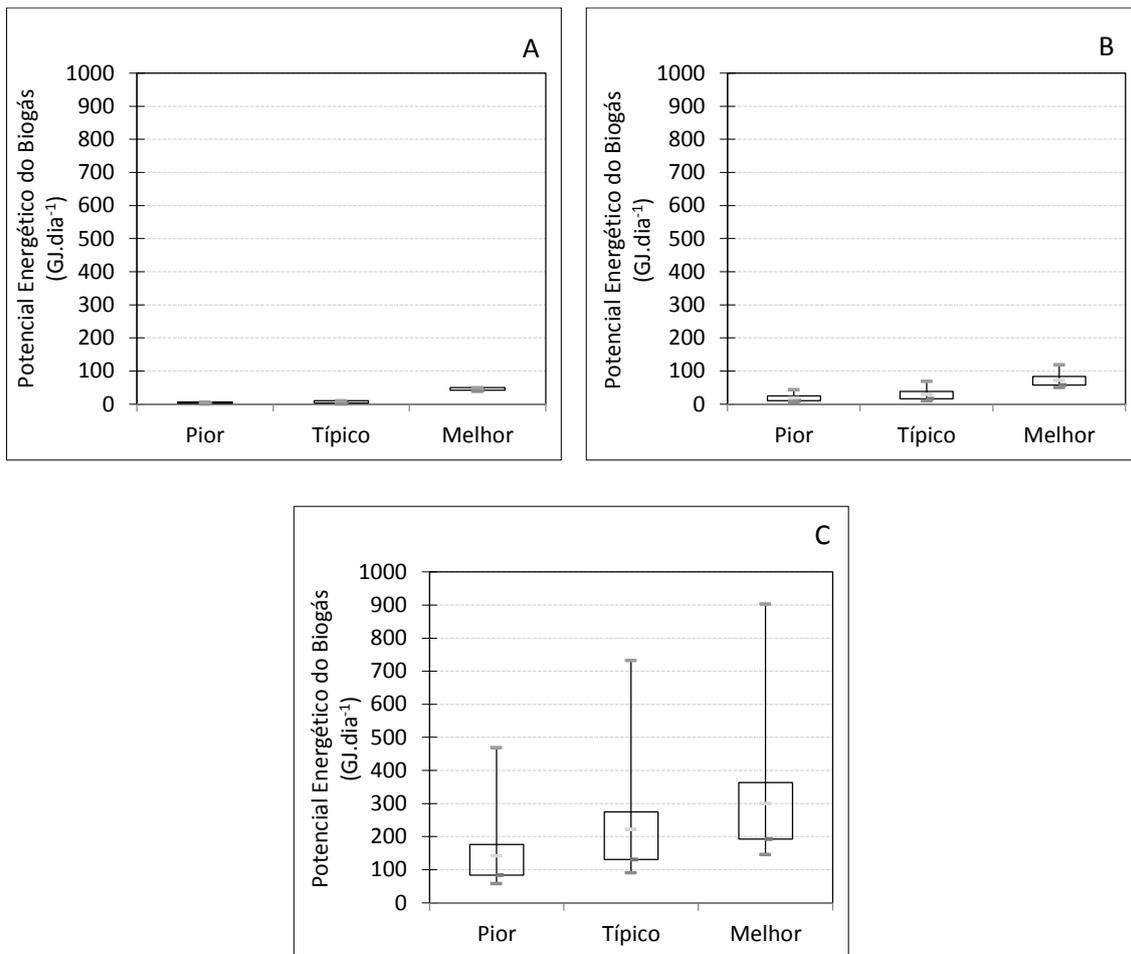
Apenas a ETE Ouro Verde, a qual utiliza reator UASB, promove o aproveitamento energético do biogás à eletricidade no estado do Paraná. Considerando a situação atual do aproveitamento energético do biogás no Paraná, a ETE que gera eletricidade a partir do biogás produz 1,6% da capacidade máxima a ser explorada para as ETEs de médio porte, para o cenário típico, o que aponta para a necessidade de investimentos na recuperação energética do subproduto diante do elevado potencial a ser explorado.

Apesar do menor número, as ETEs de grande porte possuem um potencial energético do biogás 13 vezes maior que as ETEs de pequeno porte e 1,7 vezes as ETEs de médio porte considerando o cenário típico. Diante disso, identifica-se a maior viabilidade do aproveitamento energético do biogás em ETEs de grande porte.

A Figura 10 apresenta o potencial energético do biogás para os diferentes cenários e diferentes portes por meio do diagrama de caixa.

Apreende-se que o valor médio do potencial energético do biogás para as ETEs de pequeno porte para o pior e típico cenário foi de 4 a 6 GJ.dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Os resultados do melhor cenário destoam dos demais, alcançando valor mínimos de 39 GJ.dia<sup>-1</sup>.

A análise das 99 ETEs de médio porte indicam potenciais energéticos médios para os cenários pior, típico e melhor de 19, 29 e 73 GJ.dia<sup>-1</sup> respectivamente. No cenário típico ressalta-se que 75% das ETEs têm um potencial energético do biogás de até 38 GJ.dia<sup>-1</sup>.



**Figura 10 - Potencial energético do biogás para o pior, típico e melhor cenário no estado do Paraná, considerando-se as ETEs de. (a) pequeno porte, (b) médio porte e (c) grande porte.**

Apesar do menor número de ETEs classificado como grande porte, as 22 ETEs possuem um potencial de biogás elevado em relação às ETEs de pequeno e médio porte. Observa-se que, para o pior cenário, 75% das estações tem o potencial de produzir 176 GJ.day<sup>-1</sup> podendo atingir 363 GJ.day<sup>-1</sup> para o melhor cenário. Os valores médios da energia obtida pela recuperação energética do biogás para as estações de grande porte corresponderam a 142, 222 e 301 GJ.day<sup>-1</sup> para os cenários pior, típico e melhor, respectivamente.

A Figura 11 apresenta o potencial energético do biogás individual para ETEs operadas por reator UASB e por microrregião do estado do Paraná de acordo com o cenário típico. Por meio da estimativa do potencial energético do biogás gerado em reatores UASB pode-se vislumbrar, planos estratégicos para investimentos futuros no reaproveitamento energético do subproduto.

A maior parte das ETEs (123 unidades) operadas por reator UASB no Paraná tem potencial energético do biogás abaixo de  $30 \text{ GJ.dia}^{-1}$ . Entretanto, 19 ETEs possuem potencial maior que  $100 \text{ GJ.dia}^{-1}$ , sendo todas de grande porte.

Observa-se que as microrregiões de Curitiba e Londrina apresentam os maiores potenciais energéticos de biogás, ultrapassando o patamar  $1000 \text{ GJ.dia}^{-1}$ , sendo que a microrregião de Curitiba é responsável por 30% do potencial energético do estado. As microrregiões de Maringá e Ponta Grossa também apresentam elevado potencial do biogás, variando dentro da faixa de 500 a  $1000 \text{ GJ.dia}^{-1}$ . As demais microrregiões do estado do Paraná possuem valores para a recuperação energético do biogás abaixo de  $100 \text{ GJ.dia}^{-1}$ . As microrregiões de Faxinal, Pitanga, Capanema, Francisco Beltrão, Rio Negro e Cerro Azul não possuem potenciais devido à ausência de ETEs operando por reatores UASB em operação.

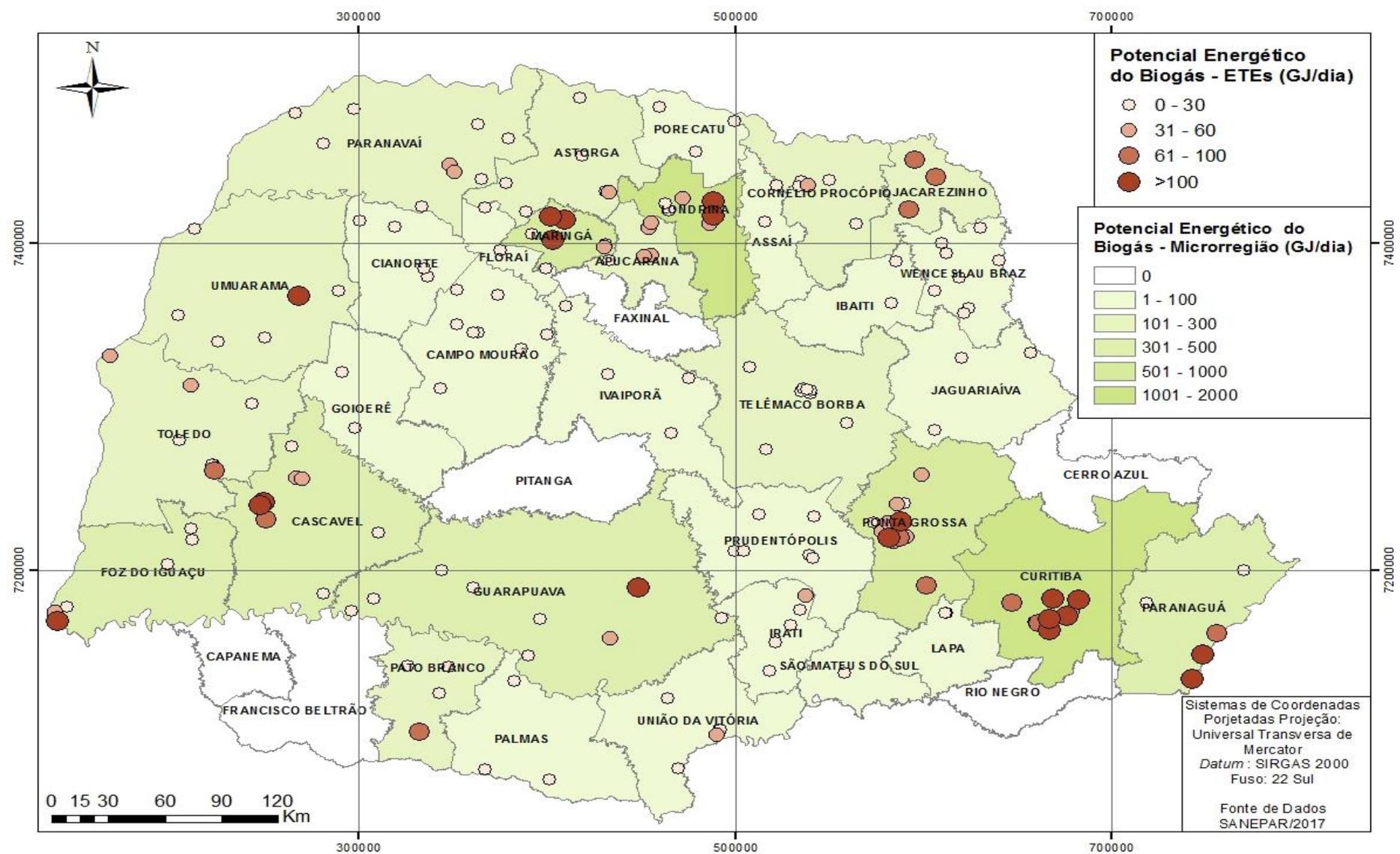


Figura 11 - Distribuição espacial do potencial energético do biogás gerado em reatores UASB do estado do Paraná.

A Tabela 14 apresenta as microrregiões do estado do Paraná com potencial energético do biogás acima de 500 GJ.dia<sup>-1</sup>.

**Tabela 14 - Microrregiões do estado do Paraná com potencial energético do biogás acima de 500 GJ.dia<sup>-1</sup>.**

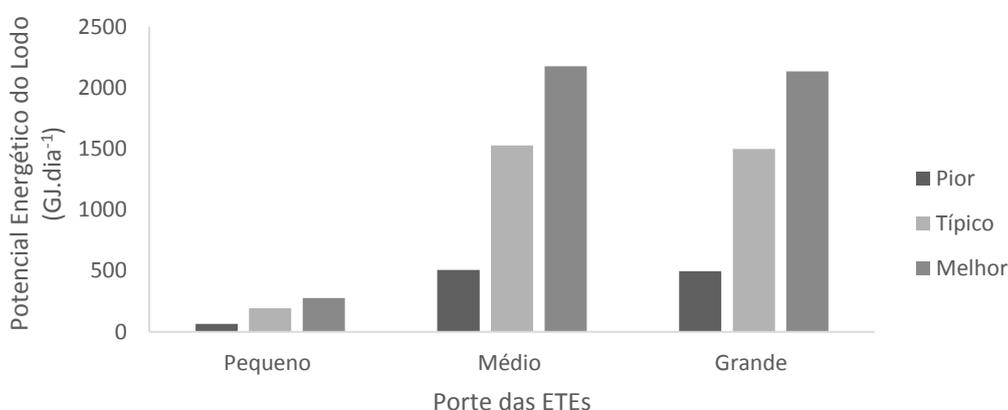
MICRORREGIÃO	ETE	Vazão (L.s <sup>-1</sup> )	Porte da ETE	Potencial Energético do biogás (GJ.dia <sup>-1</sup> )	Total
CURITIBA	1	72	Médio	13	2.477
	2	252	Médio	46	
	3	341	Médio	62	
	4	360	Médio	65	
	5	756	Grande	137	
	6	1.512	Grande	275	
	7	1.512	Grande	275	
	8	1.764	Grande	321	
	9	4.032	Grande	733	
LONDRINA	10	108	Médio	20	1.022
	11	144	Médio	26	
	12	198	Médio	36	
	13	198	Médio	36	
	14	252	Médio	46	
	15	2.358	Grande	429	
	16	2.358	Grande	429	
MARINGÁ	17	108	Médio	20	781
	18	144	Médio	26	
	19	198	Médio	36	
	20	821	Grande	149	
	21	1.300	Grande	236	
	22	1.728	Grande	314	
PONTA GROSSA	23	18	Pequeno	3	701
	24	27	Pequeno	5	
	25	180	Médio	33	
	26	180	Médio	33	
	27	180	Médio	33	
	28	180	Médio	33	
	29	288	Médio	52	
	30	288	Médio	52	
	31	360	Médio	65	
	32	360	Médio	65	
	33	720	Grande	131	
	34	1.080	Grande	196	

Observa-se que as quatro microrregiões possuem em sua maioria ETEs de médio e grande porte, sendo que Ponta Grossa detém duas unidades de pequeno porte. Dentre as microrregiões com potencial acima de 500 GJ.dia<sup>-1</sup>, Curitiba detém 49,7% do potencial energético do biogás. As microrregiões de

Curitiba e Ponta Grossa apresentam um potencial energético de 3.178 GJ.dia<sup>-1</sup>. Além disso, a proximidade das microrregiões de Curitiba e Ponta Grossa pode viabilizar projetos de aproveitamento energético.

### 2.3.2 Potencial Energético do Lodo

O lodo gerado nas ETEs do estado do Paraná normalmente é desidratado em leito de secagem ou centrífuga e tem como destino final a aplicação agrícola e/ou aterro sanitário. A Figura 12 apresenta o potencial energético total do lodo gerado em leito de secagem, de acordo com os portes das ETEs do Paraná e os diferentes cenários avaliados.



**Figura 12 - Potencial energético do lodo gerado em reatores UASB nas ETEs do estado do Paraná, considerando leito de secagem como unidade de desidratação.**

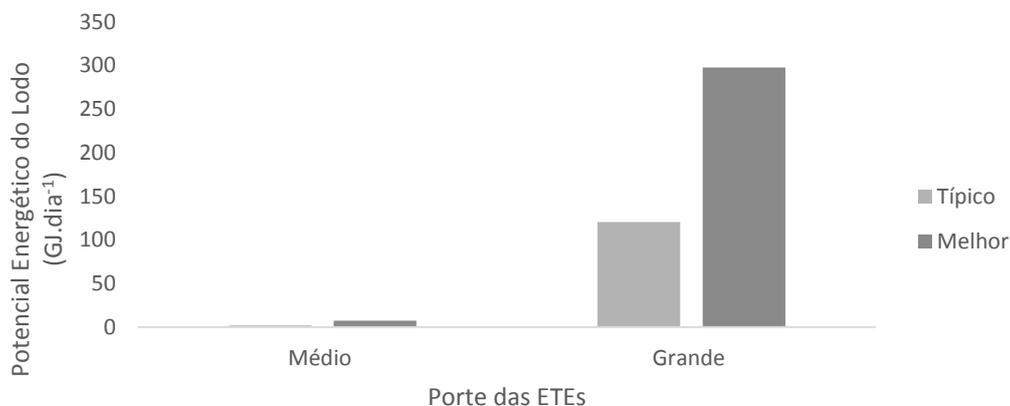
As ETEs de pequeno porte que utilizam o leito de secagem como unidade de desidratação compreendem 52 unidades (33% das ETEs) e possuem potencial energético do lodo correspondente a 276, 194 e 64 GJ.dia<sup>-1</sup> para o melhor, típico e pior cenário, respectivamente.

As ETEs de médio porte perfazem 58% (91 unidades) e apresentam um potencial energético para o lodo para o cenário típico de 1.528 GJ.dia<sup>-1</sup>.

As ETEs de grande porte compreendem apenas 15 unidades (9% das ETEs), tendo potencial energético do lodo para o pior, típico e melhor cenário de 498, 1.499 e 2.136 GJ.dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Salienta-se que as 15 estações de grande porte gerariam 98% do potencial energético do lodo produzido pelas 91 estações de médio porte considerando o cenário típico.

A Figura 13 apresenta o potencial energético total do lodo gerado em centrífuga, de acordo com os portes das ETEs do Paraná e cenários avaliados. Identifica-

se a ausência de ETEs de pequeno porte com desidratação do lodo por centrífugas.



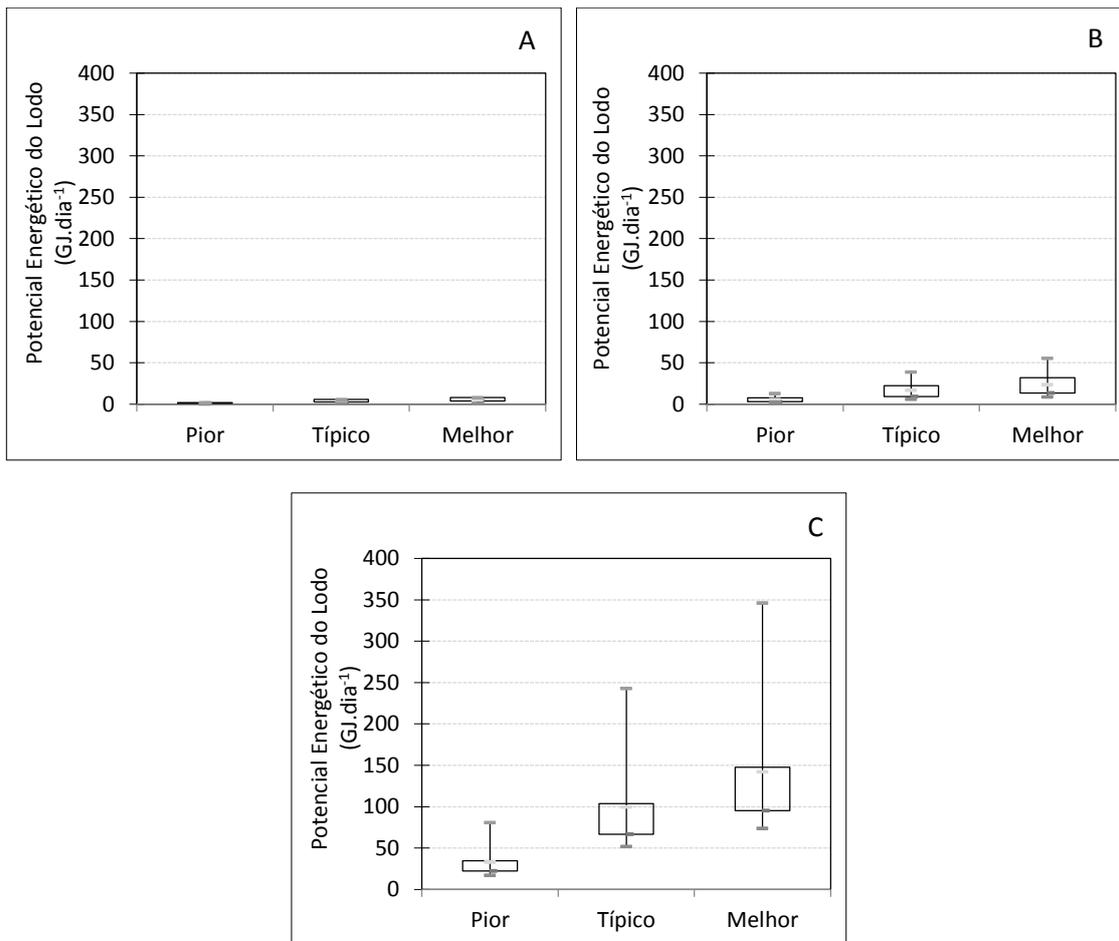
**Figura 13 - Potencial energético de lodo gerado em reatores UASB nas ETEs do estado do Paraná considerando centrífuga unidade de desidratação.**

Para as unidades de desidratação que utilizam a centrífuga, as ETEs de grande porte (7 unidades) tiveram um maior potencial, cerca de 298 e 121 GJ.dia<sup>-1</sup> para o melhor e típico cenário, ressalta-se que o para o pior cenário a energia contida no lodo foi considerada inexistente em função da elevada umidade do subproduto.

As ETEs de médio porte apresentam reduzida contribuição no potencial energético do lodo, pela presença de apenas uma estação (ETE Biguaçu) que opera com centrífuga. Ainda assim, o lodo proveniente da estação para os cenários típico e melhor apresentou o potencial de 2 e 7 GJ.dia<sup>-1</sup>, respectivamente.

De forma geral, o emprego do leito de secagem em relação à centrífuga para os cenários estudados, aponta para um maior interesse de recuperação do lodo do ponto de vista energético, em função dos menores teores de umidade na torta de lodo.

A Figura 14 apresenta os diagramas de caixa com a variação do potencial energético do lodo desidratado na unidade de leito de secagem considerando os portes das estações e os diferentes cenários avaliados.



**Figura 14 - Potencial energético do lodo nas ETEs operadas com reatores UASB no estado do Paraná com desidratação por leito de secagem para o pior, típico e melhor cenário. (a) pequeno porte, (b) médio porte e (c) grande porte.**

Os valores máximos e de 75% coincidiram para as estações de pequeno porte, sendo de 2, 6 e 8 GJ.dia<sup>-1</sup>, para pior, típico e melhor cenário, respectivamente. Verifica-se ainda, que as ETEs de pequeno porte possuem valores médios de 1, 4 e 5 GJ.dia<sup>-1</sup>. Destaque para os valores máximos das ETEs de médio porte atingindo os patamares de 13, 39 e 56 GJ.dia<sup>-1</sup> enquanto 75% dos valores estão abaixo de 7, 22 e 32 GJ.dia<sup>-1</sup> para os cenários pior, típico e melhor respectivamente. As ETEs de grande porte apresentaram valores máximos de 81, 243 e 346 GJ.dia<sup>-1</sup> e médias de 33, 100 e 142 GJ.dia<sup>-1</sup> para os três cenários. A Figura 15 apresenta o potencial energético do lodo individualmente para ETEs operadas por reator UASB e por microrregião do estado do Paraná considerando a energia deste subproduto nas diferentes unidades de desidratação (leito de secagem e centrífuga) para o cenário típico.

Observa-se que a maior parte das ETEs (109 unidades) operadas por reator UASB no Paraná tem potencial energético do lodo abaixo de 15 GJ.dia<sup>-1</sup>.

Entretanto, 4 ETEs possuem potencial maior que 100 GJ.dia<sup>-1</sup>. Por meio desta análise, permite-se diagnosticar o potencial energético do lodo, e incentivar o interesse de recuperação energética deste subproduto, favorecendo melhores planos estratégicos no investimento da destinação final do lodo.

A microrregião de Londrina possui o maior potencial de energia do lodo, obtendo o valor de 578 GJ.dia<sup>-1</sup>. As microrregiões de Cascavel, Maringá, Paranaguá e Ponta Grossa também possuem elevados potenciais na faixa de 201 a 300 GJ.dia<sup>-1</sup>. A maioria das microrregiões do estado apresentam potencial total de lodo de até 100 GJ.dia<sup>-1</sup>. As microrregiões de Faxinal, Pitanga, Capanema, Francisco Beltrão, Rio Negro, Cerro Azul e Lapa não possuem potenciais devido à ausência de ETEs nestes locais.

A Tabela 15 apresenta a microrregião do Estado do Paraná com potencial energético do lodo acima de 300 GJ.dia<sup>-1</sup>.

**Tabela 15 - Microrregiões do Estado do Paraná com potencial energético do lodo acima de 300 GJ.dia<sup>-1</sup>.**

MICROREGIÃO	ETE	Vazão (L.s <sup>-1</sup> )	Porte da ETE	Unidade de desidratação do Lodo	Potencial Energético do Lodo (GJ.dia <sup>-1</sup> )	Total
LONDRINA	10	108	Médio	Leito de Secagem	11	578
	11	144	Médio	Leito de Secagem	15	
	12	198	Médio	Leito de Secagem	20	
	13	198	Médio	Leito de Secagem	20	
	14	252	Médio	Leito de Secagem	26	
	15	2.358	Grande	Leito de Secagem	243	
	16	2.358	Grande	Leito de Secagem	243	

O leito de secagem é a unidade de desidratação do lodo predominante na maioria das microrregiões. Entretanto, 70% das estações da microrregião de Curitiba fazem uso da centrífuga. A microrregião de Londrina possui apenas ETEs com leito de secagem. Essa microrregião apresentou um potencial energético do lodo de 578 GJ.dia<sup>-1</sup>, representando 17,3% do potencial energético do lodo do estado do Paraná.

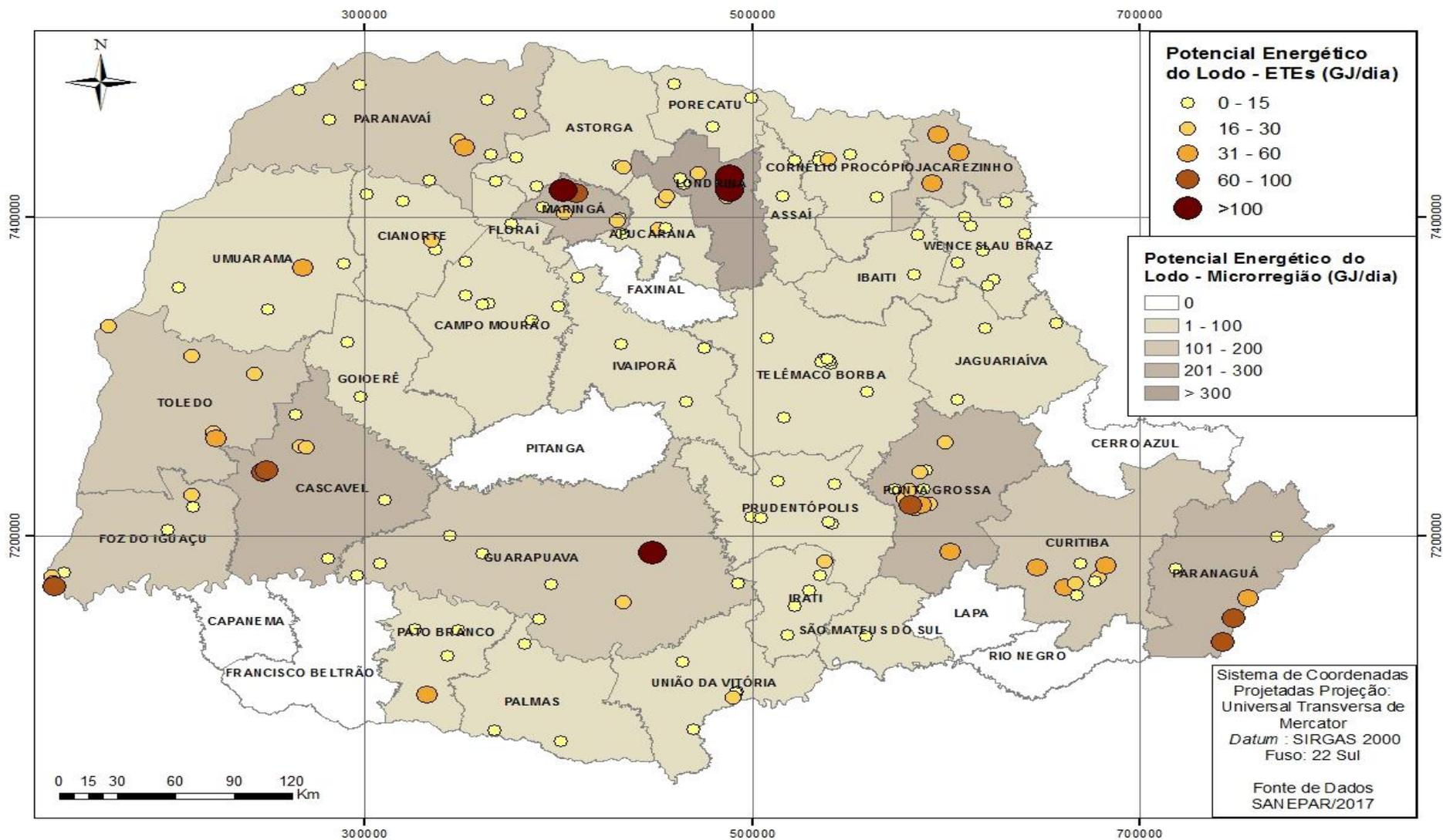
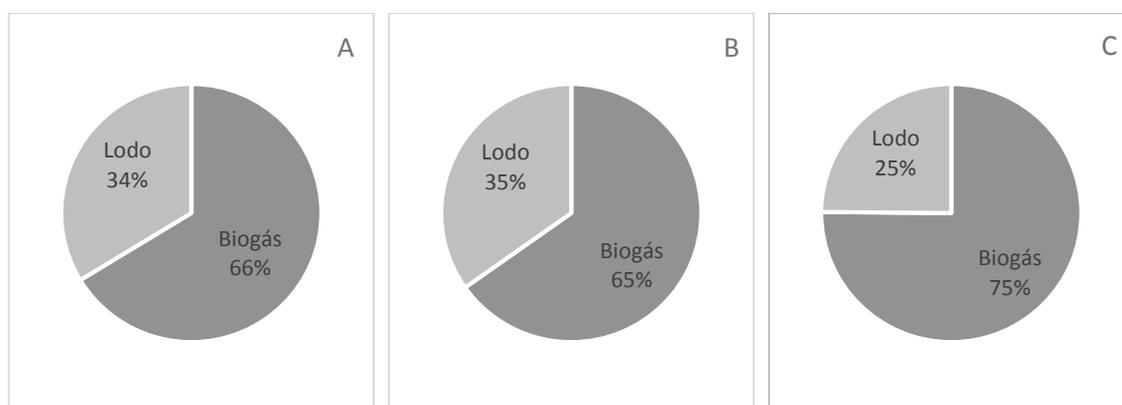


Figura 15 - Distribuição espacial do potencial energético do lodo gerado em reatores UASB do estado do Paraná.

### 2.3.3 Comparação do potencial energético dos subprodutos

A Figura 16 apresenta a porcentagem dos potenciais dos subprodutos em relação ao potencial energético total das ETEs considerando o cenário típico para pequeno, médio e grande porte.



**Figura 16 - Relação do potencial do biogás e lodo das ETEs do Paraná. (a) pequeno porte, (b) médio porte e (c) grande porte**

Nas ETEs de pequeno e médio porte há predominância do biogás como maior fonte de energia, com 66% e 65% do potencial total dos subprodutos, respectivamente.

As ETEs de grande porte esse predomínio do potencial energético do biogás em relação ao potencial do lodo é mais evidente, correspondendo a 75% da energia contida nos subprodutos.

De acordo com Ribeiro (2016), as ETEs de grande porte operadas por reatores UASB apresentam perspectivas para o aproveitamento energético do biogás para geração de eletricidade, considerando os estudos de viabilidade econômica para implantação da infraestrutura de coleta, armazenamento, tratamento (remoção de H<sub>2</sub>S, siloxanos e umidade), compressão e geração de eletricidade (conjunto motogerador) apresentados por Valente (2015) e Rosenfeldt et al. (2015).

O potencial energético das ETEs do Paraná advém principalmente do potencial do biogás. A maioria das ETEs (158 unidades) a fração do potencial do biogás em relação ao potencial total foi de 0,64, sendo todas com leito de secagem como unidade de desidratação. Todas as ETEs (8 unidades) com centrífugas tiveram índices de 0,95. Segundo Rosa (2016) que realizou um estudo de caso na ETE Laboreaux (Itabira/Minas Gerais) sobre aproveitamento energético do

biogás constatou também que o biogás é a principal fonte de energia. Valente (2015) corrobora com essa afirmação em seu estudo de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil.

## **2.4 CONCLUSÃO**

- O estado do Paraná apesar dos avanços no tratamento de esgoto doméstico e de estar em situação de destaque no cenário brasileiro em termos de aproveitamento energético, evidencia o elevado potencial a ser explorado no que se refere o aproveitamento energético do lodo e biogás de reatores UASB.
- As ETEs de grande porte promovem a mais elevada taxa de aproveitamento energético no estado do Paraná, 10.1% do potencial energético disponível, apresentando ainda o maior potencial de recuperação de energia no biogás a ser explorado dentre os portes das ETEs avaliadas.
- O subproduto com potencial energético predominante em todos os cenários estudados foi o do biogás. Porém o potencial do lodo deverá ser levado em consideração para estudos e projetos que visam alternativas para a sua destinação final.
- O SIG é uma ferramenta relevante para companhias de saneamento e pode favorecer a sustentabilidade energética das ETEs ao permitir estudos de recuperação energética dos subprodutos gerados no tratamento, com especial destaque para a digestão anaeróbia. Além disso, pode ser usada como uma ferramenta de apoio a tomada de decisão, uma vez que possibilita a identificação pontual de ETEs e regiões promissoras para realizar o reaproveitamento energético.

## **2.5 REFERÊNCIAS**

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

AHMETOVIC´ E, IBRIC´ N, KRAVANJA Z. Optimal design for heat-integrated water- using and wastewater treatment networks. Appl Energy 2014;135:791–808.

CHERNICHARO, C.A.L.; STUETZ, R.M. Energy Recover from Biogas in Anaerobic Wastewater Treatment Plants. 2008. In: CHERNICHARO, C.A.L. Limitações e Possíveis Melhorias Futuras no Projeto, na Construção e na Operação de Reatores UASB Tratando Esgotos Domésticos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2009. Relatório final de atividades referente a pós-doutorado.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº377, de 09 de outubro de 2006. Dispõe sobre licenciamento ambiental simplificado de Sistemas de Esgotamento Sanitário. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2006.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas Energia. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2017\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf)>. Acesso em: 28 janeiro 2018.

HOUDKOVÁ, L.; BORAN, J.; UCEKAJ, V.; ELSASER, T.; STEHLIK, P. Thermal processing of sewage sludge – II. Applied Thermal Engineering. v. 28, p.2.083–2.088, 2008.

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários. Secretariado para América Latina e Caribe, São Paulo, 80p. 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE – 2016. PNSB 2008: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/notas\\_tecnicas.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/notas_tecnicas.pdf)>. Acesso em 20 ago. 2017.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Japão. 2006.

LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. 106f. Monografia (Projeto de

Graduação, Departamento de Engenharia Ambiental) UFES, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2012.

LOBATO, L. C S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. 176 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

METCALF e EDDY. INC. Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos. 5. ed. New York, McGraw - Hill Book, 2016. 1815p.

MOREIRA, H.; POSSETTI, G; SOUZA, R.; KNOPKI, R.; ZAWADZKI, R. Diretrizes de capacitação para o uso de biogás de esgoto no Brasil. Revista DAE, v.66, nº 209, p. 134-150, 2017.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ- HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology, v. 5, p. 93-114, 2006.

PANEPINTO D, FIORE S, ZAPPONE M, GENON G, MEUCCI L. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. Applied Energy 2016; 161:404–11.

RIBEIRO, A.A.S.; Aplicações de Sistemas de Informações Geográficas em Empresas de Saneamento. 2012. 56 p. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Pós-Graduação em Geoprocessamento Aplicado ao Planejamento Urbano e Rural da Universidade Cruzeiro do Sul – Espírito Santo, 2012.

RIBEIRO, T.B., CHERNICHARO, C.A.L, GARCIA, G.B. (2016). Overview of sewage treatment in the South, Southeast and Midwest regions of Brazil: most employed technologies (Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas). Revista DAE, submitted. [in Portuguese].

ROSA, A. P. Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto. 172 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola

de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ROSA, A. P; CONESA, J.A.; FULLANA; A., MELO G.C.B.; BORGES, J.M.; CHERNICHARO, C.A.L. Energy potential and alternative usages of biogas and sludge from UASB reactors: case study of the Laboreaux wastewater treatment plant. *Water Science & Technology* 73.7, 2016.

ROSENFELDT, S. et al. Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais 2015.

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. Relatório de Administração e Sustentabilidade 2016. Disponível em:<<http://site.sanepar.com.br/a-sanepar/sanepar-em-numeros>>. Acesso em: 20 janeiro 2018.

SHIRADO, J. Análise dos fluxos de materiais e de energia como ferramenta de gestão para uma estação de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico. 117f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Setor de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SILVA, T. C. F. Utilização de Biogás de Estações de Tratamento de Esgoto para Fins Energéticos. 2015. 152 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2015.

SILVEIRA, B. et al. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, DF.: Ministério das Cidades, 183 p., 2015.

TCHOBANOGLOUS, G., LEVERENZ, H. Impacts of New Concepts and Technology on the Energy Sustainability of Wastewater Management. Conference Climate Change, Sustainable Development, and Renewable Energy Sources. Thessaloniki, 2009.

VALENTE, V. B. Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil. 182f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VERA L, Sun W, Iftikhar M, Liu J. LCA based comparative study of a microbial oil production starch wastewater treatment plant and its improvements with the combination of CHP system in Shandong, China. *Resour Conserv Recycl* 2015; 96:1–10.

ZILOTTI, H.A.R. Potencial de produção de biogás em uma Estação de tratamento de esgoto de cascavel para a geração de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

### **3 ESTUDOS DE ALTERNATIVAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO EM ETEs OPERADAS POR REATORES UASB: UM ESTUDO DE CASO DO ESTADO DO PARANÁ, BRASIL**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

O Brasil carece de significativos avanços no setor de saneamento. Além disso, as companhias de saneamento demandam grande quantidade de energia para atingir a qualidade do efluente exigida pela legislação.

O tratamento anaeróbio de esgoto doméstico ganha força neste cenário e atualmente tem sido amplamente empregado no Brasil. A aplicação de reatores anaeróbios tem como vantagens o baixo custo de implantação e operação, baixa demanda de área e reduzido consumo de energia para a operação do sistema,

Dentre os sistemas anaeróbios, destaca-se a utilização dos reatores anaeróbios UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) que apresentam além das características associadas a sistemas anaeróbios, potencial de geração de energia por meio da utilização do biogás e do lodo gerado no processo de tratamento.

Segundo Ribeiro et al. (2016) no Brasil são contabilizadas 658 estações em escala real operadas por reatores UASB, com uma capacidade de tratamento de esgoto de aproximadamente 21,9 milhões de habitantes, o equivalente a uma vazão tratada da ordem de  $43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Diante disso, os reatores UASB, se credenciam como a alternativa tecnológica para o tratamento de esgoto doméstico mais empregada no Brasil (CHERNICHARO, 2008).

O biogás é um gás combustível empregado para geração de calor, geração de eletricidade ou até mesmo combustível veicular. O biogás proveniente de estações de tratamento de esgoto é constituído de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ). Por meio da presença de metano o biogás apresenta potencial calorífico de ( $35,9 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$ ), já o biogás com 60 % de  $\text{CH}_4$  é de ( $21,539 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$ ).

<sup>3</sup>) correspondendo a 70% do poder calorífico do gás natural (LOBATO, 2011; NOYOLA et al., 2006).

Segundo Jordão e Pessôa (2014) as características dos gases gerados durante o tratamento de esgoto possibilitam múltiplos usos para o biogás como (i) geração de energia elétrica, (ii) geração de energia térmica, (iii) cogeração de energia elétrica e de energia térmica. Entretanto, o biogás é usualmente queimado de forma direta em queimadores abertos, não havendo o aproveitamento energético deste subproduto (ROSA et al., 2016).

Para Valente (2015) e Rosa (2013) estudos de viabilidade do aproveitamento energético dos subprodutos gerados em reatores UASB são de grande relevância e contribuem para o aprimoramento da matriz energética brasileira pela oferta de fontes renováveis a partir do setor de saneamento.

Moreira (2017) afirma que o aproveitamento energético do biogás está bem respaldado na literatura (BALAT, 2009; PÖSCHL et al., 2010; SHEN et al., 2015). Ainda, cita estudos que apresentam a redução dos custos operacionais de ETEs quando se utiliza o biogás na geração de energia elétrica (Mc CARTY et al., 2011; LOBATO, 2011; LIMA, 2012; VALENTE, 2015; ROSENFELDT et al., 2015; CABRAL, 2016) e com a gestão de lodos e escumas (BOUGRIER et al., 2006; LOBATO, 2011; ROSA et al., 2016).

Vários outros estudos apontam a relevância e viabilidade técnica, econômica e ambiental do aproveitamento energético do lodo e biogás gerados em reatores UASB (GU et al., 2017; VALENTE, 2015; SHIRADO, 2014; ROSA, 2013; LOBATO, 2011, STILLWELL et al., 2010; SALOMON e LORA, 2009; ZANETTE, 2009 e RULKENS, 2007).

A geração de energia elétrica a partir do biogás gerados em sistemas anaeróbios, de acordo com Salomon e Lora (2009) tem como principais vantagens a (i) geração descentralizada de energia, próximo da fonte consumidora; (ii) possibilidade de lucro adicional devido à produção e à comercialização de energia; (iii) redução no consumo de eletricidade; (iv) potencial de uso em processos para a cogeração de eletricidade e calor; e (v) redução das emissões de metano. Tsagarakis (2007) complementa indicando o interesse na geração de eletricidade não somente para a inserção na rede de

distribuição, mas também na geração e no consumo *in situ* nas dependências da própria ETE.

Um outro fator preponderante para o interesse na recuperação energética do biogás, em especial em reatores UASB, é associado ao fato de que esta tecnologia de tratamento apresenta baixa demanda energética, além do subproduto poder ser empregado em sua totalidade para a geração de eletricidade em sistemas de cogeração, visto que as condições climáticas brasileiras dispensam o uso do biogás para a manutenção da temperatura dos reatores.

De forma complementar, o aumento nos serviços de coleta e tratamento de esgoto sanitário e de coleta e destinação correta de resíduos sólidos urbanos, aumento da fiscalização dos órgãos ambientais, aumento do consumo de energia elétrica no país são fatores que estimulam a produção e o interesse de energia por meio do biogás (ROSA, 2013; EPE, 2013; SNIS, 2012; SALOMON e LORA; 2009).

Segundo Gu et al. (2017) recuperar a energia oriunda de diferentes fontes e reduzir o consumo de energia nos processos unitários são condições para a autossuficiência energética das ETEs, em que o atendimento desta condição é condicionado à geração de energia a partir dos subprodutos, minimizando, assim, o consumo de energia externa (McCARTY et al., 2011). Metcalf e Eddy (2016) afirmam que em teoria as ETEs possuem mais energia do que necessitam para realizar o tratamento podendo se tornar até mesmo fornecedora de energia.

Uma ferramenta de destaque que pode promover e facilitar a recuperação energética do biogás nas estações de tratamento de esgoto corresponde ao uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Os SIGs podem ser utilizados para avaliar e identificar alternativas para a utilização do biogás em ETEs, contribuindo para a tomada de decisões pelas companhias de saneamento para gerenciar este subproduto.

O tratamento e a disposição final do lodo são tidos na engenharia sanitária como o grande desafio futuro no âmbito do saneamento. O gerenciamento do lodo é um custo operacional significativo, que varia significativamente geograficamente, especialmente relacionado à distância e acordo com aterros próximos. Valente

(2015) apontou valores que variaram entre 70 a 184 R\$/t para lodos com teor de sólidos entre 20 e 30% (SEMAE, SANASA, SANEPAR, SABESP, CEDAE, SANESUL, 2014).

O Andreoli et al. (2001) aponta que o tratamento do lodo representa de 20% a 60% dos custos operacionais das ETEs. Porém, as empresas de saneamento são obrigadas por legislação ambiental a destinar de forma correta este subproduto do tratamento.

Na Europa reduzir a produção do lodo nas ETEs é a prioridade em seu gerenciamento, subsequente a minimização, reciclagem, aproveitamento térmico e como última opção o envio para o aterro sanitário (WERLE e WILK, 2010).

Atualmente o destino final do lodo mais comum em vários países, inclusive no Brasil são os aterros sanitários, o que pode ocasionar a contaminação dos solos e emissão de odores desagradáveis, além dos elevados gastos com o transporte, desperdiçando assim o potencial dos nutrientes e/ou energético do lodo desidratado (ROSA, 2013).

O aproveitamento energético do biogás surge como alternativa para o gerenciamento do lodo, podendo vir a ser utilizado no processo de secagem, reduzindo seu volume conseqüentemente custos com transporte.

Nesse contexto, o estado do Paraná (Brasil) apresenta uma situação de destaque no âmbito do tratamento de esgoto pela via anaeróbia, pois atualmente das 235 ETEs em funcionamento no estado, 182 são operadas por reatores UASB, com vazões variando de 3 L.s<sup>-1</sup> a 4032 L.s<sup>-1</sup> (SANEPAR, 2016).

No Estado do Paraná apenas duas ETEs realizam o aproveitamento energético do biogás, destaque para a ETE Ouro Verde, que utiliza reatores UASB, situada no município de Foz do Iguaçu, a qual foi precursora no país a utilizar o biogás como fonte de energia. Além disso, foi a primeira ETE brasileira a ser conectada à rede de distribuição de energia elétrica e cadastrada junto a Agência Nacional de Energia Elétrica. Na ETE Belém, a qual emprega reatores aeróbios no tratamento de esgoto, situada no município de Curitiba é prevista a produção de eletricidade por meio de uma usina com potência instalada de 2,8 mega-watts (MW) (ZILOTTI, 2012).

O presente trabalho teve como objetivo estudar alternativas para o aproveitamento energético do biogás gerado em ETEs operadas por reatores UASB no estado do Paraná.

## **3.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.2.1 Área de estudo**

O estudo foi realizado em 122 estações de tratamento de esgoto do estado do Paraná que operam com reatores UASB. As ETEs foram classificadas em termos de porte de acordo com o Instituto Ambiental do Paraná (IAP) e a Resolução CONAMA no 377/2006, em que considerou os portes das estações em função das faixas de vazão, a saber: (i) pequeno porte com vazão até  $56 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (ii) médio porte com vazão de 57 até  $463 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  e (iii) grande porte acima de  $464 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ . Diante disso, 35 foram classificadas como pequeno porte, 71 médio porte e 16 grande porte. O Paraná é uma unidade federativa do Brasil, localizado na região Sul do país, com uma área aproximadamente  $435,036 \text{ km}^2$  e possui 399 municípios.

A Figura 17 ilustra espacialmente as ETEs pelo porte que operam por reatores UASB no estado do Paraná.

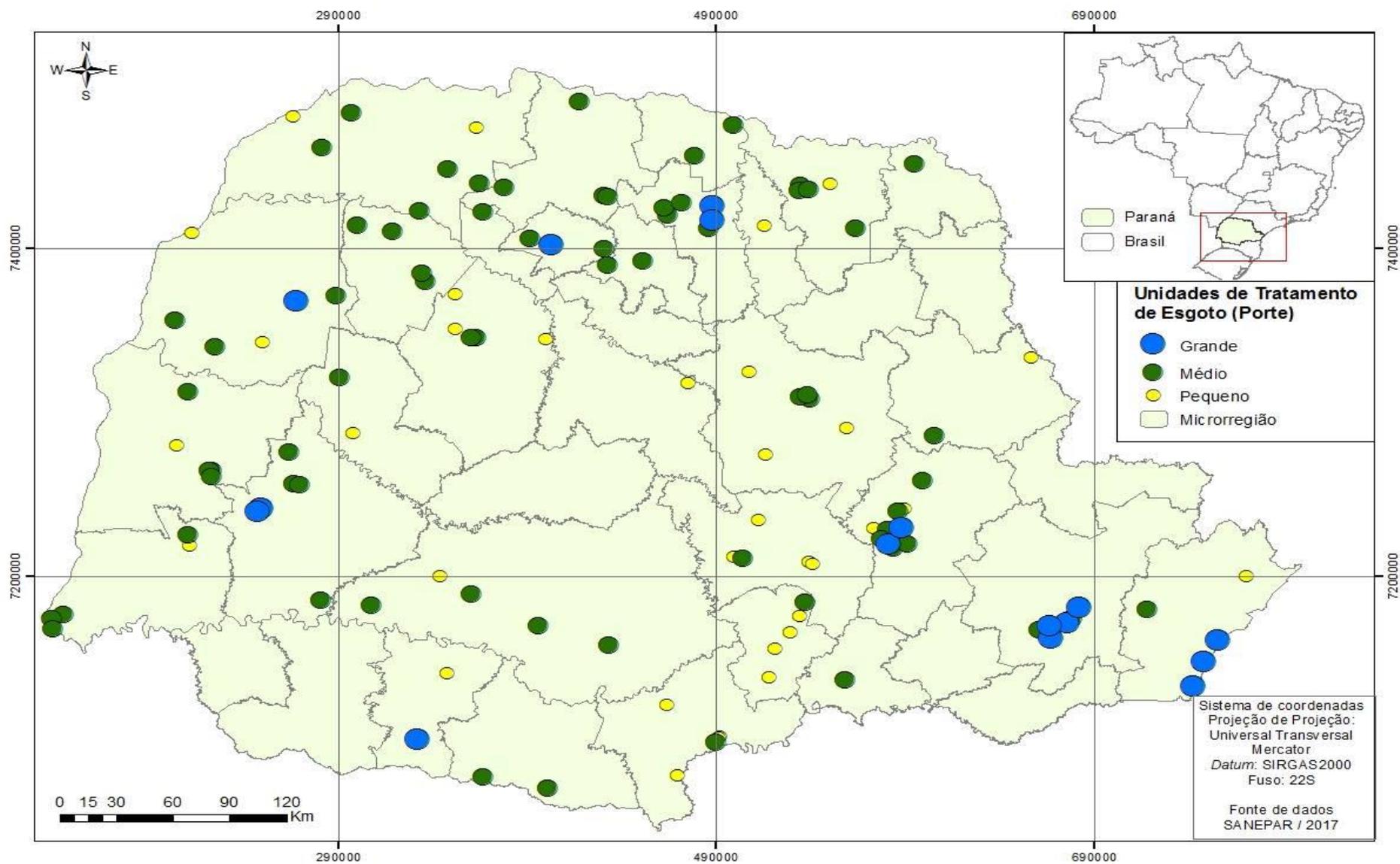


Figura 17 - Localização das ETEs que operam por reatores UASB no estado do Paraná de acordo com o porte.

O estudo do emprego do biogás para geração de eletricidade em ETEs do Paraná operando com reatores UASB seguiu o procedimento apresentado a seguir:

### 3.2.2 Determinação da energia elétrica produzida nas ETEs

Este estudo contempla o levantamento do potencial energético do biogás gerados em ETEs de diferentes portes, a partir da metodologia proposta por Lobato (2011), considerando-se a conversão do potencial do biogás em energia elétrica por um equipamento motogerador com eficiência de 30%.

O cálculo do potencial energético do biogás foi realizado a partir de dados secundários levantados pela companhia de saneamento no ano de 2016. Utilizaram-se os dados de vazão das ETEs e aplicados ao modelo proposto Lobato (2011). O modelo empregado para a estimativa do potencial energético do biogás nos reatores UASB foi elaborado de acordo com três cenários (i) pior; (ii) típico e (iii) melhor como descrito na Tabela 16 a qual consideram os potenciais de geração dos subprodutos para diferentes características do esgoto bruto, o cenário típico correspondente às condições intermediárias para os dois cenários apresentados.

**Tabela 16 - Descrição das características do pior e melhor cenários para o modelo matemático relativo ao lodo e biogás gerados em reatores UASB.**

	Pior	Melhor
Aspectos relacionados ao biogás <sup>1</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas operando com esgoto mais diluído</li> <li>• Maiores concentrações de sulfato no afluente</li> <li>• Menor eficiência de remoção de DQO</li> <li>• Maiores índices de perda de metano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas operando com esgoto mais concentrados</li> <li>• Menores concentrações de sulfato no afluente</li> <li>• Maior eficiência de remoção de DQO</li> <li>• Menores índices de perda de metano</li> </ul>

**Fonte:** Lobato (2011).

A Tabela 17 apresenta os dados de entrada e as condições previstas para os cenários avaliados, a Tabela 18 detalha a equação utilizada para a estimativa do potencial energético do biogás conforme detalhado em Lobato (2011).

**Tabela 17 - Dados de entrada para elaboração do modelo proposto Lobato (2011).**

Componente	Parâmetro	Unidade	Cenário		
			Pior	Típica	Melhor
BIOGÁS	População contribuinte (Pop)	hab.	1.000 a 1.000.000		
	Contribuição per capita de esgoto (QPC)	L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	120 a 220		
	Contribuição per capita de DQO (QPC <sub>DQO</sub> )	L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	90 a 110		
	Eficiência de remoção de DQO (E <sub>DQO</sub> )	%	60	65	70
	Concentração de sulfato no afluente (C <sub>SO4</sub> )	kgSO <sub>4</sub> .m <sup>-3</sup>	80	60	40
	Eficiência de redução de sulfato (E <sub>SO4</sub> )	%	80	75	70
	Temperatura operacional do reator (T)	°C	20 a 30		
	Percentual de CH <sub>4</sub> no biogás (C <sub>CH4</sub> )	%	70	75	80

Fonte: Rosa (2013)

**Tabela 18 - Equação utilizada para a estimativa do potencial energético do biogás em ETEs operadas por reatores UASB.**

Unidade	Relação	Cenário					
		Pior		Típico		Melhor	
		Equação	(R <sup>2</sup> )	Equação	(R <sup>2</sup> )	Equação	(R <sup>2</sup> )
Biogás	L.s <sup>-1</sup> x MJ.d <sup>-1</sup>	y = 116,37x	0,52	y = 181,74x	0,70	y = 214,68x + 38417	0,78

Fonte: Lobato (2011)

A partir dos dados de vazão do esgoto bruto nas ETEs monitoradas foi possível estimar o potencial energético do biogás, o detalhamento do procedimento de cálculo utilizado para o modelo é apresentado por Lobato (2011) para os diferentes cenários avaliados. A estimativa da energia elétrica gerada a partir do uso do biogás para os diferentes cenários foi estimada considerando-se um fator de conversão de 30%, associado à eficiência típica de um equipamento de conversão do biogás à eletricidade.

### 3.2.3 Determinação da demanda energética das ETEs em atividades operacionais e administrativas.

O consumo de energia nas ETEs está relacionado à demanda de eletricidade para realizar todas as atividades envolvidas no processo de tratamento de esgoto. Essa demanda foi obtida por meio dos valores médio das contas de energia elétrica das ETEs, no período de janeiro a dezembro de 2016, fornecidos pela Companhia de Saneamento do Estado do Paraná.

### 3.2.4 Estudo da Energia Livre das ETEs

A produção líquida ou a energia elétrica livre corresponde à diferença entre a eletricidade gerada a partir do uso do biogás e a demanda energética das ETEs nas atividades administrativas e operacionais. O cálculo da eletricidade

necessária para suprir a demanda das ETEs foi feito pela diferença entre a energia elétrica gerada a partir do uso do biogás e o consumo de energia elétrica das ETEs advindo das contas de energia fornecida.

### **3.2.5 Determinação da demanda de energia para secagem térmica do lodo nas ETEs.**

Por meio da quantidade de lodo gerado em cada ETE operada por reatores UASB no Paraná foi realizado o cálculo da energia requerida para secagem térmica desse lodo. A energia demandada para secagem térmica do lodo até 10% de umidade foi calculada considerando o coeficiente proposto por Possetti (2015) de 5,54 MJ para remover 1 kg de água presente no lodo.

### **3.2.6 Utilização da energia livre para secagem térmica do lodo nas ETEs.**

A energia livre foi utilizada na demanda de energia para secagem térmica do lodo nas ETEs. A energia excedente correspondeu à diferença entre a energia livre e a demanda energética para secagem térmica do lodo das ETEs.

### **3.2.7 Mapas Temáticos**

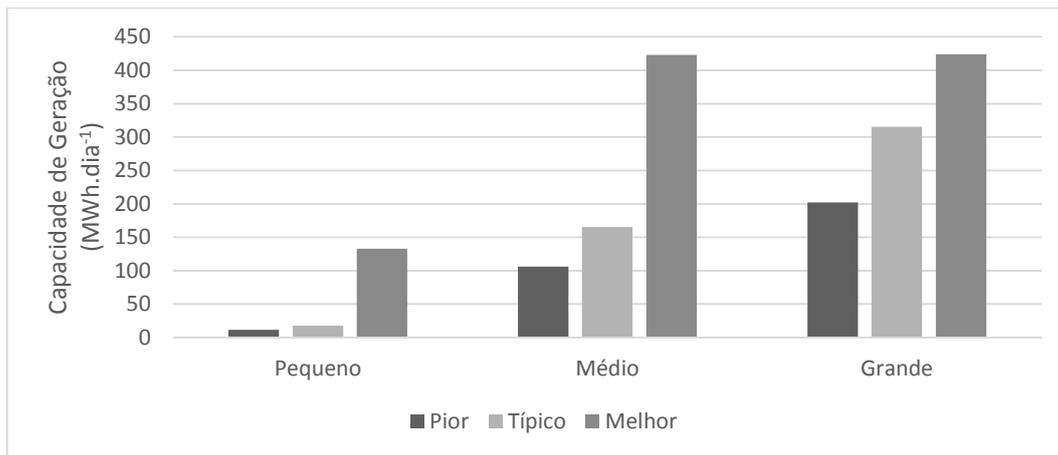
A confecção dos mapas temáticos e realização da análise espacial qualitativa e quantitativa foi realizado por meio do software ArcGIS® 10.2, da Environmental Systems Research Institute (ESRI). Considerou-se todo o Estado do Paraná, sendo utilizada as microrregiões de planejamento disponibilizado pelo sistema de bases e referenciais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Ainda, com o auxílio do software ArcGIS® 10.2 os dados localização geográfica, vazão e potencial energético das ETEs, foram convertidas em arquivo vetorial do tipo ponto no formato shapefile (\*.shp) utilizando a ferramenta Add XY data. Por meio da extensão *Analysis Tools (Spatial Join)* os elementos espaciais da planilha com a tabela de atributos do shapefile foram associados às microrregiões do Paraná. Para a classificação dos potenciais foi utilizado a ferramenta *Symbology* em *layer properties*.

## **3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **3.3.1 Energia elétrica gerada nas ETEs**

A Figura 18 apresenta o potencial de energia elétrica das ETEs de pequeno, médio e grande porte operadas por reatores UASB no estado do Paraná.



**Figura 18 - Capacidade de geração de energia elétrica considerando os portes das ETEs e os cenários pior, típico e melhor.**

Conforme apresentado, as 35 ETEs de pequeno porte possuem a menor capacidade de geração de energia elétrica dentre os portes das estações avaliadas. Para o pior, típico e melhor cenário a capacidade de geração de energia elétrica foi de 11, 18 e 132 MWh.dia<sup>-1</sup>.

A maioria das ETEs do estado do Paraná avaliadas, cerca de 58% (71 unidades) são de médio porte. Considerando o cenário típico observa-se uma capacidade de geração de 165 MWh.dia<sup>-1</sup>, representando apenas 52% da capacidade de geração das ETEs de grande porte para o mesmo cenário. No entanto, para o melhor cenário, as ETEs de médio e grande porte possui a mesma capacidade de geração de energia elétrica de 423 MWh.dia<sup>-1</sup>.

As ETEs de grande porte (16 unidades) possuem capacidade de geração de energia elétrica 18 e 1,91 vezes maior que as ETEs de pequeno e médio porte, respectivamente, considerando os cenários pior e típico. No cenário típico, essas ETEs podem gerar até 316 MWh.dia<sup>-1</sup>.

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam a geração de energia elétrica individual a partir do biogás para as ETEs operadas por reator UASB e por microrregião do estado do Paraná para o pior, típico e melhor cenário, respectivamente.

Observa que a medida que a qualidade da efluente melhora (pior, típico e melhor) o potencial de geração de energia elétrica torna-se maior. Conforme apresentado para o pior cenário 46% das ETEs (56 unidades) apresentaram potencial de geração de energia elétrica abaixo de 1000 kWh.dia<sup>-1</sup>. Ainda neste cenário 28% das ETEs (35 unidades) tem capacidade de gerar de 1000-2000

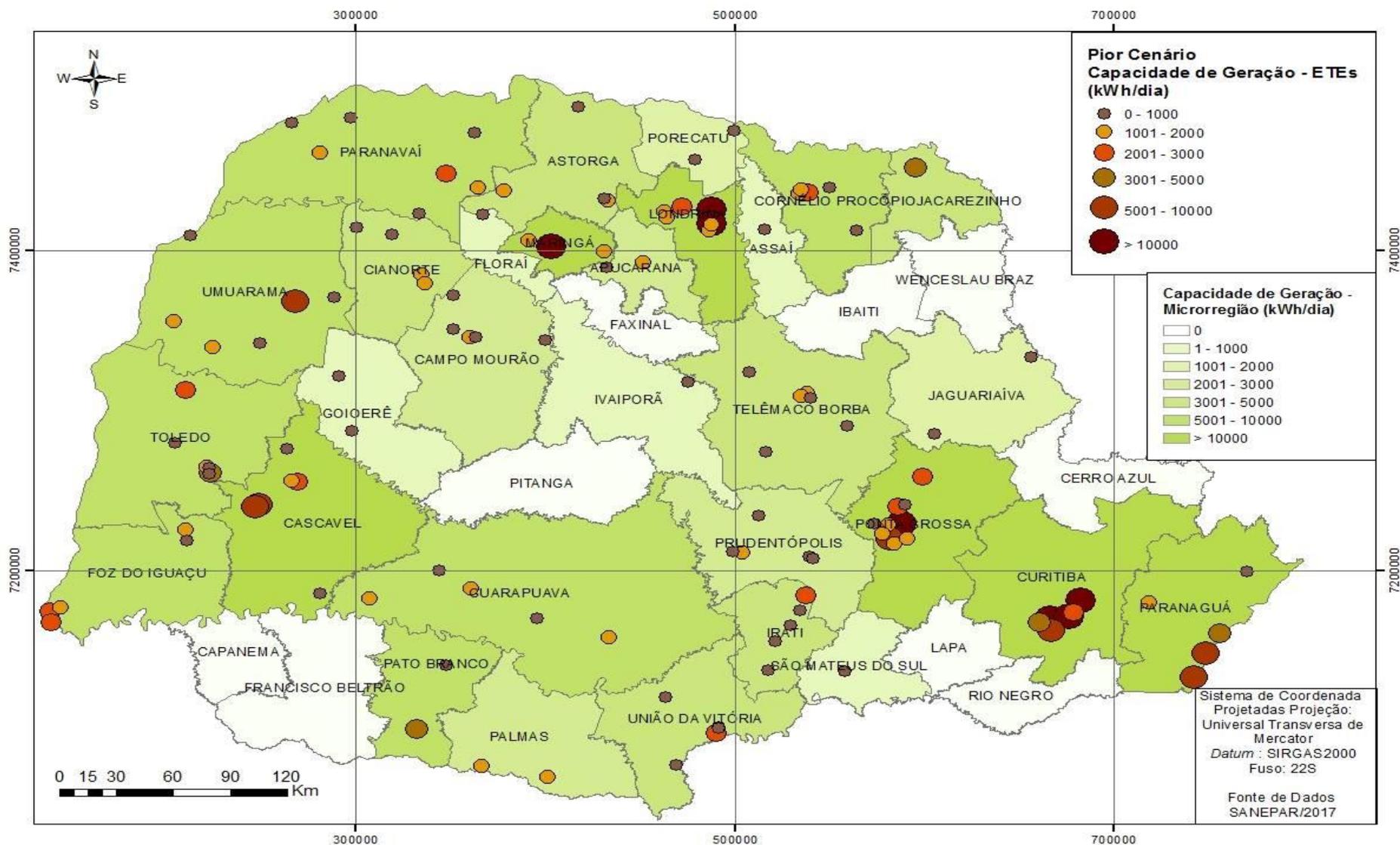
kWh.dia<sup>-1</sup>. Diante disso, 74% das estações (91 unidades) geram apenas até 2000 kWh.dia<sup>-1</sup>. Destaca-se que as ETEs com capacidade de geração acima de 5000 kWh.dia<sup>-1</sup> são de grande porte.

Considerando o cenário típico, podemos inferir que há um aumento do potencial de geração de energia elétrica nas classes intermediárias, ou seja, 32% das ETEs (40 unidades) possuem capacidade de gerar energia elétrica de 2000 – 10000 kWh.dia<sup>-1</sup>. Porém, 30% (37 unidades) produzem menos de 1000 kWh.dia<sup>-1</sup>, sendo todas de pequeno porte. As ETEs de grande porte 11% (13 unidades) são responsáveis por gerar mais de 10000 kWh.dia<sup>-1</sup>. Nota-se, as ETEs que tem capacidade de gerar energia elétrica maior que 10000 kWh.dia<sup>-1</sup> no cenário típico é 63% maior (13 unidades) em relação ao pior cenário (8 unidades).

Para o melhor cenário, as ETEs possuem maior capacidade de gerar eletricidade a partir do biogás. Neste cenário não apresenta estações com capacidade de geração menor que 3000 kWh.dia<sup>-1</sup>. A maioria das ETEs (56 unidades) possuem potencial de geração de 3000-5000 kWh.dia<sup>-1</sup> e 40% das ETEs (50 unidades) apresentam geração de 5000-10000 kWh.dia<sup>-1</sup>. As 16 estações que geram mais de 10000 kWh.dia<sup>-1</sup> são de grande porte, possuindo capacidade de geração de energia elétrica 2,1 vezes maior comparado ao pior cenário nesta faixa.

Observa-se para o pior cenário que a maioria das microrregiões possuem capacidade de gerar eletricidade a partir do uso do biogás na faixa de 0-1000 kWh.dia<sup>-1</sup>. Entretanto, no melhor cenário cerca de 56% das microrregiões possuem capacidade para gerar mais de 10000 kWh.dia<sup>-1</sup>. Para o cenário típico, 49% (12 microrregiões) das microrregiões geram mais de 5000 kWh.dia<sup>-1</sup>.

Pode-se destacar que as microrregiões Cascavel, Curitiba, Ponta Grossa, Paranaguá, Londrina e Maringá para ambos os cenários tem capacidade de geração elétrica maior que 10000 kWh.dia<sup>-1</sup>. Nota-se ainda, que o melhor cenário não possui microrregiões com capacidade de geração na faixa de 1000-3000 kWh.dia<sup>-1</sup>.



**Figura 19 – Distribuição espacial da capacidade de geração de energia elétrica por meio do biogás em ETEs operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o pior cenário.**

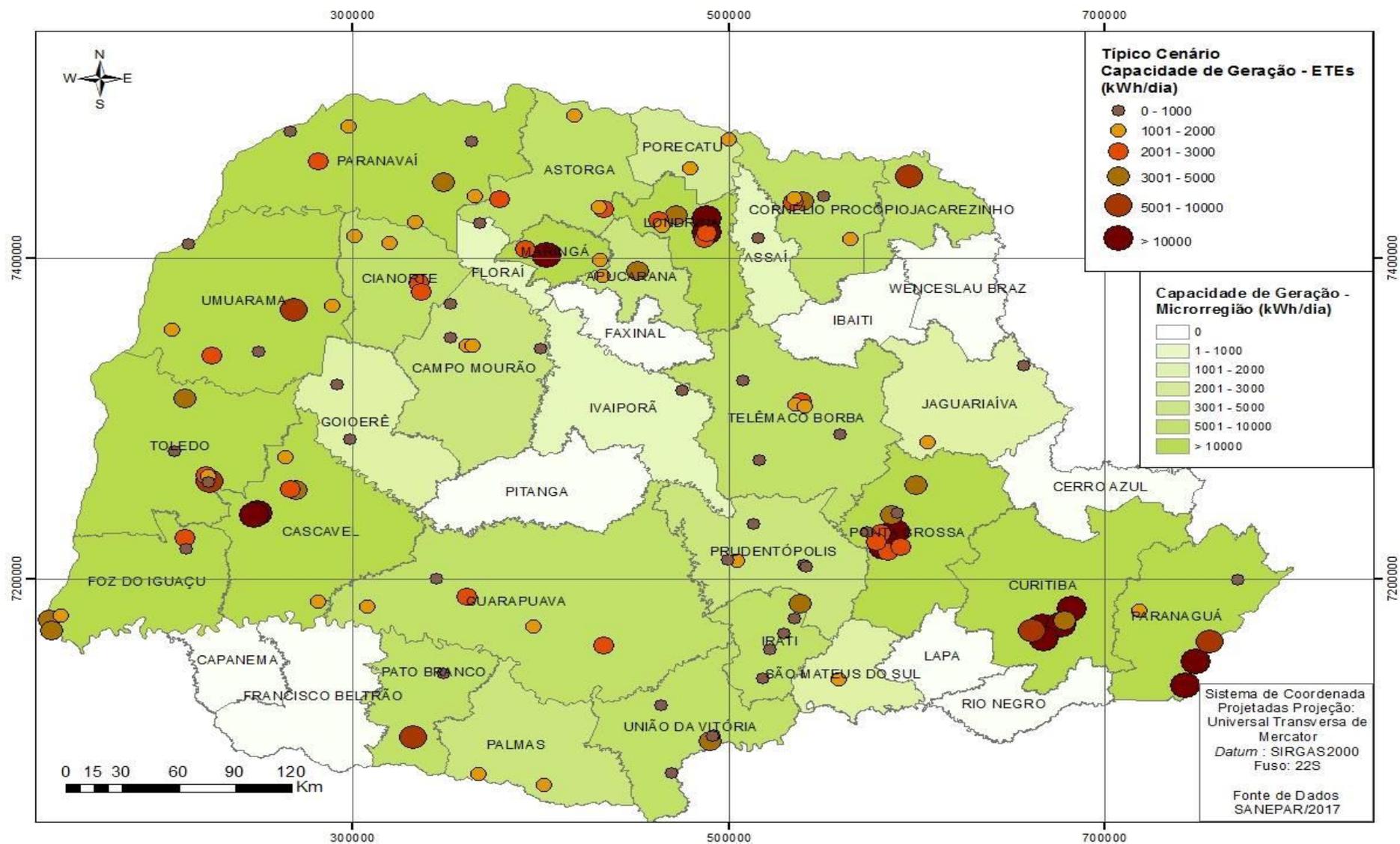


Figura 20 - Distribuição espacial da capacidade de geração de energia elétrica por meio do biogás em ETEs operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o cenário típico.

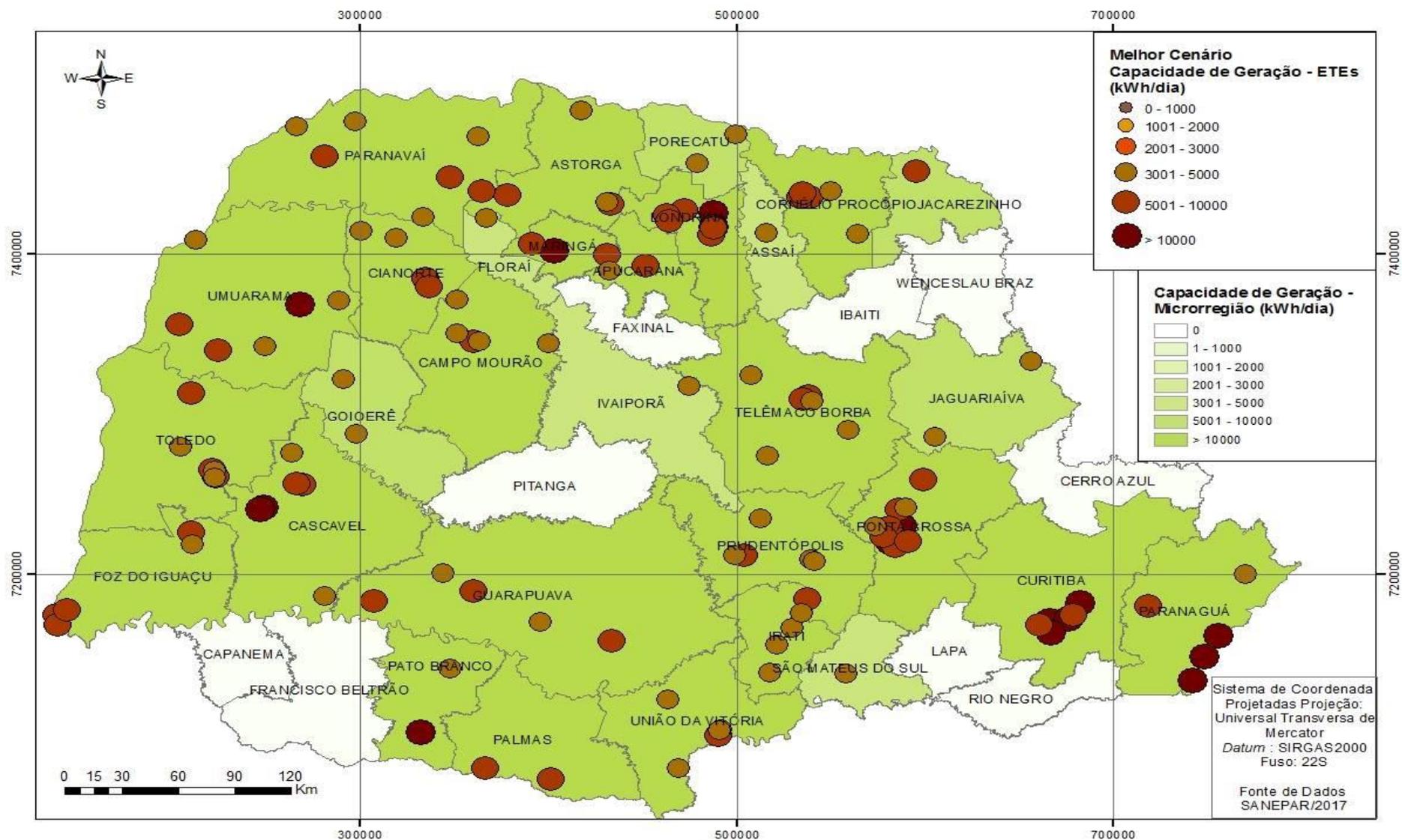


Figura 21 - Distribuição espacial da capacidade de geração de energia elétrica por meio do biogás em ETEs operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o melhor cenário.

### **3.3.2 Demanda de energia elétrica nas atividades operacionais e administrativas das ETEs**

A Figura 22 apresenta a distribuição espacial do consumo de energia elétrica individual das ETEs operadas por reator UASB e por microrregiões no estado do Paraná.

A maioria das ETEs, cerca de 70% (86 unidades) consomem menos de 100 kWh.dia<sup>-1</sup>. Fato este explicado pelas estações serem operadas por reatores UASB, a qual tem como característica principal o baixo consumo energético para sua operação. Porém, 3% (4 unidades) destas estações consomem mais de 1000 kWh.dia<sup>-1</sup>, sendo 75% destas de grande porte.

Conforme apresentado e corroborando com o estudo de consumo energético por ETEs operadas por reatores UASB no estado do Paraná, a maioria das microrregiões consomem menos de 100 kWh.dia<sup>-1</sup>. Entretanto, 18% consomem mais de 1000 kWh.dia<sup>-1</sup>, a qual predomina estações de grande porte. Nota-se que as regiões de Curitiba, Paranaguá, Ponta Grossa, Londrina, Irati e Maringá são as microrregiões mais consumidoras de energia elétrica para realizar o tratamento de esgoto do estado do Paraná.

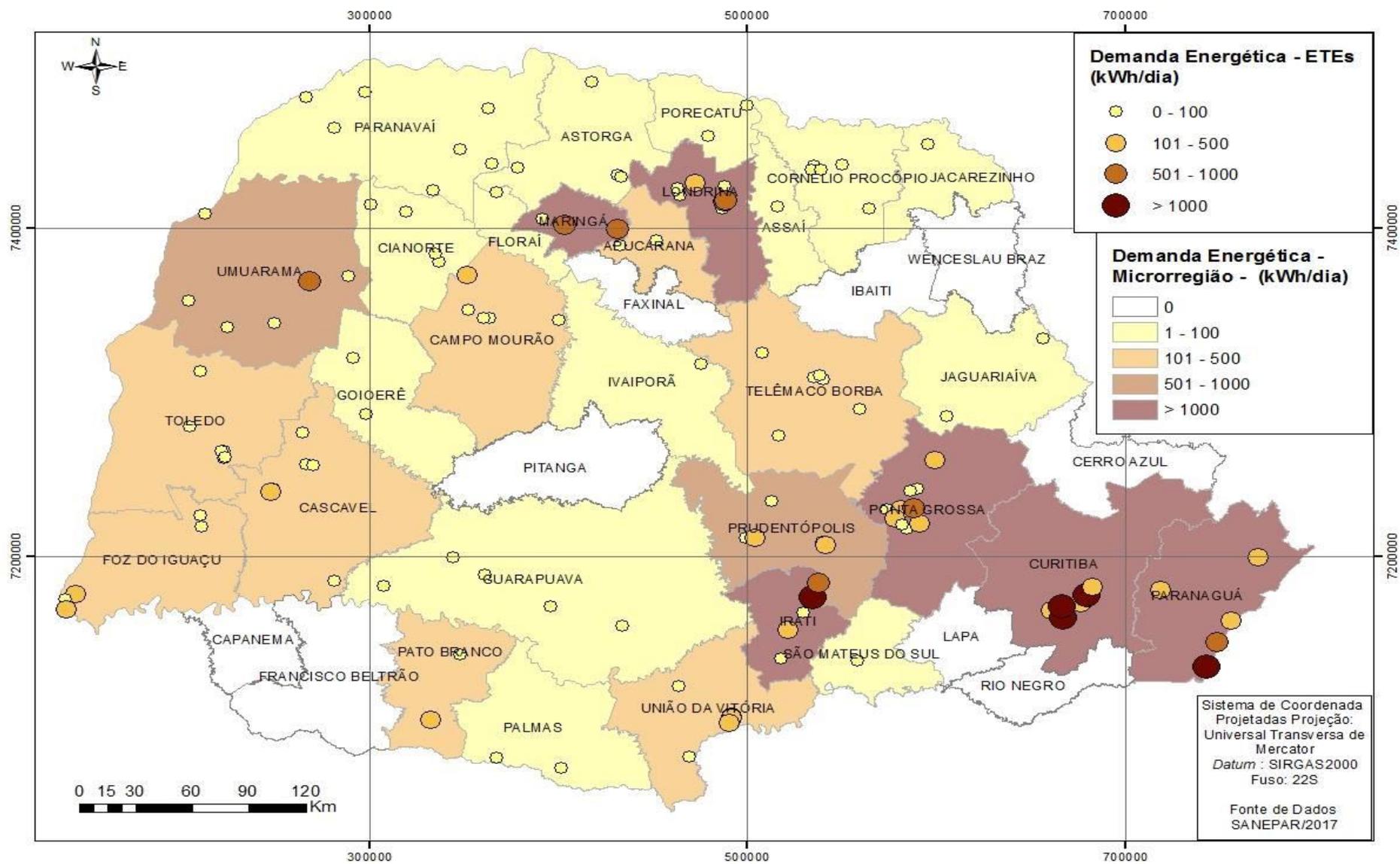
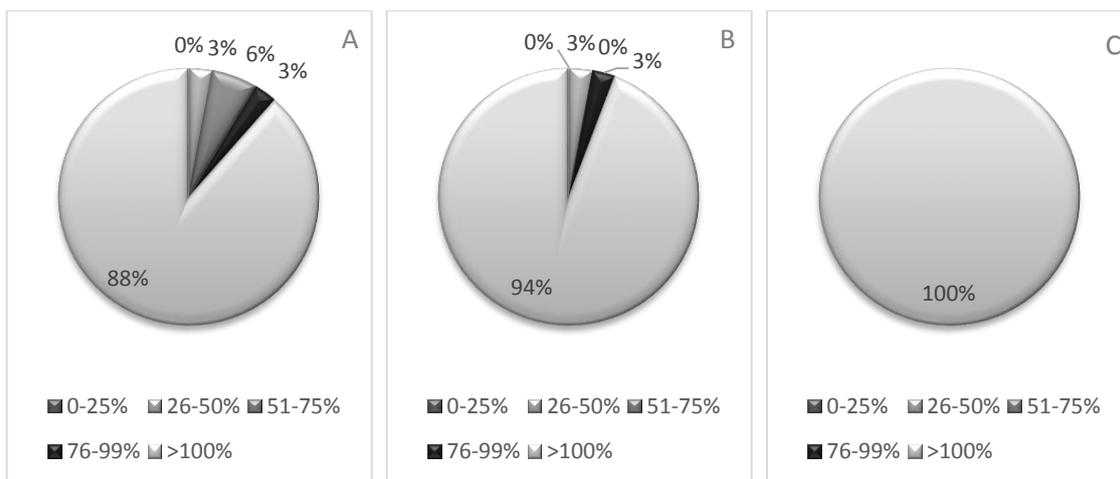


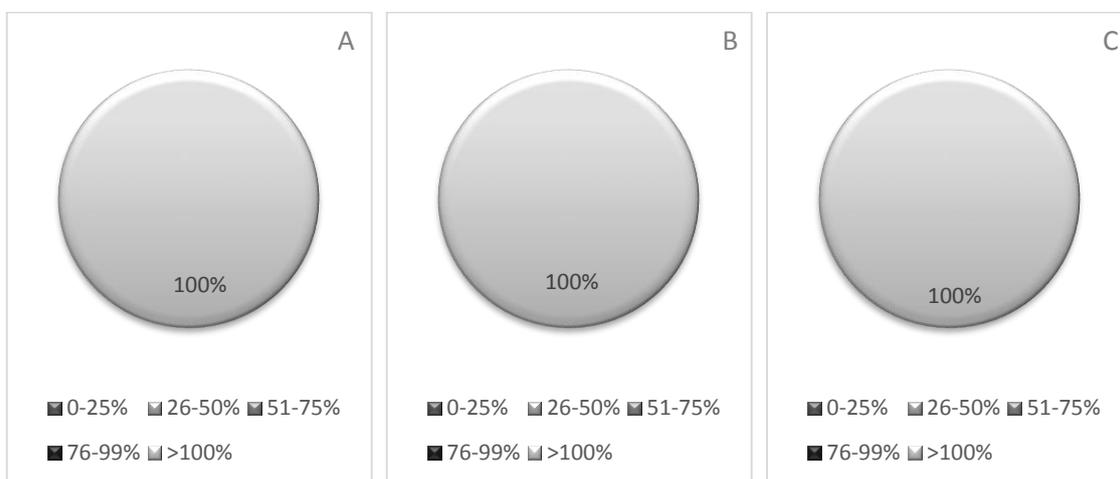
Figura 22 – Distribuição espacial do consumo de energia elétrica das ETEs operadas por reator UASB no estado do Paraná.

### 3.3.3 Energia Elétrica Livre das ETEs

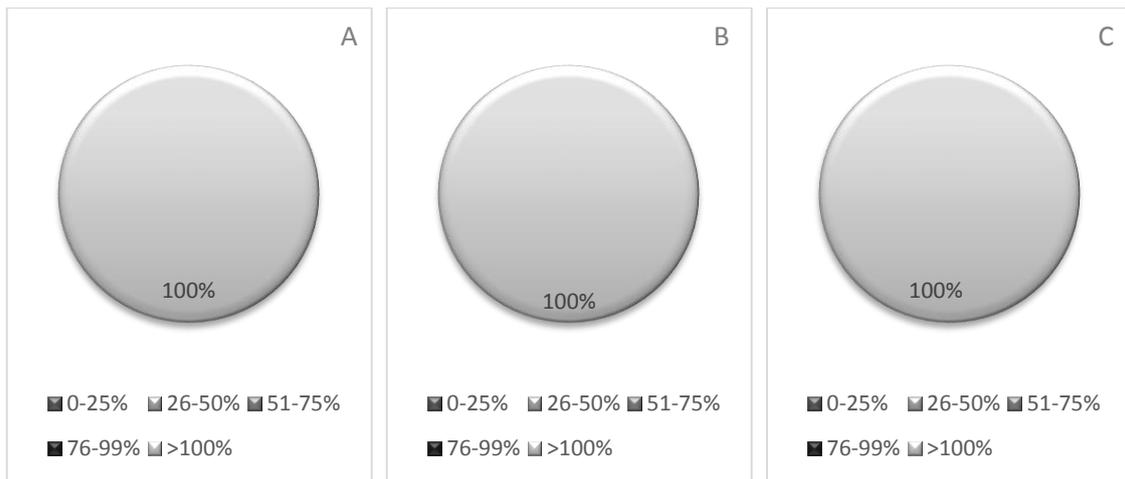
Nas Figuras 23, 24 e 25 são apresentadas as estações de pequeno, médio e grande porte, para os cenários pior, típico e melhor considerando a porcentagem de atendimento da demanda energética das ETEs considerando o consumo de eletricidade para secagem térmica do lodo. A avaliação ocorreu para 5 classes distintas que correspondem a porcentagem de ETEs que atendem à demanda energética em (i) 0-25%, (ii) 26-50%, (iii) 51-75%, (iv) 76-99% e v) > 100%.



**Figura 23 – Energia Elétrica Livre das ETEs de pequeno porte considerando o potencial energético do biogás e o consumo de eletricidade para os cenários: (a)pior, (b) típico e (c) melhor.**



**Figura 24 - Energia Elétrica Livre das ETEs de médio porte considerando o potencial energético do biogás e o consumo de eletricidade para os cenários: (a)pior, (b) típico e (c) melhor.**



**Figura 25 - Energia Elétrica Livre das ETEs de grande porte considerando o potencial energético do biogás e o consumo de eletricidade para os cenários: (a) pior, (b) típico e (c) melhor.**

Em todos os cenários, mais de 88% das ETEs de pequeno porte atendem em 100% da demanda energética. Ressalta-se para o melhor cenário, a qual 100% das ETEs supre a demanda energética e ainda há excedente. No cenário típico, 97% das ETEs atendem 75% ou mais do consumo de energia e apenas 3% supre a necessidade energética das ETEs em 25-50%.

As ETEs de médio e grande porte para todos os cenários obtiveram 100% das estações suprindo totalmente a demanda energética da estação e ainda gerando excedente.

Rosa (2013) ao avaliar o potencial de aproveitamento energético do biogás na ETE Laboreaux (Itabira/Minas Gerais) estimou que 57,6% da demanda energética da estação poderia ser suprida com a recuperação do biogás gerado.

Conclui-se que todas as ETEs de médio e grande porte considerando o cenário pior, típico e melhor possuem capacidade de suprir as demandas de energia elétrica e gerar eletricidade excedente que possa ser destinado para outras atividades ou para abastecer alguma comunidade vizinha. Esta capacidade de autossuficiência em termos de produção de eletricidade para ETEs de médio e grande porte foi reportado por Rosa (2013) ao simular ETEs com características hipotéticas e agora atestado por este estudo a partir de dados reais das 123 ETEs que operam com reatores UASB.

As Figuras 26, 27 e 28 apresentam a energia elétrica livre a partir do biogás para as ETEs operadas por reator UASB no estado do Paraná para o pior, típico e melhor cenário, respectivamente.

Observa-se para o pior cenário que 4 ETEs de pequeno porte (3% das ETEs) consomem mais energia que teria disponível caso houvesse o aproveitamento energético do biogás. Porém, 7 ETEs (6%) possuem energia livre acima de 100 GJ.dia<sup>-1</sup>, sendo todas de grande porte. Nota-se ainda que todas as ETEs de pequeno porte geram excedentes abaixo de 30 GJ.dia<sup>-1</sup>. A maioria das ETEs 82% (100 unidades) e 30% (37 unidades) para o pior e típico cenário, respectivamente, possuem energia elétrica livre na faixa de 0 - 30 GJ.dia<sup>-1</sup>.

No cenário típico, 2 ETEs de pequeno porte consomem mais energia que conseguiriam gerar caso houvesse o aproveitamento do potencial energético do biogás.

Lima (2012) estudando o potencial energético de uma ETE com reator UASB da Universidade Federal do Espírito Santo considerada de pequeno porte, pois apresenta uma vazão de 0,87 L.s<sup>-1</sup>, verificou uma produção de biogás 5,5 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup> correspondendo a uma geração de apenas 12 kWh por mês, não suprimindo sequer a demanda energética da própria ETE.

No melhor cenário não houve ETEs que apresentaram consumo de energia elétrica maior que a capacidade de geração de energia elétrica pelo uso do biogás. Destaca-se que 52,4% das ETEs (64 unidades) tem de energia livre acima de 60 GJ.dia<sup>-1</sup>. Novamente as ETEs responsáveis por gerar excedentes acima de 100 GJ.dia<sup>-1</sup> são de grande porte. Entretanto, todas as ETEs de pequeno porte apresentaram valores excedentes de energia elétrica na faixa de 30 - 60 GJ.dia<sup>-1</sup>.

As ETEs do Paraná possuem capacidade de gerar energia por meio do biogás suficiente para suprir suas demandas energéticas em atividades administrativas e operacionais, além de gerar um excedente que poderá ser utilizado na secagem térmica do lodo. Segundo Werf (2016), 85% das ETEs com digestão anaeróbia de lodo nos EUA empregam o biogás como fonte de energia, destes 49% são utilizados para aquecimento do próprio digestor.

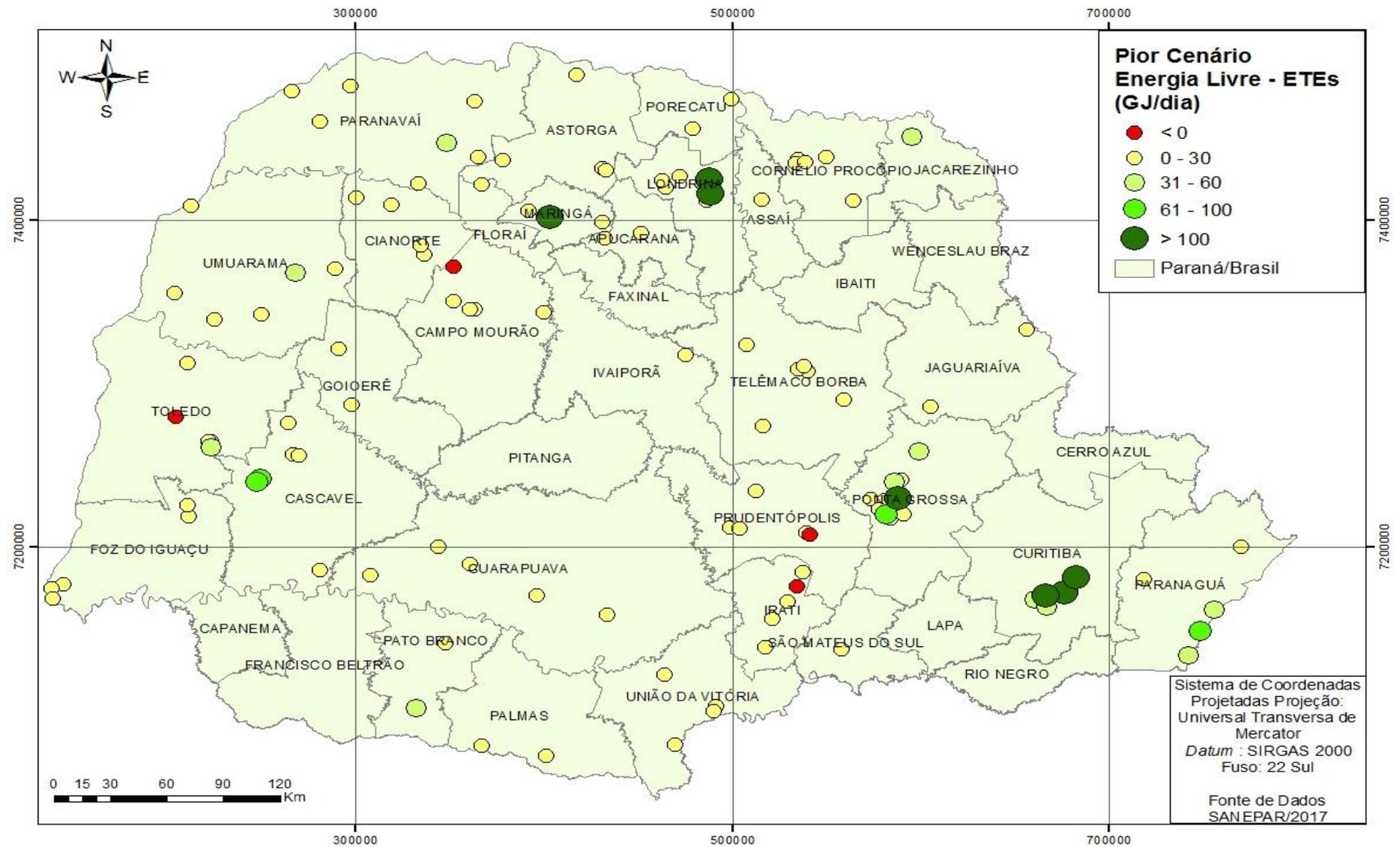


Figura 26 - Energia elétrica livre em ETes operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o pior cenário.

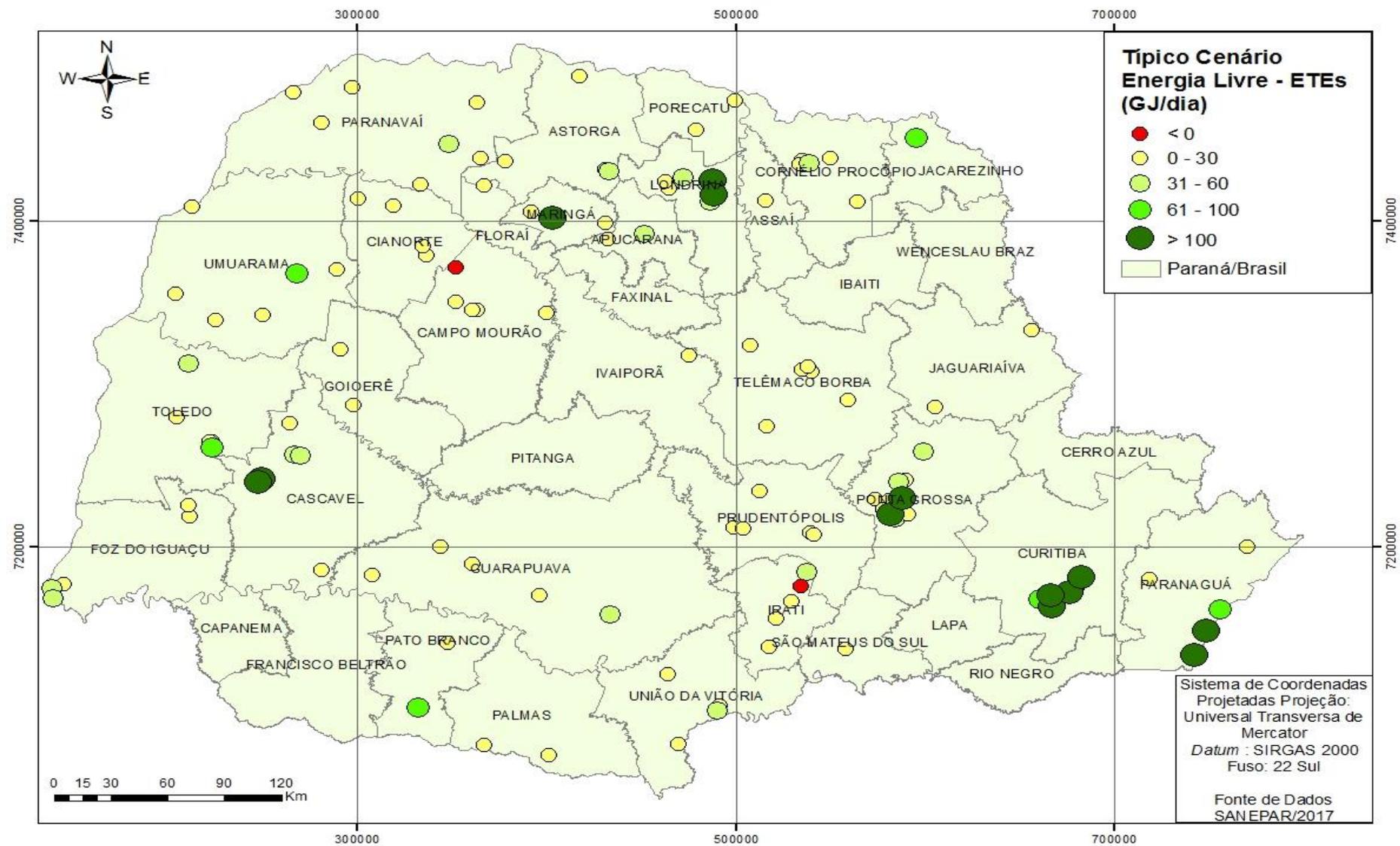


Figura 27 - Energia elétrica livre em ETes operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o cenário típico.

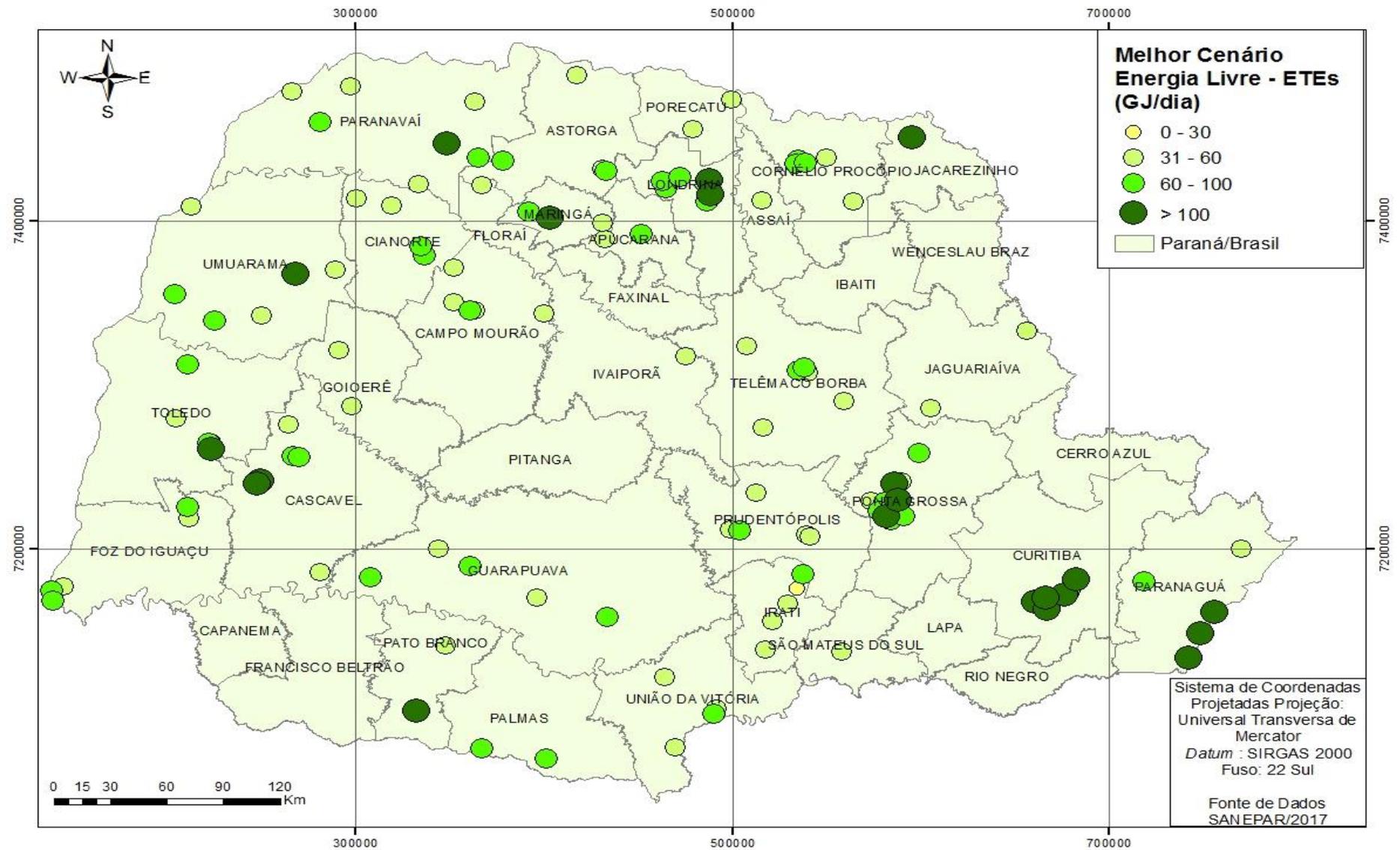


Figura 28 - Energia elétrica livre em ETes operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o melhor cenário.

### 3.3.4 Demanda de energia para secagem térmica do lodo nas ETEs.

A partir da Figura 29, a qual apresenta um panorama de produção de lodo diária tanto nas ETEs operadas por reatores UASB quanto para as microrregiões do estado do Paraná.

Observa-se que em apenas 4 unidades a produção diária de lodo foi maior que 1000 kg, destaca-se que ambas as ETEs são de grande porte. A maior produtora de lodo é a ETE Atuba Sul, onde gera 5233 kg.dia<sup>-1</sup> e a ETE Porto Figueira é a menor, produzindo apenas 4 kg.dia<sup>-1</sup>. Porém, 65% das ETEs possuem geração de lodo abaixo de 100 kg.dia<sup>-1</sup>, sendo 2 unidades de grande, 43 de médio e 34 de pequeno porte. As microrregiões de Curitiba, Londrina, Maringá, Cascavel e Ponta Grossa são as que mais produzem lodo no estado do Paraná, gerando mais de 1000 kg.dia<sup>-1</sup>. As regiões em branco não possuíam ETEs de acordo com o banco de dados. Entretanto a região de Assaí possui apenas 1 ETEs, a qual não possui dados de geração de lodo. A maioria das microrregiões apresentaram geração diária menor que 300 kg de lodo.

A espacialização da geração de lodo nas ETEs é de suma importância devido ao grande impacto ambiental causado pela destinação incorreta desse resíduo do tratamento de esgoto. Ainda, diante desses resultados a companhia de saneamento poderá planejar ações visando a redução dos custos com transporte e destinação do lodo.

Na Figura 30, 6 ETEs de grande porte necessitariam de mais de 5000 MJ.dia<sup>-1</sup> para remover toda a água presente no lodo. Destaca-se, a ETE Sul e a ETE Atuba Sul, que precisaria de 58980 e 78275 MJ.dia<sup>-1</sup> para secagem térmica de todo lodo gerado no processo de tratamento. A maioria das ETEs consumiriam menos de 500 MJ.dia<sup>-1</sup> para secar o lodo. Já a maioria das microrregiões necessitariam menos de 1000 MJ.dia<sup>-1</sup>. As microrregiões de Maringá, Ponta Grossa, Londrina e Curitiba demandariam para secar o lodo mais de 10000 MJ.dia<sup>-1</sup>.

Esse resultado demonstra a grande quantidade de energia necessária para secagem térmica do lodo, onerando ainda mais a companhia de saneamento. Porém, essa energia demandada para a secagem do lodo poderia ser suprida com o aproveitamento energético do biogás.

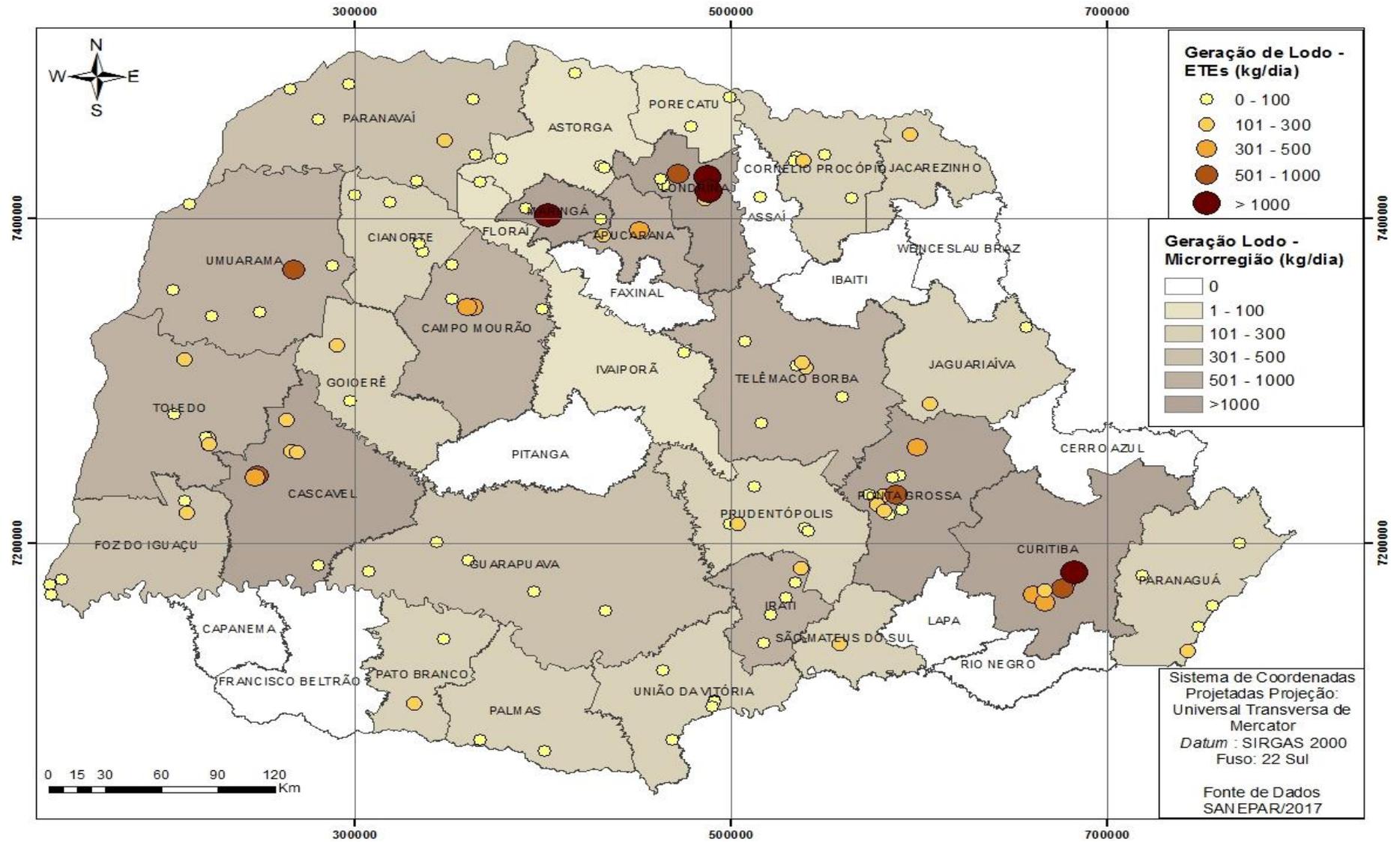


Figura 29 - Distribuição espacial da geração de lodo das ETEs operadas por reator UASB no estado do Paraná.

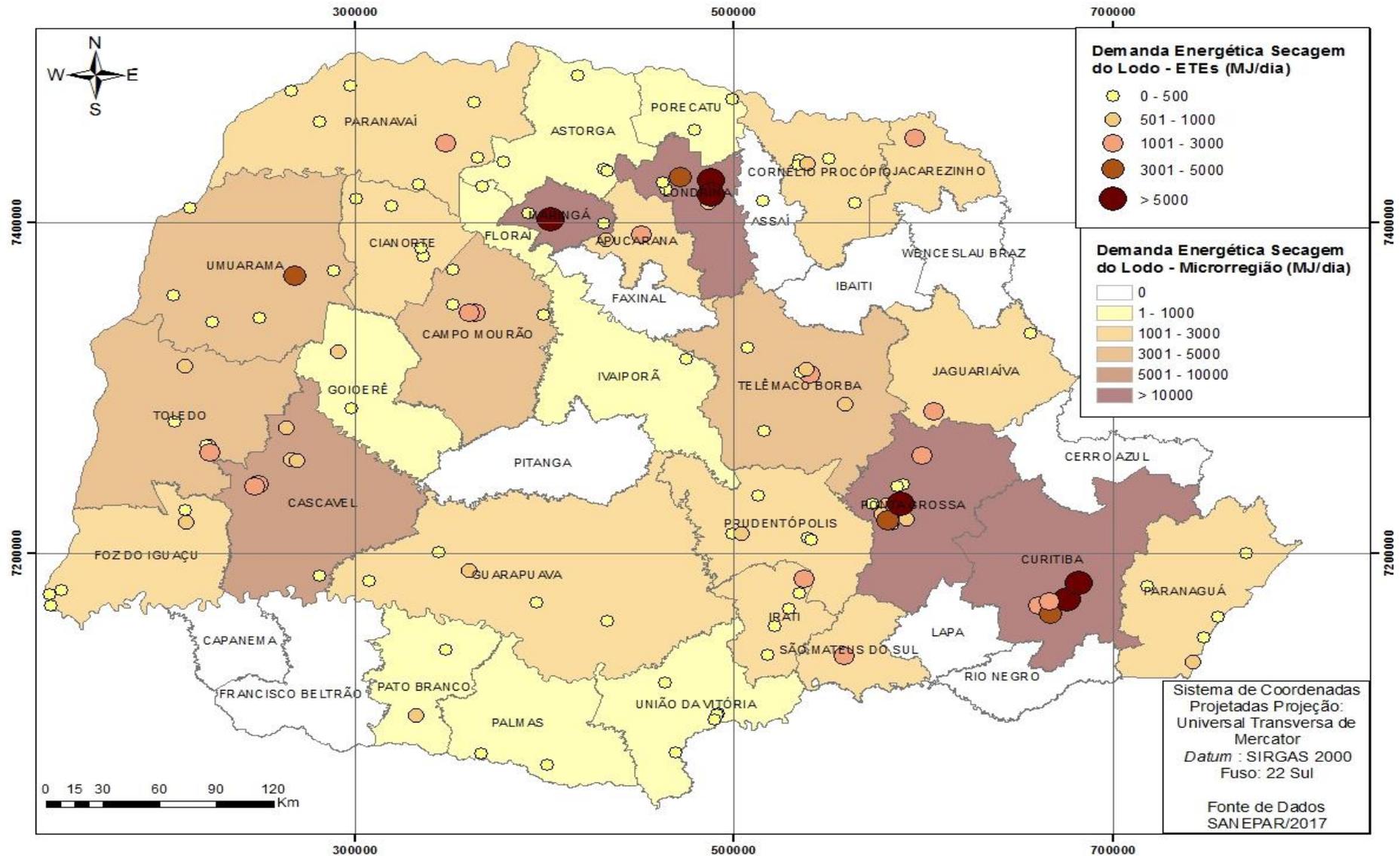


Figura 30 - Distribuição espacial do consumo de energia elétrica para a secagem do lodo gerado nas ETEs operadas por reator UASB no estado do Paraná.

### **3.3.5 Energia remanescente após a produção de eletricidade para atender às demandas energéticas das ETEs e promover a secagem térmica do lodo.**

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam a espacialização da energia excedente gerada após utilizar o potencial energético das ETEs nas demandas energéticas operacionais e administrativas e para a demanda de secagem térmica do lodo.

Os cenários pior e típico apresentam ETEs que não conseguem suprir as demandas energéticas por meio do seu potencial energético. Essas ETEs, podem suprir suas demandas, caso os excedentes de energia de ETEs próximas, destina-se a rede de distribuição gerando créditos de energia, o que é permissível pela Resolução 482/2012 e 687/2015 da ANEEL.

A maioria das ETEs geram excedentes na faixa de 0- 30 GJ.dia<sup>-1</sup> para os cenários pior e típico, e 31 - 60 GJ.dia<sup>-1</sup> para o melhor cenário.

Diante desses resultados, observa-se que as ETEs do estado do Paraná possuem potencial energético capaz de suprir suas demandas em atividades operacionais e administrativas, secar termicamente o lodo e ainda gerar excedentes que pode ser alocado para a redes de distribuição. Mostra-se interessante a utilização do potencial energético das ETEs para a secagem térmica do lodo, possibilitando a redução de custos com o gerenciamento do lodo nessas estações.

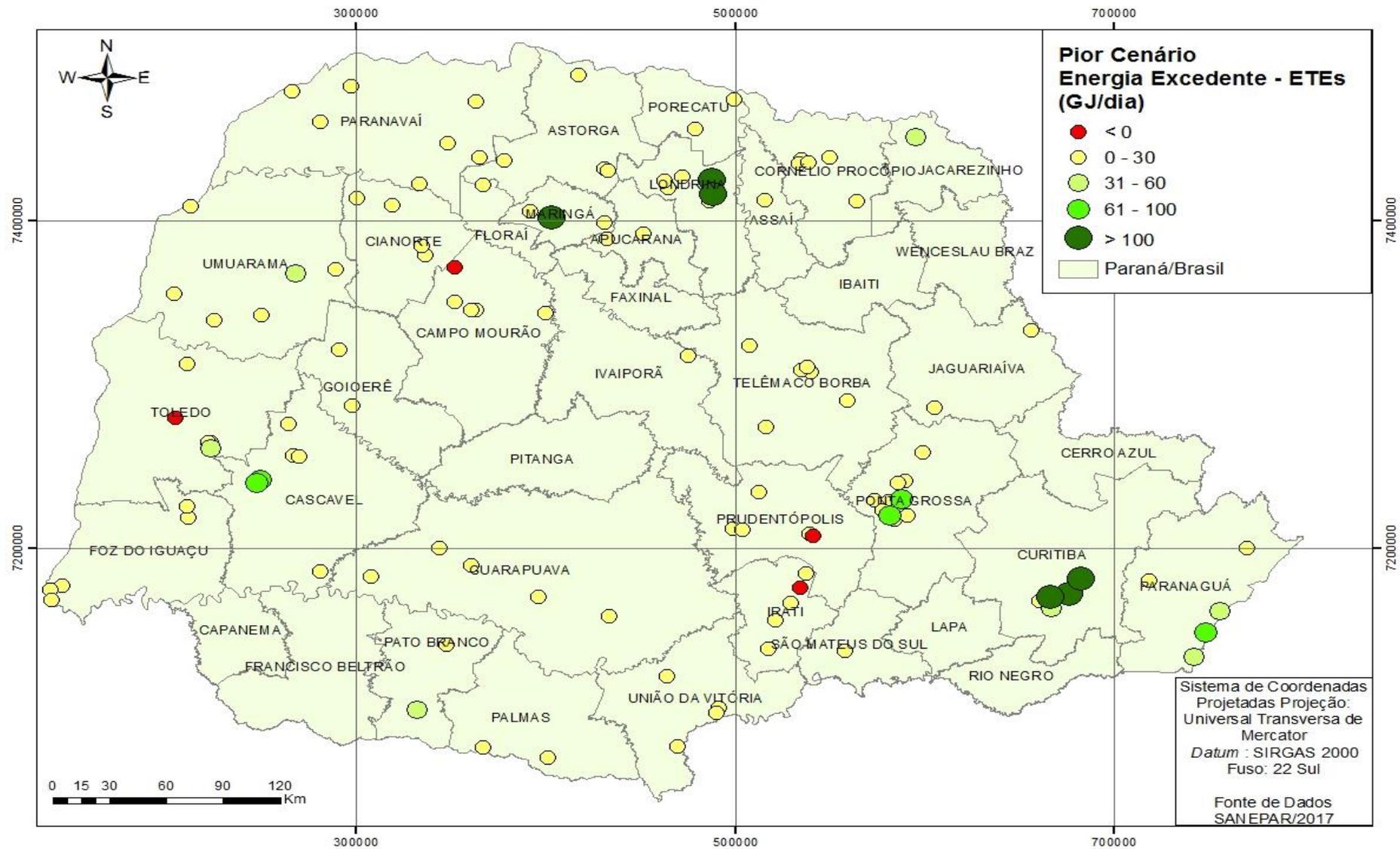


Figura 31 - Energia excedente em ETes operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o pior cenário.

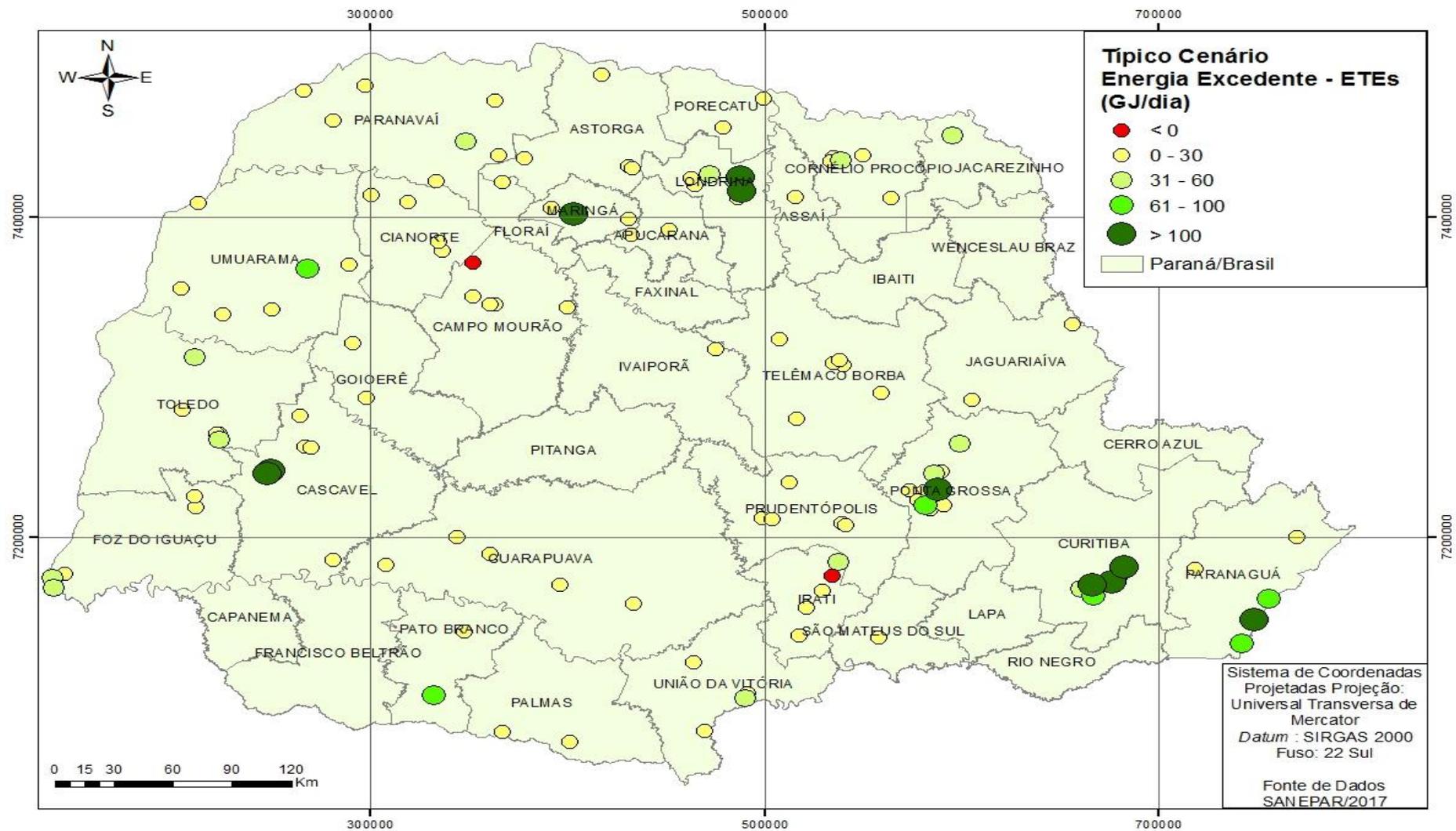


Figura 32 - Energia excedente em ETEs operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o típico cenário.

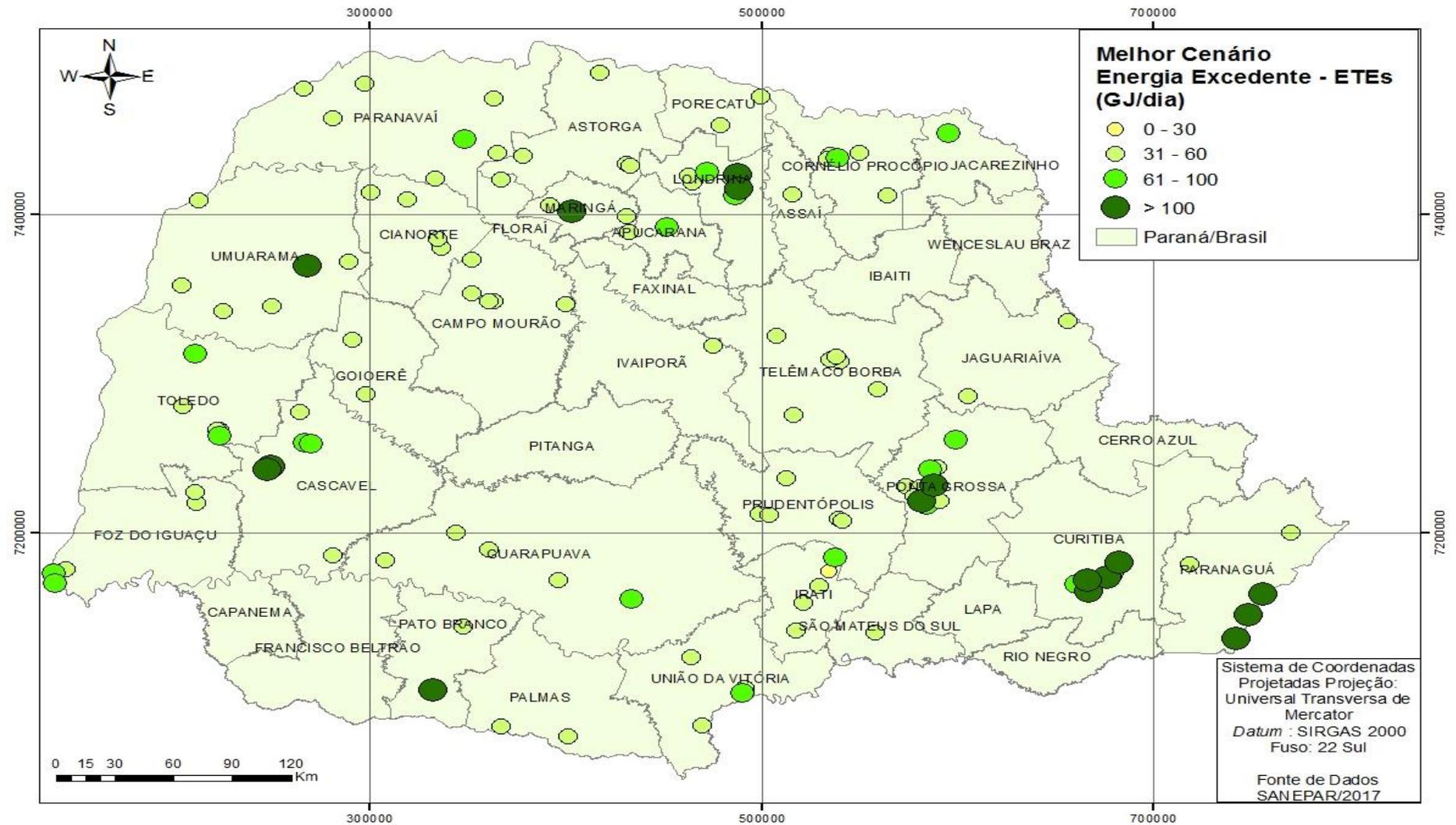
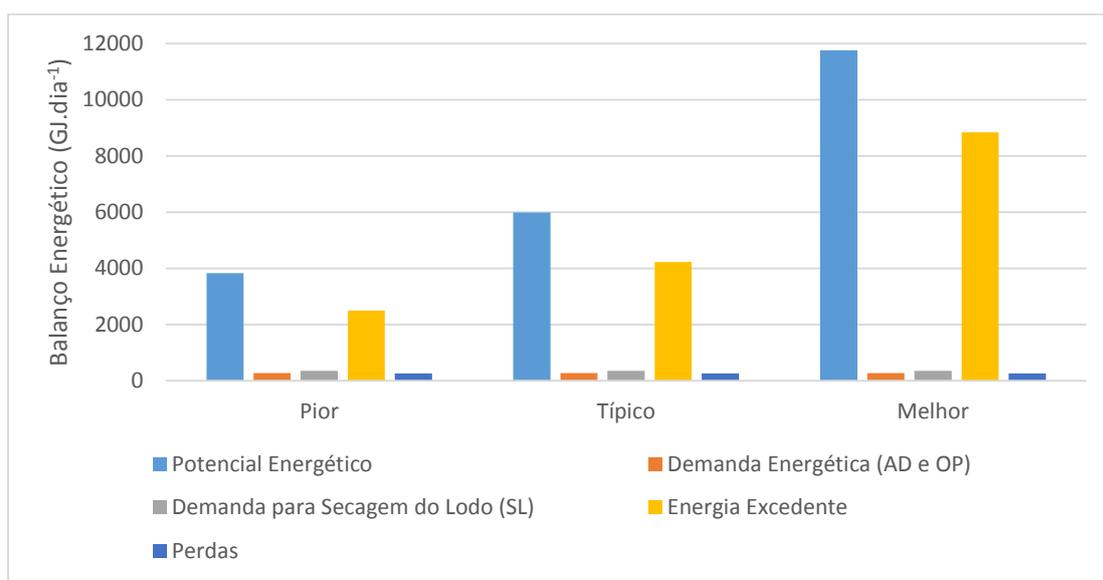


Figura 33 - Energia excedente em ETEs operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o melhor cenário.

### 3.3.6 Balanço Energético das ETEs.

O balanço energético é importante para comparar a produção com a demanda de energia e as perdas durante o processo das ETEs, com intuito de auxiliar nas tomadas de decisões futuras no que tange a eficiência energética.

A Figura 34 apresenta o balanço energético das ETEs operadas por reatores UASB no estado do Paraná.



**Figura 34 - Balanço energético das ETEs operadas por reator UASB no Paraná.**

Como pode observar, os potenciais energéticos das ETEs são superiores as demandas e as perdas inerentes aos processos de transformação de energias, para todos os cenários. Destaca-se que para o melhor cenário, o potencial do estado do Paraná apresenta valores acima de 10000 GJ.dia<sup>-1</sup>. Nota-se que as perdas representam apenas 7, 4 e 2% em relação ao potencial gerador para os cenários pior, típico e melhor, respectivamente.

Observa-se que o potencial energético supri as demandas operacionais e administrativas e a demanda para secagem térmica do lodo. Além disso, produz excedentes que podem ser disponibilizados na rede, criando assim créditos de energia, a qual pode ser utilizado em ETEs que não conseguiram suprir suas demandas energéticas.

### **3.4 CONCLUSÕES**

- As ETEs podem ser avaliadas como potenciais unidades para a geração de eletricidade, a qual pode ser aproveitada para consumo próprio ou inserida na rede de distribuição. Contribuindo não somente com o tratamento de efluente com fins de atendimento à legislação, mas como fonte de energia e diversificação da matriz energética brasileira.
- As microrregiões de Cascavel, Curitiba, Londrina, Maringá, Paranaguá e Ponta Grossa são as maiores geradoras de energia elétrica por meio do biogás.
- O uso dos SIGs permitiu identificar as estações operadas por reatores UASB e as microrregiões com maior potencial em geração de energia elétrica advinda do biogás, facilitando assim a tomada de decisões futuras pela companhia de saneamento frente ao aproveitamento energético deste subproduto.
- Diante dos dados reais avaliados, conclui-se que a transformação do biogás recuperado de reatores UASB em eletricidade pôde suprir integralmente as demandas energéticas operacionais e administrativas das ETEs de médio e grande porte para todos os cenários estudados.
- Conclui-se que a energia livre gerada supre a demanda energética para secagem térmica do lodo até uma umidade de 10%, ainda gera excedentes que poderá ser destinada a rede de distribuição.
- Ocorre perdas referentes a transformações energéticas durante os processos de geração de eletricidade e transformação de calor na secagem do lodo.
- Aponta-se a necessidade do aprimoramento da operação e funcionamento dos reatores UASB a fim de potencializar as propriedades energéticas do biogás.

### **3.5 REFERÊNCIAS**

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2012a. Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012 – In: Resoluções, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 20/12/2017.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2015a. Resolução Normativa N° 687, de 24 de novembro de 2015 – In: Resoluções, 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 20/12/2017.

BALAT, M.; BALAT, H. Biogas as a Renewable Energy Source - A Review. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. v. 31, nº 14, p.1280-1293, 2009.

BOUGRIER, C.; DELGENES, J.P.; CARRERE, H. Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield. Trans IChemE, Part B. Process Safety and Environmental Protection, 84(B4), p. 280-284, 2006.

CABRAL, C. B. G. Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 139. 2016.

CHERNICHARO, C.A.L.; STUETZ, R.M. Energy Recover from Biogas in Anaerobic Wastewater Treatment Plants. 2008. In: CHERNICHARO, C.A.L. Limitações e Possíveis Melhorias Futuras no Projeto, na Construção e na Operação de Reatores UASB Tratando Esgotos Domésticos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2009. Relatório final de atividades referente a pós-doutorado.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2022. Brasília. MME/EPE, 2013. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pdee/forms/epeestudo.aspx>>. Acesso em: 09/12/2017.

GU, Y.; LI, Y.; LI, X.; LUO, P.; WANG, H.; ROBINSON, Z.; WANG, X.; WU, J.; LI, F. The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants. Applied Energy, v. 204, p.1463-75, 2017.

JORDÃO, E.P e PESSÔA, C.A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 7ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

LIMA, A.; PASSAMANI, F. Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES. 2012. 106 p. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

LOBATO, L. C S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. 176 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

McCARTY, P.L.; BAE J.; KIM, J. Domestic wastewater treatment as a net energy producer can this be achieved? *Environ. Sci. & Technol.*, v. 45, p. 7100- 7106, 2011.

METCALF e EDDY. INC. Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos. 5. ed. New York, McGraw - Hill Book, 2016. 1815p.

MOREIRA, H.; POSSETTI, G; SOUZA, R.; KNOPKI, R.; ZAWADZKI, R. Diretrizes de capacitação para o uso de biogás de esgoto no Brasil. *Revista DAE*, v.66, nº 209, p. 134-150, 2017.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ- HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology*, v. 5, p. 93-114, 2006.

PÖSCHLA, M.; Warda, S.; Owende, P. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Appl. Energ.* 2010, 87, 3305–3321.

RIBEIRO, A.A.S.; Aplicações de Sistemas de Informações Geográficas em Empresas de Saneamento. 2012. 56 p. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Pós-Graduação em Geoprocessamento Aplicado ao Planejamento Urbano e Rural da Universidade Cruzeiro do Sul – Espírito Santo, 2012.

ROSA, A. P. Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto. 172 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ROSA, A. P.; CONESA, J. A.; FULLANA; A., MELO G. C. B.; BORGES, J. M.; CHERNICHARO, C. A. L. Energy potential and alternative usages of biogas and sludge from UASB reactors: case study of the Laboreaux wastewater treatment plant. *Water Science & Technology* 73.7., 2016.

ROSENFELDT, S. et al. Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais 2015.

RULKENS, W. Sewage sludge as a biomass resources for the production of energy: overview and assessment of the various options. *Energy & Fuels*, v.22, p.9-15, 2007.

SALOMON, K.R.; LORA, E.E.S. (2009) Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, p. 1101-1107.

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. Relatório de Administração e Sustentabilidade 2016. Disponível em:<<http://site.sanepar.com.br/a-sanepar/sanepar-em-numeros>>. Acesso em: 20 janeiro 2018.

SEMAE, SANASA, SANEPAR, SABESP, CEDAE, SANESUL. Custo de disposição final do lodo (R\$/t). Informações obtidas por meio de comunicação telefônica, apresentações e e-mail do segundo trimestre de 2014 até janeiro de 2015. [S.l.]. 2014.

SHEN, Y.; LINVILLE, J.L.; URGUN – DEMIRTAS, M.; MINTZ, M.M.; SNYDER, S.W. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v. 50, p. 346–362, 2015.

SHIRADO, J. Análise dos fluxos de materiais e de energia como ferramenta de gestão para uma estação de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico. 117f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) – Setor de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SNIS – Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. (2012) Ministério das Cidades. Diagnóstico dos serviços de água e esgoto. 18ª ed. Disponível em:

<<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=103>>.

Acesso em: 24 maio 2017.

STILLWELL, A. S.; HOPPOCK, D. C.; WEBBER, D. M. E. Energy Recovery from Wastewater Treatment Plants in the United States: A Case Study of the Energy-Water Nexus. *Sustainability*. v. 2, p. 945-962; doi:10.3390/su2040945, 2010.

TSAGARAKIS, K.P. (2007) Optimal number of energy generators for biogas utilization in wastewater treatment facility. *Energy Conversion and Management*, v. 38, p. 2694-2698.

VALENTE, V. B. Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil. 182f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

WERF. Water Environment Research Foundation. Energy efficiency in wastewater treatment in North America: A compendium of best practices and case studies of novel approaches. CH2M HILL Canada Limited, 2010.

WERLE S.; WILK R.K. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renewable Energy*, doi:10.1016/j.renene.2010.01.019, 2010.

ZANETTE, A. L. Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. 2009. 97 p. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZILOTTI, H.A.R. Potencial de produção de biogás em uma Estação de tratamento de esgoto de cascavel para a geração de energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O Brasil apresentou um retardo na cobertura de tratamento de esgoto, ficando abaixo de países menos expressivos em termos econômicos. Constatou-se que as piores regiões em saneamento no País são o Norte e Nordeste. Devendo ainda melhorar a distribuição de investimentos em saneamento no país.
- Notou-se grande aplicação de reatores anaeróbios no Brasil, principalmente os reatores UASB, sendo os estados de São Paulo, Paraná e Minas Gerais que mais utilizam dessa tecnologia. Porém, poucos estados realizam a recuperação energética do biogás, gerado nesses reatores, diante do potencial ainda a ser explorado.
- Ainda, o Brasil, nos próximos anos, necessitará de desburocratizar o setor de energia, com o intuito de incentivar o uso de fontes alternativas de energia como o biogás advindo do tratamento de esgoto.
- O estado do Paraná possui elevado número de reatores UASB instalado nas estações de tratamento de esgoto. Diante disso há um grande potencial a ser explorado no que tange a utilização do biogás e lodo produzidos nesses reatores para fins energéticos.
- O biogás apresentou como o subproduto principal das ETEs do Paraná, podendo vir a ser reaproveitado para suprir as demandas energéticas dessas ETEs.
- O georreferenciamento do potencial do biogás e lodo permitiu especializar e visualizar as estações de tratamento de esgoto e microrregiões do Paraná com maiores potenciais possibilitando o gerenciamento e a promoção do reaproveitamento energético desses subprodutos.
- As ETEs do Paraná poderão atender completamente a demanda por energia elétrica nas atividades operacionais e administrativas no tratamento de esgoto por meio do reaproveitamento energético do biogás.
- Nota-se que, a energia livre poderá ser utilizada para secagem térmica do lodo reduzindo sua umidade até 10%, sendo extremamente benéfico para as companhias, devido a redução do volume de lodo a ser transportado para destinação final.

- O aproveitamento energético do biogás promoverá nas ETEs estudadas a sustentabilidade energética, reduzindo custos com energia elétrica e mitigando os impactos ambientais inerentes dos processos de tratamento de esgoto e da destinação final do lodo.

### **3.7 RECOMENDAÇÕES**

Diante dos resultados obtidos no presente trabalho, recomenda-se para a condução de trabalhos futuros:

- Avaliar o aproveitamento energético do biogás e lodo nas microrregiões.
- Propor outras alternativas para os subprodutos gerados nos reatores UASB.
- Avaliar a viabilidade econômica da utilização do lodo como fonte energética.
- Avaliar a viabilidade econômica para implantação de sistema de reaproveitamento energético do biogás.
- Quantificar a vazão de biogás *in situ*.
- Expandir o estudo para outros estados que contenha estações de tratamento de esgoto com reatores UASB.