

XI - 588 - ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ETES OPERADAS POR REATORES UASB NO ESTADO DO PARANÁ, BRASIL

Lucas Sampaio Lopes ⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Recursos Hídricos e Ambientais – UFV. Doutorando em Recursos Hídricos e Ambientais – UFV.

André Pereira Rosa ⁽²⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (2007), mestrado (2009) e doutorado (2013) em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Atualmente é professor Adjunto do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), atuando no curso de Engenharia Agrícola e Ambiental.

Thaís da Silva Alves ⁽³⁾

Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Julia Silva Marco ⁽³⁾

Bacharel em Geografia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Endereço ⁽¹⁾: Rua Augusta Siqueira, 161, apt 303/bloco A - Centro - Viçosa – Minas Gerais - CEP: 36570-125 - Brasil - Tel: +55 (31) 99322-0813 - e-mail: lucas.s.lobes@ufv.br.

RESUMO

A crise hídrica, vivenciada no Brasil nos últimos anos, prejudicou o abastecimento de água e a produção de energia proveniente de usinas hidrelétricas, sendo necessário o acionamento das termelétricas, que são mais caras e poluentes. Nesse contexto, para diminuir a dependência hídrica na produção de energia brasileira, a geração de energia elétrica por meio do biogás no tratamento de esgoto doméstico torna-se uma alternativa. A pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial de produção de energia elétrica advinda do biogás gerado em ETES com reatores UASB no estado do Paraná. O estudo foi realizado em 122 estações de tratamento de esgoto. A avaliação do potencial de produção de energia elétrica foi realizada por meio da metodologia proposta por Lobato (2011), considerando-se a conversão do biogás em energia elétrica por um equipamento motogerador com eficiência de 30%. Por fim, pôde-se constatar que a energia elétrica gerada nas ETES supriria as demandas operacionais e administrativas, a demanda para secagem térmica do lodo e ainda geraria excedentes que poderá ser utilizada em ETES que não atingiram o potencial necessário ou serem fornecidas para a rede de distribuição. Destaca-se que para o melhor cenário, o Paraná possui capacidade de geração acima de 6,7 GW dia⁻¹, o equivalente para abastecer uma população de aproximadamente 960 mil habitantes. Dessa forma, a produção de energia elétrica por meio do biogás em ETES é factível e contribui para diversificar a matriz energética brasileira e para redução da emissão de gases efeito estufa.

PALAVRAS-CHAVE: Energia, Biogás, Reator UASB.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas vêm propiciando emergências recorrentes e intensas. Exemplo disso, é a crise hídrica enfrentada pelo Brasil, sendo considerada a pior dos últimos 91 anos, o que afeta diretamente o setor elétrico devido a dependência das hidrelétricas.

Nesse viés, para alcançar a qualidade do efluente exigida na legislação brasileira, o setor de saneamento consome bastante energia elétrica, sendo o segundo maior custo operacional dessas companhias. Os gastos com energia pelas concessionárias de saneamento brasileiras impactam diretamente em seus orçamentos prejudicando investimentos em outras áreas do setor. Neste contexto, a redução das despesas com energia elétrica pelas companhias de saneamento faz-se necessário e o aproveitamento energético do biogás gerado no tratamento de esgoto surge como alternativa.

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).

Segundo Valente (2015), o biogás pode contribuir com geração de energia elétrica para uso em benefício da própria ETE ou inserida na rede de distribuição. Além disso, a recuperação da energia térmica liberada com a queima do biogás pode conferir redução da quantidade de lodo destinado ao aterro sanitário devido ao ser utilizado no processo de secagem.

Já Salomon e Lora (2009) aponta que a produção de energia elétrica a partir do biogás gerados em sistemas anaeróbios 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.

De acordo com Metcalf e Eddy (2016), o processo anaeróbio mais utilizado para o tratamento de esgoto doméstico em escala mundial é o reator UASB. 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 $43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Nos reatores UASB, o biogás é formado por meio da digestão anaeróbia de microrganismos em perfeito equilíbrio e condições ideais. O processo ocorre por meio de quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A substância final de cada etapa serve como base para a próxima, sendo assim, um dos produtos do sistema.

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. Atualmente das 235 ETEs em funcionamento no estado, 182 são operadas por reatores UASB, com vazões variando de $3 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ a $4032 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ (SANEPAR, 2016).

Entretanto, no Estado do Paraná apenas duas ETEs realizam o aproveitamento energético do biogás, a qual a ETE Ouro Verde 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 à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A partir disso, estudos de viabilidade do aproveitamento energético do biogás gerado 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 (Valente, 2015; Rosa, 2013). Logo, este trabalho tem como objetivo avaliar a produção de energia elétrica por meio do biogás gerado em ETEs operadas por reatores UASB.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

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. A Figura 1 demonstra a localização geográfica de cada estação.

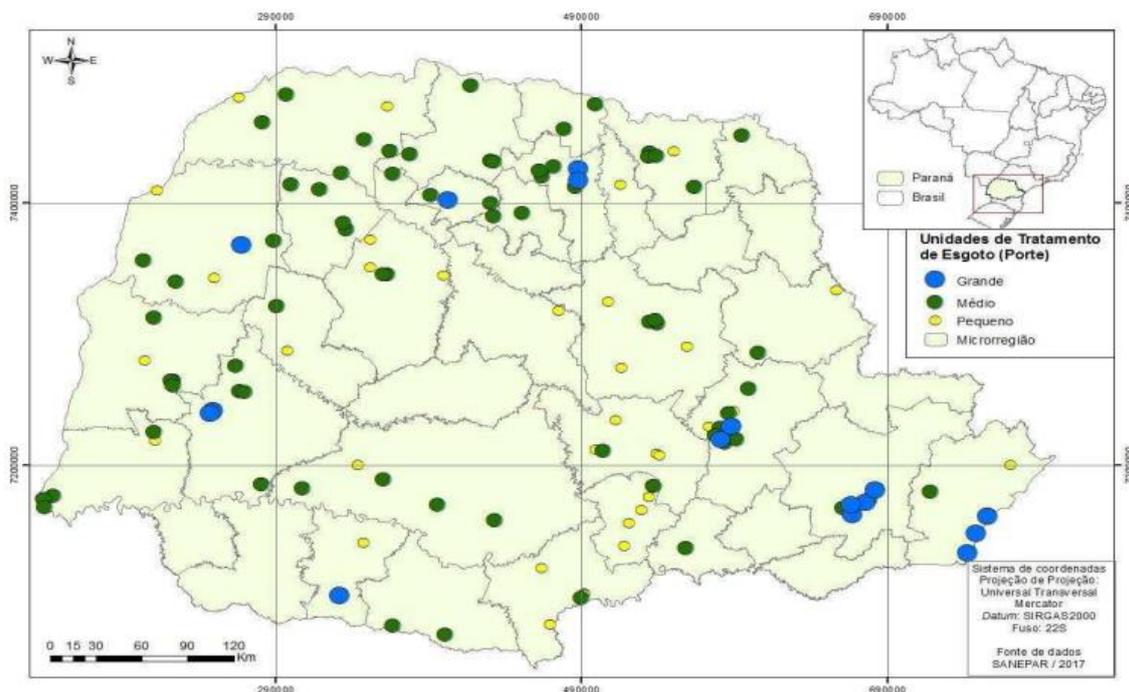


Figura 1 - Localização das ETEs que operam por reatores UASB no estado do Paraná de acordo com o porte.

2.1 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA NAS ETEs

O potencial energético do biogás gerados em ETEs de diferentes portes foi estimado a partir da equação proposta por Lobato (2011) apresentada na Tabela 1, considerando-se a conversão do potencial do biogás em energia elétrica por um equipamento motogerador com eficiência de 30%. Os dados de entrada foram levantados pela companhia de saneamento no ano de 2016.

Tabela 1: Equação utilizada para a estimativa do potencial energético do biogás em ETEs operadas por reatores UASB.

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

Fonte: Lobato (2011).

O modelo empregado para a estimativa do potencial energético do biogás foi elaborado de acordo com três cenários (i) pior; (ii) típico e (iii) melhor, a qual consideram os potenciais de geração dos subprodutos para diferentes características do esgoto bruto, conforme Tabela 2. O cenário típico corresponde às condições intermediárias para os dois cenários apresentados.

Tabela 2: Descrição das características do pior e melhor cenários para o modelo matemático relativo ao lodo e biogás gerados em reatores UASB.

Aspectos relacionados ao biogás	Pior	Melhor
	Sistemas operando com esgoto mais diluído	Sistemas operando com esgoto mais concentrados
	Maiores concentrações de sulfato no afluente	Menores concentrações de sulfato no afluente
	Menor eficiência de remoção de DQO	Maior eficiência de remoção de DQO
	Maiores índices de perda de metano	Menores índices de perda de metano

2.2 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.

2.3 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.

2.4 BALANÇO ENERGÉTICO 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.

2.5 DETERMINAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EXCEDENTE NAS ETEs

A energia excedente correspondeu à diferença entre a energia gerada e a demanda energética para atividades operacionais e secagem térmica do lodo das ETEs.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ENERGIA ELÉTRICA GERADA NAS ETEs

A Figura 2 apresenta o potencial de energia elétrica das ETEs de pequeno, médio e grande porte operadas por reatores UASB no estado do Paraná.

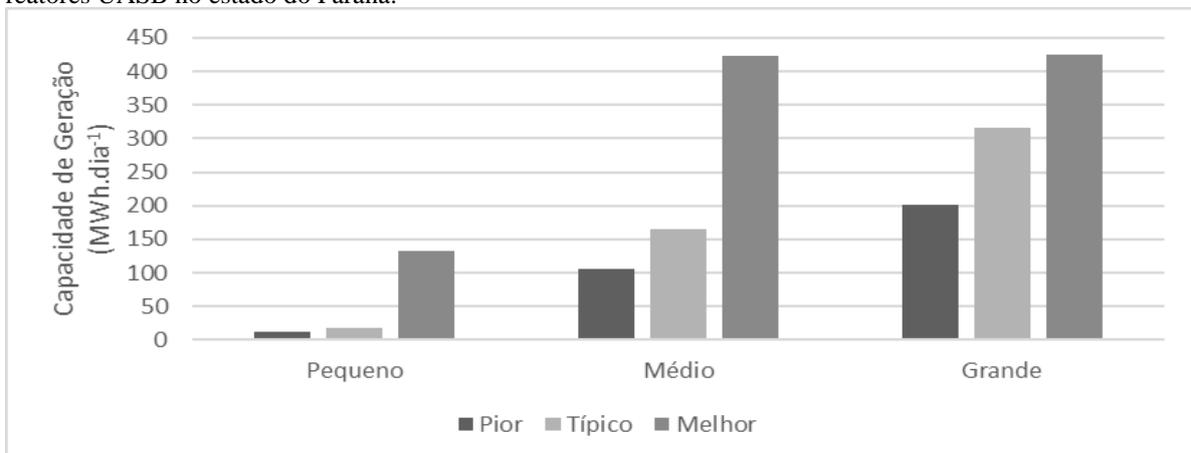


Figura 2 - Capacidade de geração de energia elétrica considerando os portes das ETEs e os cenários pior, típico e melhor.

As ETEs de pequeno porte possuem a menor capacidade de geração de energia elétrica dentre a análise. Para o pior, típico e melhor cenário a capacidade de geração de energia elétrica foi de 11, 18 e 132 MWh/dia.

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⁻¹, 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 possuem a mesma capacidade de geração de energia elétrica de 423 MWh. dia⁻¹.

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. Nesse cenário, essas ETEs podem gerar até 316 MWh. dia⁻¹, o que corresponde ao abastecimento de uma cidade com aproximadamente 109 mil habitantes, conforme observado na Tabela 3.

Ainda, para o cenário típico, o potencial energético produzido nas estações de tratamento de esgoto no Paraná pode vir a abastecer uma população total de 172 mil habitantes.

Tabela 3: Capacidade de geração de energia elétrica em Equivalente Populacional para cada porte de ETE.

Equivalente Populacional (hab.)			
Cenário / Porte	Pior	Típico	Melhor
Pequeno	3899	6090	45818
Médio	36523	57039	145730
Grande	69678	108818	146198

O equivalente populacional referente a geração de energia elétrica gerada nas ETEs do Paraná foi estimado de acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, a qual o consumo elétrico per capita da região Sul corresponde a 2,901 kWh/hab.

As Figuras 3, 4 e 5 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.

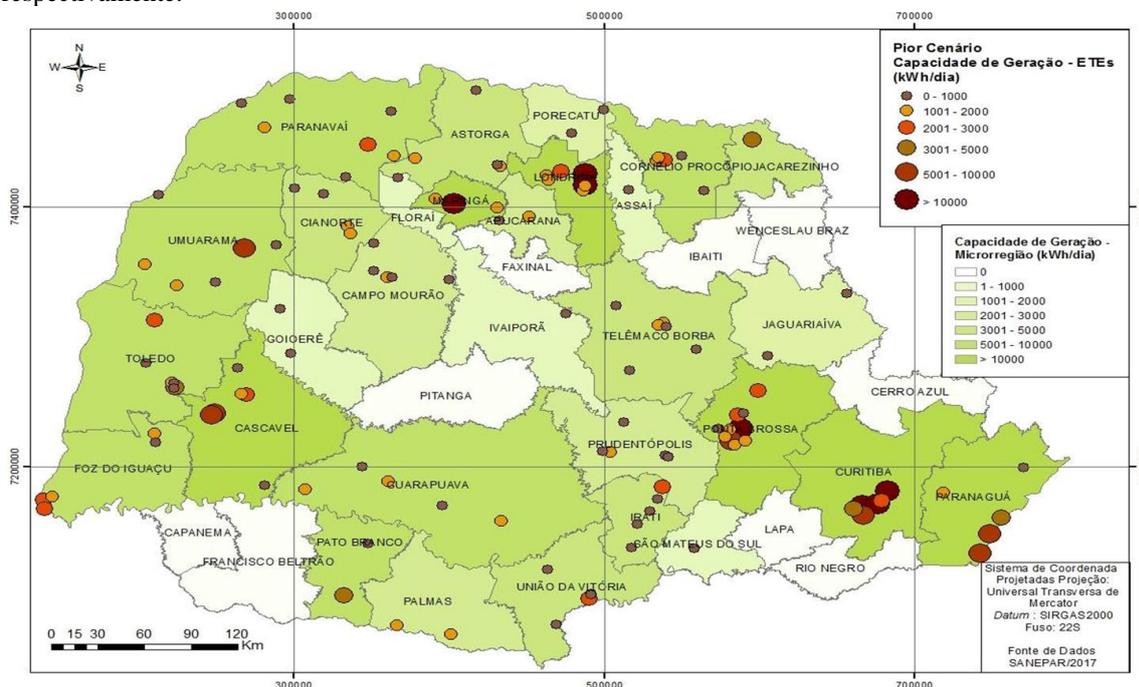


Figura 3 - Distribuição espacial da capacidade de geração de energia elétrica por meio do biogás em ETEs operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o pior cenário.

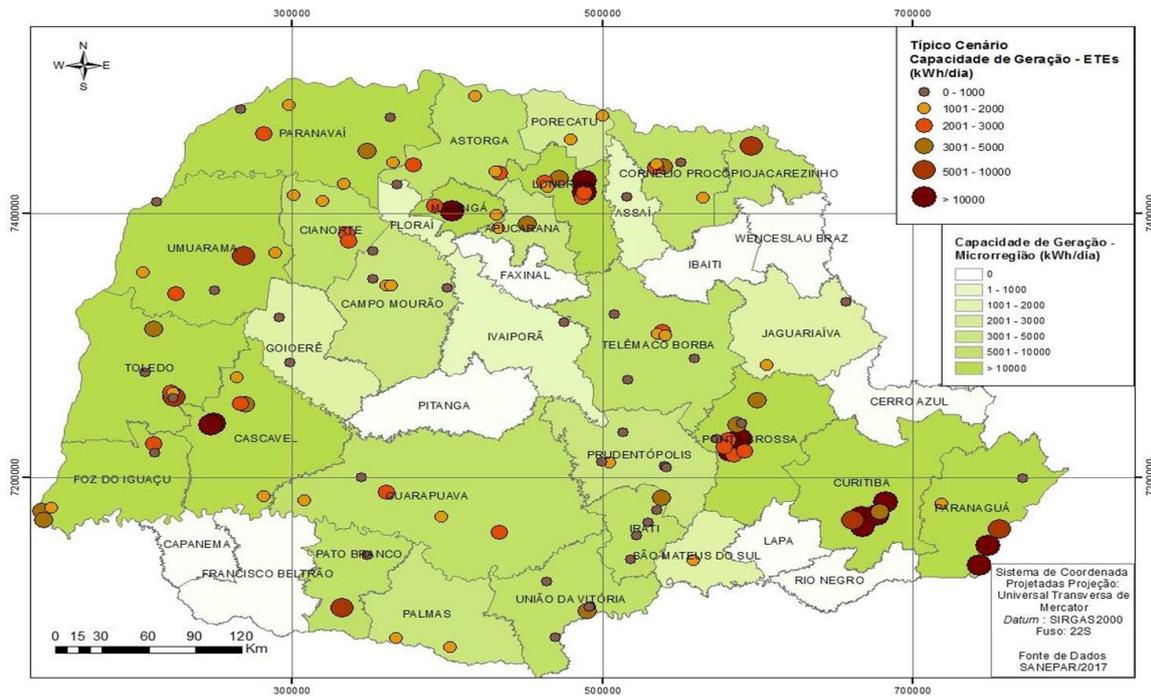


Figura 4: Distribuição espacial da capacidade de geração de energia elétrica por meio do biogás em ETES operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o típico cenário.

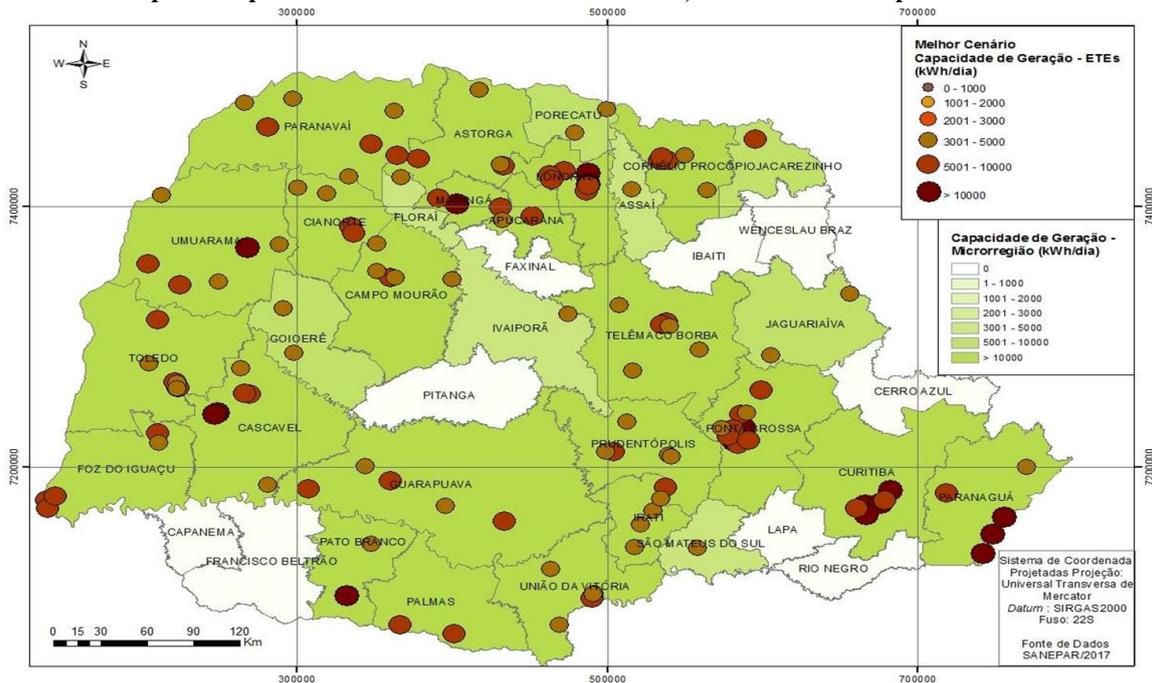


Figura 5: Distribuição espacial da capacidade de geração de energia elétrica por meio do biogás em ETES operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o melhor cenário.

À 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 1 MWh.dia⁻¹. Ainda neste cenário, 28% das ETES (35 unidades) têm capacidade de gerar de 1-2 MWh.dia⁻¹. Diante disso, 74% das estações (91 unidades) geram até 2 MWh.dia⁻¹. Destaca-se que as ETES com capacidade de geração acima de 5 MWh.dia⁻¹ são de grande porte.

3.2 DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA NAS ATIVIDADES OPERACIONAIS E ADMINISTRATIVAS DAS ETES

A maioria das ETES, cerca de 70% (86 unidades) consomem menos de 100 kWh.dia⁻¹. 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⁻¹, sendo 75% destas de grande porte. Conforme apresentado a seguir nas figuras 6 e 7.

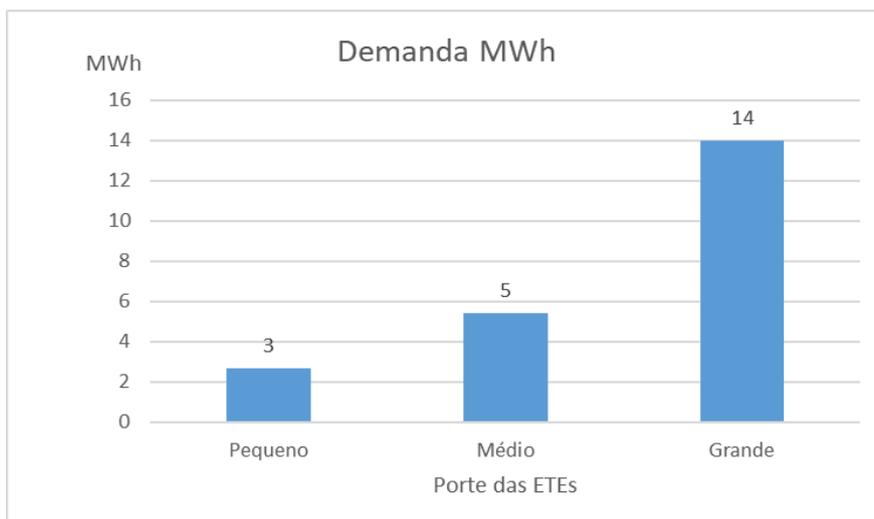


Figura 6: Demanda de energia elétrica nas atividades operacionais e administrativas das ETES classificada de acordo com o porte.

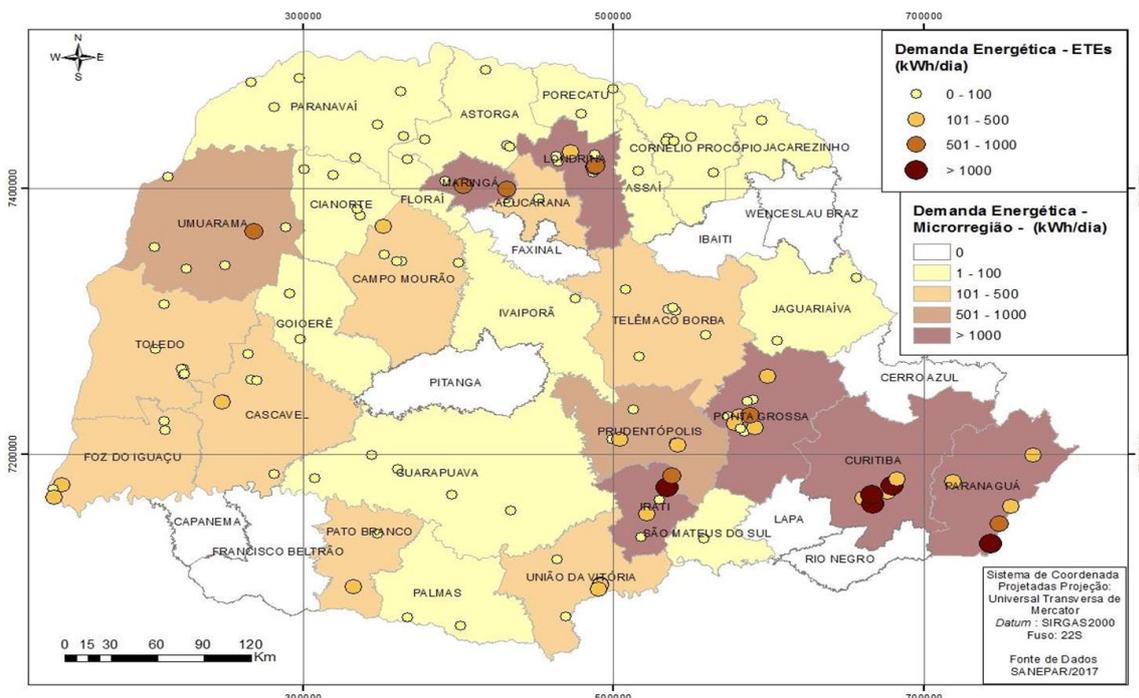


Figura 7: Distribuição espacial do consumo de energia elétrica das ETES operadas por reator UASB no estado do Paraná.

3.3 DEMANDA ENERGÉTICA PARA SECAGEM TÉRMICA DO LODO NAS ETES

Atualmente o destino 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).

Durante o estudo houve o recorte do panorama de produção de lodo diária nas ETES operadas por reatores UASB. 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⁻¹ e a ETE Porto Figueira é a menor, produzindo apenas 4 kg.dia⁻¹. Porém, 65% das ETES possuem geração de lodo abaixo de 100 kg.dia⁻¹, sendo 2 unidades de grande, 43 de médio e 34 de pequeno porte.

Em 6 ETES de grande porte necessitam de mais de 5000 MJ.dia⁻¹ para remover toda a água presente no lodo. Destaca-se, a ETE Sul e a ETE Atuba Sul, que necessitam de 58980 e 78275 MJ.dia⁻¹, respectivamente, para secagem térmica de todo lodo gerado no processo de tratamento. A maioria das ETES consumiram menos de 500 MJ.dia⁻¹ para secar o lodo.

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.

A Figura 10 revela a distribuição espacial do consumo de energia elétrica para a secagem do lodo gerado nas ETES de acordo com as microrregiões do Paraná.

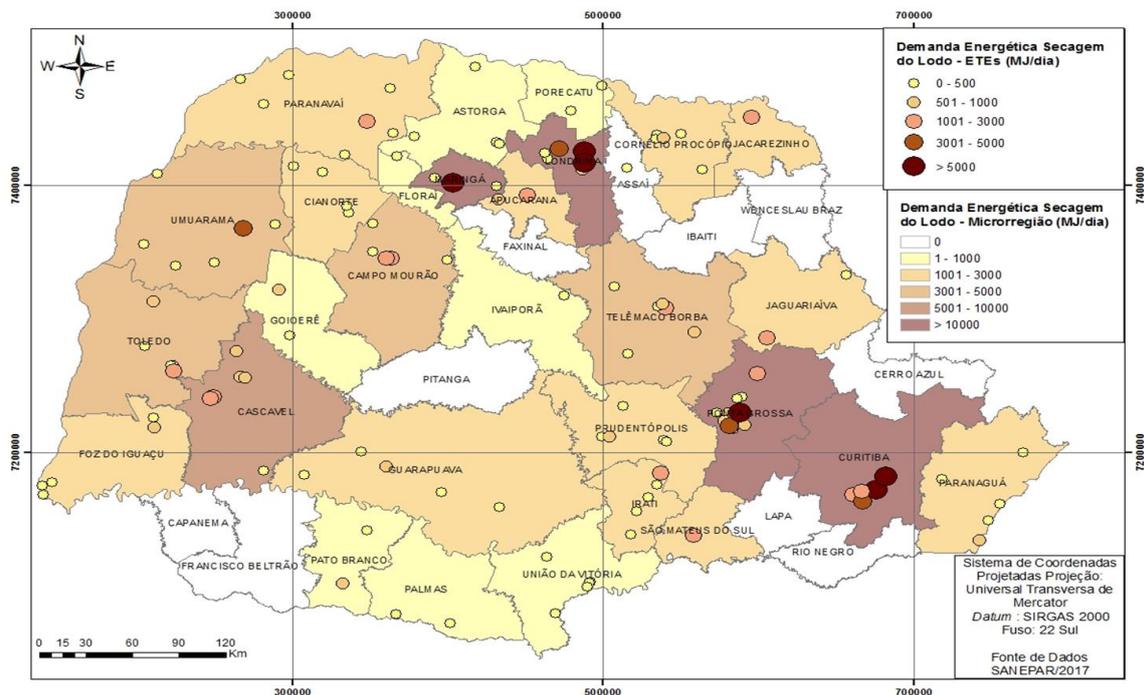


Figura 10: Distribuição espacial do consumo de energia elétrica para a secagem do lodo gerado nas ETES operadas por reator UASB no estado do Paraná.

3.4 BALANÇO ENERGÉTICO DAS ETES

Nas Figuras 8, 9 e 10 são apresentadas a porcentagem das estações de pequeno, médio e grande porte, para os cenários pior, típico e melhor que conseguem suprir a demanda energética das ETES, consumo de eletricidade para as demandas operacionais e secagem térmica do lodo, por meio da sua própria geração. 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%.

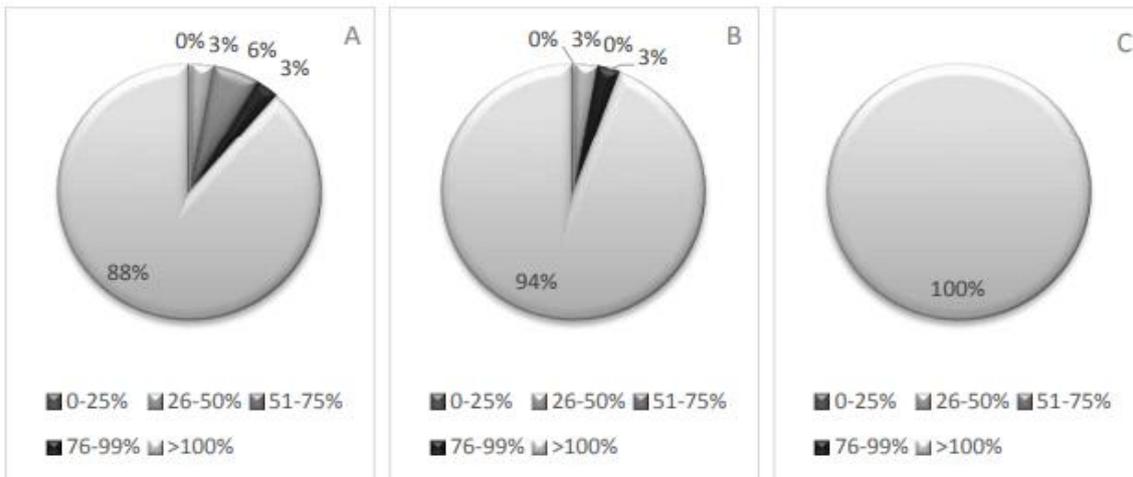


Figura 8: ETEs de pequeno porte considerando o potencial energético do biogás e o consumo de eletricidade para os cenários: (a) pior, (b) típico e (c) melhor.



Figura 9: 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.

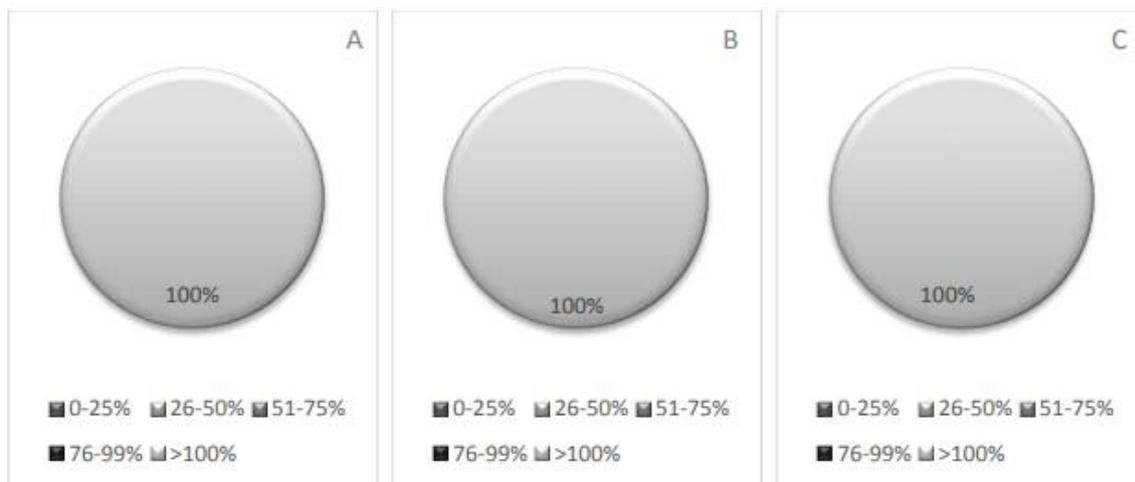


Figura 9: ETEs de grande porte considerando o potencial energético do biogás e o consumo de eletricidade para os cenários: (a) pior, (b) típico e (c) melhor.

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

As ETEs de médio e grande porte considerando o pior, típico e melhor cenário possui capacidade de suprir o consumo de energia elétrica e gerar saldo elétrico 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 122 ETEs que operam com reatores UASB.

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 10 apresenta o balanço energético das ETEs operadas por reatores UASB no estado do Paraná.

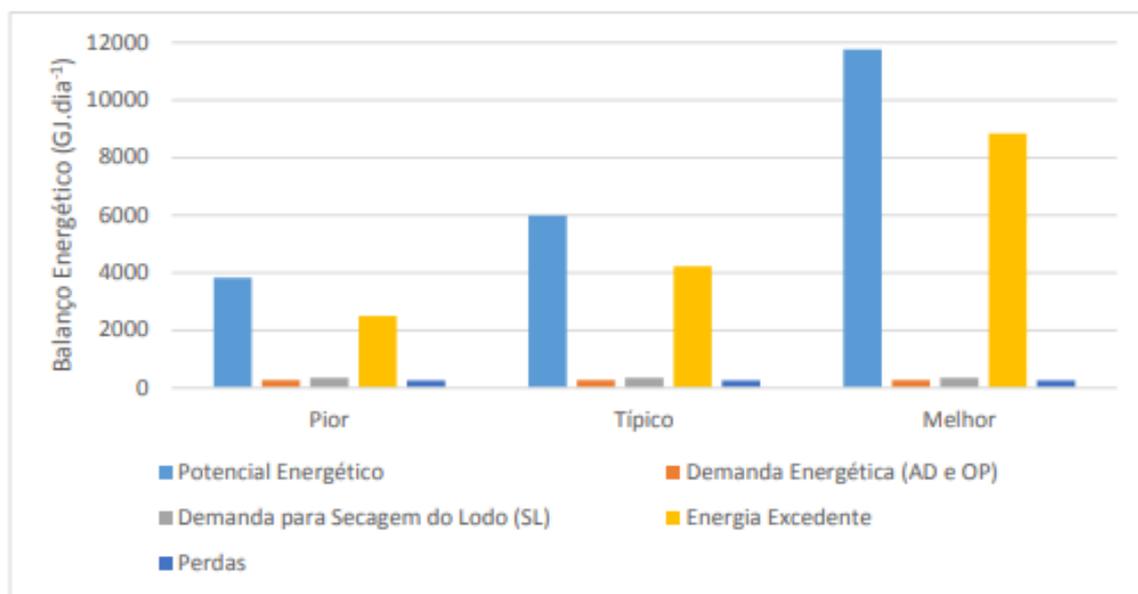


Figura 10: Balanço energético das ETEs operadas por reator UASB no Paraná.

Como pode-se observar, os potenciais energéticos das ETEs são superiores às 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⁻¹. 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 supre 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.

3.5 ENERGIA REMANESCENTE APÓS A PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE PARA ATENDER ÀS DEMANDAS ENERGÉTICAS DAS ETES E PROMOVER A SECAGEM TÉRMICA DO LODO

As Figuras 11, 12 e 13 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, destinem-se a rede de distribuição gerando créditos de energia, o que é permissível pela Resolução 482/2012 e 687/2015 da ANEEL.

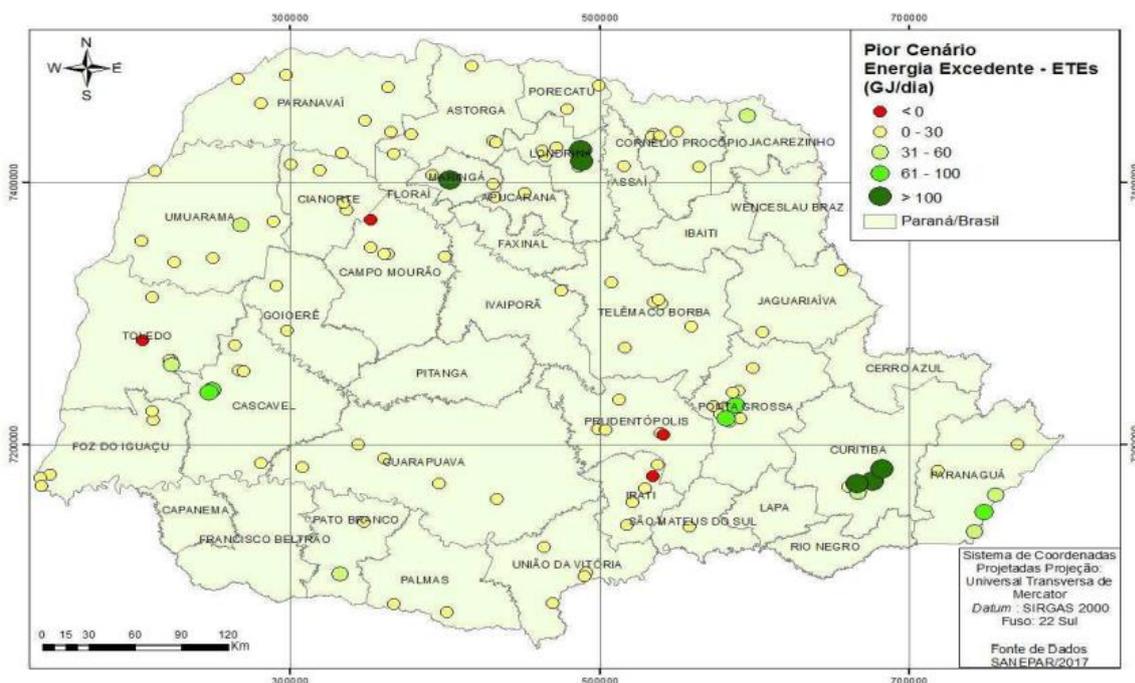


Figura 11: Energia excedente em ETES operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o pior cenário.

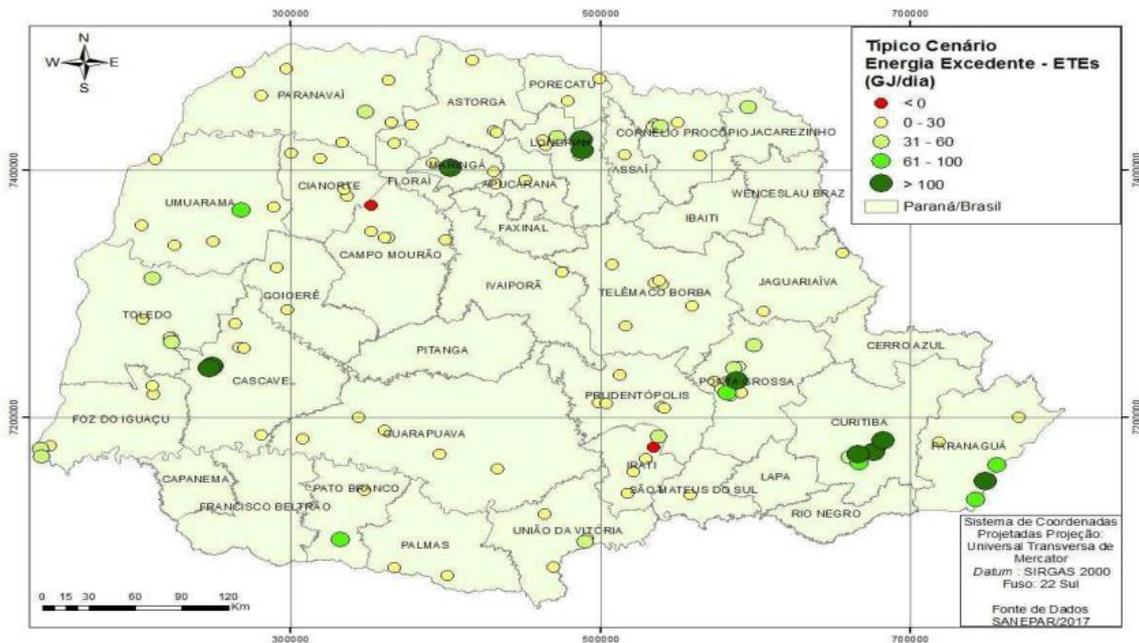


Figura 12: Energia excedente em ETES operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o típico cenário.

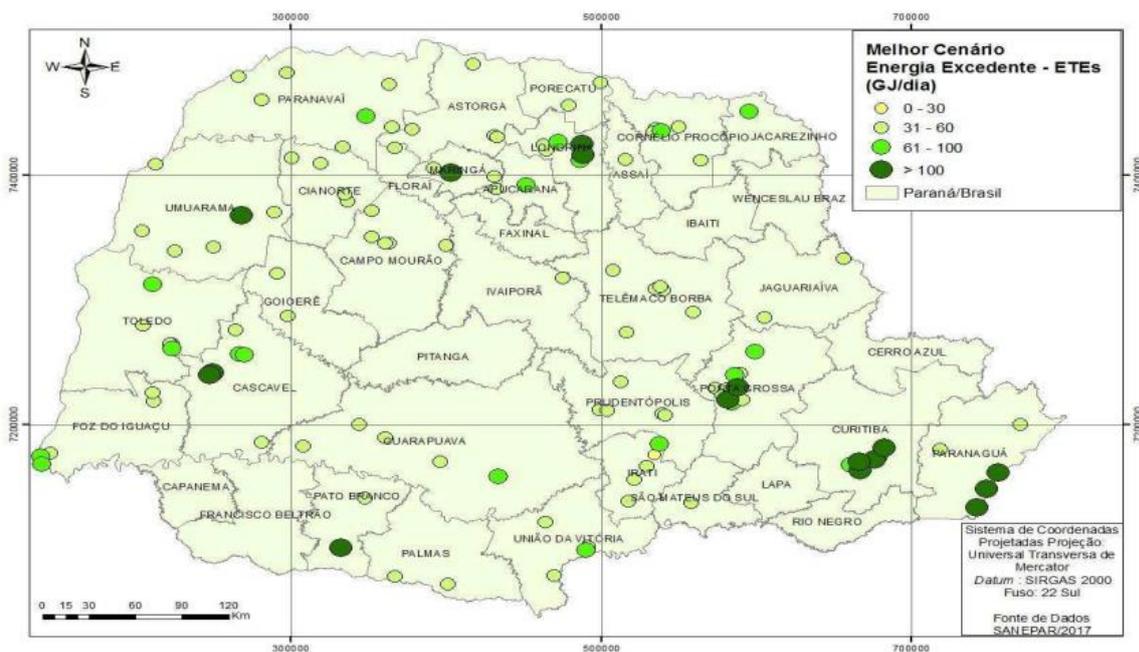


Figura 13: Energia excedente em ETES operadas por reator UASB no estado do Paraná, considerando o melhor cenário.

A maioria das ETES geram excedentes na faixa de 0- 30 GJ.dia⁻¹ para os cenários pior e típico, e 31 - 60 GJ.dia⁻¹ 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.

4. CONCLUSÃO

As ETEs podem ser avaliadas como potenciais unidades para a geração de eletricidade, 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.

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. Além disso, a energia livre gerada supre a demanda energética para secagem térmica do lodo até uma umidade de 10% e gera excedentes que poderá ser destinada a rede de distribuição.

Entretanto, ocorrem perdas referentes a transformações energéticas durante os processos de geração de eletricidade e transformação de calor na secagem do lodo. Dessa forma, aponta-se a necessidade do aprimoramento da operação e funcionamento dos reatores UASB a fim de potencializar as propriedades energéticas do biogás.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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.
2. ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2012a. Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012 – In: Resoluções, 2012.
3. ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2015a. Resolução Normativa N° 687, de 24 de novembro de 2015 – In: Resoluções, 2015.
4. BALAT, M.; BALAT, H. *Biogas as a Renewable Energy Source - A Review*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. v. 31, n° 14, p.1280-1293, 2009.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2022*. Brasília. MME/EPE, 2013. Disponível em: . 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.
9. JORDÃO, E.P e PESSÔA, C.A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 7ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. METCALF e EDDY. INC. *Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos*. 5. ed. New York, McGraw - Hill Book, 2016. 1815p.

14. 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.
15. 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.
16. PÖSCHLA, M.; Warda, S.; Owende, P. *Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways*. Appl. Energ. 2010, 87, 3305–3321.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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 EnergyWater Nexus*. Sustainability. v. 2, p. 945-962; doi:10.3390/su2040945, 2010.
29. 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.
30. 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.



31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Anuário Estatístico De Energia Elétrica 2021: ano base 2020*. [S. L.]: Empresa de Pesquisa Energética (Epe), 2021. 6 slides, color. Disponível em: <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/anuario/EPEFactSheetAnuario.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2022.