

Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas

Overview of sewage treatment in the South, Southeast and Midwest regions of Brazil: most employed technologies

- **Data de entrada:**
07/01/2017
- **Data de aprovação:**
24/10/2017

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo*/Thiago Bressani Ribeiro/ Guilherme Brugger Garcia/ André Lermontov/
Christoph Julius Platzer/ Gustavo Rafael Collere Possetti/ Mário Augusto Loureiro Leites Renato Rosseto

DOI: 10.4322/dae.2018.028

Resumo

Em vista dos compromissos assumidos pelo Brasil para o incremento dos níveis de tratamento de esgoto sanitário, faz-se importante uma leitura sobre as tecnologias mais aplicadas nos cenários regionais. O objetivo deste artigo é reportar o atual estágio de emprego dos diferentes processos associados ao tratamento de esgoto sanitário em seis estados brasileiros das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, concomitantemente com o Distrito Federal, com ênfase em suas aplicações para diferentes escalas de população atendida. Os dados utilizados foram coletados junto aos prestadores de serviço de saneamento estaduais e municipais, sendo posteriormente confrontados com uma base de dados cedida pela Agência Nacional de Águas. Ao todo, inventariaram-se 1.667 estações de tratamento de esgoto (ETEs), que têm capacidade instalada de atendimento a aproximadamente 75% da população urbana de toda a região contemplada no estudo. As tecnologias de tratamento de esgoto sanitário mais empregadas são: reatores UASB, lagoas de estabilização e lodos ativados. Conjuntamente, essas três tipologias de tratamento totalizam 90% das ETEs implantadas, sendo responsáveis por 81% da capacidade instalada de tratamento.

Palavras-chave: Estação de tratamento de esgoto (ETE). Reator UASB. Lagoas de estabilização. Lodos ativados.

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo – Engenheiro Civil pela UFMG. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne - Reino Unido. Professor titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Thiago Bressani Ribeiro – Engenheiro Ambiental pela Universidade Fumec. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Doutorando em Tecnologias Ambientais e Saneamento pela Universidade de Ghent/Bélgica e pela UFMG.

Guilherme Brugger Garcia – Graduando do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

André Lermontov – Engenheiro Químico pela UFRJ. Doutor em Processos Químicos e Bioquímicos pela UFRJ. Superintendente de Pesquisa e Tecnologia do Grupo Águas do Brasil S/A.

Christoph Julius Platzer – Engenheiro Civil pela Universidade Técnica de Hannover-Alemanha. Doutor em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlim-Alemanha. Sócio da empresa Rotária do Brasil Ltda.

Gustavo Rafael Collere Possetti – Engenheiro Ambiental pela UFPR e Engenheiro Eletricista pela UTFPR. Mestre e Doutor em Ciências pela UTFPR. Gerente da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Sanepar. Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do ISAE.

Mário Augusto Loureiro Leites – Engenheiro Civil pela UFMS. Especialista em Engenharia Sanitária pela UFMS. Gerente de operação e tecnologia da Sanesul.

Renato Rosseto – Graduado em Tecnologia Sanitária pela Unicamp. Especialista em Gerenciamento Ambiental pela Unicamp. Gerente de Operação de Esgoto na Sanasa.

***Endereço para correspondência:** Avenida Antônio Carlos 6.627 - Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Bloco 1. Belo Horizonte, MG. CEP 31270-901. E-mail: calemos@desa.ufmg.br.

Abstract

In view of the Brazilian commitments in order to increase the sewage treatment levels, it is important to analyze the most applied technologies in regional scenarios. The aim of this paper is to report the current implementation stage of the various processes associated with the treatment of domestic sewage in six Brazilian states in the South, Southeast and Midwest regions, alongside the Federal District. It also emphasizes the technologies regarding their application into different population equivalent scales. The data were collected from the state and municipal sanitation utilities, subsequently faced with a database provided by the Agência Nacional de Águas. Altogether, 1,667 sewage treatment plants (STPs) were inventoried, which have installed capacity to serve approximately 75% of the urban population of the investigated region. The most employed sewage treatment technologies are: UASB reactors, stabilization ponds and activated sludge. These three treatment technologies sum up 90% of the STPs used, accounting for 81% of the treatment installed capacity.

Keywords: Sewage treatment plant (STP). UASB reactor. Stabilization ponds. Activated sludge.

1 INTRODUÇÃO

Segundo o recente Diagnóstico Nacional dos Serviços de Água e Esgoto (BRASIL, 2016), apenas 40,8% da vazão de esgoto gerada no país é tratada. Em vista desse déficit histórico de infraestrutura, o Brasil assumiu compromissos para ampliar a cobertura de sistemas de esgotamento sanitário, podendo-se destacar: *i*) a meta de universalização prevista no Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB, 2014), cujo índice de tratamento previsto para todo o esgoto coletado no país é de 93% para o ano de 2033; e *ii*) o atendimento ao sexto Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, agenda de sustentabilidade adotada pelos países-membros para ser cumprida até 2030 (UN, 2015). Esse ODS, por sua vez, alerta para a necessidade de “assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos”.

Em face do exposto e diante da perspectiva de grande incremento do número de estações de tratamento de esgoto no Brasil nos próximos anos, entende-se ser relevante conhecer o cenário atual das principais tecnologias de tratamento que vêm sendo utilizadas, bem como compreender as escolhas tecnológicas até então adotadas. Todavia, em que pese o abrangente e importante levantamento que vem sendo desenvolvido pela Agência Nacional de Águas - ANA,

que dará origem ao Atlas Brasil de Despoluição de Bacias Hidrográficas (BRASIL, 2016), e ao estudo publicado por Noyola et al. (2012), referente às tecnologias de tratamento de esgoto predominantes na América Latina e Caribe, ainda são escassas informações atualizadas e consistidas sobre as tipologias de tratamento mais empregadas no Brasil e as justificativas para suas respectivas adoções.

É nesse contexto que se apresenta o presente artigo, cujo objetivo principal é reportar o atual estágio de emprego das diferentes tecnologias associadas ao tratamento de esgoto sanitário, em seis estados brasileiros das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, além do Distrito Federal (DF). Complementarmente, realizaram-se inferências acerca do potencial de aproveitamento energético de biogás, considerando o tratamento da fase líquida em reatores UASB.

Este trabalho é importante, pois a população total dos estados inventariados e do DF perfaz 104.511.443 habitantes, ou aproximadamente 51,5% da população brasileira, considerando a atual estimativa populacional do IBGE (IBGE, 2014). Adicionalmente, por meio de uma análise particularizada de cada um dos sete entes federativos, podem-se evidenciar as tecnologias de tratamento de esgoto preferencialmente selecionadas em cada região.

2 METODOLOGIA

Os dados utilizados foram coletados junto aos prestadores de serviço de saneamento estaduais e municipais de seis estados brasileiros e do DF, conforme indicado na Tabela 1. Adicionalmente, as informações foram confrontadas com uma base de dados cedida pela Agência Nacional de Águas (ANA) (BRASIL, 2016), permitindo complementar o levantamento das ETEs em cada estado, configurando-se assim um levantamento censitário. Os dados coletados referem-se às tipologias de tratamento empregadas em cada ETE e às respectivas vazões e/ou populações de projeto. Na ausência de uma dessas informações (vazão ou população de projeto), realizaram-se estimativas tendo como premissa o consumo médio *per capita* de água por região, de acordo com os dados do Diagnóstico Nacional dos Serviços de Água e Esgoto (BRASIL, 2016). A geração *per capita* de esgoto foi considerada igual ao consumo *per capita* de água (coeficiente de retorno igual a 100%), mas no cômputo da vazão total foi desconsiderada a contribuição decorrente de infiltração. Acredita-se que essa premissa seja aceitável para o propósito do presente estudo, de estimar a vazão de esgoto unicamente a partir da população contribuinte, e vice-versa, uma vez que seria extremamente difícil estimar com exatidão os coeficientes de retorno e as vazões de infiltração, e até mesmo a população efetivamente interligada à rede coletora de esgoto.

Ressalta-se que as populações e vazões atinentes às ETEs investigadas referem-se à capacidade instalada de tratamento, não refletindo necessariamente os equivalentes populacionais atualmente atendidos. Essa análise permite evidenciar os possíveis desafios em termos do incremento de infraestrutura associada ao tra-

tamento de esgoto em cada um dos estados e distrito avaliados.

Tabela 1: Relação dos entes federativos e prestadores de serviço de saneamento que participaram do levantamento de dados*

Ente federativo	Prestadores de serviço (municípios atendidos)
São Paulo	Sabesp (diversos municípios)
	Semae (São José do Rio Preto)
	DAE (Ribeirão Preto)
	Semae (Piracicaba)
	SAAE (São Carlos)
	Sanasa (Campinas)
Minas Gerais	Águas do Brasil (Araçoiaba, Votorantim e Jaú)
	Copasa (diversos municípios)
Rio de Janeiro	SAAE (Itabira)
	Águas do Brasil (diversos municípios)
Distrito Federal	Cedae (diversos municípios)
	Caesb (diversas regiões)
Santa Catarina	Casan (diversos municípios)
	Emasa (Balneário Camboriú)
	Samae (diversos municípios)
	Habitasul (Florianópolis)
	Simae (Herval d'Oeste e Luzerna)
	Semasa (Itajaí)
	Águas de Joinville (Joinville)
	Viaplan (Lages)
Águas de Itapema (Itapema)	
Paraná	Sanepar (diversos municípios)
Mato Grosso do Sul	Sanesul (diversos municípios)

*Nota: Dados complementados com levantamento efetuado pela ANA (2016).

Ao todo foram inventariadas 1.667 ETEs, conforme detalhado na Figura 1. As diferentes tecnologias de tratamento de esgoto foram categorizadas quanto às suas respectivas capacidades instaladas de atendimento (ou potenciais equivalentes populacionais), de modo a conformar quatro portes de ETEs, assim definidos: *i*) ETEs de pequeno porte (subgrupo com capacidade instalada menor que 2.000 habitantes); *ii*) ETEs de pequeno porte (subgrupo com capacidade instalada maior ou igual a 2.000 e menor que 10.000 habitantes); *iii*) ETEs de médio porte (grupo com capacidade instalada maior ou igual a 10.000 e

menor que 100.000 habitantes); e iv) ETEs de grande porte (grupo com capacidade instalada maior ou igual a 100.000 habitantes). Complementarmente, caracterizaram-se os processos de tratamento mais empregados no âmbito de cada estado/distrito, em termos do número de ETEs implantadas e suas respectivas capacidades de tratamento instaladas. Para tanto, os processos de tratamento foram agrupados em seis categorias, a saber:

- Reatores UASB: nesta categoria foram consideradas as ETEs que possuem somente os reatores UASB instalados (ou RAFA/RALF, em alguns estados), bem como aquelas que os empregam em conjunto com unidades de pós-tratamento (p.ex.: lodos ativados, filtros biológicos percoladores, lagoas de polimento, entre outras).
- Lagoas de estabilização (Lagoas): aqui foram contempladas as lagoas anaeróbias, facultativas, de maturação, aeradas e de sedimentação. Os fluxogramas de ETEs que apresentavam sistemas de lagoas (p.ex.: sistema australiano) foram contabilizados como uma unidade de lagoas de estabilização.

- Lodos ativados (LA): neste enquadramento foram inseridos os processos de lodos ativados convencional, aeração prolongada e por batelada.
- Tanque séptico seguido de filtro anaeróbio (TS+FA): nesta categoria foram considerados como uma unidade somente as ETEs que contemplavam em seu fluxograma a combinação sequencial entre tanque séptico e filtro anaeróbio.
- Tratamento preliminar seguido de emissário submarino (TP+Emissário): aqui foram contabilizadas as ETEs que apresentavam uma etapa de pré-tratamento associada à posterior disposição oceânica.
- Outros: nesta categoria foram inseridas as demais tecnologias diferentes daquelas anteriormente elencadas, como: biofiltros aerados submersos, filtros anaeróbios, filtros anaeróbios seguidos por escoamento superficial, biorreatores de membranas, tratamento preliminar quimicamente assistido, tanques sépticos, tanques sépticos seguidos por vala de infiltração e *wetlands*.

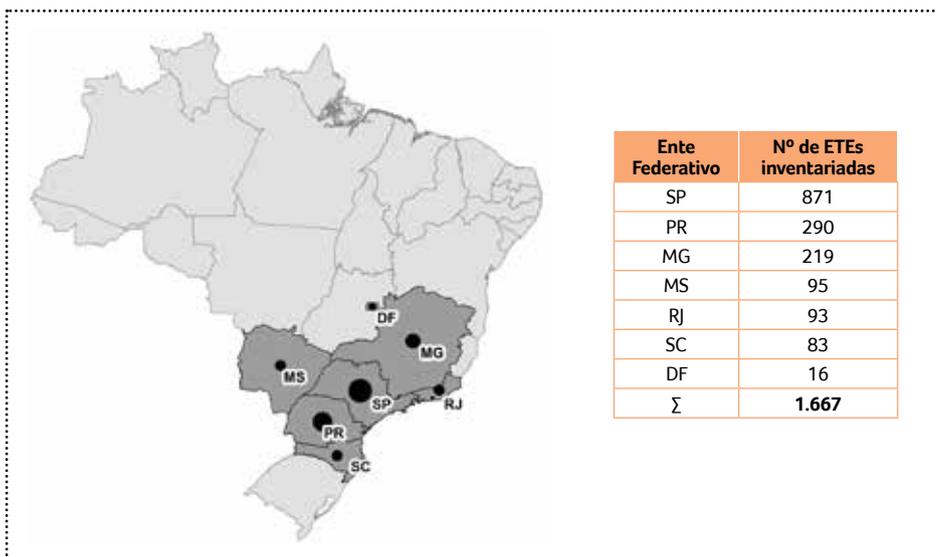


Figura 1: Distribuição regional e número de ETEs inventariadas

A partir da referida discretização das tecnologias mais empregadas no âmbito de cada ente federativo foram delineados os principais aspectos históricos que, provavelmente, levaram à adoção preferencial de determinados processos de tratamento, em vista da experiência dos autores.

Adicionalmente, caracterizou-se o potencial de geração de energia elétrica a partir do uso do biogás proveniente do tratamento anaeróbio (reatores UASB) do esgoto em ETEs com equivalente populacional maior que 100.000 ha-

bitantes. Esse patamar foi adotado a partir das premissas de viabilidade econômica e financeira destacadas por Valente (2015) e Rosenfeldt et al. (2015). Para tanto, consideraram-se os parâmetros reportados na Tabela 2. Esses cálculos foram realizados com o intuito de exemplificar os potenciais de geração de energia limpa e de recuperação econômica inerentes ao processo de tratamento de esgoto, mediante valorização energética de subprodutos, como o biogás. Essa prática ainda é incipiente no Brasil.

Tabela 2: Síntese dos parâmetros utilizados para avaliação simplificada do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado em reatores UASB

Parâmetro	Unidade	Valor	Referência
Produção unitária de metano – Cenário Típico	NLCH ₄ .hab ⁻¹ .d ⁻¹	10,2	Lobato et al. (2012)
Poder Calorífico Inferior (PCI) do metano	kWh.m ⁻³ CH ₄	9,97	Moran et al. (2010)
Eficiência de conversão elétrica em motores de combustão interna	%	30	USEPA (2003)
Fator de capacidade anual	%	90	Wiser et al. (2010)
Consumo médio de eletricidade residencial nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste	kWh.mês ⁻¹	182	EPE (2016)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação global

Nas Figuras 2 (a-b) e 3 são mostrados, respectivamente, o número de ETEs implantadas por tecnologia de tratamento empregada e as correspondentes capacidades instaladas (população passível de ser atendida), segundo as quatro diferentes escalas estabelecidas (portes de ETEs). Verifica-se uma participação expressiva de siste-

mas que empregam reatores UASB, lagoas de estabilização e lodos ativados, para todos os portes de ETEs. Somados, esses sistemas contabilizam 90% das estações avaliadas, representando 81% da capacidade instalada de tratamento. Do total de ETEs investigadas, 945 (57%) têm equivalente populacional inferior a 10.000 habitantes. A utilização de estações de pequeno porte (vazão inferior a 25 L/s) é marcante na América Latina, como observado por Noyola et al.(2012).

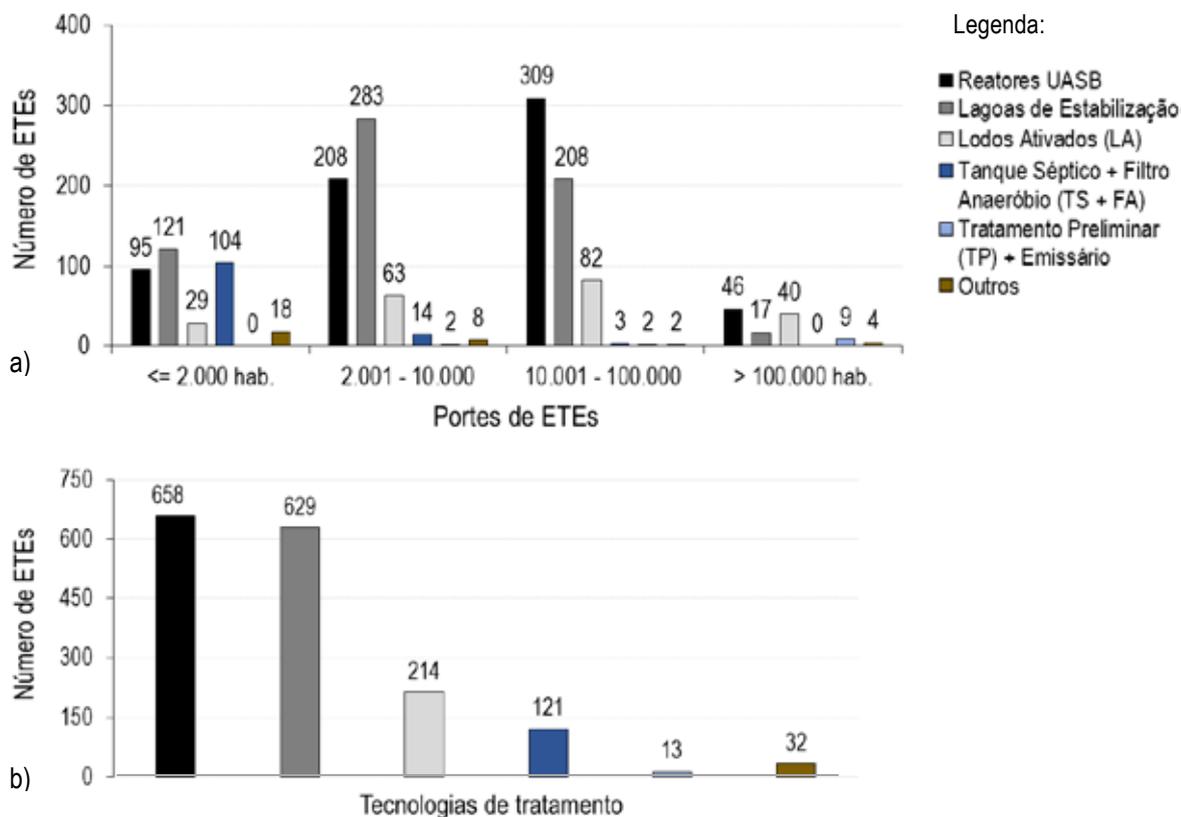


Figura 2: a) Número de ETEs por categoria de município; e b) Número total de ETEs por tecnologia de tratamento.

As lagoas de estabilização são especialmente aplicadas em instalações de menor porte (43% das ETEs implantadas). Entre as possíveis explicações, podem-se citar a menor demanda operacional (associada majoritariamente às operações de limpeza da área) e, principalmente, a maior disponibilidade de área típica de municípios interioranos, cuja sede é pequena frente aos limites municipais. Nota-se ainda a importante presença do sistema composto por tanque séptico seguido por filtro anaeróbio para o atendimento de populações até 10.000 habitantes, representando aproximadamente 13% dos sistemas implantados. Em uma análise complementar, nota-se que aproximadamente 86% dos sistemas

TS+FA são aplicados em ETEs com capacidade inferior a 2.000 habitantes.

Os reatores UASB, por sua vez, encontram-se em cerca de 40% das 1.667 ETEs inventariadas, demonstrando a elevada aceitação da tecnologia anaeróbia como primeiro estágio do processo de tratamento, independentemente do porte da estação. Entre aquelas com capacidade instalada de atendimento inferior a 10.000 habitantes, os reatores UASB figuram em 32% das ETEs implantadas. Essa proporção eleva-se para 51% quando da análise específica de ETEs de médio porte. Nota-se ainda a presença significativa dos reatores UASB entre as opções tecnológicas aplicadas a estações com capacidade instalada de

tratamento superior a 100.000 habitantes (40% das ETEs implantadas), em número superior ao processo de lodos ativados.

A utilização dos reatores UASB nas ETEs de grande porte abre perspectiva para o aproveitamento energético do biogás para geração de eletricidade, visto os indicativos de viabilidade econômica para implantação da infraestrutura de coleta, armazenamento, tratamento (remoção de H_2S , siloxanos e umidade), compressão e geração de eletricidade (conjunto motogerador) reportados por Valente (2015) e Rosenfeldt et al. (2015). Considerando a capacidade instalada para atender 10,7 milhões de habitantes nos reatores anaeróbios implantados em ETEs de maior porte (acima de 100.000 habitantes), há potencial de uma produção diária de cerca de 110.000 Nm^3 de metano e, conseqüentemente, de geração de energia elétrica da ordem de 108,1 $GWh.ano^{-1}$. Essa quantidade de energia supriria o consumo mensal de eletricidade de aproximadamente 48.830 residências.

Ressalta-se, entretanto, que esse potencial poderia ser ainda maior, mais especificamente para reatores UASB de tipologia convencional e/ou reatores passíveis de aprimoramentos. Nestes, além das perdas de metano dissolvido no efluente (Souza et al., 2011), os vazamentos para a atmosfera por meio de fissuras e tampas mal vedadas na estrutura de coleta de biogás, além de ligações irregulares de água pluvial na rede de esgoto, são desafios que poderiam ser superados em médio prazo, uma vez que interferem sobremaneira na produção de biogás (Possetti et al., 2013; Silva e Possetti, 2015). Nesse sentido, a relação unitária típica de produção de energia

a partir do metano ($37,2 kWh.habitante^{-1}.ano^{-1}$ - Lobato et al., 2012) poderia ser incrementada substancialmente, possivelmente em mais de 30% ou 40%. Dados recentes do projeto Pro-biogás indicam um potencial nessa ordem de grandeza para reatores UASB de tipologia convencional e com sistema de coleta de biogás bem vedado (Cabral et al., 2016).

Quanto ao processo de lodos ativados, nota-se a maior participação relativa dessa tecnologia à medida que aumenta o porte da ETE. Entre aquelas de menor porte, as instalações com lodos ativados representam cerca de 10% das estações implantadas, ao passo que entre aquelas de maior porte tal proporção eleva-se para cerca de 35%. Quando da análise específica em termos da capacidade instalada de atendimento às populações (Figura 3), percebe-se que o processo em questão representa 35% da população total passível de ser atendida, seguido pelos reatores UASB (30%) e lagoas de estabilização (15%).

Ainda acerca do potencial de atendimento instalado, pode-se destacar a utilização de emissários submarinos com pós-tratamento preliminar (TP + Emissário), especialmente implantados em ETEs de grande porte em municípios litorâneos com população superior a 100.000 habitantes. Entre as estações de maior porte de toda a região investigada, a prática de transporte e dispersão do esgoto no oceano contabiliza 26% da capacidade de tratamento instalada, ainda que sejam somente 9 ETEs implantadas. Conjuntamente, essas estações apresentam capacidade instalada de aproximadamente 12,9 milhões de habitantes.

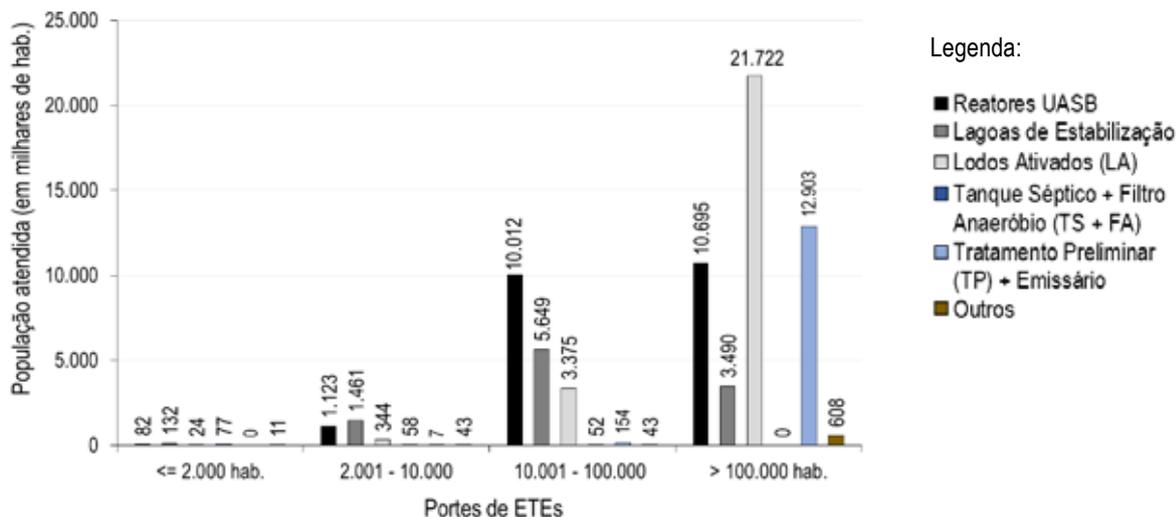


Figura 3: Capacidade instalada (população atendida) por tecnologia de tratamento em cada um dos quatro portes de ETEs

Em vista da expressividade da utilização de reatores UASB entre os entes federativos pesquisados, e da necessidade de estes serem usualmente seguidos por uma unidade de pós-tratamento, apresentam-se na Figura 4 as principais tipologias de pós-tratamento empregadas. A escolha tecnológica por filtros biológicos percoladores (FBP), filtros anaeróbios (FA) e lagoas de polimento provavelmente se associa a um melhor aproveitamento dos critérios de destaque nos reatores UASB, como a baixa produção de lodo e a relati-

va simplicidade operacional e de manutenção. Além disso, esses sistemas possuem baixo custo operacional, pois podem efetuar o tratamento do esgoto com reduzido consumo de energia elétrica e sem demandar a aplicação de produtos químicos. Em conjunto, o número de FBPs, FAs e lagoas de polimento implantados representam 64% das opções de pós-tratamento utilizadas. Destaca-se a utilização de FBPs, dos quais aproximadamente 65% encontram-se instalados no estado de Minas Gerais e 20% no estado de Mato Grosso do Sul.

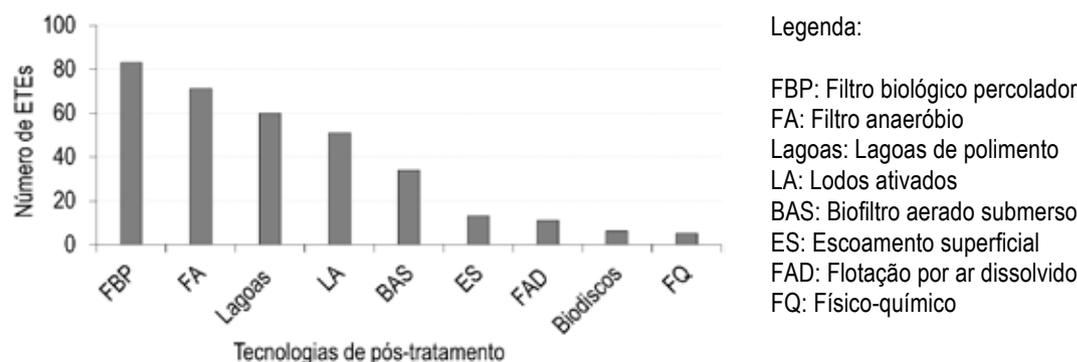


Figura 4: Tecnologias de pós-tratamento aplicadas após os reatores UASB analisados

Na Tabela 3 são apresentadas as relações entre a população urbana de cada ente federativo e a respectiva capacidade instalada de tratamento de esgoto. Cabe enfatizar, tal como apontado no item Metodologia, que a capacidade instalada das ETEs investigadas não reflete necessariamente os equivalentes populacionais atualmente atendidos. Destacam-se os números relativos ao DF e ao estado do Rio de Janeiro (RJ). Para o primeiro, nota-se que a atual capacidade instalada de tratamento é suficiente para atender a toda a população urbana. Já no RJ, as ETEs implantadas têm capacidade de atender a cerca de 90,2% da população urbana estadual. Em conjunto, as 1.667 ETEs implantadas nas 7 regiões avaliadas têm capacidade instalada de atendimento a 75,1% da população urbana das localidades. Essa é uma importante consideração, visto que os atuais índices de tratamento de esgoto gerado nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste são de 36,9%, 45,7% e 46,4%, respectivamente (BRASIL, 2016).

Entre os desafios para a efetiva utilização da capacidade de tratamento instalada, cita-se a ociosidade das redes de esgotamento sanitário no país (ITB, 2015), caracterizada pela inexistência de ligação do ramal predial à rede coletora implantada. Ressalta-se ainda que alguns estados, além da necessidade de ampliação de suas redes coletoras, possuem o desafio de ampliar sua capacidade de tratamento de esgoto. Atualmente, as capacidades de tratamento de esgoto instaladas nos estados de Minas Gerais e Santa Catarina são inferiores a 45% de suas respectivas populações urbanas. Adicionalmente, as obras associadas ao incremento da infraestrutura de coleta e tratamento de esgoto nas regiões Sul e Sudeste, vinculadas às duas edições do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) do Governo Federal, apresentam baixa porcentagem de conclusão (31 e 43%, respectivamente – ITB, 2016).

Tabela 3: Relação entre populações e capacidade de tratamento instalada

Ente federativo	População urbana estadual (hab.) (A) ^a	Capacidade de tratamento instalada (hab.) (B)	Relação B/A (%)
SP	42.221.049	34.673.740	82,1%
MG	17.684.111	7.869.236	44,5%
RJ	15.919.600	14.353.593	90,2%
PR	9.453.791	8.175.246	86,5%
SC	5.650.132	2.409.502	42,6%
MS	2.243.474	1.806.122	80,5%
DF	2.755.962	2.777.350	100,8%
Σ	95.928.120	72.101.575	75,1%

^aEstimativa populacional IBGE (2014), considerando os índices de urbanização por estado/distrito (IBGE, 2013)

Cumpram ainda mencionar que os percentuais de capacidade de atendimento da população urbana caracterizados na Tabela 3 (Relação B/A) não guardam nenhuma associação com as eficiências de tratamento das ETEs investigadas.

3.2 Avaliação por ente federativo

Na Figura 5 é caracterizada, de forma comparativa entre os entes federativos, a prevalência das três tecnologias de tratamento de esgoto mais empregadas nas regiões. Essa análise permite verificar as contribuições relativas de cada estado/distrito no cômputo global das ETEs inventariadas.

Como caracterizado anteriormente, os reatores UASB, lagoas de estabilização e lodos ativados figuram entre 90% das opções tecnológicas selecionadas nas ETEs inventariadas, representando, respectivamente, 658, 629 e 214 estações (ver Figura 1b). Sob essa perspectiva, PR e MG responsabilizam-se por 65% dos reatores UASB implantados em toda a região. Quanto às lagoas de estabilização, cerca de 86% encontram-se no estado de SP, o qual também é detentor de 63% dos sistemas de lodos ativados inventariados.

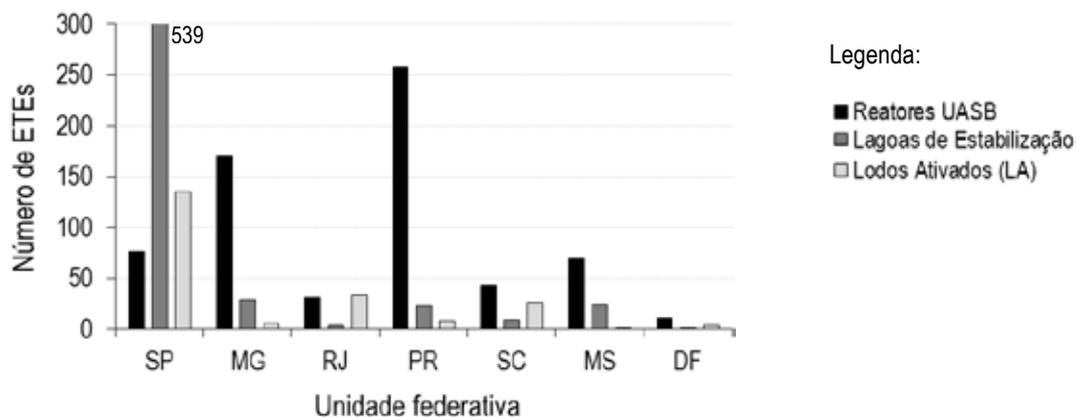


Figura 5: Comparação entre as três tecnologias de tratamento de esgoto mais empregadas entre os entes federativos avaliados

Na Figura 6 são mostrados os números de ETEs e as respectivas capacidades instaladas de atendimento discriminadamente para cada unidade federativa avaliada. Essa análise permite evidenciar os processos de tratamento de esgoto preferencialmente selecionados em cada região.

Para o estado de SP, em termos do número de estações implantadas, nota-se que as lagoas de estabilização são os principais sistemas de tratamento implantados (539 unidades), especialmente em ETEs de pequeno porte, onde representam 65% das estações construídas. Na sequência aparecem: lodos ativados (135 unidades), tanques sépticos seguidos de filtros anaeróbios (90 unidades) e reatores UASB (76 unidades). Em termos da capacidade de tratamento instalada, verifica-se expressiva participação do processo de lodos ativados (46% do total), seguidos pelas lagoas de estabilização (26% do total), tratamento preliminar e emissários (14% do total) e reatores UASB (12% do total).

No estado do PR predominam de forma significativa os reatores UASB, entre todos os portes de ETES elencados, representando cerca de 89% do total de estações construídas (258 unidades). Na sequência aparecem as lagoas de estabilização (23 unidades) e os lodos ativados (8 unidades). A predominância dos reatores anaeróbios em termos de número de

estações implantadas reflete-se também na potencial população atendida. Coincidentemente, tal opção tecnológica corresponde a 89% da atual capacidade instalada de tratamento no estado, seguida pelos lodos ativados (8% do total) e lagoas de estabilização (3% do total).

Logo, pode-se constatar que o estado do PR detém o maior parque de reatores UASB do Brasil e, provavelmente, do mundo, considerando-se a aplicação da tecnologia para o tratamento de esgoto doméstico. A seleção preferencial de tais reatores anaeróbios pode estar associada aos critérios clássicos de menor CAPEX e OPEX quando da comparação com sistemas aeróbios, dado o menor consumo de energia elétrica e eventual produção de energia a partir do aproveitamento do biogás, compactidade e baixa produção de lodo (já estabilizado), por exemplo. Entre os aspectos elencados, destaca-se que os projetistas da Sanepar estiveram na Holanda na década de 80, interagindo com o professor Gatze Lettinga, inventor do reator UASB. Dessa interface advém a concepção dos reatores anaeróbios de leito fluidizado (RALF), uma variante do reator UASB marcanamente empregada pela Sanepar. Há que se ressaltar, entretanto, as recentes críticas à adoção dessa tecnologia, notadamente provenientes de problemas relacionados a emissões odorantes, acúmulo de espuma, corrosão de estruturas e qualidade do

efluente. Aspectos estes que podem ser mitigados com projetos adequados e operação sistemática.

No estado de MG, similarmente ao estado do PR, prevalecem de forma significativa os reatores UASB entre todos os portes de ETEs elencados, somando cerca de 78% do total de estações construídas (170 unidades). Na sequência aparecem as lagoas de estabilização (29 unidades), tanques sépticos seguidos de filtros anaeróbios (12 unidades) e lodos ativados (6 unidades). Considerando-se a capacidade de tratamento instalada, os reatores UASB representam cerca de 70% do total, seguidos pelos lodos ativados (22% do total) e lagoas de estabilização (8% do total). A seleção significativa dos reatores UASB como solução de projeto em Minas Gerais pode ser creditada, entre outros fatores, à preferência por sistemas compactos, em vista da geografia montanhosa do estado, bem como à influência das pesquisas sobre pós-tratamento de efluentes anaeróbios, no âmbito do Prosab (Programa de Pesquisas em Saneamento Básico), coordenadas pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Quanto ao estado do RJ, prevalece a utilização dos reatores anaeróbios (UASB) em ETEs de pequeno e médio porte, onde se encontram em cerca de 38% das estações implantadas, seguidos pelo processo de lodos ativados, presente em 34% das ETEs de pequeno e médio portes. Especificamente para o atendimento de populações até 10.000 habitantes, observa-se a utilização expressiva dos tanques sépticos seguidos por filtros anaeróbios, os quais se encontram em cerca de 30% das ETEs de pequeno porte. Em termos da capacidade de tratamento instalada, destaca-se a utilização de tratamento preliminar seguido por disposição oceânica, especialmente empregado para o atendimento de populações superiores a 100.000 habitantes. Tal opção tecnológica responde por 58% da atual capacidade instalada de tratamento no estado, seguido pelos lodos ativados (35% do total) e reatores UASB (4% do total). O contexto histórico desse arranjo provavelmente se associa ao aproveitamento

da capacidade de diluição dos oceanos e ao menor controle operacional de processos requerido para a tecnologia de TP+Emissário.

Para o estado de SC, os reatores UASB predominam em termos de número de ETEs implantadas para todos os portes de estação considerados (52% do total); todavia, nesse estado é significativa a utilização do processo de lodos ativados em estações de pequeno porte, onde correspondem a cerca de 33% das ETEs construídas. Quanto à capacidade instalada de tratamento, os reatores UASB respondem por cerca de 45% da população passível de ser atendida, seguidos pelos lodos ativados (41% do total) e lagoas de estabilização (13% do total). A Lei Estadual nº 14.675/09 estabelece padrões mais restritivos para o lançamento de efluentes de ETEs em corpos hídricos ($DBO \leq 60$ mg/L), em comparação à Resolução Conama nº 430/11. Essa condição também se verifica em outros entes federativos, como SP e MG. Especificamente quanto ao estado de SC, os padrões de lançamento mais restritivos podem ter sido um importante fator para impulsionar a expressiva utilização de reatores de lodos ativados para o tratamento de esgoto doméstico.

No estado do MS, os reatores UASB e as lagoas de estabilização correspondem a 98% das opções tecnológicas utilizadas, sendo que 99% das ETEs implantadas têm equivalente populacional inferior a 100.000 habitantes. O papel dos reatores anaeróbios é ainda ressaltado quando da análise da atual capacidade instalada de tratamento. Nesse caso, respondem por aproximadamente 85%, seguidos pelas lagoas de estabilização (12% do total) e lodos ativados (4% do total). Em um contexto histórico, a seleção preferencial de reatores UASB no MS, especificamente no âmbito da Sanesul, deve-se a uma proximidade técnica com a Sanepar, que transferiu o modelo de reatores do tipo RALF para implantação das primeiras estações compactas nos municípios de Dourados, Campo Grande e Três Lagoas há mais de 22 anos. Posto isso, e considerando os critérios clássicos de vantagem do processo anaeró-

bio outrora citados, o emprego de reatores UASB passou a ser prioritário.

Por fim, quanto ao DF, nota-se similarmente a prevalência (69%) de implantação de reatores UASB para todos os portes de ETEs, os quais, quando considerada a capacidade instalada de tratamento, respondem por 67% do total. Em sequência aparece o pro-

cesso de lodos ativados, especialmente empregado em ETEs de grande porte, cuja capacidade instalada de tratamento corresponde a aproximadamente 32% do total. A utilização dos LA provavelmente está associada à necessidade de melhor qualidade do efluente e confiabilidade do processo para remoção de nutrientes, em vista do lançamento em ambientes lênticos, nomeadamente o Lago Paranoá.

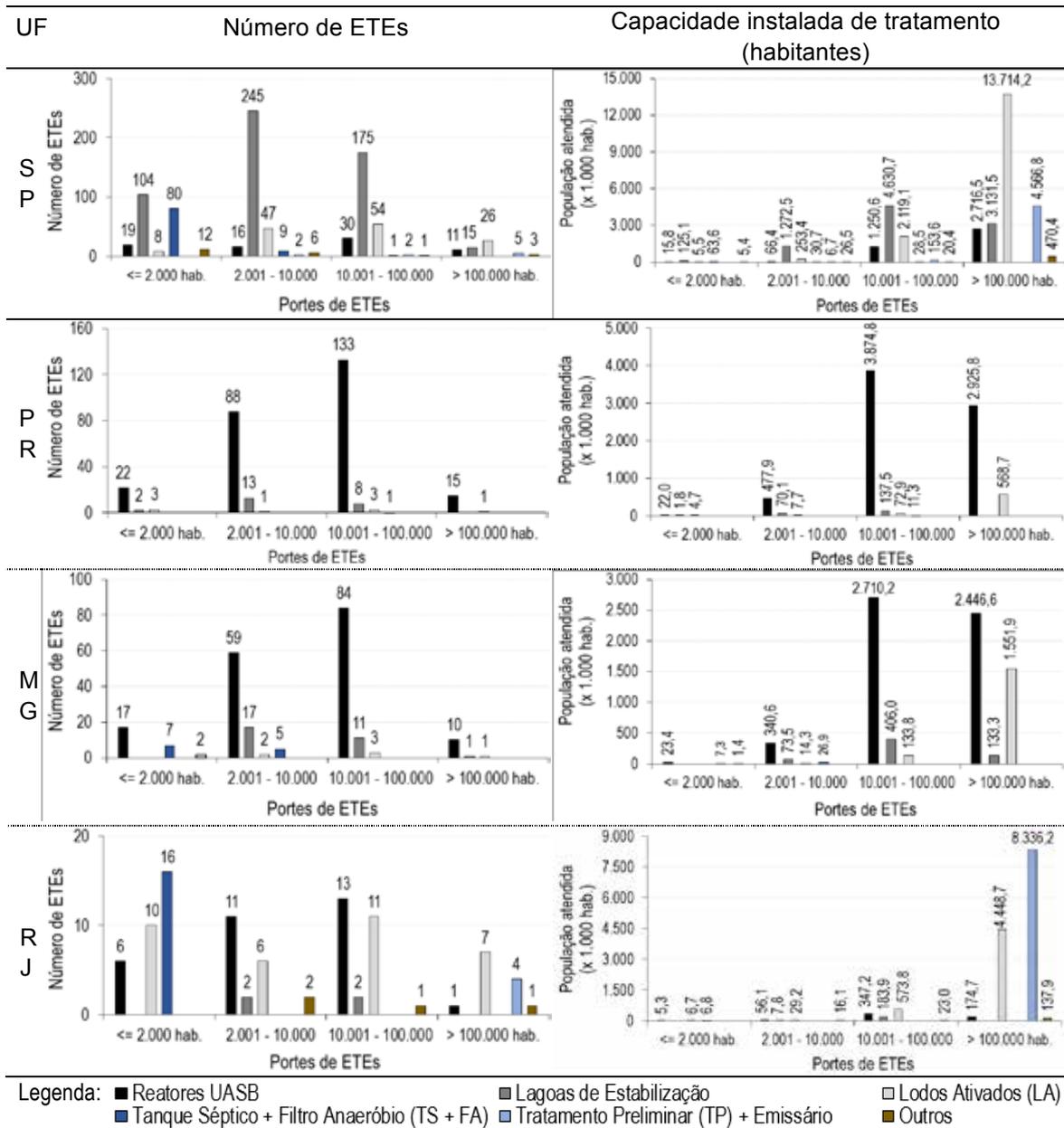


Figura 6: Número de ETEs instaladas nos estados avaliados e respectivas populações passíveis de atendimento

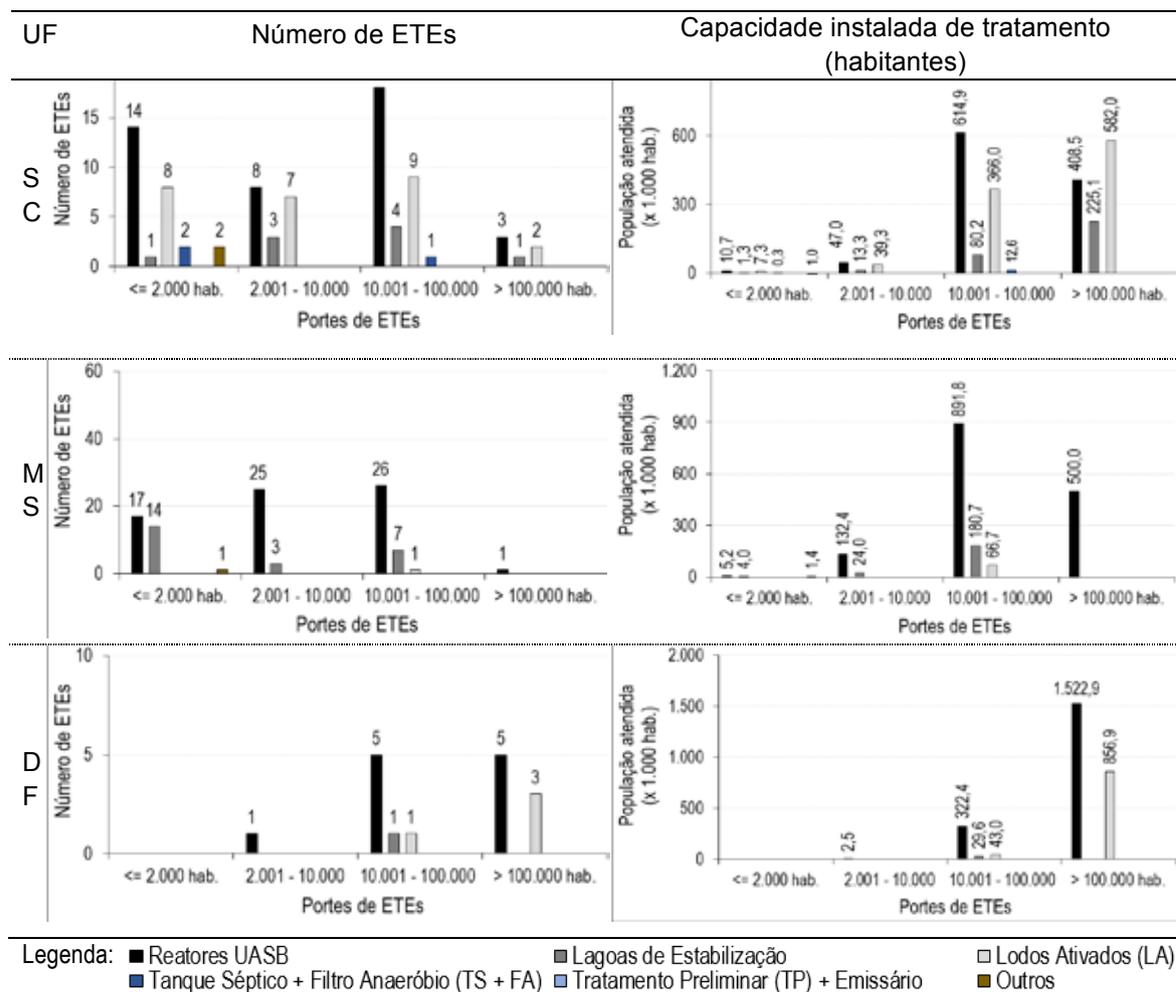


Figura 6 (continuação): Número de ETEs instaladas nos estados avaliados e respectivas populações passíveis de atendimento

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Capacidade instalada de atendimento

Em conjunto, as 1.667 ETEs implantadas nas 7 regiões avaliadas possuem capacidade instalada de atendimento a 75,1% de toda a população urbana local. A maioria das estações construídas (57%) são de pequeno porte, com capacidade instalada de atendimento inferior a 10.000 habitantes.

Em um panorama geral, os lodos ativados, os reatores UASB e as lagoas de estabilização são responsáveis por 81% da capacidade instalada de tratamento. Para ETEs com capacidade instalada inferior a 10.000 habitantes, verifica-se o emprego preferencial das seguintes tecnologias: lagoas de estabilização (47%), reatores UASB (36%) e lo-

dos ativados (11%). Para ETEs com equivalentes populacionais entre 10.000 e 100.000 habitantes, tem-se: reatores UASB (52%), lagoas de estabilização (29%) e lodos ativados (18%). Já para ETEs com capacidade instalada superior a 100.000 habitantes, nota-se: lodos ativados (44%), tratamento preliminar seguido de disposição oceânica (26%) e reatores UASB (22%).

Especificamente quanto aos entes federativos avaliados, os reatores UASB são preferencialmente selecionados no PR, MG, MS, e também no DF, para todos os portes de ETEs. O mesmo ocorre em SC, à exceção das estações de maior porte, em que são empregados preferencialmente os lodos ativados (48%). Essa preferência também se mani-

feita nas ETEs de maior porte em SP (56%). Nesse estado, por sua vez, predominam as lagoas de estabilização nas estações de pequeno (75%) e médio porte (56%). Por fim, para o RJ nota-se nítida variação da seleção da tecnologia em função do portes da ETE: os tanques sépticos seguidos de filtros anaeróbios e os reatores UASB são especialmente empregados em estações com capacidade instalada até 2.000 habitantes (64%); os reatores UASB são preferencialmente utilizados nas estações com capacidade instalada superior a 2.000 e inferior a 10.000 habitantes (51%); os lodos ativados são empregados na maioria das estações de médio porte (51%) e, para aquelas de grande porte, predomina a utilização de tratamento preliminar seguido por disposição oceânica (64%).

4.2 Número de ETEs implantadas

Conjuntamente, os reatores UASB, seguidos pelas lagoas de estabilização e lodos ativados, totalizam 90% das tecnologias de tratamento empregadas nas ETEs implantadas em toda a região investigada. Particularmente, tais reatores anaeróbios encontram-se em cerca de 40% das 1.667 ETEs inventariadas.

Considerando o número de estações construídas, o panorama geral, anteriormente caracterizado em função da capacidade instalada de atendimento, assume novos contornos. De fato, para ETEs com capacidade instalada inferior a 10.000 habitantes, predomina a seleção de lagoas de estabilização (43%), com utilização marcante no estado de SP, seguidas pelos reatores UASB (32%). Todavia, em sequência aparece o sistema tanque séptico-filtro anaeróbio (18%), demonstrando sua aplicação para o atendimento de populações efetivamente pequenas (< 2.000 habitantes), especialmente no estado de São Paulo. Para ETEs de médio porte há relação direta entre o número de estações implantadas e as respectivas capacidades instaladas, permanecendo a configuração anteriormente descrita: reatores UASB, lagoas de estabilização e lodos ativados, respectivamente.

Por fim, para as ETEs de maior porte nota-se a prevalência do emprego de reatores UASB (40%), seguidos pelos lodos ativados (35%) e lagoas de estabilização (15%). Especificamente quanto à utilização de sistemas de pós-tratamento de efluentes de reatores UASB, nota-se a seleção preferencial de FBP, FA e lagoas de polimento, notadamente nos estados de MG, PR e MS. Por sua vez, os lodos ativados são a opção de pós-tratamento tipicamente selecionada (76%) nos estados de SP e SC.

Em vista do expressivo número global de reatores UASB implantados (658) e respectiva capacidade total instalada de tratamento (21,9 milhões de habitantes), cabe destacar que, embora o aspecto de aproveitamento energético não tenha sido responsável pela grande expansão da tecnologia no passado, tendo em vista a pouca disponibilidade de informações e expertise na área, os avanços recentes demonstram essa potencialidade. Certamente, o componente de aproveitamento energético do biogás se constituirá em um novo atrativo para a continuidade da expansão da tecnologia.

Observa-se que cada região tem preferência distinta quanto ao emprego das tecnologias de tratamento avaliadas, aparentemente com motivações técnicas suficientemente claras. Todavia, nota-se que a seleção preferencial de um processo pode estar relacionada à orientação das grandes companhias de saneamento ou também de preferências regionais associadas ao conhecimento e à experiência dos projetistas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos prestadores de serviço de saneamento e à Agência Nacional de Águas (ANA), que disponibilizaram os dados para a realização da pesquisa. Os autores agradecem particularmente aos engenheiros Marcelo Miki, Célio Bartole Pereira, Maria Alice Martins Judice e Mônica da Silva pelas contribuições ao longo da elabo-

ração deste artigo. Este trabalho faz parte da série de publicações do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto (INCT ETEs Sustentáveis).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2014**. Brasília: SNSA/MCIDADES. 212 p., 2016.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Atlas Brasil de Despoluição de Bacias Hidrográficas: Tratamento de Esgotos Urbanos**. 2016. No prelo.
- CABRAL, C.B.G., PLATZER, C.J., CHERNICHARO, C.A.L., BELLI, P., HOFFMANN, H. Avaliação do Biogás produzido em Reatores UASB em ETE. In: 20ª Exposição de Experiências Municipais em Saneamento, **Anais**. Jaraguá do Sul - SC, 2016.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Consumo mensal de energia elétrica por classe (regiões e subsistemas) - 2004-2016**. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9tricapor-classe\(regi%C3%B5esesubistemas\)%E2%80%932011-2012.aspx](http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumomensaldeenergiael%C3%A9tricapor-classe(regi%C3%B5esesubistemas)%E2%80%932011-2012.aspx). Acesso em: Abril/2016.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativa da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2014**. Diário Oficial da União. Brasília, 2014.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas do censo demográfico 2010**. 156 p. Rio de Janeiro: IBGE, 2013.
- 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/2016.
- LOBATO, L.C., CHERNICHARO, C.A.L., SOUZA, C.L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. **Water Sci Technol**, v. 66, n. 12, p. 2745-2753, 2012.
- Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D., Bailey, M.B. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 7th ed.: John Wiley & Sons, 2010.
- NOYOLA, A., PADILLA-RIVERA, A., MORGAN-SAGASTUME, J.M., GÜERCA, L.P., HERNÁNDEZ-PADILLA, F. Typology of municipal wastewater treatment technologies in Latin America. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 40, n. 9, p. 926-932, 2012.
- 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 Sanitária e Ambiental, **Anais**. Goiânia - GO, 2013.
- ROSENFELDT, S., CABRAL, C.B.G., PLATZER, C.J., HOFFMANN, H., ARAUJO, R.A. 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**. Rio de Janeiro - RJ, 2015.
- SILVA, T.C.F., POSSETTI, G.R.C. Influência de eventos de chuva na produção de biogás de reatores anaeróbios alimentados com esgoto doméstico. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais**. Rio de Janeiro - RJ, 2015.
- SOUZA, C.L., CHERNICHARO, C.A.L., AQUINO, S.F. Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. **Water Sci Technol**, v. 64, n. 11, p. 2259-2264, 2011.
- UN - United Nations. **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**. New York, 2015.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. **A brief characterization of reciprocating engines in combined heat and power applications**. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2003.
- 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**. 2015. 182 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- WISER, J.R., WILLIS, J.L., SCHETTLER, J.W. **Evaluation of Combined Heat and Power Technologies for Wastewater Treatment Facilities**. Columbus Water Works. Columbus, Georgia, 213 p. 2010.