TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO: ADERÊNCIA ÀS LEGISLAÇÕES AMBIENTAIS E PERSPECTIVAS DE APRIMORAMENTO EM ETES NO SUL E SUDESTE BRASILEIRO

Brenda Gonçalves Piteira Carvalho[(1)]
Engenheira Sanitarista e Ambiental (UFPA), mestre e doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG) e Engenheira de Processos da ESSE Engenharia e Consultoria, empresa direcionada a serviços e projetos de saneamento e meio ambiente.
Paulo Sérgio Souza Reis[(2)]
Engenheiro Civil (IFG), com experiência em planejamento e execução de obras de saneamento, planejamento estratégico, gestão de investimentos e modelagem financeira para projetos de infraestrutura e saneamento, Coordenador e Planejador de Projetos da ESSE Engenharia e Consultoria, empresa direcionada a serviços e projetos de saneamento e meio ambiente.
Gabrielle dos Santos Marques[(3)]
Engenheira Civil (Estácio) com experiência em planejamento estratégico, gestão de investimentos e modelagem financeira para projetos de infraestrutura e saneamento, Engenheira de Saneamento da ESSE Engenharia e Consultoria, empresa direcionada a serviços e projetos de saneamento e meio ambiente.

Endereço[(1)]**:** Av. Professor Mário Werneck, 60 – Estoril – Belo Horizonte – Minas Gerais – CEP: 30455-610 – Brasil – Tel: +55 (31) 32649535 - e-mail: bcarvalho@esseengenharia.com.br; brendapiteira@ufmg.br.

RESUMO

Este estudo analisou as principais configurações tecnológicas de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) empregadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, com foco na avaliação de seus desempenhos frente aos requisitos de qualidade do efluente e dos corpos hídricos receptores estabelecidos pela legislação ambiental vigente. Inicialmente, foram levantadas as legislações ambientais aplicáveis e suas respectivas condições de lançamento de efluentes e padrões de qualidade dos recursos hídricos. A caracterização das tecnologias implantadas nas ETEs foi realizada a partir de dados do Sistema Nacional de Informações em Saneamento (SINISA), contemplando unidades localizadas nas regiões Sul e Sudeste. As tecnologias foram organizadas em sistemas isolados e combinados, abrangendo processos anaeróbios, aeróbios, híbridos, lagunares e etapas de tratamento terciário. Foi realizada uma ampla análise de combinações tecnológicas e seus diferentes desempenhos na remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos, nutrientes e organismos indicadores. Os resultados evidenciam a predominância dos reatores anaeróbios, especialmente os reatores UASB, como tecnologia base para o tratamento de esgotos no Brasil, geralmente associados a unidades complementares de pós-tratamento. Destacam-se também a aplicação dos sistemas de lodos ativados e dos sistemas lagunares em municípios de menor porte e com maior disponibilidade de área.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de Esgoto, SINISA, Legislação Ambiental.

INTRODUÇÃO

O saneamento básico no Brasil ainda apresenta um déficit estrutural significativo, especialmente no componente de esgotamento sanitário. Apesar dos avanços normativos e institucionais recentes — com destaque para o Marco Legal do Saneamento através da Lei nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020) — o país ainda convive com baixa universalização dos serviços de coleta e tratamento de esgoto.

Segundo dados consolidados do setor através do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SINISA) (BRASIL, 2026), a cobertura de coleta de esgoto permanece inferior à de abastecimento de água, e a parcela efetivamente tratada apresenta grande heterogeneidade regional. As regiões Sul e Sudeste concentram os melhores indicadores de atendimento, porém ainda enfrentam desafios relevantes relacionados não apenas à expansão da infraestrutura, mas principalmente à eficiência dos processos de tratamento e ao atendimento de padrões ambientais cada vez mais restritivos. Nesse contexto, observa-se que o simples aumento da cobertura de coleta não garante a conformidade ambiental dos sistemas, sendo necessário avaliar a adequação tecnológica das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) frente às exigências regulatórias vigentes.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar os dados do SINISA referentes às ETEs das regiões Sul e Sudeste do Brasil, identificando as tecnologias de tratamento mais empregadas e sua distribuição regional. Adicionalmente, busca-se analisar as legislações ambientais estaduais dessas regiões, bem como a legislação federal aplicável às condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos receptores.

O estudo também considera os limites de qualidade estabelecidos para as diferentes classes de enquadramento de águas superficiais, de modo a permitir uma análise integrada entre qualidade do corpo receptor e padrão de lançamento exigido.

A partir dessa abordagem, avaliou-se as tendências tecnológicas predominantes nas ETEs brasileiras e sua aderência às exigências normativas ambientais, identificando eventuais lacunas de desempenho e, consequentemente, as necessidades de aprimoramento e complementação tecnológica dos sistemas de tratamento, especialmente diante do aumento progressivo das restrições ambientais observadas nos estados do Sul e Sudeste.

Este trabalho contribui para o avanço do conhecimento na área de tratamento de esgotos no Brasil ao integrar, de forma sistematizada, informações operacionais do SINISA com o arcabouço regulatório ambiental federal e estadual, especialmente nas regiões Sul e Sudeste.

Ao relacionar as tecnologias efetivamente empregadas nas ETEs com os limites de qualidade exigidos para corpos hídricos superficiais de diferentes classes de enquadramento, o estudo permite identificar lacunas de desempenho e potenciais desalinhamentos entre prática operacional e exigências legais. Além disso, a análise comparativa proposta fornece subsídios técnicos para a modernização e otimização de sistemas existentes, contribuindo para o planejamento de soluções mais aderentes às restrições ambientais atuais e futuras. Dessa forma, o trabalho também apoia decisões de planejamento, regulação e engenharia sanitária voltadas à evolução da infraestrutura de esgotamento sanitário no país, especialmente em um cenário de crescente rigor normativo e demanda por sustentabilidade ambiental.

METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida a partir de duas bases principais de informação: (i) legislações ambientais vigentes relacionadas às condições de lançamento de efluentes domésticos em corpos hídricos superficiais e ao enquadramento de corpos receptores; e (ii) dados mais recentes disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), com foco no módulo de esgotamento sanitário.

No âmbito normativo, foram consideradas as legislações federais aplicáveis, com destaque para a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 430/2011 (BRASIL, 2011), que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, e para a Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005), que estabelece a classificação dos corpos de água superficiais e seus respectivos enquadramentos e padrões de qualidade. Adicionalmente, foram levantadas as legislações estaduais vigentes dos estados das regiões Sul e Sudeste do Brasil, por representarem áreas com maior adensamento urbano e maior rigor regulatório ambiental.

Os dados do SINISA foram filtrados para os estados pertencentes às regiões Sul e Sudeste do Brasil, sendo eles a Região Sul (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) e Região Sudeste (Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo). Esse recorte foi adotado por representar a porção do território nacional com maior nível de urbanização, maior cobertura relativa de coleta e tratamento de esgoto e, simultaneamente, maior incidência de exigências ambientais mais restritivas quanto ao lançamento de efluentes.

Foram utilizados os dados mais atualizados do SINISA, referentes ao módulo de esgotamento sanitário, com base nas informações reportadas pelos prestadores de serviços e titulares municipais. Após a extração da base de dados, foi realizado um processo de filtragem e tratamento das informações, visando garantir consistência analítica e comparabilidade entre os sistemas de tratamento reportados.

Os dados extraídos foram organizados e categorizados com base em critérios técnicos, adotando-se as seguintes premissas metodológicas:

- Considerou-se, para fins de comparação de desempenho, que reatores classificados como decanto-digestores foram enquadrados como tanques sépticos, dada sua equivalência funcional em termos de tratamento primário anaeróbio;
- Foram excluídas ETEs que apresentavam apenas informações relativas ao tratamento preliminar, uma vez que tais unidades não representam efetivamente sistemas de tratamento biológico ou físico-químico completos;
- Foram excluídas ETEs sem informações sobre o processo de tratamento adotado ou com dados inconsistentes, de modo a evitar distorções estatísticas e interpretações indevidas quanto à tecnologia empregada.

Esse procedimento permitiu a construção de um banco de dados homogêneo, possibilitando a análise comparativa entre diferentes tecnologias de tratamento e sua aderência às exigências legais aplicáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÂO

A análise integrada entre os limites de lançamento de efluentes estabelecidos na legislação federal (BRASIL, 2011) e nas legislações estaduais de Minas Gerais (Deliberação Normativa – DN n° 8 do Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM, MINAS GERAIS, 2022), Rio de Janeiro (Normativa Operacional – NOP n° 45 do Instituto Estadual do Ambiente – INEA, RIO DE JANEIRO, 2021), São Paulo (SÃO PAULO, 1975), Santa Catarina (Resolução CONSEMA n° 182, SANTA CATARINA, 2021) e Rio Grande do Sul (Resolução CONSEMA n° 355, RIO GRANDE DO SUL, 2017), abrangendo as variáveis demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos totais (SST), nitrogênio total (NT), nitrogênio amoniacal (N-am), fósforo total (PT) e coliformes termotolerantes ou Escherichia coli (CT/E. coli) (Tabela 1), bem como os padrões de qualidade dos corpos hídricos definidos pelo enquadramento da Resolução CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005) (Tabela 2), evidencia um cenário de elevada complexidade regulatória e significativa heterogeneidade normativa no Brasil. Essa heterogeneidade não apenas reflete diferenças regionais na disponibilidade hídrica e na pressão antrópica, mas também impõe desafios técnicos relevantes para o dimensionamento e a operação de ETEs, especialmente nas regiões Sul e Sudeste.

Tabela 1 - Limites de lançamento de efluentes sanitários previstos em legislação federal brasileira e em legislações estaduais

Variáveis com limites	Federal Res. n° 430 (BRASIL, 2011)	MG DN n° 8 (MG, 2022)	RJ NOP n° 45 (RJ, 2021)	SP Decreto n° 8.478 (SP, 1976)	SC Res. n° 182 (SC, 2021)	RS Res. n° 355 (RS, 2017)
DQO (mg/L/ remoção)		180 (55-65%)			180-210	150-330
DBO (mg/L/ remoção)	120 (60%)	60 (60-70%)	40-120	60 (80%)	50-75	40-120
SST (mg/L)		100	40-110			50-140
NT (mg/L)					N/A/PA	
N-am (mg/L)	20 [1]	20	10-20		N/A/PA	20 [2]
PT (mg/L)			1-4		4	1-4 [2]
CT/E. coli (NMP/100mL)					N/A/PA	10^3-10^6

Fonte: BRASIL, 2011; MINAS GERAIS, 2022; RIO DE JANEIRO, 2021; SÃO PAULO, 1976; SANTA CATARINA, 2021; RIO GRANDE DO SUL, 2017.

Um primeiro aspecto relevante é a clara diferença entre os padrões de lançamento e os padrões de qualidade dos corpos d'água. Enquanto a Resolução CONAMA nº 430/2011 (Tabela 1) estabelece limites relativamente genéricos (por exemplo, DBO de até 120 mg/L com remoção mínima de 60%), os padrões de qualidade dos corpos receptores (CONAMA nº 357/2005) (Tabela 2) são significativamente mais restritivos, com DBO

[1] Atualmente revogada
[2] Em casos de histórico de floração de algas no corpo receptor

variando entre 5 mg/L (classes 1 e 2) e 10 mg/L (classe 3). Essa discrepância evidencia um ponto crítico: mesmo efluentes que atendem formalmente à legislação de lançamento podem não ser compatíveis com a manutenção da qualidade do corpo hídrico receptor, especialmente em bacias enquadradas como Classe 1 ou Classe 2, predominantes em regiões de maior sensibilidade ambiental. Estando, portanto, a demanda de desempenho das ETEs está condicionada à capacidade de diluição do corpo receptor.

Tabela 1 – Limites previstos para as diferentes classes de corpos d'água

Variáveis com limites	Classe 1	Classe 2	Classe 3
DBO (mg/L)	5	5	10
SDT (mg/L)	500	500	500
PT (mg/L)	0,020-0,100	0,030-0,100	0,050-0,150
Nitrato (mg/L)	10	10	10
Nitrito (mg/L)	1	1	1
N-am (mg/L)	0,5-3,7	0,5-3,7	1-13,3
CT (NMP/100mL)	200-2000	1000-2000	1000-4000

Fonte: BRASIL, 2005.

Observa-se que as legislações estaduais do Sul e Sudeste tendem a estabelecer padrões mais restritivos que a normativa federal quando aos padrões de lançamento de efluentes, particularmente em relação à matéria orgânica, nutrientes e sólidos suspensos, mas que também abrange em alguns casos, microrganismos indicadores.

No caso de São Paulo, a legislação (Decreto nº 8.478/1976, ainda como referência histórica com atualizações por normativa técnica da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) adota limites mais rigorosos de DBO (60 mg/L) e sólidos suspensos totais (até 40 mg/L), refletindo o alto grau de urbanização e pressão sobre os recursos hídricos.

Minas Gerais, por sua vez, estabelece uma abordagem fortemente condicionada à classe do corpo receptor, com limites mais restritivos de matéria orgânica, sólidos e especialmente nitrogênio amoniacal (20 mg/L), parâmetro que está revogado na legislação federal, indicando preocupação crescente com processos de eutrofização, especialmente em bacias críticas como Rio Doce e Paraopeba. No Rio de Janeiro, além desses parâmetros, a legislação estabelece também limites para fósforo total, reforçando a necessidade de controle da eutrofização em corpos hídricos.

Nos estados do Sul (Santa Catarina e Rio Grande do Sul), observa-se uma tendência semelhante. Ambos apresentam limites de DBO na faixa de 40 a 75 mg/L, destacando-se pela inclusão mais explícita de parâmetros microbiológicos e nutrientes (nitrogênio e fósforo), refletindo preocupações com a balneabilidade e os usos múltiplos da água.

A comparação entre as Tabelas 1 e 2 evidencia que os principais fatores limitantes para o atendimento simultâneo entre lançamento e qualidade do corpo receptor são os nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo. Enquanto a Resolução CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011) praticamente não estabelece limites efetivos para fósforo e apresenta restrições moderadas para nitrogênio amoniacal (esta última, revogada), o enquadramento dos corpos d'água (Classe 1 e 2) estabelece valores muito mais baixos para fósforo total (0,02–0,10 mg/L), o que representa uma diferença de ordem de grandeza. Esse descompasso implica que ETEs convencionais, mesmo eficientes na remoção de matéria orgânica (DBO), são estruturalmente insuficientes para controle de eutrofização, exigindo etapas adicionais de tratamento.

Outro ponto relevante é que os parâmetros historicamente utilizados como referência de desempenho (especialmente DBO e SST) já não são suficientes para caracterizar adequadamente a qualidade do efluente em cenários regulatórios mais restritivos.

A Tabela 1 mostra que, embora a DBO ainda seja o principal parâmetro de controle, há uma tendência clara de incorporação de nitrogênio amoniacal, fósforo total e indicadores microbiológicos (*E. coli* e coliformes

termotolerantes). Essa ampliação do escopo regulatório indica uma transição de um modelo baseado apenas em carga orgânica para um modelo mais integrado, focado em eutrofização, toxicidade e risco sanitário.

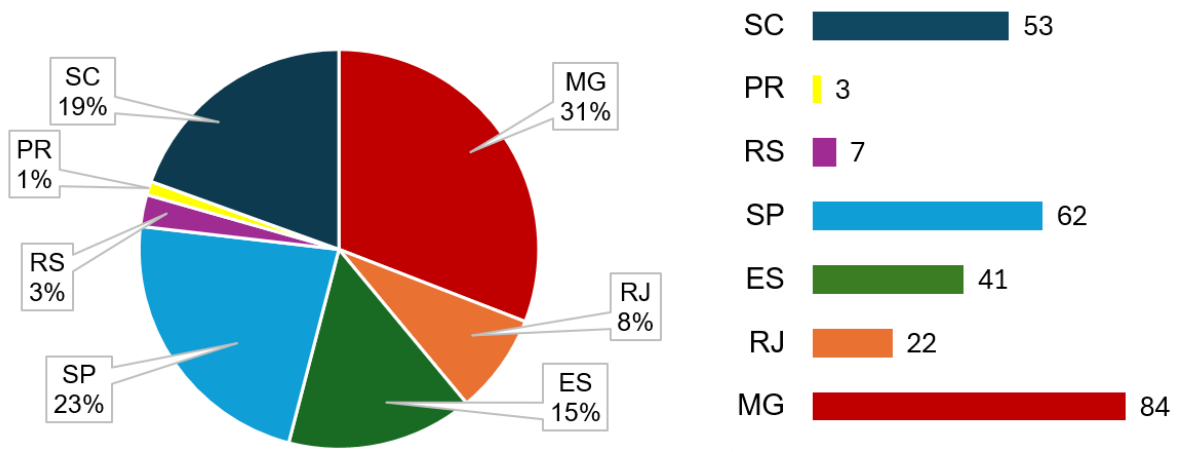
A combinação entre limites mais restritivos e corpos hídricos frequentemente enquadrados em classes 1 e 2 nas regiões Sul e Sudeste resulta em uma consequência direta: a insuficiência de tecnologias simplificadas como única etapa de tratamento. Sistemas baseados exclusivamente em reatores anaeróbios (como UASB), lagoas de estabilização e em alguns casos, sistemas exclusivamente biológicos, dificilmente conseguem atender simultaneamente as demandas de concentrações reduzidas de DBO (≤ 5–10 mg/L em termos de impacto no corpo receptor), baixo fósforo (< 0,1 mg/L), baixa concentração de nitrogênio amoniacal e controle microbiológico adequado. Isso leva à necessidade de adoção de arranjos tecnológicos mais complexos, como: pós-tratamento aeróbio (lodos ativados, filtro e biofiltro aerado submerso – FAS e BAS, filtros biológicos), remoção biológica ou química de fósforo, etapas de desinfecção avançada e sistemas terciários de polimento.

De forma geral, a análise das diferentes legislações evidencia diferenças entre os enfoques adotados pelos principais instrumentos normativos relacionados à qualidade dos efluentes e dos corpos hídricos. Enquanto a Resolução CONAMA nº 430/2011(BRASIL, 2011) estabelece padrões nacionais para o lançamento de efluentes, as legislações estaduais, em diversos casos, complementam esses requisitos por meio da inclusão de parâmetros adicionais ou da adoção de limites mais restritivos. Paralelamente, a Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005) define padrões de qualidade para os corpos hídricos de acordo com sua classe de enquadramento, estabelecendo objetivos ambientais compatíveis com os usos preponderantes da água.

Nesse contexto, o atendimento aos padrões de lançamento de efluentes constitui uma condição necessária, mas nem sempre suficiente para assegurar, isoladamente, o cumprimento dos objetivos de qualidade do corpo receptor, cuja verificação depende também das características do curso d'água, de sua capacidade de assimilação e das condições locais de lançamento. Dessa forma, os resultados reforçam a importância da aplicação integrada dos instrumentos de controle de lançamento e de enquadramento dos corpos hídricos, de modo a subsidiar o planejamento e a operação de sistemas de tratamento de esgoto compatíveis com as metas de qualidade ambiental.

Quanto à análise dos dados de tecnologias aplicadas em ETEs, de acordo com os dados do SINISA (Figura 1 e Figura 2), há dois padrões estruturais relevantes para a compreensão do saneamento nas regiões Sul e Sudeste do Brasil: a distribuição espacial desigual das ETEs entre os estados e a predominância de tecnologias de tratamento de baixa a média complexidade operacional, como reatores UASB e sistemas lagunares. Esses dois aspectos, quando analisados em conjunto, permitem compreender não apenas a configuração atual do parque de tratamento de esgotos, mas também suas limitações e potencialidades frente às crescentes exigências ambientais.

Figura 1 – Quantitativo de ETEs selecionadas por Estado



Fonte: SINISA, 2026.

No que se refere à distribuição espacial das ETEs identificadas na base analisada, observa-se uma concentração significativa em determinados estados. Minas Gerais apresenta o maior quantitativo, com 84 unidades, seguido por São Paulo, com 62 ETEs, e Santa Catarina, com 53. Na sequência, destacam-se Espírito

Santo, com 41 unidades, Rio de Janeiro, com 22, Rio Grande do Sul, com 7, e Paraná, com apenas 3 ETEs com tecnologia identificada. Essa distribuição evidencia uma assimetria regional, que pode estar associada tanto às diferenças na cobertura e no nível de detalhamento das informações disponíveis no SINISA quanto a fatores relacionados à extensão territorial, ao número de municípios, ao histórico de implantação dos sistemas de esgotamento sanitário e aos diferentes modelos de organização dos serviços. No caso específico do Paraná, estado reconhecido pela ampla aplicação de reatores UASB em ETEs, o reduzido número de unidades com tecnologia identificada na base analisada sugere uma limitação da disponibilidade de informações no SINISA, e não necessariamente uma baixa adoção dessa tecnologia.

Em estados como Minas Gerais e São Paulo, o elevado número de ETEs está associado à grande capilaridade municipal e à implantação historicamente fragmentada dos sistemas de saneamento, o que resulta em múltiplas unidades de pequeno e médio porte. Já em estados como Rio de Janeiro, o número relativamente reduzido de ETEs pode estar relacionado à concentração de sistemas centralizados de grande escala, especialmente em regiões metropolitanas, o que reduz o número absoluto de unidades, mas não necessariamente indica menor cobertura de tratamento. Por outro lado, os baixos quantitativos observados no Paraná e no Rio Grande do Sul podem refletir tanto estratégias mais centralizadas de gestão quanto possíveis limitações de atualização ou detalhamento da base de dados do SINISA, considerando que esses estados possuem sistemas de saneamento relativamente consolidados.

Na distribuição tecnológica das ETEs, (Figura 2) observa-se uma clara predominância de processos biológicos convencionais e de baixa complexidade operacional. O reator UASB representa a tecnologia mais frequente, correspondendo a 107 unidades, ou 39% do total analisado, confirmando sua consolidação como solução dominante no contexto brasileiro, especialmente em municípios de pequeno e médio porte. Sua ampla adoção está associada ao baixo custo de implantação e operação, simplicidade operacional e adequada eficiência na remoção de matéria orgânica em condições climáticas favoráveis. No entanto, trata-se de uma tecnologia com limitações conhecidas no que se refere à remoção de nutrientes e ao atendimento de padrões mais restritivos de qualidade do efluente.

Na sequência, observa-se a presença de sistemas de lodos ativados, com 51 unidades (19%), sistemas de lagoas de estabilização, com 49 unidades (18%), e combinações de tanque séptico seguido de filtro anaeróbio, com 44 unidades (16%). Em conjunto, essas tecnologias representam a maior parte das ETEs analisadas, indicando que aproximadamente a grande maioria do parque de tratamento brasileiro ainda é baseada em soluções convencionais, com predominância de processos anaeróbios ou extensivos. Tecnologias mais avançadas, como os reatores do tipo reatores de leito móvel e biofilme (MBBR do inglês, *moving bed biofilm reactor*), aparecem de forma marginal, com apenas 9 unidades (3%), enquanto a categoria “outros”, com 12 unidades (5%), indica a existência de sistemas híbridos ou soluções menos padronizadas.

Esse padrão tecnológico reflete a adoção histórica de sistemas de tratamento orientados por critérios de eficiência na remoção de matéria orgânica, simplicidade operacional e viabilidade econômica, em consonância com as demandas predominantes da expansão do esgotamento sanitário no Brasil. Embora tecnologias como os reatores UASB apresentem elevada aplicabilidade e eficiência na remoção de carga orgânica, sua configuração convencional apresenta limitações quanto à remoção de determinados constituintes, como nitrogênio e fósforo, quando comparada às exigências ambientais mais restritivas e aos objetivos de qualidade associados a corpos hídricos de maior sensibilidade ambiental.

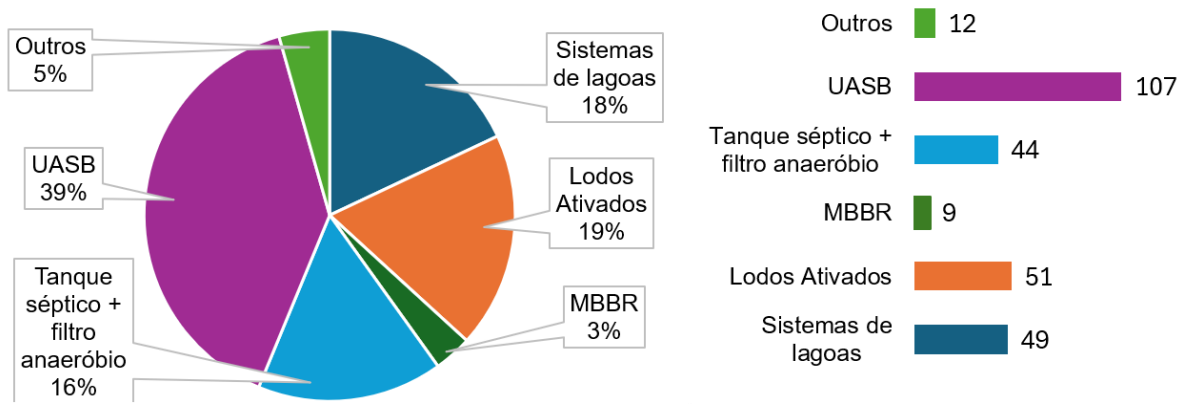
Nesse contexto, a predominância de reatores UASB e de sistemas convencionais nas ETEs brasileiras evidencia a necessidade de evolução das soluções de tratamento frente ao aprimoramento das legislações ambientais e à ampliação das metas de universalização do saneamento. Os desafios atuais relacionados à qualidade dos efluentes abrangem não apenas a remoção de matéria orgânica, mas também o controle de nutrientes, compostos nitrogenados e indicadores microbiológicos. Dessa forma, os reatores UASB permanecem como alternativas tecnicamente consolidadas, porém a incorporação de etapas de pós-tratamento torna-se fundamental para ampliar o desempenho das ETEs e possibilitar o atendimento a condições de lançamento mais restritivas, especialmente em situações nas quais são requeridos níveis mais elevados de remoção de nutrientes e proteção dos corpos receptores.

De forma geral, os dados analisados indicam um cenário no qual o parque de tratamento de esgoto nas regiões Sul e Sudeste do Brasil permanece predominantemente baseado em tecnologias consolidadas, com ampla aplicação de sistemas voltados principalmente à remoção de matéria orgânica e sólidos, enquanto soluções direcionadas ao tratamento terciário e à remoção avançada de nutrientes ainda apresentam menor participação. Esse panorama reflete o histórico de desenvolvimento do setor de saneamento no país e evidencia a

importância da modernização progressiva dos sistemas existentes, especialmente diante do aprimoramento das exigências ambientais e da crescente relevância da proteção da qualidade dos corpos hídricos receptores.

Nesse contexto, a pesquisa, o desenvolvimento tecnológico e a experiência acumulada na aplicação e adequação de diferentes tecnologias de tratamento de esgoto no Brasil têm contribuído significativamente para a evolução dos sistemas de tratamento, possibilitando a adaptação de soluções às características climáticas, operacionais e socioeconômicas nacionais. Esse processo tem favorecido a incorporação gradual de tecnologias complementares e de estratégias de pós-tratamento, ampliando o desempenho das ETEs existentes e criando condições para o atendimento a padrões de lançamento mais restritivos e a objetivos ambientais cada vez mais abrangentes.

Figura 2 – Quantitativo de ETEs selecionadas por Estado



Fonte: SINISA, 2026.

Os dados apresentados na Figura 3 organizam um conjunto amplo de configurações de ETEs, contemplando desde soluções mais simplificadas, como tanque séptico e lagoas, até arranjos mais complexos com pós-tratamentos físicos, químicos e biológicos. A figura apresenta faixas potenciais de eficiência de remoção para os parâmetros DQO, DBO, SST, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total, fósforo total e coliformes/E. coli, permitindo avaliar qualitativamente a capacidade de cada configuração tecnológica em relação aos diferentes objetivos de tratamento. A análise integrada dessas informações possibilita identificar os principais mecanismos de remoção associados a cada tecnologia e a necessidade de combinações entre processos para atendimento a requisitos de lançamento mais restritivos.

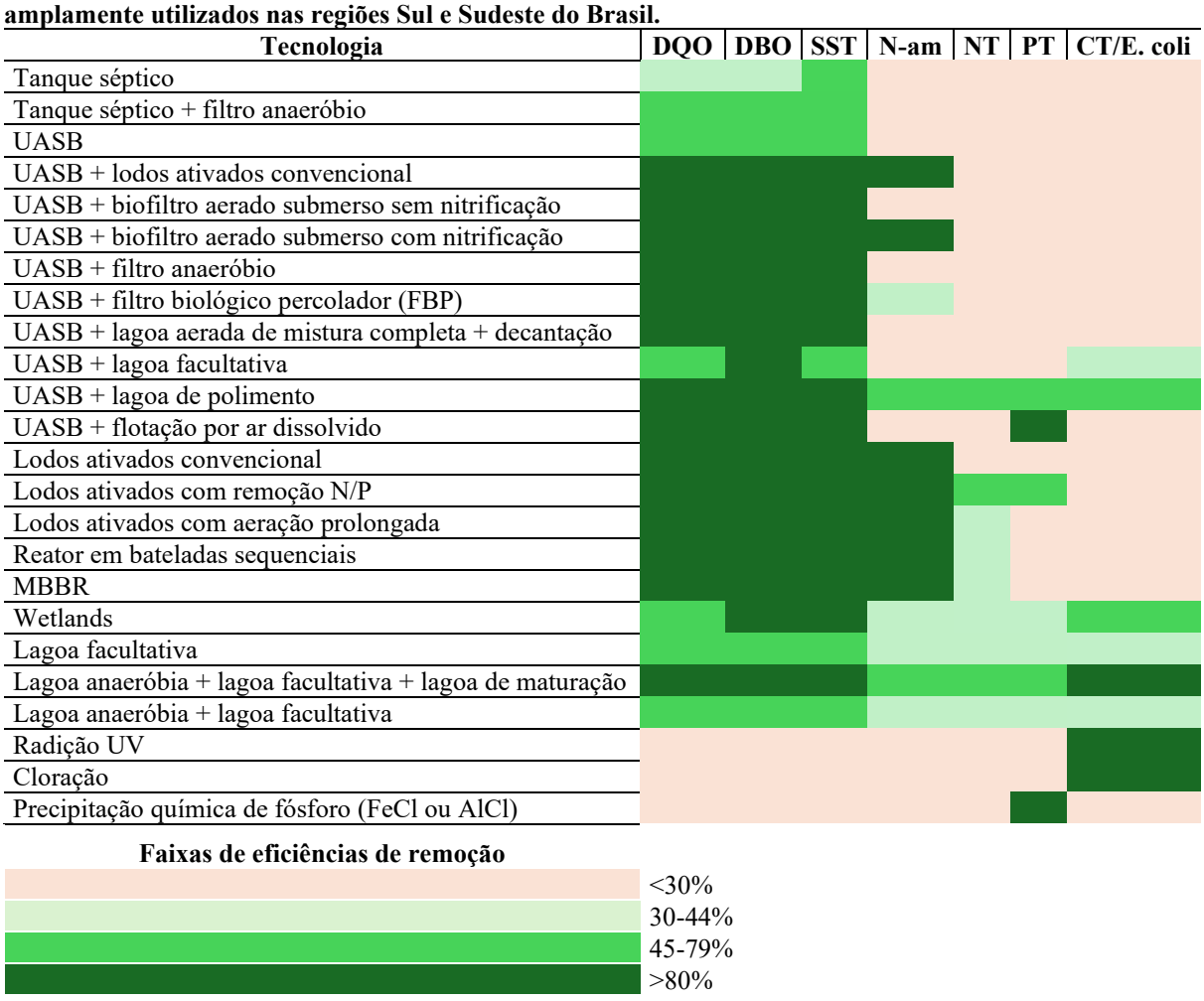
De forma geral, observa-se a recorrência de sistemas baseados em processos anaeróbios, especialmente o reator UASB, isoladamente ou combinado com etapas complementares. A ampla aplicação do UASB em diferentes arranjos tecnológicos está associada às suas vantagens operacionais e econômicas, como menor demanda energética, menor geração de lodo e elevada eficiência na remoção de matéria orgânica, características que contribuíram para sua consolidação no cenário brasileiro (CHERNICHARO, 2007). No entanto, quando empregado como única etapa de tratamento, o reator UASB apresenta desempenho limitado para determinados parâmetros, especialmente nutrientes e indicadores microbiológicos, conforme observado na Figura 3, tornando necessária a associação com unidades de pós-tratamento para ampliar a qualidade do efluente tratado.

Nesse sentido, destaca-se a presença recorrente de sistemas híbridos, especialmente combinações entre UASB e processos aeróbios, como lodos ativados (convencional, aeração prolongada e com remoção de N/P), biofiltro aerado submerso (BAS), filtros biológicos percoladores (FBP), reatores MBBR e reatores em bateladas sequenciais (SBR). Essas configurações demonstram a complementaridade entre processos anaeróbios e aeróbios, permitindo associar as vantagens do UASB na remoção de matéria orgânica e redução de custos operacionais ao maior potencial de remoção de nutrientes, sólidos remanescentes e indicadores microbiológicos proporcionado pelas etapas subsequentes. Dessa forma, os sistemas híbridos representam uma alternativa importante para adequação das ETEs às condições de lançamento mais restritivas e aos objetivos de qualidade dos corpos receptores.

Paralelamente, os sistemas lagunares mantêm relevância significativa, com presença de lagoas facultativas, anaeróbias, aeradas e de maturação, além de arranjos em série. Esses sistemas continuam sendo amplamente utilizados por sua simplicidade operacional e baixo custo, especialmente em municípios de menor porte. No entanto, sua eficiência pode ser fortemente dependente de condições climáticas e disponibilidade de área, fatores que devem ser considerados na seleção da alternativa tecnológica, especialmente em regiões com maior densidade populacional ou restrições territoriais. Ainda assim, sua permanência no conjunto tecnológico evidencia a diversidade de soluções empregadas no saneamento brasileiro, resultado de diferentes condições locais de implantação, operação e requisitos ambientais.

Do ponto de vista dos parâmetros de qualidade do efluente, a estrutura da figura evidencia que as maiores eficiências de remoção para determinados constituintes, especialmente nitrogênio total, fósforo total e coliformes/E. coli, geralmente estão associadas a configurações compostas por múltiplas etapas de tratamento ou processos específicos de remoção. Nesse contexto, sistemas anaeróbios isolados e lagoas em configurações simplificadas podem apresentar limitações para atendimento a condições de lançamento mais restritivas, enquanto a incorporação de etapas complementares de pós-tratamento permite ampliar o desempenho global das ETEs e atender a objetivos ambientais mais abrangentes.

Figura 3 - Principais configurações de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e respectivas eficiências potenciais de remoção de poluentes (DQO, DBO, SST, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total, fósforo total e coliformes/E. coli), considerando sistemas anaeróbios, aeróbios, híbridos e lagunares amplamente utilizados nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.



Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2014; Chernicharo, 2007; Metcalf & Eddy, 2014 e Jordão e Pessoa, 2017.

Nesse contexto, ganha relevância a discussão sobre *retrofit* de ETEs existentes. O novo marco legal do saneamento básico (Lei nº 14.026/2020) e a crescente rigidez dos padrões ambientais impõem uma necessidade clara de modernização das unidades em operação, especialmente aquelas baseadas exclusivamente

em processos anaeróbios ou lagoas. O *retrofit* pode envolver desde a inclusão de unidades aeróbias de pós-tratamento até a incorporação de tecnologias mais compactas e eficientes, como MBBR, BAS e SBR, além de etapas específicas para remoção de nutrientes e desinfecção.

Assim, os resultados sintetizam um cenário típico do Brasil: forte predominância de reatores anaeróbios como base do tratamento, expressiva participação de sistemas de lodos ativados como tecnologia de reforço de eficiência e presença relevante de sistemas lagunares como solução extensiva. Ao mesmo tempo, evidenciam-se limitações estruturais dessas configurações frente às exigências regulatórias atuais, reforçando a necessidade de reavaliação tecnológica e modernização das ETEs existentes para garantir conformidade ambiental, eficiência operacional e sustentabilidade de longo prazo.

CONCLUSÕES

A análise das tecnologias empregadas em ETEs nas regiões Sul e Sudeste evidencia um cenário de forte heterogeneidade tecnológica, incluindo soluções simplificadas, sistemas consolidados e arranjos mais avançados de tratamento. A predominância de reatores anaeróbios reflete a busca histórica por soluções de menor custo e maior robustez operacional, enquanto os sistemas de lodos ativados e as configurações híbridas indicam uma evolução em direção a maiores eficiências de remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos.

Entretanto, os dados também demonstram que muitas das configurações tradicionais, especialmente aquelas baseadas exclusivamente em processos anaeróbios ou em sistemas lagunares simples, apresentam limitações para atendimento pleno aos padrões atuais de lançamento de efluentes, sobretudo no que se refere à remoção de nitrogênio, fósforo e indicadores microbiológicos. Esse cenário é ainda mais relevante diante do aumento das exigências regulatórias e das metas estabelecidas pelo novo marco legal do saneamento.

Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de modernização das ETEs existentes por meio de estratégias de *retrofit*, com incorporação de etapas de pós-tratamento e tecnologias mais eficientes, como sistemas anaeróbios seguidos de pós-tratamento aeróbio, reatores compactos e unidades específicas para remoção de nutrientes e desinfecção, tendo em vista também a formação de subprodutos e o controle de suas concentrações dentro dos limites permitidos. A evolução tecnológica do setor é, portanto, essencial para garantir a conformidade ambiental, a segurança sanitária e a sustentabilidade dos sistemas de tratamento de esgoto no contexto brasileiro atual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

2. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

3. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011.

4. BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 11.445/2007. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 jul. 2020.

5. CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores anaeróbios*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2007.

6. JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.

7. METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

8. MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). Deliberação Normativa COPAM nº 8, de 21 de novembro de 2022. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais

para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2 dez. 2022.

9. RIO DE JANEIRO. Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Resolução INEA nº 45, de 8 de fevereiro de 2021. Estabelece critérios e padrões de lançamento de esgoto sanitário tratado em corpos receptores. Rio de Janeiro: INEA, 2021.

10. RIO GRANDE DO SUL. Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA). Resolução CONSEMA nº 355, de 13 de julho de 2017. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 19 jul. 2017.

11. SANTA CATARINA. Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA). Resolução CONSEMA nº 182, de 6 de agosto de 2021. Estabelece as diretrizes para os padrões de lançamento de esgotos domésticos de sistemas de tratamento públicos e privados. Florianópolis: CONSEMA, 2021.

12. SÃO PAULO. Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976. Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1976.

13. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO (SINISA). *Diagnóstico dos serviços de água e esgoto – Brasil*. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2026.

14. VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Vol. 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

15. VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Vol. 2: Lodos ativados*. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

16. VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Vol. 3: Lagoas de estabilização*. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017.