APROVEITAMENTO DE LODO INDUSTRIAL PARA GERAÇÃO DE BIOGÁS: ANÁLISE TÉCNICA CASE CETREL

Geovanna Miranda Teixeira[1]
Engenheira Química, formada pela Universidade Salvador (UNIFACS), pós-graduada em Segurança de Processos e mestranda em Engenharia Química. Possui experiência em engenharia de processos industriais, acompanhamento de projetos e gerenciamento de empreendimentos voltados à construção de dutos. Atua como Engenheira de Processo na Cetrel, desenvolvendo projetos de aproveitamento e valorização de lodo, gestão e eficiência energética, inovação e melhoria contínua de processos.
Claudia Martins Ferreira Bahia[2]
Engenheira Química atuando como Gerente de Processos e Projetos na Cetrel
Mariana Ferreira Santos[3]
Mestre em Energia, Química atuando como Engenheira de Processo na Cetrel

Endereço[1]**:** ROD BA 530 Via CETREL/Via Atlântica - Polo Industrial de Camaçari - CEP: 42816-280 - Camaçari - BA - Tel: +55 (74) 99101-5163 - e-mail: geovannateixeira@cetrel.con.br

RESUMO

O trabalho avaliou a viabilidade técnica de implantar um sistema de biodigestão anaeróbia para tratar o lodo espessado da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da Cetrel, no Polo de Camaçari/BA. A análise partiu da caracterização físico-química da biomassa e de ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (PBM). O lodo espessado obteve o melhor desempenho prático, gerando 7 m³ de biogás e 4 m³ de metano por tonelada de substrato. Com uma geração diária de 500 m³ de lodo, o potencial de bancada estimado é de 3.500 Nm³/dia. Ao aplicar um fator de eficiência tecnológica de 80% para simular a operação real, a vazão estimada cai para 2.800 Nm³/dia. Embora o processo seja eficiente para estabilização ambiental do resíduo, a conversão elétrica cobriria apenas 6,4% do consumo interno da Cetrel. Conclui-se que o projeto tem viabilidade técnica parcial, principalmente como alternativa de tratamento, estabilização e valorização do lodo, mas tem baixa relevância para geração de energia ou biometano comercial.

PALAVRAS-CHAVE: biodigestão anaeróbia; lodo industrial; biogás.

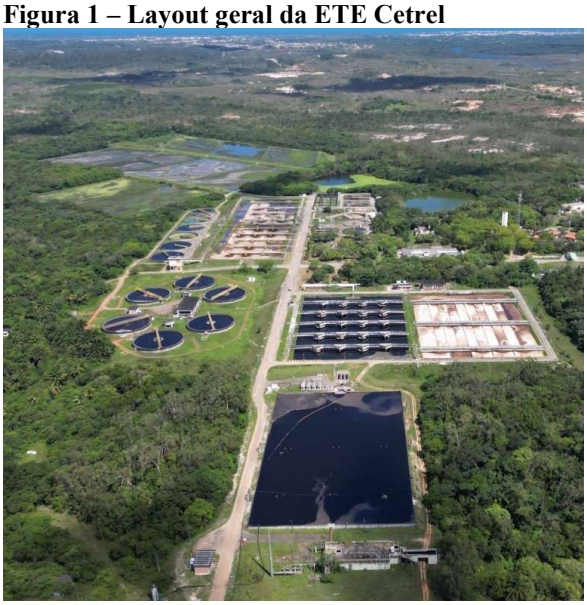
INTRODUÇÃO

A Cetrel S.A iniciou suas operações em 1978, juntamente com a implantação do Polo Industrial de Camaçari (PIC), na Bahia, consolidando-se ao longo de sua trajetória como uma empresa de referência em soluções ambientais para o setor industrial. Desde então, a companhia atua no desenvolvimento e na operação de tecnologias voltadas ao tratamento de efluentes, resíduos industriais e emissões atmosféricas, prestando suporte ambiental a diferentes segmentos produtivos.

Entre suas principais unidades operacionais, destaca-se a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), considerada a maior estação de tratamento de efluentes industriais do Brasil e da América Latina. A ETE da Cetrel é responsável pelo recebimento e tratamento da corrente de efluentes orgânicos proveniente das indústrias instaladas no Polo Industrial de Camaçari, utilizando como principal rota de tratamento o processo biológico aeróbio de lodos ativados. A unidade possui capacidade operacional aproximada de 6.200 m³/h e atua na remoção de carga orgânica, sólidos e compostos contaminantes presentes em efluentes industriais de diferentes características. A Figura 1 apresenta o layout geral da ETE Cetrel.

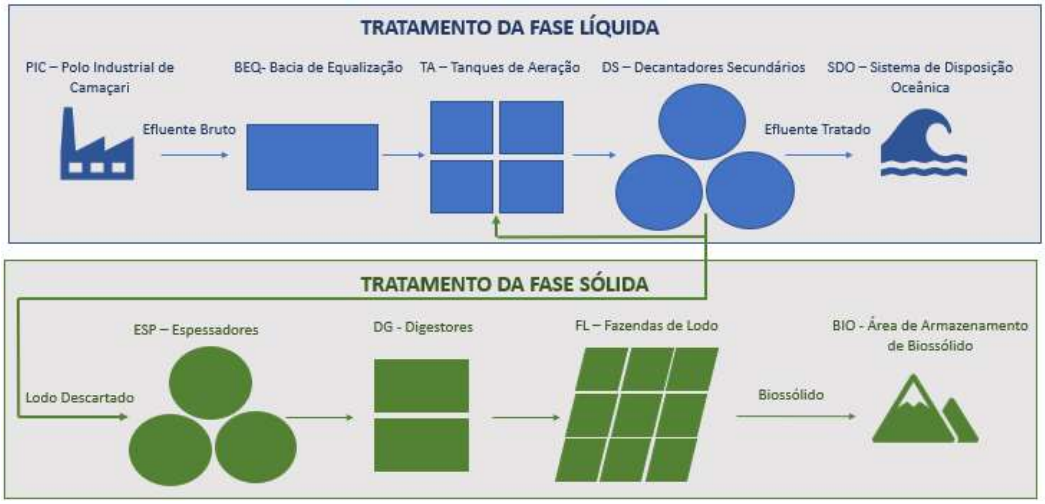
Após a equalização, as correntes de efluentes seguem para os Tanques de Aeração (TA's), onde entram em contato com colônias de bactérias e outros microrganismos presentes no lodo ativado. Esses microrganismos são responsáveis pela degradação da matéria orgânica e pela redução da carga poluidora do efluente, alcançando eficiências médias de remoção de aproximadamente 95% para Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e 75% para Demanda Química de Oxigênio (DQO). Em seguida, a massa líquida é direcionada aos decantadores, onde ocorre a separação entre a fase líquida, correspondente ao efluente tratado, e a fase sólida, composta pelo lodo ativado. O efluente tratado é posteriormente encaminhado ao Sistema de Disposição Oceânica. A Figura 2 mostra um fluxograma simplificado do processo de tratamento de efluentes da Cetrel.

Figura 1 – Layout geral da ETE Cetrel



Fonte: Tratamento de Efluentes, 2026 – CETREL.

Figura 2 – Layout do Processo de Tratamento de Efluentes



Fonte: Elaboração própria.

Quanto ao lodo separado nos decantadores, parte dele é continuamente recirculada aos tanques de aeração, com o objetivo de manter o equilíbrio da biomassa microbiana necessária ao processo biológico. A fração excedente, por sua vez, é descartada do sistema e encaminhada aos espessadores de lodo, onde ocorre uma nova etapa de separação entre as fases líquida e sólida, promovendo o adensamento do material.

O lodo espessado é direcionado para digestores aeróbios, promovendo redução da matéria orgânica ativa na presença de oxigênio. Após, é conduzido às fazendas de lodo, onde passa por processos adicionais de separação e estabilização. Entretanto, a destinação convencional desse resíduo apresenta limitações relevantes, como elevado tempo de processamento, dependência de condições climáticas e necessidade de áreas específicas para manejo. Nesse contexto, a geração contínua de lodo industrial representa um dos principais desafios operacionais e ambientais associados à ETE, tornando necessária a avaliação de alternativas tecnológicas capazes de promover sua valorização e possibilitar o aproveitamento energético desse material.

Diante desse cenário, uma das alternativas avaliadas pela Cetrel consiste na implantação de um sistema de biodigestão anaeróbia para o aproveitamento do lodo espessado gerado na ETE. Essa rota tecnológica permite a estabilização parcial da matéria orgânica presente no resíduo e, simultaneamente, a produção de biogás, combustível renovável composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono. De acordo com a literatura recente, a digestão anaeróbia tem sido amplamente estudada como uma estratégia para o tratamento de lodos e resíduos orgânicos, pois combina

redução do potencial poluidor, recuperação energética e possibilidade de valorização de subprodutos, alinhando-se aos princípios da economia circular e da transição energética (IEA BIOENERGY, 2025; CHEN et al., 2023).

Entre as possibilidades de aproveitamento energético na rota de biodigestão, podem ser considerados dois cenários principais associados à implantação do sistema. O primeiro cenário consiste na biodigestão do lodo com produção de biogás destinado à geração de energia elétrica para consumo interno, juntamente com o tratamento e a disposição adequada do digestato gerado no processo. Essa alternativa pode contribuir para a redução da dependência de energia elétrica proveniente da rede, além de possibilitar o aproveitamento energético de um resíduo produzido de forma contínua no sistema de tratamento de efluentes. A aplicação do biogás para geração de eletricidade e calor é uma das rotas mais consolidadas dessa tecnologia, especialmente em unidades que apresentam disponibilidade regular de substrato orgânico e demanda energética permanente (IEA, 2020; CIBIOGÁS, 2023).

O segundo cenário possível envolve a biodigestão do lodo com posterior purificação do biogás para obtenção de biometano, com possibilidade de injeção na rede de gás natural, além do tratamento e da disposição final do digestato. Após a remoção de impurezas e a redução do teor de dióxido de carbono, o biometano passa a apresentar características semelhantes às do gás natural, podendo ser utilizado como combustível renovável em diferentes aplicações industriais, veiculares, comerciais ou residenciais, desde que sejam atendidos os requisitos técnicos e regulatórios aplicáveis. No contexto brasileiro, essa alternativa tem ganhado relevância em função do avanço das políticas de descarbonização e da regulamentação da qualidade do biometano, incluindo critérios para sua comercialização e mistura ao gás natural (ANP, 2022; BAHIAGÁS, 2024).

A comparação entre esses cenários é relevante para subsidiar a tomada de decisão quanto à alternativa tecnicamente mais adequada para a realidade operacional de unidades industriais. Enquanto a geração de energia elétrica pode favorecer o autoconsumo e a redução de custos energéticos internos, a produção de biometano amplia as possibilidades de inserção do biogás em cadeias energéticas externas, especialmente por meio da substituição parcial do gás natural. Em ambos os casos, a viabilidade técnica depende de fatores como características físico-químicas do lodo, potencial bioquímico de metano, estabilidade do processo anaeróbio, necessidade de pré-tratamento, eficiência de conversão energética, qualidade do biogás produzido e estratégias de tratamento, aproveitamento ou disposição final do digestato.

Nesse contexto, o estudo da viabilidade técnica da implantação de um sistema de biodigestão apresenta-se como uma etapa fundamental para verificar se o lodo atualmente destinado por rotas convencionais pode ser convertido em recurso energético, contribuindo para a redução de passivos ambientais, diversificação da matriz energética e fortalecimento de práticas industriais mais sustentáveis.

Dessa forma, o presente estudo visa avaliar a viabilidade técnica da implantação de um sistema de biodigestão para aproveitamento do lodo espessado gerado na Estação de Tratamento de Efluentes da Cetrel, com base em resultados laboratoriais e em cenários possíveis de valorização energética. Para isso, são considerados cálculos de estimativa de produção de biogás a partir dos resultados laboratoriais disponíveis, bem como a avaliação da rota energética, com potencial substituição parcial do consumo de energia elétrica fornecida pela concessionária. Além disso, busca-se estabelecer um indicador de viabilidade técnica por meio da comparação entre os resultados obtidos nas análises laboratoriais e dados de projetos semelhantes, de modo a subsidiar a Cetrel na tomada de decisão quanto aos próximos passos do projeto.

OBJETIVO

Avaliar a viabilidade técnica da implantação de um sistema de biodigestão anaeróbia para o aproveitamento do lodo espessado gerado na Estação de Tratamento de Efluentes da Cetrel, com base na caracterização físico-química das amostras, nos resultados do ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), na estimativa de produção diária de biogás e na análise das possibilidades de aproveitamento energético. O estudo busca verificar o potencial de conversão do lodo industrial em biogás, comparando os resultados obtidos com dados da literatura e avaliando a representatividade da geração de energia elétrica e da produção de biometano frente às condições operacionais da unidade.

METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e caráter técnico-exploratório, voltada à avaliação da viabilidade técnica da implantação de um sistema de biodigestão para aproveitamento energético do lodo espessado gerado na Estação de Tratamento de Efluentes da Cetrel, localizada no Polo Industrial de Camaçari, Bahia. A análise foi desenvolvida com base em dados operacionais disponibilizados pela empresa, resultados laboratoriais de caracterização físico-química e ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), realizados pelo Laboratório de Biogás do CIBiogás.

A metodologia adotada compreendeu quatro etapas principais: caracterização dos substratos analisados, avaliação dos resultados dos ensaios laboratoriais de PBM, estimativa do potencial diário de produção de biogás a partir da geração de lodo espessado e análise técnica da produção biogás e rota de aproveitamento energético.

Caracterização das amostras

As análises laboratoriais consideradas neste estudo foram realizadas com amostras de sedimento, lodo espessado e codigestão composta por 10% de sedimento e 90% de lodo espessado. Para cada amostra, foram determinados parâmetros de caracterização físico-química, incluindo sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF), expressos em g/kg e em porcentagem. Esses parâmetros são relevantes para a avaliação do potencial de biodigestão, uma vez que a fração de sólidos voláteis está associada à parcela orgânica biodegradável do substrato, diretamente relacionada à produção de biogás e metano.

Potencial de produção de biogás

O potencial de produção de biogás foi determinado pelo ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), também conhecido como *Biochemical Methane Potential* (BMP), realizado sob condições controladas de digestão anaeróbia. O ensaio foi conduzido seguindo o método fermentativo em escala de bancada, utilizando reatores fechados, nos quais foram adicionados o substrato analisado e o inóculo anaeróbio, sob condições controladas de operação. Após a remoção do oxigênio do sistema, os reatores foram mantidos em temperatura controlada, permitindo o desenvolvimento do processo anaeróbio e a conversão da fração orgânica biodegradável em biogás. Ao longo do período experimental, a produção de biogás foi monitorada até sua estabilização, sendo posteriormente determinada a fração de metano presente no gás produzido.

A produção acumulada de biogás e metano foi acompanhada ao longo do ensaio até que a geração de gás apresentasse tendência de estabilização, indicando a degradação da fração orgânica biodegradável dos substratos. Os resultados foram expressos em volume de biogás e de metano por tonelada de substrato, permitindo a comparação entre as amostras avaliadas e a estimativa do potencial de aproveitamento energético do lodo espessado. Esse procedimento possibilitou avaliar, em escala laboratorial, a capacidade de conversão da matéria orgânica presente nos substratos em energia renovável, subsidiando a análise técnica da implantação de um sistema de biodigestão em escala operacional.

Estimativa do potencial diário de produção de biogás

A estimativa do potencial diário de produção de biogás foi realizada a partir da combinação entre o volume diário de lodo espessado gerado na Estação de Tratamento de Efluentes da Cetrel e o resultado obtido no ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) para esse substrato. Adotou-se como dado operacional de entrada a geração diária de lodo espessado informada pela Cetrel, correspondente a 500 m³/dia.

Para fins de estimativa preliminar, considerou-se a equivalência aproximada entre o volume de lodo espessado gerado diariamente e sua massa úmida, assumindo densidade próxima à da água, ou seja, 1 tonelada por metro cúbico. Dessa forma, a geração diária de 500 m³/dia de lodo espessado foi considerada equivalente a aproximadamente 500 toneladas de substrato por dia.

O potencial diário de produção de biogás foi calculado, conforme a Equação 1:

Produção diária = Quantidade diária de substrato × Produção específica de biogás equação (1)

Indicador de viabilidade técnica

Foi realizada uma análise comparativa com dados disponíveis na literatura técnico-científica e em referências do setor de biogás. Essa etapa teve como objetivo confrontar o potencial de produção de biogás obtido para o lodo espessado da Cetrel com valores reportados em estudos semelhantes envolvendo a biodigestão anaeróbia de lodos, resíduos orgânicos e substratos industriais.

O comparativo bibliográfico considerou parâmetros como produção específica de biogás e metano, características dos substratos avaliados, condições operacionais dos ensaios, tipo de tecnologia empregada e rotas de aproveitamento energético adotadas. A partir dessa comparação, buscou-se verificar se os resultados obtidos nas análises laboratoriais apresentavam coerência técnica em relação a projetos e estudos previamente publicados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização das amostras e PBM

Os resultados obtidos nas análises laboratoriais possibilitaram uma avaliação preliminar do comportamento das amostras quanto ao potencial de aproveitamento em processo de biodigestão anaeróbia. Foram analisadas três

condições distintas: sedimento, lodo espessado e uma mistura de codigestão composta por 10% de sedimento e 90% de lodo espessado. Os parâmetros analisados na caracterização físico-química, sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF), além dos dados provenientes do ensaio de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) são apresentados nas Tabelas 1 e 2. Esses parâmetros são relevantes porque a produção de biogás está diretamente associada à fração orgânica biodegradável do substrato, geralmente representada pelos sólidos voláteis, enquanto a fração fixa está relacionada a materiais minerais ou inorgânicos, que não contribuem diretamente para a conversão biológica em metano (HOLLIGER et al., 2016; KLEYBÖCKER; SCHNEIDER, 2020).

A amostra de sedimento apresentou teor de sólidos totais de 46,40%, valor consideravelmente superior ao observado nas demais amostras. Além disso, verificou-se elevada participação de sólidos fixos, correspondente a 82,48% em base seca, indicando predominância de material mineral ou inorgânico. Esse resultado sugere baixa disponibilidade de matéria orgânica biodegradável para conversão em biogás, o que está de acordo com a ausência de produção de biogás e metano observada nos dados de PBM. Em sistemas de digestão anaeróbia, substratos com elevada fração inorgânica tendem a apresentar menor rendimento energético, uma vez que essa parcela não é degradada biologicamente e pode ainda contribuir para acúmulo de material no interior dos reatores, reduzindo o volume útil e aumentando a necessidade de manejo operacional (HOLLIGER et al., 2016; VDI, 2016).

Tabela 1 – Caracterização físico-química das amostras

Identificação	ST (g/kg)	SV[1] (g/kg)	SF[1] (g/kg)	ST (%)	SV[1] (%)	SF[1] (%)
Sedimento	464,0	175,2	824,8	46,40	17,52	82,48
Lodo espessado	45,6	788,5	211,5	4,56	78,85	21,15
Codigestão (10% sedimento e 90% lodo espessado)	87,6	466,6	533,4	8,76	46,66	53,34

[1] Resultados expressos em base seca.
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2 – Potencial de produção de biogás (dados PBM)

Identificação	Biogás (m^3. tonelada de substrato)	Metano (m^3. tonelada de substrato)
Sedimento	-	-
Lodo espessado	7	4
Codigestão (10% sedimento e 90% lodo espessado)	6	5

Fonte: Elaboração própria.

A amostra composta pela codigestão de 10% de sedimento e 90% de lodo espessado apresentou teor de sólidos totais de 8,76% e produção específica de 6 m^3 de biogás por tonelada de substrato. Embora o resultado de metano tenha sido de 5 m^3 por tonelada de substrato, superior ao obtido para o lodo espessado isolado, a mistura apresentou teor de sólidos fixos de 53,34% em base seca. Esse valor indica presença expressiva de material inorgânico, o que pode representar uma limitação operacional para sistemas de biodigestão, especialmente em razão do risco de deposição de sólidos no fundo do biodigestor, redução do volume útil, necessidade de limpezas periódicas e possível comprometimento da estabilidade hidráulica do processo.

Dessa forma, apesar do resultado favorável da codigestão quanto à produção de metano, a elevada presença de sólidos fixos reduziu sua atratividade para continuidade da análise. A mesma limitação foi observada de maneira ainda mais acentuada na amostra de sedimento, na qual a fração fixa foi predominante. Assim, as amostras de sedimento e codigestão não foram consideradas alternativas prioritárias no presente estudo, sendo o lodo espessado selecionado como substrato principal para avaliação da rota de aproveitamento energético.

A amostra de lodo espessado apresentou o menor teor de sólidos totais entre as condições avaliadas, com 4,56%. Apesar da baixa concentração total de sólidos, observou-se elevada fração de sólidos voláteis, correspondente a 78,85% em base seca, indicando maior proporção de matéria orgânica potencialmente biodegradável. Esse comportamento refletiu-se no ensaio de PBM, no qual o lodo espessado apresentou a maior produção específica de biogás entre as amostras analisadas, com 7 m^3 de biogás por tonelada de substrato e 4 m^3 de metano por tonelada de substrato.

Para fins comparativos, o rendimento de metano obtido para o lodo espessado correspondeu a aproximadamente 0,111 m^3 CH_4/kg SV, considerando o teor de sólidos totais de 4,56% e a fração de sólidos voláteis de 78,85%.

Esse valor ficou abaixo da faixa frequentemente reportada para lodos de esgoto, que pode variar aproximadamente entre 0,18 e 0,30 m³ CH_4/kg SV, a depender do tipo de lodo, da composição orgânica, do grau de estabilização prévia e das condições operacionais do processo (KLEYBÖCKER; SCHNEIDER, 2020). Essa diferença pode estar relacionada à origem industrial do resíduo avaliado, que tende a apresentar maior variabilidade de composição e possível presença de componentes de menor biodegradabilidade quando comparado a lodos de origem predominantemente sanitária.
Ainda assim, a relação entre os volumes de biogás e metano obtidos para o lodo espessado indica uma composição aproximada de 57% de metano no biogás produzido. Esse valor encontra-se dentro da faixa típica indicada para biogás gerado por digestão anaeróbia, cujo teor de metano geralmente varia entre 45% e 75% em volume, dependendo do tipo de substrato e das condições de produção (IEA, 2020). Esse aspecto é relevante, pois o teor de metano está diretamente associado ao poder energético do biogás e, consequentemente, ao seu potencial de aproveitamento em sistemas de geração de energia elétrica ou, após etapas de purificação, em rotas de produção de biometano.

Potencial diário de produção de biogás
A partir dos resultados obtidos nas análises laboratoriais de Potencial Bioquímico de Metano (PBM), foi possível estimar o potencial de produção de biogás do lodo espessado gerado na Estação de Tratamento de Efluentes da Cetrel. De acordo com os dados operacionais disponibilizados, a geração diária de lodo espessado corresponde a aproximadamente 500 m³/dia. Considerando, para fins de estimativa preliminar, a equivalência entre volume e massa do substrato úmido, adotou-se o valor de 500 toneladas de lodo espessado por dia.
O ensaio laboratorial indicou uma produção específica de 7 m³ de biogás por tonelada de substrato para o lodo espessado. Dessa forma, a produção teórica diária de biogás foi calculada pela multiplicação entre a quantidade diária de substrato disponível e o rendimento específico obtido em laboratório. Com base nessa relação, obteve-se um potencial estimado de 3.500 Nm³/dia de biogás, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Potencial de produção de biogás

Condições	Potencial de produção de Biogás (Nm³/dia)
Dados laboratoriais	3.500

Fonte: Elaboração própria.

Embora esse resultado indique um potencial relevante de produção, é necessário considerar que os dados laboratoriais são obtidos sob condições controladas e otimizadas de ensaio, as quais nem sempre são reproduzidas integralmente em sistemas operacionais em escala real. Em laboratório, variáveis como temperatura, homogeneização, tempo de retenção, proporção substrato/inóculo e ausência de perturbações operacionais tendem a ser mais controladas do que em uma planta de biodigestão em operação contínua.
Por esse motivo, foi adotado um fator tecnológico de 80%, associado à eficiência esperada do biodigestor e às perdas inerentes à operação em escala real. Esse fator representa uma aproximação entre o potencial máximo obtido em laboratório e a produção média que poderia ser alcançada em condições operacionais reais. A adoção desse fator é especialmente relevante em sistemas de biodigestão anaeróbia, nos quais o desempenho depende da estabilidade do processo biológico, da eficiência do reator, da qualidade do substrato, da agitação, do controle operacional e da manutenção das condições adequadas para a atividade microbiana.
Considerando o potencial laboratorial de 3.500 Nm³/dia e a aplicação do fator tecnológico de 80%, a produção estimada de biogás em escala operacional foi reduzida para 2.800 Nm³/dia, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Potencial de produção de biogás considerando fator tecnológico

Condições	Potencial de produção de Biogás (Nm³/dia)
Fator tecnológico de 80%	2.800

Fonte: Elaboração própria.

Em estudo aplicado a sistemas de tratamento em Ribeirão Preto, Pontes *et al.* (2026) estimaram produção de metano de 1.990 m³/dia para sistema de lodos ativados e até 3.235,6 m³/dia para sistema UASB, valores que, considerando uma composição média de 60% de metano no biogás, corresponderiam aproximadamente a 3.317 e 5.393 Nm³/dia de biogás, respectivamente. Em escala internacional, Francini *et al.* (2020), ao avaliarem tecnologias de digestão anaeróbia para mistura contendo lodo de esgoto e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, reportaram vazões diárias de biogás da ordem de 7.204 a 9.116 Nm³/dia.

Ao comparar os estudos citados e o potencial estimado para o lodo espessado da Cetrel, de 3.500 Nm³/dia em condição laboratorial e 2.800 Nm³/dia após a aplicação do fator tecnológico de 80%, nota-se um potencial de produção inferior. Essa diferença pode estar associada à natureza industrial do lodo da Cetrel, que tende a apresentar composição mais variável em relação aos lodos de origem predominantemente sanitária, além da possível presença de frações menos biodegradáveis e de compostos que podem limitar a conversão anaeróbia. As características físico-químicas do substrato também ajudam a explicar esse comportamento, especialmente no que se refere ao teor de sólidos fixos e à composição da matéria orgânica disponível para degradação.

Viabilidade técnica

A partir dos resultados verifica-se que o lodo espessado da Cetrel apresentou potencial de produção de biogás de 188 LN.kgSV^{-1}. Esse resultado representa um indicativo preliminar da capacidade do substrato em gerar biogás a partir da fração orgânica disponível, sendo utilizado como parâmetro de comparação para avaliação da viabilidade técnica da rota de biodigestão anaeróbia.

Quando comparado aos resultados médios de análises de lodos industriais, observa-se que o desempenho do lodo espessado da Cetrel foi inferior à média de referência. Segundo os dados comparativos conhecidos, lodos industriais apresentam, em média, potencial de produção de biogás de aproximadamente 288 LN.kgSV^{-1}, valor cerca de 65% superior ao obtido para a amostra analisada. Essa diferença indica que, embora o lodo da Cetrel apresente potencial de geração de biogás, seu rendimento específico é mais baixo quando comparado a outros lodos industriais previamente avaliados.

Esse comportamento pode estar relacionado à origem do material, às características do processo industrial que gera o efluente e às etapas de tratamento às quais o lodo foi submetido antes da análise. Em sistemas de tratamento biológico por lodos ativados, o tempo de aeração exerce influência direta sobre a biodegradabilidade da matéria orgânica remanescente. No caso da Cetrel, o elevado tempo de aeração contribui para a estabilização prévia do lodo, reduzindo a fração de matéria orgânica mais facilmente degradável e, consequentemente, diminuindo o potencial de conversão em biogás.

Além disso, o tempo de processamento observado indica que o lodo apresenta idade avançada, cerca de 30 dias. Essa condição pode limitar a produção de biogás, pois parte relevante da matéria orgânica disponível já foi consumida ou estabilizada durante o próprio processo aeróbio de tratamento. Dessa forma, o menor rendimento específico obtido no ensaio não necessariamente inviabiliza a rota de biodigestão para fins de tratamento e valorização do lodo, mas evidencia que o substrato apresenta menor disponibilidade de matéria orgânica prontamente biodegradável em comparação a outros lodos industriais. Como consequência, a baixa produção estimada de biogás reduz a atratividade de rotas energéticas de maior escala, especialmente a purificação para obtenção de biometano visando incremento na rede da concessionária de gás, uma vez que o volume disponível tende a ser insuficiente para justificar os investimentos em tratamento, compressão, controle de qualidade e infraestrutura de conexão à rede.

Quanto à conversão do biogás em energia elétrica, as estimativas indicam uma contribuição limitada em relação à demanda energética total da Cetrel. A geração prevista de 149 MWh/mês corresponde a apenas 6,4% do consumo mensal atual da empresa, evidenciando que a rota elétrica, quando analisada isoladamente, não seria suficiente para reduzir de forma expressiva a dependência de energia adquirida no mercado. Assim, o aproveitamento energético do biogás deve ser compreendido como uma alternativa complementar de autoconsumo, voltada à valorização energética do lodo e à redução parcial do consumo externo, e não como uma solução capaz de atender de maneira significativa à demanda elétrica global da unidade.

Esse resultado está diretamente relacionado ao potencial de produção de biogás do lodo espessado, que, embora contínuo, apresenta rendimento específico relativamente baixo quando comparado a outros substratos orgânicos com maior biodegradabilidade. Assim, mesmo considerando a disponibilidade diária de lodo e a aplicação de um sistema de conversão energética, a quantidade de energia elétrica gerada permanece restrita. Isso reforça que a viabilidade da rota elétrica não deve ser avaliada apenas pela substituição de energia da concessionária, mas também pelos benefícios associados à valorização do resíduo, à redução de passivos ambientais e à possibilidade de integração do sistema de biodigestão à operação da ETE.

Do ponto de vista operacional, a energia gerada poderia ser direcionada ao autoconsumo da própria planta de biogás ou de outras unidades consumidoras da Cetrel enquadradas na mesma titularidade e modalidade de contratação. Entretanto, por representar uma fração reduzida do consumo total, os ganhos energéticos tenderiam a ser modestos.

Portanto, a análise indica que a rota de geração de energia elétrica possui viabilidade técnica como alternativa de aproveitamento do biogás, mas apresenta baixa representatividade energética em relação ao consumo total da Cetrel e possível limitação econômica diante da competitividade dos preços praticados no Mercado Livre de Energia. Assim, a continuidade da avaliação deve considerar não apenas a energia produzida e sua equivalência no consumo interno, mas também o custo evitado efetivo, o investimento requerido, os custos operacionais da

planta, a vida útil dos equipamentos e os benefícios ambientais e operacionais decorrentes da biodigestão, como o tratamento do lodo, a redução da carga orgânica, a estabilização do resíduo e a possibilidade de aproveitamento do digestato.

CONCLUSÃO

O estudo confirmou a viabilidade técnica da biodigestão anaeróbia como rota de tratamento, mas com limitações importantes em sua escala energética. Entre as matrizes testadas, o lodo espessado isolado é a única opção viável para o reator, pois o sedimento puro e as misturas de codigestão trazem uma carga mineral inorgânica muito alta (>53% de sólidos fixos), gerando riscos severos de assoreamento e paradas de manutenção no biodigestor.
Com base no potencial de bancada de 7Nm³/t e descontando as perdas de eficiência em escala real pelo fator tecnológico de 80%, projeta-se uma produção firme de 2.800Nm³/dia de biogás. Embora esse volume valide o processo biológico, a conversão em energia elétrica entrega apenas 149 MWh/mês (6,4% do consumo do site), mostrando baixa representatividade diante do balanço energético da companhia. Portanto, o projeto não deve ser defendido pelo ganho elétrico isolado, mas sim pelos benefícios ambientais agregados: estabilização acelerada do resíduo, redução de passivos e diminuição do custo de transporte e disposição final do lodo.
Embora restrita para o cenário atual da Cetrel, a biodigestão anaeróbia continua sendo uma alternativa promissora para plantas com configurações distintas. ETEs que operam com lodos mais jovens, menor tempo de estabilização aeróbia ou que permitam a codigestão com resíduos de alto potencial calórico tendem a alcançar rendimentos de metano significativamente maiores. Portanto, a viabilidade desta tecnologia deve ser projetada caso a caso, condicionada à qualidade da biomassa local, à constância do suprimento e ao alinhamento com a infraestrutura energética disponível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS — ANP. Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro de 2022. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto. Diário Oficial da União, Brasília, 2022.
2. BAHIAGÁS. Portal de Suprimento de Gás: Chamada Pública Biometano. Salvador: Companhia de Gás da Bahia, 2024.
3. CHEN, et al. Comprehensive evaluation of sewage sludge anaerobic digestion process. Environmental Science and Pollution Research, 2023.
4. CIBIOGÁS. Panorama do Biogás no Brasil 2022. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2023.
5. FRANCINI, Giovanni; LASAGNI, Marzio; LOMBARDI, Lidia. Comparison of anaerobic digestion technologies: an Italian case study. Detritus, v. 9, p. 94–104, 2020. DOI: 10.31025/2611-4135/2020.13921.
6. HOLLIGER, C. et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. Water Science and Technology, v. 74, n. 11, p. 2515–2522, 2016.
7. IEA — INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for organic growth. Paris: IEA, 2020.
8. IEA BIOENERGY. Task 37: Energy from Biogas. IEA Bioenergy, 2025.
9. KLEYBÖCKER, A.; SCHNEIDER, J. Factsheet – Biogas production via anaerobic digestion of sewage sludge and co-substrates. Version v3. [S. l.]: Water Europe, 21 dez. 2020.
10. PONTES, Aylla Joani M. de O.; NASCIMENTO, Yone Domingues dos Santos; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; BARROS, Regina Mambeli. Energy Recovery from Sewage Sludge in Ribeirão Preto: A Comparative Analysis Between UASB and Activated Sludge Systems. AgriEngineering, v. 8, n. 4, artigo 137, 2026. DOI: 10.3390/agriengineering8040137.
11. VDI — VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI 4630: Fermentation of organic materials: characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Düsseldorf: VDI, 2016.