USO DO ATP COMO FERRAMENTA OPERACIONAL PARA DIAGNÓSTICO DA BIOMASSA EM SISTEMAS DE LODOS ATIVADOS

Raphaela Rangel da Silva Araujo [(1)]
Bióloga pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), Mestre em Biociências Nucleares (Ecologia) pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), Mestre em Pesquisa Biomédica (Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias) pelo Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IBCCF/UFRJ), Bióloga do Laboratório Central da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).
Sirlei Geraldo Azevedo [(2)]
Engenheiro Químico pela Universidade Federal de Minas Gerias (UFMG), Especialista em Engenharia Sanitária e Meio Ambiente (UFMG), Pós-graduado em Engenharia da Qualidade (PUC-MG), Engenheiro Químico pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).
Endereço[(1)]: BR 356, km 04, s/n – Belvedere - Belo Horizonte – Minas Gerais - CEP 30320-765 – Brasil – Tel: +55 (31) 3250-2382 – e-mail: raphaela.araujo@copasa.com.br

RESUMO

O monitoramento convencional de sistemas de lodos ativados, baseado em parâmetros físico-químicos apresenta limitações operacionais devido ao intervalo entre coleta e resultado e à incapacidade de diferenciar biomassa ativa de material inerte. Este estudo avaliou a aplicação da determinação de adenosina trifosfato (ATP) por bioluminescência como ferramenta de diagnóstico rápido da condição fisiológica do lodo em três Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs): Arrudas, Betim e Ibirité. Foram analisados os parâmetros ATP celular (cATP), Índice de Estresse da Biomassa (BSI) e Razão de Biomassa Ativa (ABR), correlacionados com Sólidos Suspensos Voláteis (SSV/AVSS) e indicadores físico-químicos convencionais. Os resultados demonstraram que o cATP forneceu uma estimativa direta e sensível da biomassa metabolicamente ativa, enquanto o BSI permitiu a identificação precoce de eventos de estresse e toxicidade, podendo caracterizar influência de recebimentos de efluentes não domésticos bem como lodos mistos na etapa do tratamento. O ABR evidenciou limitações do uso isolado de sólidos como indicador de eficiência microbiológica, destacando situações de acúmulo de biomassa inativa. Conclui-se que a metodologia de ATP é uma ferramenta robusta e complementar ao monitoramento convencional, capaz de fornecer diagnósticos operacionais imediatos, antecipar riscos biológicos e subsidiar decisões para maior estabilidade e eficiência dos sistemas de tratamento de esgoto.

PALAVRAS-CHAVE: ATP, lodos ativados, controle operacional.

INTRODUÇÃO

O monitoramento convencional de Estações de Tratamento de Efluentes, fundamentado em parâmetros físico-químicos como DQO, DBO e SST, além da análise microscópica, apresenta um gap temporal crítico entre a coleta e o resultado, o que limita a capacidade de resposta operacional. Em contrapartida, a tecnologia de bioluminescência de ATP surge como uma ferramenta de diagnóstico microbiológico em tempo real, quantificando a biomassa ativa total através da reação enzimática com a luciferase em menos de dez minutos. Esta metodologia permite a distinção entre o ATP celular (cATP), que representa a fração efetivamente viável da microbiota, e o Índice de Estresse de Biomassa (BSI), parâmetro estequiométrico que identifica precocemente estados de toxicidade ou sobrecarga orgânica no lodo.

A integração desta métrica ao controle de processo viabiliza intervenções preventivas de alta precisão, permitindo a detecção imediata de descartes industriais inibitórios antes que ocorra o colapso do sistema biológico. Operacionalmente, a análise de cATP refina o gerenciamento do descarte de lodo ao substituir a estimativa indireta por Sólidos Suspensos Totais (SST) — que frequentemente superestimam a biomassa devido à presença de material inerte — por dados de vitalidade celular real. Adicionalmente, a ferramenta auxilia na mitigação do bulking filamentoso por meio do diagnóstico precoce de desequilíbrios nutricionais e promove a eficiência energética ao otimizar a demanda de aeração conforme a atividade metabólica instalada.

Sob a ótica da viabilidade econômica, embora o custo unitário do ensaio seja superior aos métodos gravimétricos, o retorno sobre o investimento é consolidado em curto prazo através da prevenção de paradas biológicas conferindo maior segurança operacional e estabilidade ao processo frente às oscilações de carga afluente.

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar a aplicação da determinação de adenosina trifosfato (ATP) por bioluminescência como ferramenta operacional de diagnóstico rápido da condição fisiológica da biomassa em sistemas de lodos ativados, em comparação com os indicadores convencionais de monitoramento. Busca-se analisar a capacidade do ATP celular (cATP) em representar diretamente a biomassa microbiológica ativa, bem como avaliar o Índice de Estresse da Biomassa (BSI) como indicador precoce de estresse microbiológico e instabilidade operacional.

Adicionalmente, o estudo objetiva avaliar a Razão de Biomassa Ativa (ABR) como métrica da eficiência microbiológica do lodo, comparando-a com os parâmetros baseados em sólidos suspensos voláteis (AVSS), além de comparar o comportamento biológico dos sistemas de lodos ativados das ETEs Arrudas, Betim e Ibirité, considerando diferentes perfis de afluente. Por fim, busca-se demonstrar o potencial da metodologia de ATP como ferramenta de apoio à tomada de decisão operacional e à prevenção de falhas biológicas em estações de tratamento de esgoto.

METODOLOGIA

A metodologia de análise de ATP (Adenosina Trifosfato) com o equipamento LuminUltra baseia-se na técnica de bioluminescência, que quantifica a biomassa ativa total em amostras de água ou superfícies em poucos minutos. Diferente dos métodos tradicionais que dependem de cultura de microrganismos, esta metodologia mede a luz emitida pela reação entre o ATP da amostra e a enzima luciferase.

Para realizar as análises, o processo inicia-se com a etapa de Calibração (UltraCheck), que deve ser feita diariamente para converter os valores de RLU (Unidades Relativas de Luz) em concentrações reais de ATP. Este procedimento consiste em misturar o padrão de ATP, conhecido como UltraCheck, com o reagente enzimático Luminase para realizar a medição no luminômetro e estabelecer o padrão de referência.

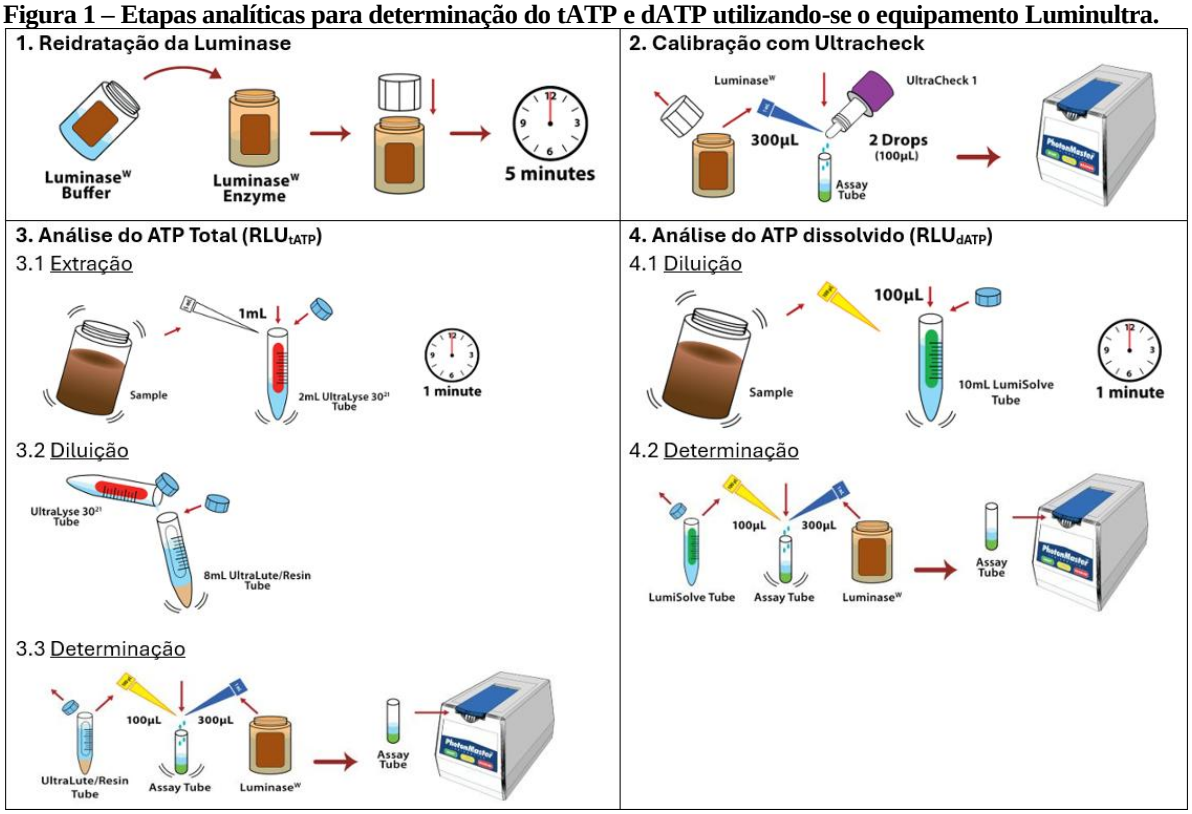
Na sequência, procede-se com a Extração de tATP (Amostra Bruta), onde uma pequena alíquota da amostra de lodo, geralmente de 100 µL, é adicionada diretamente ao reagente de lise UltraLyse para romper instantaneamente todas as células. O extrato resultante é misturado ao tampão de diluição UltraLute para estabilizar o ATP e neutralizar possíveis inibidores, finalizando com a mistura de uma alíquota do diluído com a enzima Luminase para que o equipamento realize a leitura do valor total de ATP.

A Medição de dATP (ATP Dissolvido) é realizada adicionando-se uma gota da amostra original de efluente diretamente ao tampão de diluição UltraLute, pulando propositalmente a etapa de lise. Como as membranas celulares não são rompidas nesse estágio, apenas o ATP que já se encontra livre no líquido reage com a Luminase durante a leitura, permitindo quantificar apenas a fração dissolvida. Todas as etapas analíticas estão ilustradas na Figura 1.

Por fim, ocorre o Cálculo e Análise de Biomassa, fase em que o software específico que subtrai o valor de dATP do tATP para obter o cATP (ATP celular). A separação analítica entre tATP e dATP permite diferenciar biomassa metabolicamente ativa de ATP proveniente de lise celular ou material biológico inativo, fornecendo uma leitura mais precisa da condição funcional do lodo ativado em comparação aos parâmetros convencionais baseados apenas em sólidos.

A partir desses dados, o sistema calcula o BSI (Biomass Stress Index), que representa a porcentagem de ATP dissolvido em relação ao total. Outra métrica importante para análise da saúde do lodo é a Razão de Biomassa Ativa (ABR). Esse parâmetro relaciona o ATP com os Sólidos Suspensos Totais (SST) para indicar quanto do lodo é realmente biológico e quanto é matéria inerte, além do AVSS que é baseado no cATP e indica a parte sólida efetivamente ativa.

Figura 1 – Etapas analíticas para determinação do tATP e dATP utilizando-se o equipamento Luminultra.



Fonte: Test Kit Instructions QuenchGone21TM Wastewater (QG21W). Acesso em 16/04/2026.

A Tabela I abaixo indica as etapas analíticas e todas os parâmetros / métricas indicados pelo equipamento. Posteriormente analisamos cada métrica, separadamente.

Tabela I – Métricas analisadas: significado e interpretação técnica.

Etapa analítica	O que é realizado	O que mede	Interpretação técnica
tATP– ATP Total	Lise completa da amostra + reação enzimática	ATP intracelular + ATP dissolvido	Quantidade total de ATP presente no sistema (biomassa viva + células lisadas)
dATP– ATP Dissolvido	Amostra sem lise celular	ATP livre no meio líquido	Indicador de lise celular, estresse ou toxicidade
cATP– ATP Celular	Subtração: tATP–dATP	ATP intracelular	Quantificação direta da biomassa ativa viável
BSI (%)	dATP /tATP× 100	Grau relativo de estresse da biomassa	Valores elevados indicam estresse microbiológico
ABR (%)	cATP convertido / SST	Fração ativa da biomassa	Avalia eficiência microbiológica do lodo
AVSS	cATP* 0,5	Sólidos Suspensos Voláteis Ativos	Indicador indireto da biomassa biologicamente ativa presente no lodo

A. MÉTRICAS ANALISADAS

cATP (ATP celular (ng/mL)
O cATP representa a fração de ATP associada às células viáveis, sendo calculado pela diferença entre ATP Total e ATP Livre. É um indicador direto da biomassa microbiológica ativa, refletindo: quantidade de microrganismos vivos; potencial metabólico do lodo; e capacidade de degradação da matéria orgânica. Valores mais elevados de cATP indicam maior atividade biológica do sistema.

A Tabela II indica a concentração de Biomassa Ativa (cATP), correlacionando esse parâmetro com a condição da biomassa assim como ações recomendadas para cada faixa de concentração.

Tabela II - Concentração de Biomassa Ativa (cATP).

Faixa de cATP (ng/mL)	Condição da Biomassa	Ação recomendada
> 2.500	Alta Atividade	Sistema Robusto. Verificar se há excesso de lodo (Necessidade de descarte).
500 - 2.500	Operação Normal	Faixa ideal para a maioria das ETEs urbanas. Manter parâmetros atuais.
100 - 500	Baixa atividade	Possível sobrecarga orgânica ou início de inibição. Monitorar DQO de entrada.
< 100	Crítica / Morte	Risco iminente de perda de eficiência. Investigar toxicidade severa imediatamente.

BSI – Biomass Stress Index (%)
O BSI expressa a proporção de ATP Livre em relação ao ATP Total e indica o nível de estresse ou lise celular da biomassa. BSI baixo: biomassa saudável, células íntegras; BSI elevado: maior liberação de ATP intracelular, sugerindo estresse operacional, toxicidade, choques hidráulicos ou envelhecimento do lodo.

A Tabela III indica o índice de estresse da Biomassa (BSI), correlacionando o nível de estresse a ações recomendadas para cada faixa.

Tabela III – Índice de estresse da biomassa (BSI).

Valor de BSI (%)	Nível de estresse	Interpretação técnica
< 25 %	Baixo	Biomassa saudável e adaptada ao efluente.
25 % – 50 %	Moderado	Início do estresse metabólico. Checar pH, OD ou presença de surfactantes.
50% – 75%	Alto	Toxicidade aguda ou choque de carga. Requer intervenção (ex.: recirculação)
> 75 %	Severo	Lise celular em massa. Risco de perda total do lodo biológico.

ABR – Active Biomass Ratio (%)
O ABR indica a fração ativa da biomassa em relação aos sólidos suspensos totais (SST). Esse índice permite avaliar a eficiência microbiológica do lodo e a proporção de microrganismos realmente ativos no processo. Valores mais altos de ABR refletem maior eficiência biológica do sistema.

A Tabela IV abaixo indica os percentuais de ABR, a qualidade indicativa do lodo, assim como a interpretação técnica.

Tabela IV – Razão de Biomassa Ativa (ABR).

Razão ABR (%)	Qualidade do Lodo	Diagnóstico
>30 %	Excelente	Lodo jovem, altamente ativo e eficiente.
10 % –30 %	Bom / Médio	Faixa comum em sistemas estabilizados.
<10 %	Pobre	Excesso de sólidos inertes, lodo muito velho ou mineralizado.

B. ESTUDO AMOSTRAL

Para a realização do estudo, foram coletadas amostras provenientes dos reatores de lodos ativados das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) Arrudas, Betim e Ibirité. Além da determinação das concentrações de ATP (adenosina trifosfato), o monitoramento abrangeu a caracterização físico-química e biológica por meio dos parâmetros: Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Suspensos Voláteis (SSV), Demanda Química de Oxigênio (DQO), condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico (pH) e análise qualitativa da comunidade zooplanctônica. Todas as métricas descritas acima (BSI e ABR) também foram calculadas.

As análises foram conduzidas no Laboratório Central da ETE Arrudas (LCAR), compreendendo o período de 28 de janeiro de 2026 a 20 de março de 2026. Os resultados de todos os parâmetros analisados encontram-se no Anexo I, ao final deste relatório.

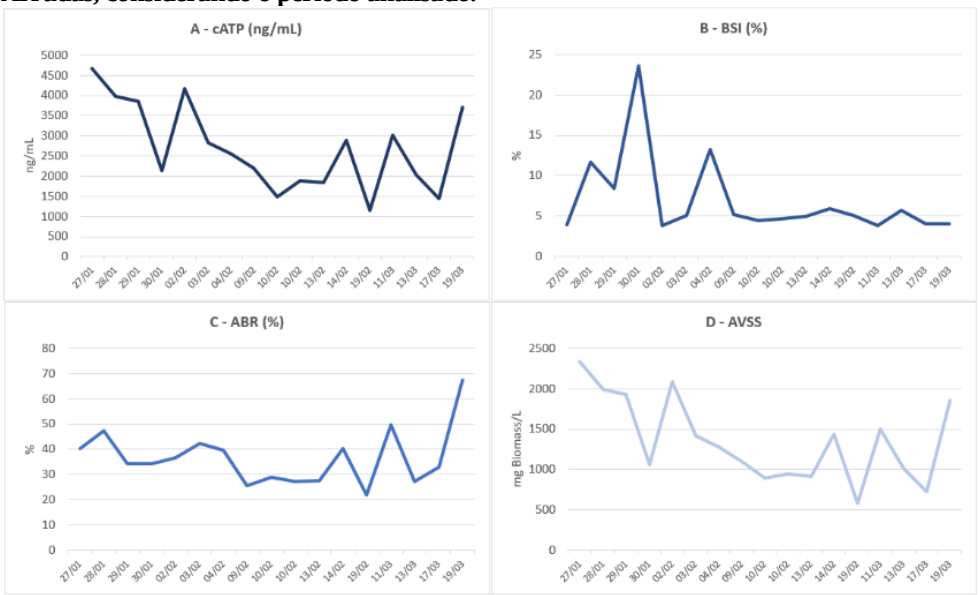
ANÁLISES E RESULTADOS

A. MÉTRICAS

ETE ARRUDAS

A Figura 2 abaixo indica os valores para os parâmetros / métricas fornecidos pelo Luminômetro, assim como a concentração de Sólidos Suspensos Totais (mg/L), por coleta/amostra.

Figura 2 - Gráfico para os parâmetros cATP, BSI (%), ABR (%) e AVSS para o lodo do Reator da ETE Arrudas, considerando o período analisado.



Embora as métricas tenham permanecido dentro dos limites operacionais, a análise do comportamento dos dados revela observações importantes, detalhadas a seguir:

Comportamento do cATP
Os valores de cATP variaram de aproximadamente 1.150 a 4.700 ng/mL ao longo do período analisado. Esse intervalo indica: presença consistente de biomassa ativa; oscilações naturais associadas a variações de carga orgânica, idade do lodo e condições operacionais. Em diversos momentos, o cATP apresentou valores elevados, evidenciando boa atividade microbiológica do lodo ativado.

Comportamento do BSI
O BSI manteve-se predominantemente baixo, em geral entre 4% e 13%, com poucos registros pontuais acima desse intervalo. Esse comportamento indica: baixa liberação de ATP Livre; biomassa pouco estressada e estruturalmente estável; condições operacionais adequadas à manutenção da atividade microbiana.

Comportamento do ABR
Os valores de ABR oscilaram aproximadamente entre 22% e 67%. Registros mais baixos sugerem momentos com maior fração inativa do lodo; Valores mais elevados indicam períodos com alta proporção de biomassa efetivamente ativa, favorecendo a eficiência do tratamento. De forma geral, o ABR demonstra capacidade biológica adequada, com variações esperadas ao longo do tempo.

Comportamento do AVSS
Os valores de AVSS variaram aproximadamente entre 576 e 2.338 mg/L ao longo do período analisado. Esse comportamento indica: presença significativa de sólidos suspensos totais, compatíveis com elevada concentração de material biológico no sistema; variações associadas à dinâmica de crescimento microbiológico, descarte de lodo e oscilações de carga orgânica afluente.

Em diversos momentos, os valores de AVSS permaneceram elevados mesmo quando observadas reduções pontuais no cATP, evidenciando a presença de fração considerável de biomassa inativa ou material particulado orgânico não viável. Esse descolamento reforça a limitação do AVSS como indicador isolado de atividade microbiológica, destacando a importância de sua análise integrada com cATP e ABR para correta avaliação da qualidade e eficiência do lodo.

A Tabela V abaixo apresenta um Quadro de Diagnóstico baseado nos eventos críticos identificados na série amostral, cruzando o comportamento dos indicadores com a interpretação técnica.

Tabela V – Diagnóstico baseado nos resultados das métricas analisadas, para a ETE Arrudas.

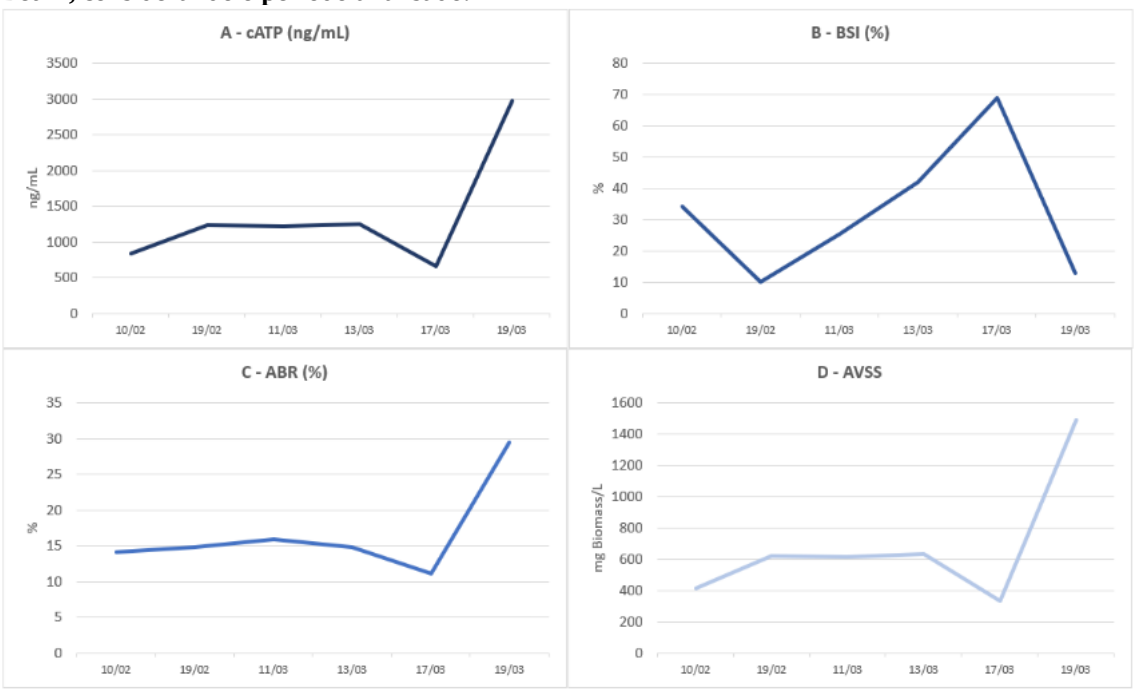
Período	Comportamento dos Indicadores (cATP · BSI · ABR · AVSS)	Diagnóstico Técnico Provável	Ação Recomendada
27/01 a 29/01	**cATP alto + BSI baixo + ABR elevado + AVSS elevado**	Crescimento excessivo de biomassa ativa, associado a elevada disponibilidade de substrato orgânico.	Avaliar carga orgânica de entrada e verificar necessidade de ajuste na taxa de descarte de lodo.
30/01	**cATP em queda + BSI em elevação (~24%) + AVSS ainda elevado**	**Toxicidade aguda:** estresse metabólico significativo com manutenção de sólidos voláteis, indicando lise celular sem redução imediata da massa de lodo.	Identificar entrada de efluente tóxico, intensificar monitoramento e acompanhar recuperação da biomassa.
09/02 a 10/02	**ABR baixo (26–29%) + AVSS elevado**	Redução da eficiência microbiológica com acúmulo de biomassa inativa ou envelhecida.	Verificar idade do lodo, ajustar descarte e revisar condições de aeração.
10/02 a 19/02	**cATP e ABR baixos + AVSS ainda significativo**	**Falta de alimento / lodo velho:** presença de sólidos voláteis predominantemente inativos.	Revisar carga orgânica aplicada e estratégia de descarte de lodo.
19/03	**ABR elevado (67%) + BSI em elevação (~20%) + AVSS elevado**	Instabilidade com biomassa altamente ativa, porém sob	Monitorar sólidos suspensos, taxa de recirculação e estabilidade do processo.

		estresse, com risco de crescimento descontrolado.	

ETE BETIM

A Figura 3 abaixo indica os valores para os parâmetros / métricas fornecidos pelo Luminômetro, assim como a concentração de Sólidos Suspensos Totais (mg/L), por coleta/amostra.

Figura 3 – Gráfico para os parâmetros cATP, BSI (%), ABR (%) e AVSS para o lodo do Reator da ETE Betim, considerando o período analisado.



Embora as métricas tenham permanecido dentro dos limites operacionais, a análise do comportamento dos dados revela observações importantes, detalhadas a seguir:

Comportamento do cATP

Na ETE Betim, o cATP apresentou variação entre cerca de 660 e 2.980 ng/mL. Esses valores indicam: presença contínua de biomassa ativa; períodos com redução da atividade celular, possivelmente associados a maior ATP Livre ou alterações no regime de carga. A biomassa manteve-se funcional, ainda que com flutuações na atividade metabólica.

Comportamento do BSI

O BSI apresentou ampla variação, com valores aproximadamente entre 10% e 69%. Registros mais elevados de BSI indicam eventos significativos de estresse celular, com maior liberação de ATP Livre. Esses episódios sugerem condições menos favoráveis à integridade da biomassa em determinados períodos.

Comportamento do ABR

Os valores de ABR situaram-se majoritariamente entre 11% e 29%. Esse intervalo indica: Fração ativa da biomassa relativamente limitada em alguns momentos; Possível predominância de sólidos biológicos com menor atividade metabólica. Ainda assim o sistema apresenta atividade biológica suficiente para manter o processo

Comportamento do AVSS

Na ETE Betim, os valores de AVSS situaram-se aproximadamente entre 418 e 632 mg/L no período avaliado. Esse intervalo indica: concentração relativamente baixa de sólidos suspensos totais em comparação às demais unidades; possível predominância de biomassa mineralizada ou envelhecida em determinados momentos do monitoramento.

A manutenção de AVSS moderado, associada a valores consistentemente baixos de ABR, sugere que parte significativa do lodo presente no sistema não estava metabolicamente ativa.
Esse comportamento indica eficiência microbiológica limitada, mesmo quando o cATP apresentou sinais de recuperação, reforçando a necessidade de ajustes na taxa de descarte de lodo para renovação da biomassa ativa.

A Tabela VI abaixo apresenta um Quadro de Diagnóstico Rápido baseado nos eventos críticos identificados na série amostral, cruzando o comportamento dos indicadores com a interpretação técnica.

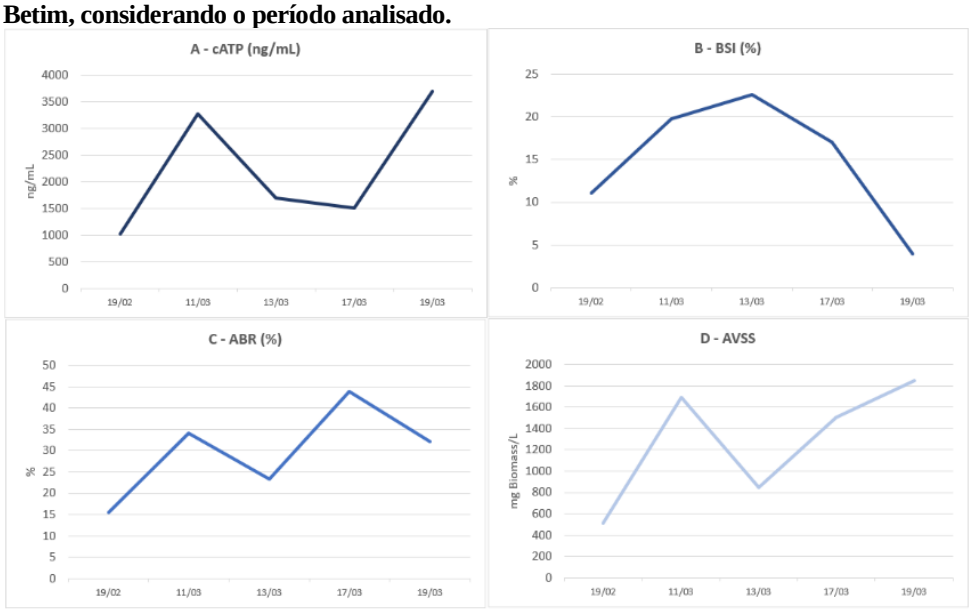
Tabela VI – Diagnóstico baseado nos resultados das métricas analisadas, para a ETE Betim.

Período	Comportamento dos Indicadores (cATP · BSI · ABR · AVSS)	Diagnóstico Técnico Provável	Ação Recomendada
10/02	cATP moderado + BSI elevado (~34%) + ABR baixo (~14%) + AVSS baixo (~418 mg/L)	**Estresse metabólico significativo:** baixa fração ativa da biomassa e estoque reduzido de sólidos biológicos viáveis.	Investigar fontes de toxicidade, checar pH, OD e cargas industriais; monitorar recuperação da biomassa.
19/02	cATP em recuperação + BSI baixo (~10%) + ABR ainda baixo + AVSS moderado (~620 mg/L)	Biomassa em fase de recuperação fisiológica, porém com eficiência microbiológica limitada devido à elevada fração inerte.	Avaliar ajuste na taxa de descarte para renovação da biomassa ativa e manter acompanhamento contínuo.
11/03 a 13/03	cATP elevado + BSI alto (25–42%) + ABR persistentemente baixo + AVSS moderado (~613–632 mg/L)	**Instabilidade operacional recorrente:** biomassa responde metabolicamente, porém sob forte estresse e com baixo rendimento biológico.	Intensificar controle da carga afluente, correlacionar com DQO e condutividade e adotar medidas preventivas.

ETE IBIRITÉ

A Figura 4 abaixo indica os valores para os parâmetros / métricas fornecidos pelo Luminômetro, assim como a concentração de Sólidos Suspensos Totais (mg/L), por coleta/amostra.

Figura 4 – Gráfico para os parâmetros cATP, BSI (%), ABR (%) e AVSS para o lodo do Reator da ETE Betim, considerando o período analisado.



Embora as métricas tenham permanecido dentro dos limites operacionais, a análise do comportamento dos dados revela observações importantes, detalhadas a seguir:

Comportamento do cATP
Na ETE Ibirité, o cATP apresentou variação entre cerca de 1.025 e 3.700 ng/mL. Esses valores indicam: períodos de elevada atividade biológica e boa presença de biomassa celular viável no sistema. A variação observada é compatível com mudanças operacionais e de carga afluente.

Comportamento do BSI
O BSI apresentou ampla variação, com valores aproximadamente entre 10% e 69%. Predominância de índices moderados indica nível controlado de estresse celular. A biomassa manteve-se majoritariamente íntegra, com baixa perda de ATP intracelular.

Comportamento do ABR
Os valores de ABR situaram-se majoritariamente entre 16% e 24%. Esse intervalo indica: Registros mais elevados indicam períodos de boa eficiência biológica do lodo; Oscilações refletem mudanças naturais na composição e atividade da biomassa. Ainda assim o sistema apresenta atividade biológica suficiente para manter o processo.

Comportamento do AVSS
Os valores de AVSS observados na ETE Ibirité variaram aproximadamente entre 512 e 1.691 mg/L ao longo do período analisado. Esse comportamento indica: presença de quantidade relevante de sólidos voláteis no sistema; oscilações compatíveis com variações na carga orgânica e na condição operacional do reator.

Apesar dos registros de AVSS moderado a elevado, os valores de ABR permaneceram baixos, indicando que uma parcela significativa do material orgânico suspenso não correspondia a biomassa efetivamente ativa. Esse cenário caracteriza um lodo com eficiência microbiológica reduzida, evidenciando a importância do controle integrado entre AVSS, cATP e ABR para evitar interpretações superestimadas da capacidade biológica do sistema baseadas apenas na concentração de sólidos.

A Tabela VII abaixo apresenta um Quadro de Diagnóstico Rápido baseado nos eventos críticos identificados na série amostral, cruzando o comportamento dos indicadores com a interpretação técnica.

Tabela VII – Diagnóstico baseado nos resultados das métricas analisadas, para a ETE Ibirité.

Período	Comportamento dos Indicadores (cATP · BSI · ABR · AVSS)	Diagnóstico Técnico Provável	Ação Recomendada
19/02	cATP moderado + BSI baixo (~11%) + ABR baixo (~16%) + AVSS baixo-moderado (~512 mg/L)	Biomassa com baixa eficiência microbiológica, predominância de sólidos voláteis inativos ou lodo envelhecido.	Avaliar idade do lodo, revisar descarte e ajustar estratégia de renovação da biomassa.
11/03	cATP elevado + BSI moderado (~20%) + ABR ainda baixo + AVSS elevado (~1.691 mg/L)	Elevação rápida da atividade metabólica com acúmulo de sólidos voláteis, indicando resposta a aumento de carga com eficiência limitada.	Monitorar estabilidade, correlacionar com DQO afluente e ajustar aeração conforme demanda metabólica.
13/03	cATP em queda + BSI em elevação (~23%) + ABR baixo + AVSS em redução (~850 mg/L)	**Início de instabilidade operacional:** queda da atividade celular associada à redução dos sólidos voláteis e aumento do estresse.	Investigar variações operacionais recentes, checar nutrientes, pH e manter acompanhamento da recuperação do lodo.

B. DIAGNÓSTICO DAS ETES

ETE ARRUDAS

A ETE Arrudas apresentou biomassa predominantemente ativa, robusta e funcional, caracterizada por cATP elevado, BSI majoritariamente baixo e ABR frequentemente em faixas médias a altas, mesmo diante de oscilações pontuais.

Os eventos de elevação transitória do BSI associados à manutenção de AVSS elevado indicam resiliência da biomassa frente a choques de carga orgânica ou efluente industrial, com evidência clara de que a integridade celular foi rapidamente restabelecida.

O descolamento ocasional entre AVSS elevado e redução de cATP não caracteriza falha operacional, mas sim a presença esperada de fração inerte em sistemas de grande porte, reforçando a limitação do uso isolado de sólidos como indicador de desempenho. De forma geral, o sistema opera com elevada margem de segurança biológica.

ETE BETIM

A ETE Betim apresenta um perfil crônico de baixa eficiência microbiológica, caracterizado por ABR persistentemente baixo, episódios recorrentes de BSI elevado e AVSS estruturalmente reduzido.

Mesmo nos períodos de elevação do cATP, a resposta metabólica ocorre sob estresse significativo, indicando que a biomassa ativa existente opera próxima ao seu limite fisiológico. Esse padrão é compatível com a influência recorrente de cargas industriais e efluente com potencial inibitório, típico da bacia de contribuição da unidade.

O conjunto dos indicadores demonstra que não se trata de eventos pontuais, mas sim de uma condição estrutural de instabilidade microbiológica, exigindo estratégia contínua de renovação do lodo e controle rigoroso do afluente.

ETE IBIRITÉ

A ETE Ibirité apresenta alta sensibilidade às variações de carga, evidenciada por respostas metabólicas rápidas (picos de cATP) acompanhadas de baixa conversão em biomassa efetivamente ativa (ABR baixo).

Os valores elevados de AVSS, em conjunto com ABR persistentemente reduzido, indicam que o sistema acumula sólidos orgânicos sem conversão eficiente em biomassa viável, caracterizando um lodo com eficiência microbiológica limitada.

Os episódios de elevação simultânea de cATP e BSI apontam resposta adaptativa sob estresse, sugerindo que a ETE opera em regime reativo, demandando ajustes operacionais finos (aeração, idade do lodo e controle de carga).

C. DESEMPENHO BIOLÓGICO E CARACTERÍSTICAS DO AFLUENTE

A análise de ATP em reatores biológicos permite avaliar o desempenho da biomassa a partir de sua resposta fisiológica imediata às condições impostas pelo afluente. Diferentemente dos parâmetros convencionais, que descrevem a carga aplicada ou a concentração de sólidos no sistema, os indicadores cATP, BSI e ABR refletem diretamente o estado metabólico, o nível de estresse e a eficiência microbiológica do lodo no momento da amostragem. Nesse contexto, as características do afluente — como origem, complexidade química, variabilidade de carga e presença de compostos potencialmente inibitórios — exercem papel determinante na interpretação dos resultados de ATP, uma vez que influenciam não apenas a quantidade de biomassa, mas principalmente sua vitalidade e capacidade de conversão biológica.

Assim, valores elevados de atividade metabólica podem representar sistemas biologicamente eficientes em cenários de efluentes estáveis, ou respostas adaptativas sob estresse em sistemas com forte influência industrial. A leitura integrada entre desempenho biológico e perfil do efluente é, portanto, essencial para diferenciar biomassa saudável de biomassa reativa ou estruturalmente estressada, fornecendo base técnica mais robusta para o diagnóstico operacional e a tomada de decisão em sistemas de lodos ativados.

Abaixo trazemos uma tabela comparativa do desempenho biológico e características do efluente de cada ETE.

Tabela VIII – Comparação Integrada das ETEs (Indicadores Biológicos e Perfil do Efluente).

Aspecto	ETE Arrudas	ETE Betim	ETE Ibirité
Perfil do afluente	Predominantemente doméstico urbano, com contribuição industrial difusa e alto amortecimento hidráulico	Mista com forte influência industrial, incluindo siderurgia e efluentes com potencial tóxico	Predominantemente doméstico, com crescimento recente da carga e variações hidráulicas
Complexidade do afluente	Alta vazão, porém com maior previsibilidade e tamponamento	Alta variabilidade química e potencial inibitório recorrente	Variabilidade hidráulica e orgânica moderada
Comportamento do cATP	Elevado e estável, com oscilações pontuais	Flutuante, com elevações sob estresse	Reativo, com respostas rápidas a mudanças de carga
Comportamento do BSI	Predominantemente baixo	Recorrentemente elevado	Moderado, com episódios de elevação
Comportamento do ABR	Médio a alto, indicando boa conversão biológica	Persistentemente baixo	Baixo, mesmo com AVSS elevado
Comportamento do AVSS	Elevado, com fração inerte esperada	Baixo a moderado	Moderado a elevado, porém pouco eficiente
Diagnóstico global	Sistema robusto, resiliente e biologicamente estável	Sistema estruturalmente estressado, com eficiência microbiológica limitada	Sistema sensível, com resposta rápida, porém baixo rendimento biológico
Implicação operacional	Alta segurança operacional	Necessidade de controle rigoroso do afluente e descarte	Ajustes finos para evitar acúmulo de biomassa inerte

Conforme apresentado neste item, a avaliação das características do afluente, associada aos parâmetros biológicos obtidos por meio da análise de ATP, evidenciou que o desempenho dos reatores está diretamente condicionado à natureza, à complexidade e à variabilidade da carga aplicada. Os indicadores cATP, BSI e ABR permitiram caracterizar não apenas a quantidade de biomassa presente, mas principalmente sua condição fisiológica, nível de estresse e eficiência microbiológica frente às condições impostas pelo afluente em cada unidade avaliada.

A análise integrada dos indicadores biológicos e das características do efluente permitiu identificar níveis distintos de risco operacional associados ao desempenho microbiológico em cada ETE avaliada. Esses riscos não se manifestam de forma homogênea, variando conforme a estabilidade da biomassa, o grau de estresse metabólico e a eficiência de conversão biológica observados em cada unidade.

Com o objetivo de consolidar essa análise integrada e traduzi-la em uma ferramenta de leitura comparativa e suporte à tomada de decisão operacional, resumimos o desempenho biológico de cada ETE, conforme tabela a seguir.

Tabela XIX – Desempenho biológico das ETEs Arrudas, Ibirité e Betim.

	ETE Arrudas	ETE Ibirité	ETE Betim
Saúde da Biomassa	alta	moderada	Baixa
Eficiência do Lodo	alta	baixa	Baixa
cATP	consistentemente elevado	reativo, com respostas rápidas a variações de carga	flutuante, com picos associados a estresse
BSI	predominantemente baixo	moderado, com episódios de elevação	frequentemente elevado
ABR	médio a alto	persistentemente baixo	persistentemente baixo
AVSS	elevado com fração inerte esperada para sistema de grande porte	moderado a elevado, com baixa conversão em biomassa ativa	estruturalmente reduzido
Efluente	predominantemente doméstico com amortecimento hidráulico	predominantemente doméstico, porém com crescimento recente da carga e variação hidráulica	Forte influência industrial no afluente, com potencial inibitório recorrente
Desempenho	biomassa robusta, com elevada margem de	Sistema responde rapidamente às mudanças de	Biomassa ativa operando sob estresse crônico, com baixa

	segurança operacional e rápida recuperação frente a perturbações.	carga, porém acumula sólidos orgânicos ineficientes, demandando ajustes finos de operação.	eficiência microbiológica e necessidade contínua de intervenção operacional.”

Nesse contexto, a interpretação integrada entre o perfil do efluente e a resposta biológica observada mostrou-se fundamental para diferenciar sistemas biologicamente estáveis de sistemas reativos ou estruturalmente estressados, evitando leituras isoladas dos parâmetros.

D. LIMITAÇÕES E ESCOPO DA ANÁLISE

O presente estudo fundamenta-se em um conjunto amostral reduzido, especialmente no caso das ETEs Betim e Ibirité, o que poderia, sob uma abordagem estatística clássica, ser interpretado como uma limitação à representatividade de longo prazo dos resultados. Entretanto, é fundamental esclarecer que o escopo desta análise não é a caracterização histórica ou a avaliação de desempenho médio das unidades, mas sim a obtenção de um diagnóstico operacional imediato da condição fisiológica da biomassa, no contexto da aplicação da metodologia de ATP como ferramenta de apoio à operação.

A análise baseada em ATP (cATP, BSI e ABR), complementada pela avaliação de AVSS, possui natureza conceitualmente distinta dos parâmetros convencionais de monitoramento (DQO, DBO, SST), os quais demandam séries temporais extensas para interpretação robusta de tendência. Trata-se, neste caso, de uma ferramenta de diagnóstico rápido, projetada para fornecer um “retrato instantâneo” do estado metabólico da biomassa no momento da amostragem, com elevada sensibilidade a eventos de estresse, toxicidade, choque de carga ou acúmulo de sólidos biologicamente inertes.

Nesse sentido, mesmo um número amostral limitado é tecnicamente suficiente para capturar padrões fisiológicos relevantes, desde que os indicadores sejam interpretados de forma integrada, conforme realizado neste estudo. A leitura cruzada entre cATP, BSI, ABR e AVSS permite identificar, de maneira objetiva, a condição funcional do lodo ativado, diferenciando situações de biomassa saudável, biomassa estressada ou predominância de material particulado inativo, independentemente da extensão da série histórica disponível.

Aplicação às ETEs Betim e Ibirité
No caso da ETE Betim, o número reduzido de amostras não compromete a assertividade do diagnóstico, uma vez que os indicadores apresentaram comportamento convergente e consistente ao longo do período avaliado: ABR persistentemente baixo, episódios recorrentes de BSI elevado e AVSS estruturalmente reduzido. Esse conjunto de respostas aponta de forma inequívoca para um estado crônico de estresse microbiológico, compatível com o perfil do efluente afluente da unidade, caracterizado por significativa influência industrial. Assim, apesar da limitação amostral, o retrato obtido reflete uma condição operacional predominante, e não eventos isolados ou episódicos.

Para a ETE Ibirité, a análise amostral cumpre o papel de um diagnóstico de regime operacional, evidenciando elevada reatividade da biomassa (picos de cATP) associada a baixa eficiência de conversão biológica (ABR baixo) e ao acúmulo de AVSS. Esse padrão indica um sistema sensível a variações de carga, com resposta metabólica rápida, porém limitada eficiência na incorporação dessa atividade em biomassa efetivamente ativa. Nesse contexto, o valor analítico reside menos na frequência estatística dos eventos e mais na natureza da resposta biológica frente às condições impostas, plenamente capturada pela metodologia mesmo em séries amostrais curtas.

Validade e alcance das conclusões
Dessa forma, as conclusões apresentadas neste relatório não se propõem a substituir avaliações de desempenho de longo prazo, tampouco estabelecer parâmetros médios de referência para as unidades estudadas. O foco central é a avaliação da aplicabilidade do ATP como ferramenta operacional de diagnóstico rápido, capaz de fornecer informações técnicas confiáveis para tomada de decisão imediata, prevenção de falhas biológicas e interpretação qualificada do comportamento do lodo ativado.

Sob essa ótica, o número amostral adotada mostra-se compatível com o objetivo do estudo, demonstrando que, mesmo com poucos pontos de coleta, a metodologia foi capaz de identificar estados de estresse microbiológico, diferenciar biomassa ativa de sólidos biologicamente inertes e antecipar riscos operacionais que não seriam detectados pela análise isolada de parâmetros convencionais.

Assim, a limitação do número de amostras não fragiliza as conclusões, mas reforça o caráter prático, operacional e estratégico da ferramenta proposta, evidenciando seu potencial como instrumento de diagnóstico em tempo real no controle de sistemas de lodos ativados.

DISCUSSÃO

Quando consideramos o ATP como ferramenta de diagnóstico imediato da biomassa, diversos estudos demonstram que a medição de ATP captura o estado metabólico instantâneo da biomassa, sendo adequada mesmo em séries amostrais curtas.

Yu et al. (2025) demonstraram que o ATP aeróbio é o principal preditor da qualidade do efluente, permitindo identificar alterações operacionais antes de parâmetros tradicionais como DQO e SST. Chu et al. (2001) mostraram que o ATP é um indicador direto de atividade microbiológica, distinguindo biomassa viva de material particulado inerte, algo que sólidos suspensos não conseguem fazer. Esses estudos sustentam tecnicamente o uso do ATP como diagnóstico pontual válido, exatamente como aplicado nas ETEs Betim e Ibirité, mesmo com número amostral reduzido.

O Biomass Stress Index (BSI) foi validado como um sensor antecipado de perturbações microbiológicas, muitas vezes antes da queda de desempenho hidráulico ou da piora de sedimentabilidade. Zhu et al. (2021) demonstraram correlação estatisticamente significativa entre BSI e carga orgânica, SVI e SV30, com capacidade preditiva de até 14 dias antes da manifestação operacional do problema.

Estudos compilados por Vermicon (2025) reforçam o BSI como ferramenta de alerta precoce para toxicidade e estresse crônico, aplicável inclusive em ambientes com forte influência industrial. Tais resultados corroboram os diagnósticos da ETE Betim, onde o BSI elevado recorrente foi interpretado corretamente como estresse estrutural, e não evento pontual.

A literatura é consistente ao afirmar que SST, SSV e até AVSS superestimam biomassa ativa, pois incluem frações mortas ou inertes. Whalen et al. (2005; 2010) demonstraram que a fração ativa da biomassa geralmente varia entre 15% e 40% dos sólidos, sendo o ABR o parâmetro mais representativo da eficiência biológica real.

Trabalhos (Application notes) da LuminUltra (fabricante do equipamento utilizados nos testes) mostram que sistemas com AVSS elevado e ABR baixo acumulam biomassa biologicamente ineficiente, mesmo quando o sistema aparenta estabilidade pelos sólidos convencionais. Esses resultados vão de encontro aos identificados para a ETE Ibirité, onde AVSS elevado coexistiu com ABR baixo, indicando acúmulo de sólidos orgânicos inativos.

Estudos operacionais e industriais mostram que ATP é uma métrica de condição, não de tendência histórica, e não exige longas séries temporais para diagnóstico. Kang et al. (1988) demonstraram que a ATP responde de forma imediata à presença de inibidores e choques tóxicos, sendo adequada para avaliações pontuais de saúde microbiológica.

Casos industriais recentes (China Steel, 2025) mostraram que decisões operacionais críticas podem ser tomadas com base em janelas curtas de ATP, sem prejuízo da confiabilidade técnica.

Esses trabalhos validam conceitualmente a nossa justificativa metodológica, reforçando que o número amostral adotado é compatível com o objetivo de diagnóstico imediato.

CONCLUSÃO

Os resultados observados no presente estudo encontram respaldo em literatura científica e técnica consolidada, que reconhece o ATP, o BSI e o ABR como indicadores sensíveis do estado fisiológico imediato da biomassa em sistemas de lodos ativados. Estudos demonstram que essas métricas permitem identificar eventos de estresse, toxicidade e ineficiência microbiológica mesmo em análises pontuais, não sendo dependentes de séries temporais extensas, diferentemente dos parâmetros convencionais baseados em sólidos. Assim, os diagnósticos obtidos para as ETEs Arrudas, Betim e Ibirité são consistentes com evidências publicadas e refletem condições operacionais reais no momento da amostragem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Clean Environment Brasil pela disponibilização do equipamento utilizado nas análises de ATP, fundamental para a realização deste estudo. Agradecem, de forma especial, a Fabio Fontana Rogério, pela intermediação do empréstimo do equipamento e pelo apoio técnico prestado. O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Mentoria da COPASA, cujo suporte institucional foi essencial para a viabilização e o desenvolvimento das atividades técnicas apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES); COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS (COPASA MG). Avaliação operacional em escala real da ETE Ibirité. Belo Horizonte, s.d.

CHU, C. P. et al. Using ATP bioluminescence technique for monitoring microbial activity in sludge. Biotechnology and Bioengineering, Hoboken, v. 75, n. 4, p. 469–474, 2001.

COPASA MG. ETE sustentável: perfil das ETEs Arrudas, Betim e Ibirité; aproveitamento energético e contexto operacional. Belo Horizonte: COPASA MG, s.d.

COPASA MG. Licenciamento ambiental da Estação de Tratamento de Esgoto Arrudas. Belo Horizonte: SUPRAM/COPAM, s.d.

COPASA MG; METALSIDER. Projeto de reúso industrial: ETE Betim Central. Belo Horizonte: COPASA MG, s.d.

LUMINULTRA TECHNOLOGIES. How to interpret microbiological stress: application note – wastewater. Fredericton, NB: LuminUltra Technologies, fev. 2018.

LUMINULTRA TECHNOLOGIES. Rapid identification and troubleshooting of a toxicity event: ROI case study. Fredericton, NB: LuminUltra Technologies, set. 2018.

WHALEN, P. A. et al. Cellular ATP: a superior measure of active biomass for biological wastewater treatment processes. Guelph: LuminUltra Technologies, 2005.

ZHU, Y. et al. Correlation analysis among ATP, Biological Stress Index and common indices in activated sludge process. Environmental Engineering, v. 39, n. 6, p. 49–54, 2021.

YU, Y. et al. Real-time ATP monitoring revolutionizing wastewater treatment. Process Safety and Environmental Protection, s.l., 2025. (no prelo).

KANG, S. J. et al. ATP as a measure of active biomass concentration and inhibition in biological wastewater treatment processes. Ann Arbor: University of Michigan, 1988.