

**ETE**

**RESULTADOS DO PROJETO  
DE MEDIÇÕES DE BIOGÁS  
EM REATORES ANAERÓBIOS**

---



**ETE**

## **RESULTADOS DO PROJETO DE MEDIÇÕES DE BIOGÁS EM REATORES ANAERÓBIOS**

---

**Coletânea de publicações do PROBIOGÁS**  
Série Aproveitamento Energético de Biogás  
em Estações de Tratamento de Esgoto

1ª Edição  
Ministério das Cidades  
Brasília, 2017

*República Federativa do Brasil*

**Presidente da República**

Michel Temer

**Ministro das Cidades**

Bruno Araújo

**Secretário Executivo do Ministério das Cidades**

Luciano Oliva Patrício

**Secretário Nacional de Saneamento Ambiental**

Alceu Segamarchi Júnior

**Chefe de Gabinete**

Gustavo Zarif Frayha

**Diretor de Planejamento e Regulação**

Ernani Ciríaco de Miranda

**Diretora de Repasses a Projetos de Saneamento**

Roberta Sampaio Soares

**Diretor de Financiamento de Projetos de Saneamento**

Sérgio Wippel

*Apoio Técnico*

Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ).

**Diretor Nacional:** Wolf Michael Dio

**Coordenador do Projeto:** Wolfgang Roller

*Informações legais*

*As ideias e opiniões expressas neste livro são dos autores e não refletem necessariamente a posição do Ministério das Cidades, da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental ou da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.*

*A duplicação ou reprodução de todo ou partes (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais é permitida, desde que o projeto PROBIOGÁS seja citado como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição de todo ou partes deste estudo, é necessário o consentimento por escrito do Ministério das Cidades e da GIZ.*

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação [CIP]

Bibliotecário Responsável: Illy Guimarães B. Batista [CRB/DF 2498]

Brasil. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás.

Resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios / Probiogás ; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH [GIZ] ; autores, Carolina Cabral ... [et al.].

– Brasília, DF : Ministério das Cidades, 2016.

50 p. : il. – (Aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto ; 6)

ISBN 978-85-7958-070-3

1. Biogás em estações de tratamento de esgoto – Brasil. 2. Reator anaeróbio de fluxo ascendente [UASB] – Brasil. 3. Reator anaeróbio de leito fluidizado [RALF] – Brasil. 4. Biogás em estações de tratamento de esgoto – aspectos ambientais – Brasil. 5. Biogás – produção e utilização – Brasil. 6. Energia – fontes alternativas. I. Ministério das Cidades. II. Deutsche Gesellschaft für Internationale

CDD 665.776

CDU 662.767.2



## Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil

[www.cidades.gov.br/probiogas](http://www.cidades.gov.br/probiogas)

O Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS – é um projeto inovador, fruto da cooperação técnica entre o Governo Brasileiro, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e o Governo Alemão, por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Tem o objetivo de contribuir para a ampliação do uso energético eficiente do biogás e, por conseguinte, para a redução de emissões de gases indutores do efeito estufa, o projeto conta com uma rede de parcerias nas esferas governamental, acadêmica e empresarial e possui vigência entre os anos de 2013 e 2017.

Para alcançar tais objetivos, o PROBIOGÁS desenvolve atividades em três linhas: (1) *condições-quadro*, atuando junto a órgãos governamentais em prol da melhoria das condições regulatórias relacionadas à produção de energia a partir do biogás; (2) *cooperação científica*, aproximando instituições de ensino e de pesquisa brasileiras entre si e das alemãs; e, (3) *cadeia de valor*, com o intuito de fomentar a indústria brasileira para produção nacional de tecnologia e de aproximar empresas brasileiras e alemãs para o intercâmbio de conhecimento. Além dessas atividades, o PROBIOGÁS busca capacitar profissionais brasileiros em diversos níveis, contemplando os atores que integram a cadeia de biogás e objetivando fortalecer o mercado de biogás no Brasil.

A realização da parceria Brasil-Alemanha possibilita a transferência do conhecimento e da experiência alemã sobre o aproveitamento do biogás gerado a partir do tratamento de efluentes e de resíduos, cuja *expertise* é reconhecida mundialmente. Neste contexto, o PROBIOGÁS assume papel relevante, indutor do desenvolvimento de tecnologias nacionais para o aproveitamento do biogás, possibilitando um retorno positivo para o setor de saneamento básico no Brasil, em função do potencial de incremento na viabilidade técnica e econômica das plantas e instalações de tratamento de esgotos e de resíduos sólidos, a partir da geração de energia proveniente dos processos de biodegradação da fração orgânica.

Para melhor inserir o Projeto nas políticas nacionais, foi criado um Comitê Gestor interministerial com a função de assegurar a integração entre as diversas áreas do Governo Federal com atuação no tema. O Comitê é formado pelos seguintes órgãos: Ministério das Cidades, do Meio Ambiente, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, das Minas e Energia, da Agricultura, da Pecuária e Abastecimento, do Desenvolvimento, Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, assim como a GIZ.

### Ministério das Cidades



MINISTÉRIO DAS  
CIDADES



*Coordenação do projeto PROBIOGÁS*

Ernani Ciríaco de Miranda (Ministério das Cidades) e Wolfgang Roller (GIZ)

---

**Publicado por**

Projeto Brasil–Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS (Projeto de Cooperação Técnica Bilateral entre a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades – SNSA/MCidades e a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável – GIZ)

---

**Contatos**

*SNSA/MCidades*

Setor de Autarquias Sul, Quadra 01, Lote 01/06, Bloco H, Ed. Telemundi II  
CEP: 70070-010, Brasília – DF, Brasil. Telefone: +55 (61) 2108-1000  
[www.cidades.gov.br](http://www.cidades.gov.br)

*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*

SCN Quadra 1 Bloco C Sala 1501 – 15º andar Ed. Brasília Trade Center,  
CEP: 70711-902, Brasília-DF, Brasil. Telefone: +55 (61) 2101-2170  
[www.giz.de/brasil](http://www.giz.de/brasil)

---

**Expediente**

*Autores*

Carolina Bayer Gomes Cabral (Rotária do Brasil), Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (DESA/UFMG), Heike Hoffmann (Rotária do Brasil), Priscilla Natalie Pereira Neves (DESA/UFMG), Christoph Platzer (Rotária do Brasil), Thiago Bressani Ribeiro (DESA/UFMG), Sebastian Rosenfeldt (Rotária do Brasil).

*Coordenação do material*

DESA/UFMG e Consórcio AKUT/Rotária do Brasil

*Revisão Técnica*

**Ministério das Cidades** – Keyla Nunes da Silva  
**GIZ** – Hélinah Cardoso Moreira

*Revisão Ortográfica*

Wagner Santos

*Capa, projeto gráfico e diagramação*

Estúdio Marujo

## PREFÁCIO

A Lei de diretrizes nacionais para o saneamento básico – Lei Federal nº11.445/2007 – estabelece que a prestação dos serviços terá a sustentabilidade econômico-financeira assegurada e, sob os aspectos técnicos, atenderá aos requisitos que garantam a qualidade adequada. Por sua vez, a Lei que institui a política nacional de resíduos sólidos – Lei 12.305/2010 – estabelece a obrigatoriedade da coleta seletiva e determina que apenas os rejeitos devam ser encaminhados aos aterros sanitários (regra que ficou conhecida no país como o “fim dos lixões”). Tais elementos reforçam o grande desafio enfrentado pelo Brasil de ampliar os níveis de tratamento dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos.

O Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab – aprovado em dezembro de 2013, com horizonte de 20 anos, destaca que um dos princípios fundamentais da política de saneamento diz respeito à matriz tecnológica que orienta o planejamento e a política setorial. Segundo o Plansab, planejar o saneamento básico no país, com um olhar de longo prazo, necessariamente envolve a prospecção dos rumos tecnológicos que o setor pode e deve trilhar. Cabe à política de saneamento básico identificar tendências, nacionais e internacionais, segundo as quais a matriz tecnológica do saneamento vem se moldando, o que supõe também procurar enxergar novos conceitos, ainda que sejam antigas formulações em novas roupagens, ou novos desafios que pressionam no sentido de mudanças paradigmáticas. Neste sentido, temas como a sustentabilidade, a gestão integrada das águas urbanas, o saneamento ecológico e o combate às mudanças climáticas globais podem ser evocados como exemplos.

Neste contexto, o PROBIOGÁS é um instrumento de grande importância para a implementação do Plansab. O aproveitamento energético do biogás nos processos de tratamento dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos, consagrado em diversos países, representa um pequeno esforço de modernização das instalações dos sistemas brasileiros com impactos altamente positivos na sustentabilidade econômico-financeira, na qualidade dos processos de tratamento e na melhoria do meio ambiente, contribuindo de forma efetiva para a redução dos gases de efeito estufa.

Espera-se que os resultados do PROBIOGÁS possibilitem a inserção do aproveitamento energético do biogás na pauta dos governos e dos prestadores de serviços de saneamento básico, de modo a fazer com que esta fonte renovável de energia seja utilizada em toda a sua potencialidade, dentro da realidade brasileira, contribuindo também para a geração distribuída de energia e a maior diversificação da matriz energética nacional.

## APRESENTAÇÃO DA COLETÂNEA

A Coletânea de Publicações do PROBIOGÁS é uma relevante contribuição governamental aos profissionais brasileiros que atuam em diferentes setores da infraestrutura, energia renovável, inovação tecnológica e, em especial, no setor de saneamento. Essa coletânea é composta por cadernos técnicos que tratam do biogás como tema central.

A coletânea é dividida em quatro séries, cada uma agrupando um conjunto de publicações que contribuem para uma determinada área do conhecimento e/ou de atuação no tema.

### BIOGÁS

A primeira série é intitulada **Desenvolvimento do Mercado de Biogás**, abreviada como **BIOGÁS**, composta por publicações que tratam de aspectos tecnológicos da geração e utilização do biogás, do processo de licenciamento ambiental de plantas e instalações, da comercialização de coprodutos de plantas de biogás, entre outros tópicos pertinentes à estruturação da cadeia produtiva e à consolidação de um mercado nacional.

### RSU

A segunda série aborda a utilização energética do biogás gerado a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, questão extremamente atual no contexto técnico e institucional do saneamento ambiental brasileiro. Denominada **Aproveitamento Energético do Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos** e abreviada simplesmente como **RSU**, esta série abordará, entre outros tópicos, a metodologia e a tecnologia da metanização seca e estudos de viabilidade técnica e econômica.

### ETE

A terceira série é chamada **Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto**, simbolizada pela sigla **ETE**, e composta por publicações que tratam de aspectos técnicos, do projeto à operação, de estudos de viabilidade técnica e econômica, e de orientações para a licitação de sistemas de tratamento que contemplem o biogás.

### RA

Finalmente, a quarta série abordará a utilização do biogás oriundo dos resíduos das atividades agrícolas, pecuárias e da agroindústria, que possuem um elevado potencial de aproveitamento no país. Intitulada **Aproveitamento Energético do Biogás de Resíduos Agrosilvopastoris**, abreviada simplesmente como **RA**, as publicações versarão sobre os resíduos da suinocultura, comercialização de biofertilizante, entre outros tópicos.

Por oportuno, informamos que todas as Publicações da Coletânea estão disponíveis para *download* na página do Projeto PROBIOGÁS, hospedado no site da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades: [www.cidades.gov.br/probiogas](http://www.cidades.gov.br/probiogas)

# SUMÁRIO

---

12	1 APRESENTAÇÃO
----	----------------

---

13	2 METODOLOGIA
13	2.1 Seleção das ETEs integrantes do projeto de medições
13	2.2 ETEs selecionadas e principais características de projeto dos reatores anaeróbios
18	2.3 Quantificação dos parâmetros associados à produção e à composição do biogás
32	2.4 Estabelecimento das relações unitárias de produção de metano
33	2.5 Estimativa do potencial de aproveitamento energético do biogás
34	2.6 Emissões de gases de efeito estufa decorrentes da perda de metano

---

35	3 RESULTADOS E DISCUSSÃO
35	3.1 Dificuldades enfrentadas durante o projeto
36	3.2 Monitoramento dos parâmetros associados à produção e à composição do biogás
45	3.3 Fatores interferentes na produção de biogás
61	3.4 Relações unitárias de produção de metano
64	3.5 Subsídios para o aproveitamento energético do biogás nas ETEs investigadas
71	3.6 Propostas de melhoria dos reatores UASB visando o incremento da recuperação de Biogás

---

74	4 CONCLUSÕES
----	--------------

---

76	5 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS
----	--

---

77	6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
----	------------------------------

---

81	ANEXO 1
----	---------

---

116	ANEXO 2
-----	---------

---



## LISTA DE FIGURAS

- 13 **1:** Fluxograma das principais etapas da metodologia.
- 14 **2:** Exemplo das condições dos reatores anaeróbios, com visível fuga de gás.
- 15 **3:** Mapa com as ETEs participantes do Projeto Medições.
- 18 **4:** Desenho esquemático da configuração geral dos medidores instalados nas ETEs.
- 19 **5:** Ilustração esquemática da sonda *s::can* para medição de DQO.
- 20 **6:** Medidores de vazão de biogás.
- 22 **7:** Princípio de funcionamento dos sensores.
- 22 **8:** Detecção dos principais pontos de vazamento nos reatores anaeróbios.
- 23 **9:** Recorte do desenho de projeto para instalação da sonda de DQO, do quadro de análises da composição do gás e do quadro de comando.
- 24 **10:** Recorte do desenho de projeto para instalação do medidor de vazão e do ponto de coleta de amostras de biogás.
- 24 **11:** Medição da composição de biogás.
- 24 **12:** Medição da vazão de biogás.
- 25 **13:** Medição da DQO – sonda e controlador.
- 25 **14:** Banco de dados online com monitoramento das 10 ETEs.
- 27 **15:** Efeito da entrada de ar na tubulação de coleta devido a um procedimento operacional.
- 27 **16:** Exemplo de período com *drift* dos valores de DQO devido ao acúmulo de sujeira na sonda.
- 34 **17:** Padrão de produção e consumo de biogás com alimentação e utilização contínua.
- 38 **18:** Séries históricas das concentrações de  $DQO_{total}$  e  $DQO_{filtrada}$  para a ETE C.
- 40 **19:** Gráficos *box-plot* das concentrações percentuais de  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$  e  $O_2$  no biogás.
- 42 **20:** ETE A: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás.
- 42 **21:** ETE B: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás.
- 42 **22:** ETE C: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás.
- 43 **23:** ETE D: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás.
- 43 **24:** ETE E: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás.
- 43 **25:** ETE F: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás.
- 44 **26:** ETE H: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás.
- 44 **27:** ETE J: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás.

- 45 **28:** Gráficos *box-plot* das vazões de esgoto e biogás para as ETEs analisadas.
- 45 **29:** ETE A: comportamento diário da produção média de biogás.
- 46 **30:** ETE C: comportamento diário da produção média de biogás.
- 46 **31:** ETE D: comportamento diário da produção média de biogás.
- 46 **32:** ETE E: comportamento diário da produção média de biogás.
- 47 **33:** ETE F: comportamento diário da produção média de biogás.
- 47 **34:** ETE H: comportamento diário da produção média de biogás.
- 47 **35:** ETE J: comportamento diário da produção média de biogás.
- 49 **36:** Tempos de detenção hidráulica e velocidades ascensionais médias – ETE A.
- 49 **37:** Tempos de detenção hidráulica e velocidades ascensionais médias – ETE C.
- 50 **38:** Tempos de detenção hidráulica e velocidades ascensionais médias – ETE D.
- 50 **39:** Tempos de detenção hidráulica e velocidades ascensionais médias – ETE E.
- 51 **40:** Tempos de detenção hidráulica e velocidades ascensionais médias – ETE F.
- 52 **41:** Gráficos *box-plot* para a ETE A das variáveis: [a] Vazão de biogás; [b] carga orgânica removida; [c] concentração de DQO<sub>afluente</sub>; [d] Vazão de esgoto; [e] Temperatura; e [f] Precipitação acumulada.
- 53 **42:** Análise dos principais fatores interferentes na produção de biogás na ETE A.
- 54 **43:** Curvas das médias horárias de vazão de esgoto, DQO<sub>afluente</sub> e vazão normalizada de biogás para a ETE A.
- 55 **44:** Pluviometria e temperatura do esgoto ETE C – período de estiagem.
- 55 **45:** Médias horárias da vazão de esgoto e concentração de DQO na ETE C – período de estiagem.
- 56 **46:** Médias horárias da vazão de esgoto e biogás e carga de DQO<sub>removida</sub> na ETE C - período de estiagem.
- 56 **47:** Pluviometria e temperatura do esgoto na ETE C – período chuvoso.
- 57 **48:** Médias horárias da vazão de esgoto e concentração de DQO na ETE C – período chuvoso.
- 57 **49:** Médias horárias da vazão de esgoto e biogás e carga de DQO<sub>removida</sub> na ETE C – período chuvoso.
- 58 **50:** Pluviometria e temperatura do esgoto na ETE C – período chuvoso [análise complementar].
- 59 **51:** Médias horárias da vazão de esgoto e biogás na ETE C – período chuvoso [análise complementar].
- 59 **52:** Gráficos de dispersão entre a vazão média diária de biogás e a vazão média diária de esgoto na ETE F para: [a] período de estiagem (junho a agosto); e [b] período chuvoso (janeiro a março).
- 61 **53:** Análise dos principais fatores interferentes na produção de biogás entre as ETEs investigadas.

61	<b>54:</b> <i>Box-plot</i> das relações unitárias obtidas da produção de biogás [lado esquerdo] quanto a 1) per capita; 2) vazão de esgoto tratado; e 3) carga orgânica removida, em comparação aos cenários do modelo de Lobato <i>et al.</i> [2012] [lado direito].
65	<b>55:</b> Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE A.
65	<b>56:</b> Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE B.
65	<b>57:</b> Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE C.
66	<b>58:</b> Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE D.
66	<b>59:</b> Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE E.
66	<b>60:</b> Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE F.
67	<b>61:</b> Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE G.
67	<b>62:</b> Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE H.
67	<b>63:</b> Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE J.
69	<b>64:</b> Gráfico <i>box-plot</i> da concentração de H <sub>2</sub> S.
71	<b>65:</b> Síntese de propostas de melhoria de projeto e operação visando o incremento da produção e coleta do biogás.

## LISTA DE TABELAS

15	<b>1:</b> Estações participantes do Projeto Medições.
16	<b>2:</b> Principais características de projeto dos reatores anaeróbios investigados.
17	<b>3:</b> Principais características de projeto dos reatores anaeróbios investigados [continuação].
22	<b>4:</b> Métodos e faixa de medição para cada componente medido.
26	<b>5:</b> Dados recebidos durante uma hora de medição na ETE C.
29	<b>6:</b> Período selecionado para análise dos dados de vazão de esgoto, vazão e composição do biogás e DQO laboratorial.
31	<b>7:</b> Síntese das análises estatísticas realizadas.
37	<b>8:</b> Caracterização dos parâmetros associados à fase líquida nas ETEs investigadas.
39	<b>9:</b> Caracterização dos parâmetros associados à fase gasosa nas ETEs investigadas.
51	<b>10:</b> Estatística descritiva dos parâmetros da ETE A.
52	<b>11:</b> Matriz de correlações entre as variáveis.
64	<b>12:</b> Tabela comparativa das relações unitárias de produção de metano para as ETEs investigadas.
68	<b>13:</b> Volume mínimo do gasômetro com relação à produção diária de biogás.
70	<b>14:</b> Estimativas de geração de energia elétrica e da potência do motorizador para as ETEs monitoradas.
73	<b>15:</b> Potencial de emissões de GEE em tCO <sub>2</sub> equivalentes.

## 1

## APRESENTAÇÃO

O aumento dos índices de cobertura de tratamento de esgoto na América Latina está associado à utilização de reatores UASB. Os custos de uma estação de tratamento com essa tipologia de reator anaeróbio, seguido por unidade de tratamento biológico aeróbio, geralmente proporcionam economias de investimento (CAPEX) de 20 a 50% e operacionais (OPEX) acima de 50%, em comparação com uma planta de lodos ativados convencional (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

Entretanto, os reatores UASB ainda apresentam algumas limitações de projeto, construção e operação que devem ser solucionadas para se evitar o descrédito e a redução de sua aplicação. Uma parcela considerável desses reatores anaeróbios no Brasil não possui sequer coleta de biogás, tampouco queimadores em funcionamento contínuo, visto que não foram dimensionados para uma coleta sistemática do gás. Paralelamente, as tampas dos compartimentos de biogás, localizadas na parte superior do reator, não são usualmente bem vedadas, constituindo-se em pontos de fuga gasosa para a atmosfera.

Tendo em vista que o metano, principal componente do biogás, tem potencial de aquecimento 28 vezes maior que o CO<sub>2</sub> (IPCC, 2014), esse é um fator preocupante. Na busca pelo desenvolvimento de um sistema sustentável de tratamento de esgoto, é fundamental o gerenciamento integrado dos subprodutos gerados no processo – a exemplo do biogás – propiciando sua captura e utilização e, conseqüentemente, mitigando impactos ambientais.

Poucos estudos tratam da caracterização quantitativa e qualitativa do biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico, em escala real. Nesse sentido, o governo brasileiro, por intermédio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA) do Ministério das Cidades, e o governo alemão, por meio da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*, no âmbito do Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (PROBIOGÁS), implementou o projeto “Avaliação do potencial de aproveitamento energético de biogás gerado em reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de esgoto doméstico no Brasil”, doravante referenciado como **Projeto de Medições**. Em seu escopo, previam-se medições em 10 estações de tratamento de esgoto (ETE), em escala real, distribuídas em seis entes federativos do Brasil.

*Este projeto é importante, pois visa compreender o verdadeiro potencial de geração de energia associado aos reatores UASB/RALF tratando esgoto doméstico, bem como as formas de maximizá-lo. Para tanto, investigações das fases líquida e gasosa foram realizadas, com o intuito de verificar o comportamento da produção e qualidade do biogás, bem como identificar as principais variáveis interferentes em sua vazão, como cargas orgânicas aplicadas e eventos pluviométricos.*

Este projeto e os avanços científicos por ele proporcionados não seriam possíveis sem a contribuição ativa das seguintes prestadoras de serviço: CAESB, COPASA, Grupo Águas do Brasil, SABESP, SAAE Itabira, SeMAE Rio Preto, SANASA, SANEPAR e SANESUL. No mais, a coordenação deste proje-

to foi realizada em esforço conjunto da consultoria AKUT/Rotária do Brasil em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Um agradecimento especial a todos os envolvidos neste projeto, que proporcionou um avanço significativo no conhecimento sobre o comportamento do biogás em reatores anaeróbios em escala real no Brasil.

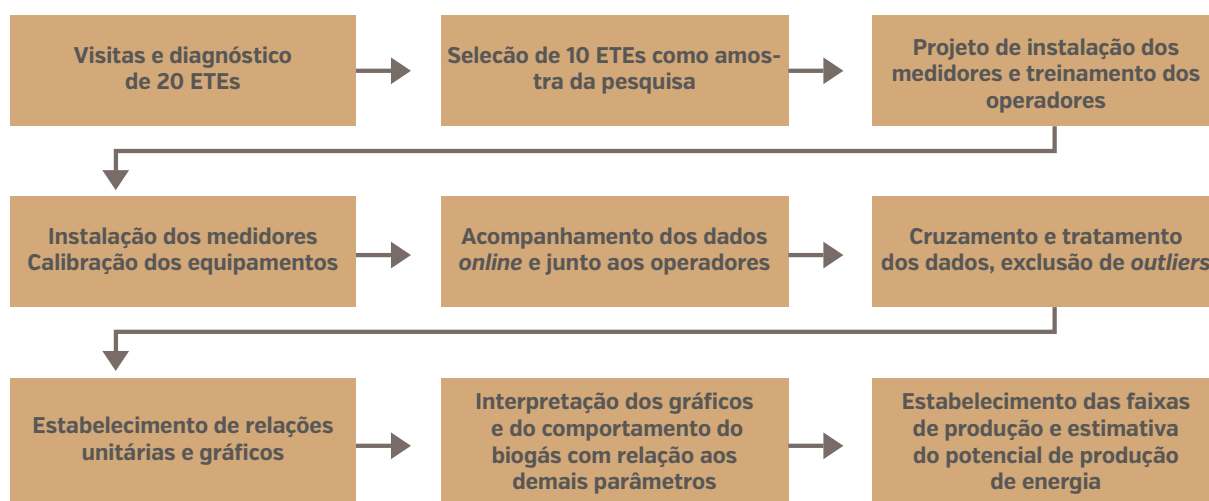
# 2

## METODOLOGIA

As ETEs que serviram de amostra para este estudo têm, em comum, o fato de utilizarem reatores UASB/RALF como sistema de tratamento de esgotos e geração de biogás, e estão distribuídas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país.

**Figura 1:** Fluxograma das principais etapas da metodologia.

Na Figura 1, pode-se visualizar o fluxograma das principais etapas metodológicas, as quais são melhor caracterizadas nos subitens de 2.1 a 2.6, a seguir.



Fonte: Rotária do Brasil [2016].

### 2.1 Seleção das ETEs integrantes do projeto de medições

Ao todo, foram visitadas 20 estações de tratamento de esgoto pré-selecionadas pelo Projeto de Medições, as quais possuíam reatores UASB ou RALF como parte do fluxograma de tratamento. O processo de escolha das ETEs levou em consideração três aspectos: a) as condições gerais da ETE; b) as condições dos reatores anaeróbios; e c) as condições para instalação dos equipamentos de medição.

#### 2.1.1. Condições gerais da ETE

Em relação às condições gerais da ETE, os principais critérios considerados para avaliação foram:

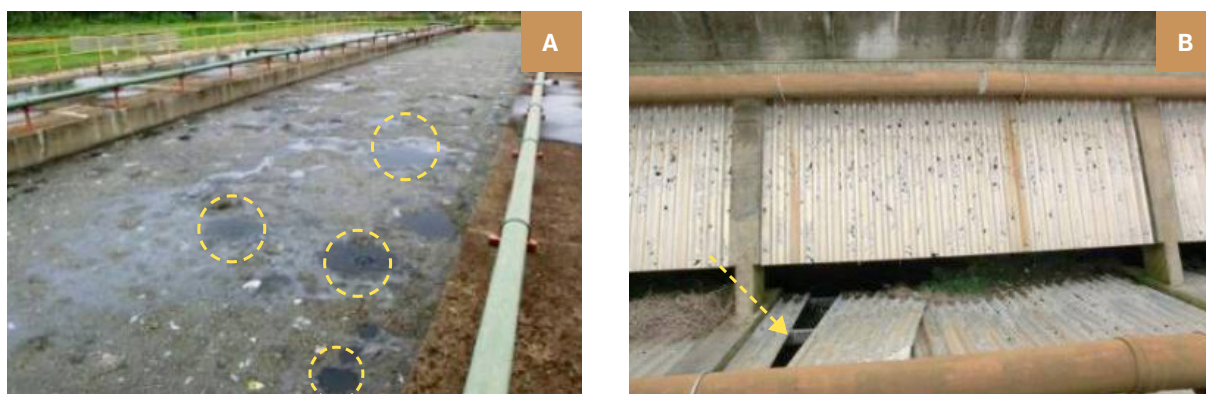
- » **Acesso:** verificação do acesso viário dos aspectos de segurança no entorno da ETE, bem como a proximidade aos centros urbanos;
- » **Vazão e carga orgânica:** verificação da aderência da vazão e carga orgânica de projeto à vazão e à carga orgânica atual;
- » **Existência de *by pass*:** verificação quanto à existência/realização de *by pass* de parte da vazão de entrada diretamente para o pós-tratamento, sem passar pelos reatores anaeróbios. Uma vez caracterizado, seria necessária a medição precisa da vazão derivada, de forma a caracterizar a vazão de entrada nos reatores anaeróbios.

### 2.1.2. Condições dos reatores anaeróbios

Para a avaliação das condições dos reatores anaeróbios, foram observados os seguintes critérios principais:

- >> **Vazão:** verificação da magnitude da influência sazonal associada à pluviometria, considerando tanto o aumento da vazão instantânea pelo evento pluviométrico quanto a duração deste regime;
- >> **Distribuição do esgoto:** verificação quanto à distribuição uniforme do esgoto entre os módulos de reatores anaeróbios, o que possibilitaria obter relações mais confiáveis entre a  $DQO_{removida}$  e a produção de biogás;
- >> **Remoção de espuma:** verificação da existência de procedimentos operacionais e remoção sistemática de espuma;
- >> **Fugas de gás:** verificação da existência de fugas/vazamentos significativos de biogás para a atmosfera, como exemplificado na Figura 2.

**Figura 2:** Exemplo das condições dos reatores anaeróbios, com visível fuga de gás. (a) Compartimento de decantação aberto, com destaque para a formação de bolhas de escape de biogás; (b) Separadores trifásicos rompidos.



**Fonte:** Rotária do Brasil [2014].

### 2.1.3. Condições para instalação dos equipamentos de medição

Nesse quesito, foram verificadas as condições para se instalarem os medidores de fase líquida e gasosa, incluindo as adaptações de infraestrutura necessárias para a adequada medição e os respectivos custos. Os critérios específicos para a escolha dos locais de instalação dos instrumentos (sonda *s::can* e sensor INCA 4002) encontram-se detalhados nas Notas Técnicas anexas a este Relatório.

## 2.2 ETEs selecionadas e principais características de projeto dos reatores anaeróbios

Em vista do atendimento aos critérios anteriormente elencados, foram selecionadas 10 (dez) estações de tratamento de esgoto nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste do Brasil, pertencentes às seguintes prestadoras de serviço: Grupo Águas do Brasil, CAESB, COPASA, SAAE Itabira, SABESP, SANASA, SANEPAR, SANESUL e SEMAE São José do Rio Preto. Cabe destacar que o nome das ETEs não foi divulgado para preservar o anonimato das informações.

As estações escolhidas e seus respectivos dados de referência estão listados na Tabela 1, sendo sua localização apresentada na Figura 3. As medições da fase líquida e da gasosa iniciaram-se na primeira ETE, no mês de novembro de 2014, e, na última delas, em março de 2015.

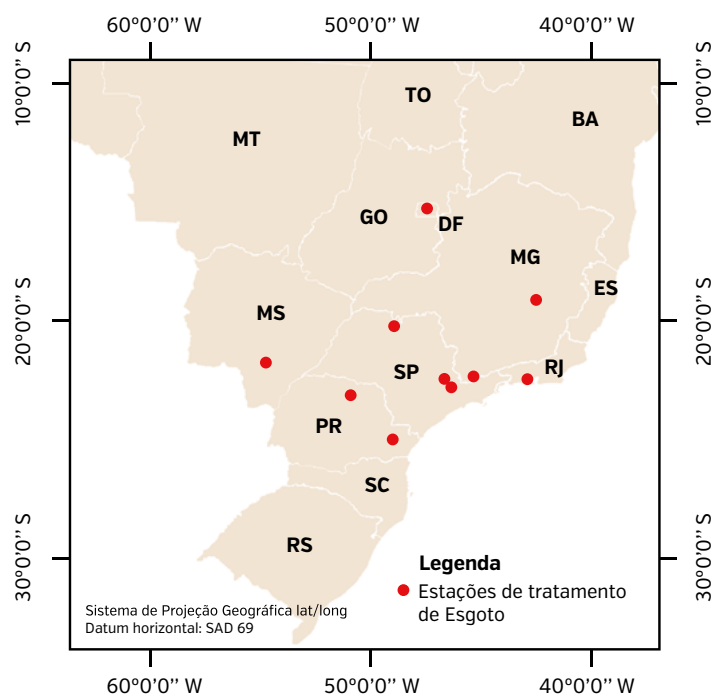
**Tabela 1:** Estações participantes do Projeto Medições.

NOME DA ETE	PE (HAB.)	VAZÃO DE PROJETO (L/s)	TECNOLOGIA <sup>1</sup>
ETE A	198.000	310	UASB + Lagoa aerada
ETE B	207.000	316	RALF + FBP
ETE C	64.800	90	RALF + FBP
ETE D	100.000	90	UASB + LAT
ETE E	200.000	300	UASB + LA
ETE F	250.000	400	UASB + LA
ETE G	664.200	1080	UASB + LA
ETE H	90.000	85	UASB + FBP
ETE I	92.250	150	UASB + FBP
ETE J	48.600	90	UASB + LA

<sup>1</sup>LA = Lodos ativados; FBP = Filtro biológico percolador; LAT= Lagoa de alta taxa.

Fonte: Autores [2016].

**Figura 3:** Mapa com as ETEs participantes do Projeto Medições.



Fonte: Autores [2016].

As principais características de projeto dos reatores investigados são sintetizadas na Tabela 2 e na Tabela 3. Como se poderia pressupor, alguns dos reatores tipo RALF ou UASB modificado apresentam divergências em relação aos valores recomendados pela literatura, sobretudo em relação à área de influência dos tubos de distribuição e à inexistência de defletor de gases. Quanto à primeira, poderia implicar em menor produção de biogás, visto existir a possibilidade de menor contato entre o substrato e a biomassa. Em relação à segunda, poderia haver prejuízo com relação à separação da fase gasosa, com perdas de biogás para o compartimento de decantação.



**Tabela 2:** Principais características de projeto dos reatores anaeróbios investigados.

		CRITÉRIO/PARÂMETRO									
		DISTRIBUIÇÃO DO AFLUENTE					COLETA DO EFLUENTE				
VOLUME DO REATOR (m³)	DIÂMETRO DO TUBO DE DISTRIBUIÇÃO (mm)	DISTÂNCIA ENTRE O BOCAL DE SAÍDA E O FUNDO DO REATOR (m)		ÁREA DE INFLUÊNCIA DE CADA TUBO DE DISTRIBUIÇÃO (m²)		SUBMERGÊNCIA DO TUBO DE COLETA DO EFLUENTE (m)					
		PROJETO	LITERATURA <sup>a</sup>	PROJETO	LITERATURA <sup>a</sup>	PROJETO	LITERATURA <sup>a</sup>	PROJETO	LITERATURA <sup>a</sup>	PROJETO	LITERATURA <sup>a</sup>
ETE A <sup>c</sup>	1.998	75		0,30		5,0		0,35			
ETE B <sup>b</sup>	2.980	50		0,10		4,1		0,62			
ETE C <sup>b</sup>	1.239	75		0,10		1,3		0,45			
ETE D <sup>c</sup>	1.158	200		0,15		2,0		0,25			
ETE E	3.046	75		0,20		2,6		0,30		0,20 a 0,30	
ETE F	686	75	75 a 100	0,20	0,10 a 0,20	3,1		0,2			
ETE G	2.940	85		0,30		3,1		0,17			
ETE H	605	50		0,15		2,4		0,17			
ETE I	551	75		0,20		3,1		0,35			
ETE J	3528	60				2,4		0,15			

<sup>a</sup>Chernicharo (2007), NBR 12209 (ABNT, 2011); <sup>b</sup>Reator tipo RALF; <sup>c</sup>Reator tipo UASB modificado.

Fonte: Autores (2016).

**Tabela 3:** Principais características de projeto dos reatores anaeróbios investigados (Continuação).

CRITÉRIO/PARÂMETRO													
COMPARTIMENTO DE DECANTAÇÃO													
VOLUME DO REATOR (M <sup>3</sup> )	PROFUNDIDADE DO COMPARTIMENTO DE DECANTAÇÃO (m) (Hd)		TRESPASSE DOS DEFEITORES DE GASES, EM RELAÇÃO À ABERTURA PARA O DECANTEADOR (m)		ALTURA ÚTIL DO REATOR (m) (Hútil)		RELAÇÃO $\frac{H_d}{H_{útil}}$ (m)		INCLINAÇÃO DAS PAREDES DO DECANTEADOR (°)		LARGURA DA CÂMARA DE GÁS DO SEPARADOR TRIFÁSICO (m)		TAXA DE LIBERAÇÃO DE GÁS (m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> ) <sup>c</sup>
	PROJETO	LITERATURA <sup>a</sup>	PROJETO	LITERATURA <sup>a</sup>	PROJETO	LITERATURA <sup>a</sup>	PROJETO	LITERATURA <sup>a</sup>	PROJETO	LITERATURA <sup>a</sup>	PROJETO	LITERATURA <sup>a,b</sup>	PROJETO
ETE A <sup>d</sup>	1,7	≥ 1,50	0,10	0,10 a 0,20	4,6	4,0 a 6,0	0,4	-	50	≥ 50	0,50	0,25	0,091
ETE B <sup>d</sup>	3,5				5,6		0,6		60		6,20f		0,010
ETE C <sup>d</sup>	1,95				6,0		0,3		56		5,00f		0,037
ETE D <sup>e</sup>	2,0				5,2		0,4		38		1,50		0,270
ETE E	3,046		0,15		6,3		0,3		57		0,80		0,051
ETE F	686		0,31		5,6		0,3		62		0,35		0,171
ETE G	2,940		0,20		5,0		0,3		50		0,50		0,219
ETE H	605		0,19		4,5		0,4		54		0,50		0,032
ETE I	551		0,15		5,0		0,7		45		4,1		0,000
ETE J	3528		0,23		7,3		0,2		59		0,70		0,094

<sup>a</sup>Chernicharo (2007), NBR 12209 (ABNT, 2011); <sup>b</sup>Largura mínima recomendada; <sup>c</sup>Calculada com a vazão mediana de biogás (item 3.2.2.1);

<sup>d</sup>Reator tipo RALF; <sup>e</sup>Reator tipo UASB modificado; <sup>f</sup>Raio (câmara circular).

Fonte: Autores (2016).

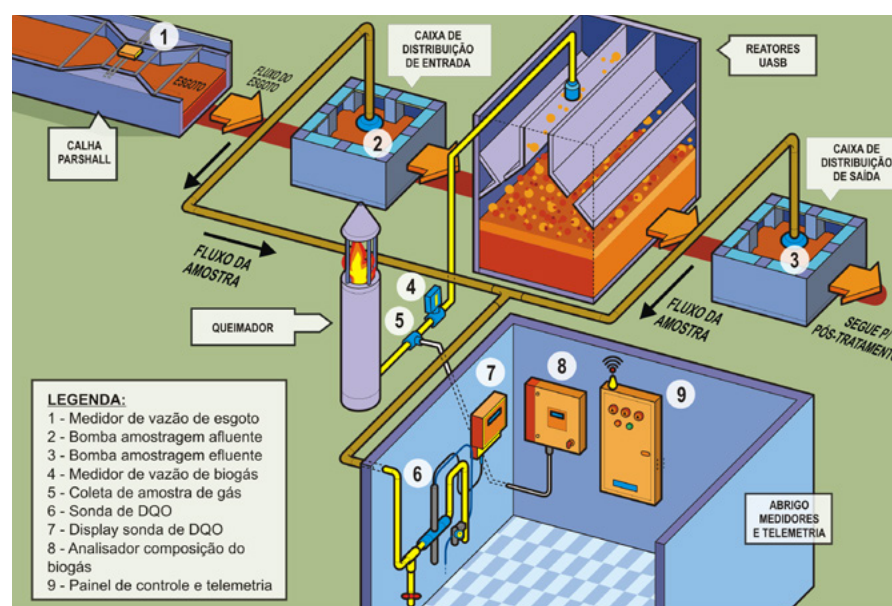
## 2.3 Quantificação dos parâmetros associados à produção e à composição do biogás

Para que fosse possível a caracterização das fases líquida e gasosa de cada reator anaeróbio monitorado, foram utilizados os seguintes instrumentos:

- >> Medidor ultrassônico da vazão de esgoto instalado na Calha *Parshall*;
- >> Sonda medidora das concentrações de  $DQO_{total}$  e  $DQO_{filtrada}$ , instalada em um ponto central para receber esgoto bruto e efluente dos reatores anaeróbios, alternadamente;
- >> Medidor de vazão de biogás tipo vórtex, instalado na linha de coleta do biogás para queima;
- >> Medidor de composição do biogás, por meio de equipamento de medição dos teores de  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$  e  $O_2$ , recebendo amostras de biogás coletado da linha do queimador.

A seguir, pode-se visualizar a conformação geral dos equipamentos instalados nas ETEs (Figura 4). Salienta-se que houve variações e adaptações de acordo com as características ou necessidades específicas de cada estação.

**Figura 4:** Desenho esquemático da configuração geral dos medidores instalados nas ETEs.



Fonte: Cabral [2016].

### 2.3.1. Caracterização da fase líquida dos reatores anaeróbios investigados

#### 2.3.1.1. Vazão de esgoto afluente

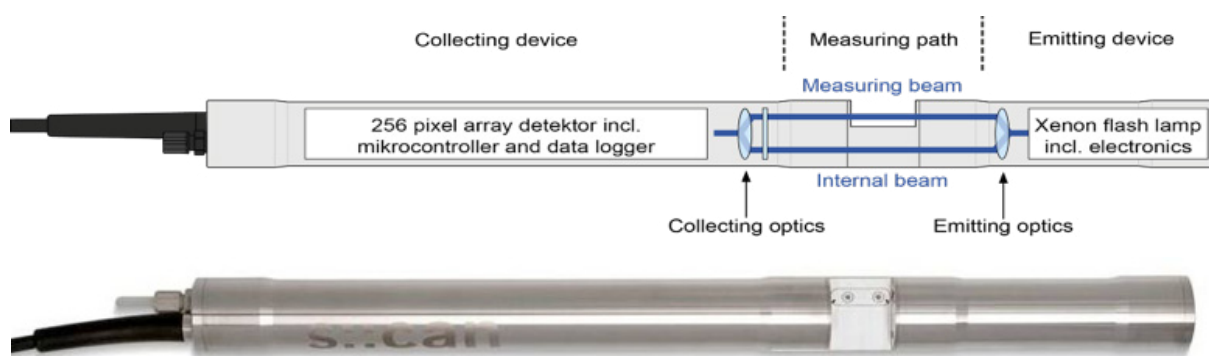
A maioria das ETEs investigadas já dispunha de medidor de vazão de esgoto instalado na Calha *Parshall*, na entrada da estação. Nesse caso, foi necessária somente a conexão do sinal do medidor ao sistema de telemetria (ver item 2.3.5). Para as estações que não possuíam o equipamento instalado ou havia *by pass* de parte do esgoto sem medição, um medidor de nível foi disponibilizado pelo Projeto de Medições. Cabe ressaltar que, para a ETE D, foi mensurada a vazão afluente a um reator, sendo a vazão total determinada a partir da multiplicação pelo número de reatores existentes, a saber: três reatores.

### 2.3.1.2. Concentração e eficiência de remoção de DQO

O sistema de medição *online* da concentração de matéria orgânica, via determinação da demanda química de oxigênio (DQO), era composto por sonda e unidade controladora, da marca *s::can* – modelo *Carbolysers*. O equipamento tem sensibilidade para detectar concentrações entre 100 e 3.250 mg<sub>DQO</sub>/L, por meio de medição ótica (espectrometria) da absorbância ao longo do espectro ultravioleta (UV) e luz visível (VIS).

Os detalhes associados à tecnologia, ao princípio de medição, às experiências de trabalho e às medidas de manutenção encontram-se pormenorizados na Nota Técnica que segue em anexo a este Relatório. Em síntese, a sonda emite um feixe de luz (*emitting device*) cuja redução de intensidade, após o contato com o meio, é medida por um detector (*collecting device*) ao longo de uma gama de comprimentos de onda. Para o cálculo da DQO<sub>total</sub>, por exemplo, a absorbância é verificada ao longo do comprimento de onda entre 250 e 370 nm do espectro eletromagnético. A Figura 5 ilustra esquematicamente o funcionamento da sonda.

**Figura 5:** Ilustração esquemática da sonda *s::can* para medição de DQO.



Fonte: *s::can* [2015].

A medição ocorria *in situ*, sem necessidade de tratamento da amostra, minimizando erros de medição tipicamente associados a: amostragem, transporte, armazenamento, diluição da amostra, etc. O equipamento utilizava ainda um sistema de autolimpeza via ar pressurizado, objetivando impedir o acúmulo de sujeira no sensor de leitura.

Cabe destacar que, em virtude do elevado custo de aquisição da sonda, efetuou-se a medição do afluente e efluente utilizando-se um único equipamento. Para tanto, a alternância era realizada por meio de bombas automatizadas, acionadas de 15 em 15 minutos. Os detalhes desta operação estão caracterizados na Nota Técnica em anexo a este Relatório.

*Optou-se por mensurar as concentrações de DQO<sub>total</sub> afluente e DQO<sub>filtrada</sub> efluente, para se caracterizar efetivamente a carga orgânica removida passível de conversão a metano. Com esta configuração, exclui-se a interferência de sólidos (DQO<sub>particulada</sub>) provenientes, por exemplo, de eventos de perda de lodo em função de sobrecargas hidráulicas. Logo, os dados de DQO<sub>filtrada</sub> presentes neste Relatório não devem ser interpretados como indicadores da qualidade final do efluente. Enfatiza-se que as eficiências de remoção reportadas devem ser entendidas como cargas orgânicas potencialmente transformadas em metano.*

Torna-se fundamental ressaltar que, inicialmente, as sondas de DQO apresentaram um problema de fabricação e tiveram de ser enviadas ao fornecedor para troca, o que atrasou a coleta de dados em tempo real. Complementarmente, os conjuntos moto-bomba utilizados para amostragem queimaram repetidas vezes, o que também acarretou em períodos sem medição do parâmetro DQO. Adicionalmente, durante a maior parte do período em que operaram, as sondas implantadas registraram valores diferentes daqueles detectados em análises laboratoriais. Ainda que dotadas do referido sistema de autolimpeza, notava-se acúmulo de sujeira no sensor de leitura, ocasionando um aumento gradual dos valores de DQO, denominados *drifts*. Ademais, o procedimento de calibração indicado no início do projeto pelo fabricante não se mostrou adequado para as ETEs em questão. Somente para as ETEs A e C foi possível selecionar pequenos períodos de dados confiáveis provenientes do equipamento. Todas as experiências referentes ao uso e calibração da sonda para medições em esgoto bruto e efluente de reatores UASB estão consolidadas na Nota Técnica em anexo a este Relatório.

Posto isso, tem-se que os dados de DQO utilizados no presente Relatório referem-se às análises laboratoriais realizadas a partir de amostragens simples e compostas, enviadas pelas prestadoras de serviço.

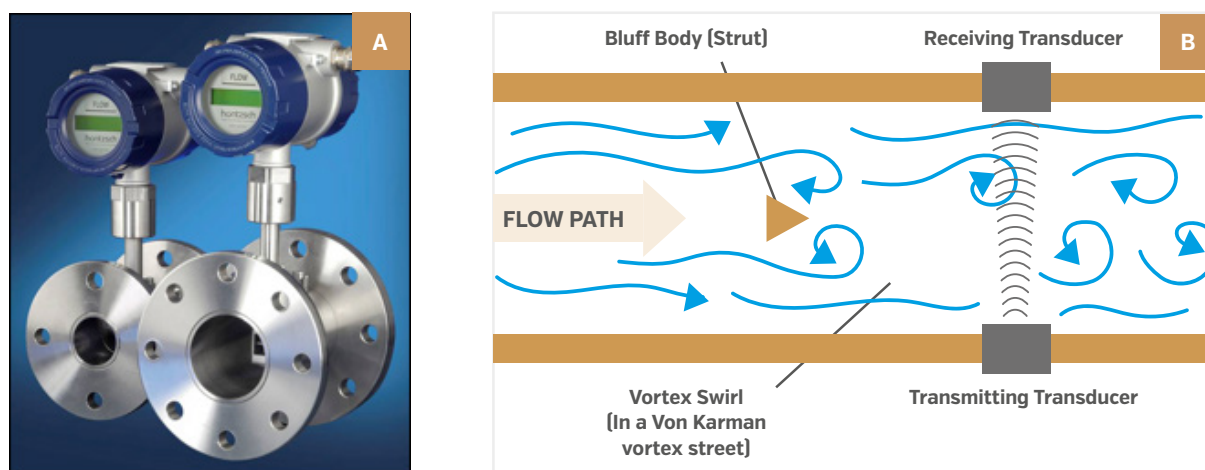
### 2.3.2. Caracterização da fase gasosa dos reatores anaeróbios investigados

#### 2.3.2.1. Vazão de biogás

Para caracterização da vazão de biogás, foi utilizado um sistema composto por unidade de medição de vazão tipo vórtex (marca Höntzsch), com medição de temperatura e pressão.

Em relação ao princípio de funcionamento do equipamento, tem-se que, quando fluidos passam através de uma restrição introduzida em um duto, vórtices são formados pelos lados. A frequência do vórtice é proporcional ao fluxo médio e, desta forma, ao fluxo volumétrico. Sensores capacitivos são colocados dentro do duto, protegidos contra choques, temperatura e desgaste pela passagem do fluido. Tais sensores, por sua vez, detectam os pulsos de pressão causados pelos vórtices e os convertem em pulsos elétricos (Figura 6a e 6b).

**Figura 6:** Medidores de vazão de biogás. [a] Exemplo de medidor tipo vórtex; [b] Esquema demonstrativo do princípio de medição.



Fonte: Höntzsch [2014].

Ressalta-se que, na linha de gás (ver Figura 4), a jusante do medidor de vazão, foram instalados medidores de pressão e de temperatura do gás, para que fosse possível calcular a vazão normalizada. Para tanto, foi utilizada a Equação 1:

#### Equação 1

$$Q_N = \frac{Q_{GAS} * P_{GAS} * T_N}{T * P_N}$$

Sendo:

- >>  $Q_N$  = Vazão normalizada (Nm<sup>3</sup>/h)
- >>  $Q_{GAS}$  = Vazão de gás no medidor (m<sup>3</sup>/h)
- >>  $P_{GAS}$  = Pressão na linha de gás (sobrepessão + pressão atmosférica) (mbar)
- >>  $T_N$  = Temperatura normal (273 K)
- >>  $T$  = Temperatura do gás (K)
- >>  $P_N$  = Pressão normal (1013,25 mbar)

Cabe informar que todas as ETEs investigadas operaram com mais de um reator UASB, porém nem sempre foi possível instalar o medidor de vazão em um ponto após a unificação das tubulações de biogás. Para estes casos, mediu-se a vazão de biogás proveniente de um reator, sendo necessário multiplicá-la pelo número de reatores existentes para a obtenção da vazão total, conforme realizado para a ETE A (fator 2), ETE D (fator 3), ETE E (fator 4) e ETE G (fator 12).

#### 2.3.2.2. Composição do biogás

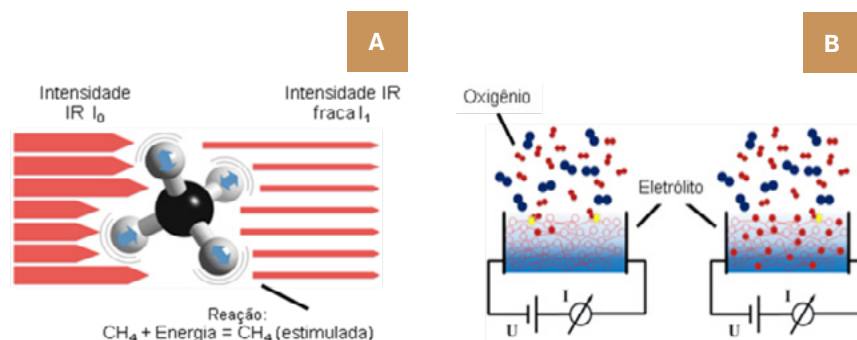
Para a medição da composição do biogás (análise qualitativa), foi utilizado um analisador fixo de gases da fabricante *Union Instruments* (modelo Inca 4002), capaz de mensurar os seguintes componentes do biogás: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S.

O princípio de funcionamento do equipamento, as informações quanto a sua calibração e as experiências com a operação encontram-se consolidadas na Nota Técnica em anexo a este Relatório. Em síntese, as concentrações de metano e dióxido de carbono são detectadas por sensores de infravermelho não dispersivo (NDIR). Esta tecnologia utiliza as propriedades dos gases de absorver radiação no comprimento de onda infravermelho (Figura 7a). A unidade NDIR consiste em filtros que selecionam uma radiação do espectro eletromagnético representativa do comportamento típico de absorção do gás (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, no caso). Tal radiação passa por uma célula de medição com o gás da amostra, sendo que a atenuação decorrente deste processo indica o grau de concentração do gás.

Por sua vez, as concentrações de oxigênio e sulfeto de hidrogênio são mensuradas em uma célula eletrolítica do equipamento. Ela consiste em dois eletrodos que agem cataliticamente, conectados por um meio condutor de eletricidade (eletrólito) e um circuito (Figura 7b). Na borda do eletrodo, ocorre uma reação entre o gás e o eletrólito, gerando uma corrente elétrica cuja amperagem indica a concentração do gás (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, no caso).



**Figura 7:** Princípio de funcionamento dos sensores. [a] Infravermelho Não Dispersivo (medição de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>); [b] Eletroquímicos (medição de H<sub>2</sub>S e O<sub>2</sub>).



Fonte: UNION (2014).

**Tabela 4:** Métodos e faixa de medição para cada componente medido.

A Tabela 4 apresenta os métodos e as faixas de medição para cada componente do biogás.

COMPONENTE MEDIDO	MÉTODO DE MEDIÇÃO	FAIXA DE MEDIÇÃO	PRECISÃO	CICLO DE MEDIÇÃO
CH <sub>4</sub>	Infravermelho	0-100 Vol.-%	+/- 1 % MBE	Descontínuo
H <sub>2</sub> S	Eletroquímico	0-10.000 ppm	+/- 3 ppm (≤ 25 ppm)	Descontínuo
O <sub>2</sub>	Eletroquímico	0-25 Vol.-%	+/- 3 % MW	Descontínuo
CO <sub>2</sub>	Infravermelho	0-100 Vol.-%	+/- 1 % MBE	Descontínuo

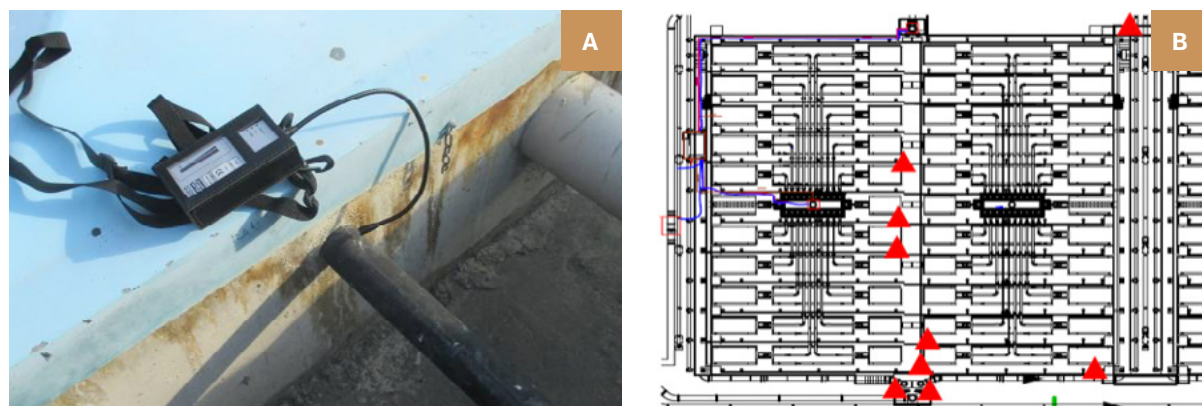
Fonte: adaptado de UNION (2014).

### 2.3.2.3. Detecção de vazamentos nos reatores anaeróbios

**Figura 8:** Detecção dos principais pontos de vazamento nos reatores anaeróbios. [a] Detector de metano; [b] Exemplo de desenho com os pontos detectados (em vermelho).

Em todas as ETEs integrantes do Projeto de Medições, foram realizadas investigações para a detecção de vazamentos de gás nos reatores anaeróbios (Figura 8a). Os pontos mais significativos foram mapeados, conforme exemplificado na Figura 8b.

Destaca-se que essa análise foi somente qualitativa, sem quantificação da vazão fugitiva de biogás. Todavia, os resultados são utilizados neste Relatório (item 3.2) para corroborar as argumentações acerca do potencial de aproveitamento energético dos reatores UASB/RALF tratando esgoto doméstico.

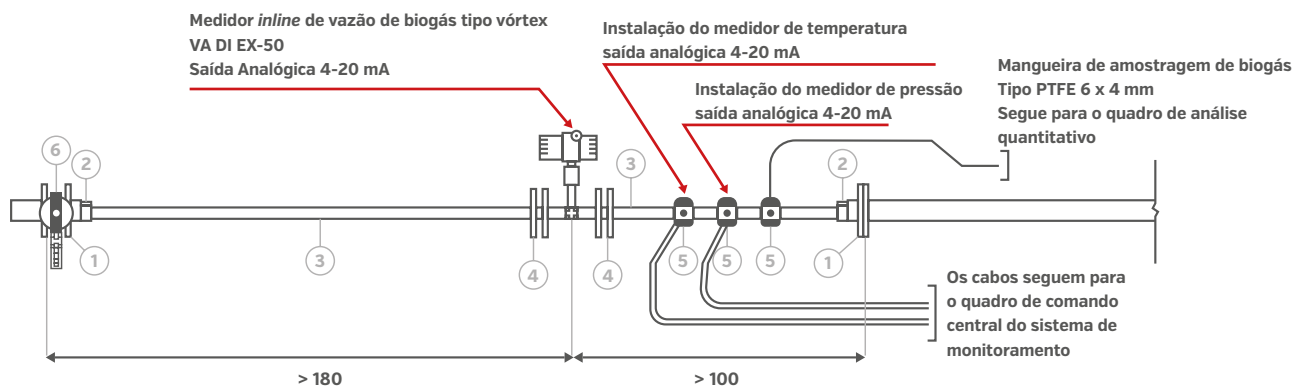


Fonte: Rotária do Brasil (2015).



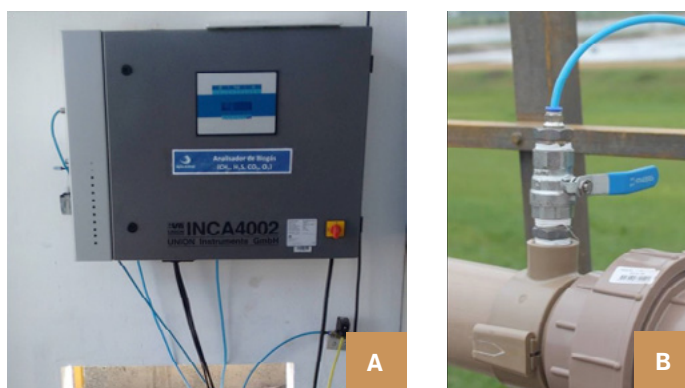


**Figura 10:** Recorte do desenho de projeto para instalação do medidor de vazão e do ponto de coleta de amostras de biogás.



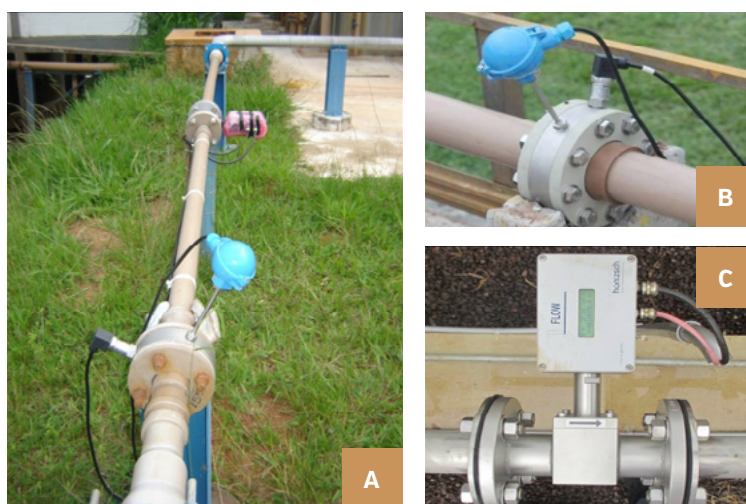
Fonte: Rotária do Brasil [2014].

**Figura 11:** Medição da  
composição de biogás. (a)  
Quadro de medição da Union  
(INCA 4002); (b) Ponto de  
coleta das amostras.



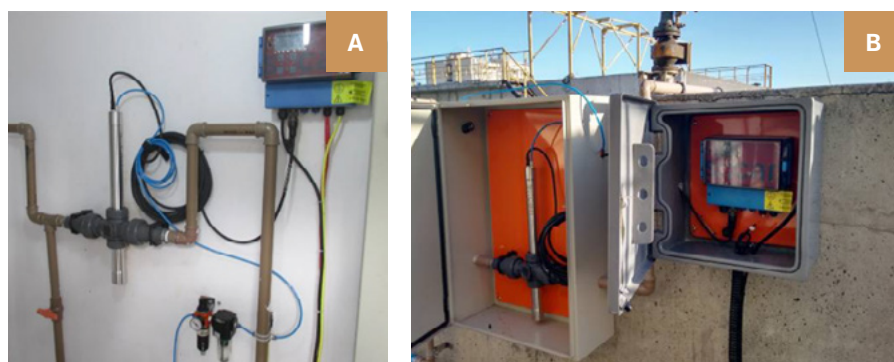
Fonte: Rotária do Brasil [2015].

**Figura 12:** Medição da  
vazão de biogás. (a) Linha  
de gás com os medidores;  
(b) Flange com medidor de  
pressão e temperatura;  
(c) Medidor de vazão.



Fonte: Rotária do Brasil [2015].

**Figura 13:** Medição da DQO – sonda e controlador. (a) Instalação dentro da casa de operação; (b) Instalação ao ar livre com caixa de proteção.



Fonte: Rotária do Brasil (2015).

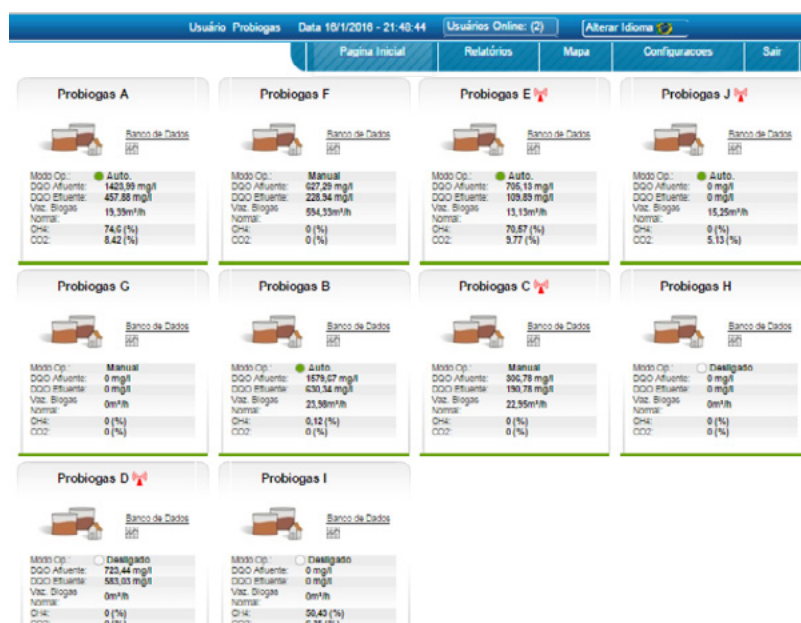
Uma vez instalados os equipamentos, além do monitoramento *online* dos valores transmitidos, conforme caracterizado adiante (item 2.3.6), era realizado paralelamente o acompanhamento *in loco* pelas prestadoras de serviço.

É importante observar que o ponto de captação das bombas, nas caixas de distribuição de vazão das ETEs, por vezes se encontrava em cota acima do analisador de DQO, o que poderia ocasionar a formação de efeito sifão, acarretando na mistura das correntes líquidas (afluente e efluente) no momento da análise. Por meio da instalação de pontos de alívio de pressão em partes altas das linhas de coleta, era possível interromper tal fenômeno. Alternativamente, algumas prestadoras optaram pela instalação de válvulas solenoides ou válvulas operadas pneumaticamente, de modo a isolar uma das linhas de coleta para análise.

### 2.3.5. Transmissão dos dados

Um sistema de telemetria com sinal GPRS (*General Packet Radio Service*) foi instalado em todas as estações de tratamento monitoradas. Os dados eram transmitidos a cada 5 minutos por um módulo de comunicação, ficando armazenados em um banco de dados *online* ([www.komvex-scada.com](http://www.komvex-scada.com)), apresentado na Figura 14.

**Figura 14:** Banco de dados online com monitoramento das 10 ETES.



**Tabela 5:** Dados recebidos durante uma hora de medição na ETE C.

A Tabela 5 corresponde à extração de dados do período de uma hora de medições na ETE C, objetivando exemplificar a frequência das leituras e a transmissão dos dados brutos.

13.03.2015 HORA	Q <sub>ESG</sub> (L/s)	DQO A (mg/L)	DQO E (mg/L)	Q <sub>BIOGÁS</sub> (m <sup>3</sup> /h)	T (°C)	P (mbar)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	O <sub>2</sub> (%)
22:37	78,9	682,2	261,0	26,4	34,1	974,4	82,4	9,5	1636,1	0,0
22:42	77,5	682,2	256,4	26,4	34,1	975,1	82,4	9,5	1636,1	0,0
22:47	70,8	641,0	256,4	25,9	34,1	974,4	82,4	9,5	1623,9	0,0
22:52	73,5	686,8	256,4	25,9	34,1	974,4	82,4	9,5	1623,9	0,0
22:57	62,7	700,6	256,4	25,9	34,1	974,4	82,4	9,5	1623,9	0,0
23:02	71,8	700,6	257,9	25,6	34,1	974,4	82,4	9,7	1636,1	0,0
23:07	64,1	700,6	256,4	25,4	34,1	974,4	82,4	9,7	1636,1	0,0
23:12	65,4	700,6	247,3	25,4	34,1	974,4	82,4	9,7	1636,1	0,0
23:17	57,0	641,0	247,3	24,9	34,3	974,4	82,4	9,4	1538,5	0,0
23:22	59,8	631,9	247,3	24,3	34,3	973,6	82,4	9,4	1575,1	0,0
23:27	71,1	618,1	247,3	24,6	34,3	974,4	82,4	9,4	1575,1	0,0
23:32	66,5	618,1	239,6	23,6	34,3	974,4	82,4	9,4	1575,1	0,0
23:37	65,4	618,1	236,6	23,6	34,3	974,4	82,4	9,5	1562,9	0,0
23:42	58,7	618,1	225,9	23,6	34,3	975,1	82,4	9,5	1562,9	0,0
23:47	60,0	613,6	225,9	23,0	34,3	975,1	82,4	9,5	1562,9	0,0

Fonte: Cabral [2016].

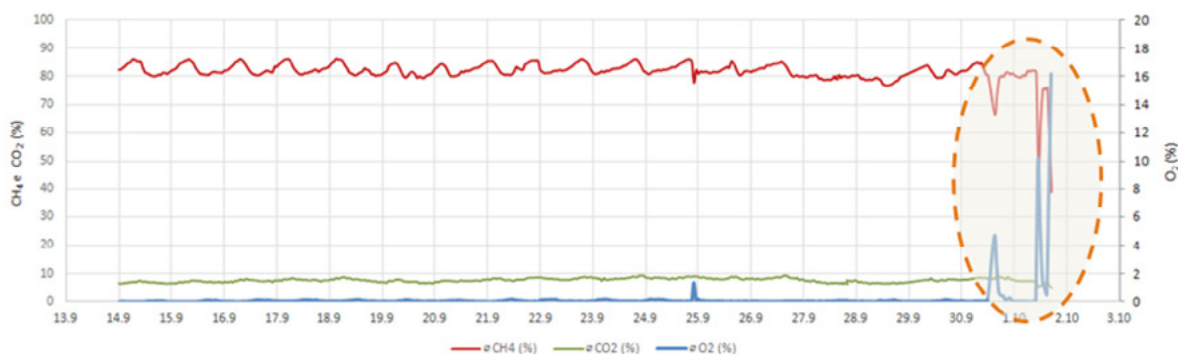
Hoffmann (2016) fez uma análise da confiabilidade da transmissão dos dados, comparando os valores mostrados no visor dos equipamentos àqueles disponíveis no banco de dados *online*, para um mesmo período. Concluiu-se que não havia diferença entre os dados da telemetria e aqueles efetivamente lidos *in loco*.

As prestadoras de serviço que integraram o Projeto Medições ficaram responsáveis pelo monitoramento dos equipamentos e por informar a existência de mensagens de erro ou não conformidades nos aparelhos. Os operadores foram instruídos sobre os procedimentos que deveriam ser tomados para a solução de diferentes tipos de problemas previstos nos manuais dos instrumentos. Na eventualidade de troca de componentes dos medidores, o fornecedor era contatado para a reposição.

Adicionalmente, as prestadoras foram instruídas a enviar semanalmente o resultado de suas análises laboratoriais, bem como comunicar atividades operacionais relevantes, como a retirada de lodo ou espuma. Dessa forma, foi possível comparar os valores de laboratório com aqueles provenientes da medição *online*, a fim de garantir o adequado funcionamento e calibração dos equipamentos.

As rotinas operacionais das ETES investigadas foram utilizadas para auxílio na interpretação dos dados e discussão de resultados. A título de exemplo, na Figura 15, é possível visualizar o efeito da retirada de espuma em uma das estações, sem o isolamento da linha de gás, proporcionando a entrada de ar na tubulação de coleta de biogás.

**Figura 15:** Efeito da entrada de ar na tubulação de coleta devido a um procedimento operacional.



**Fonte:** Autores [2016].

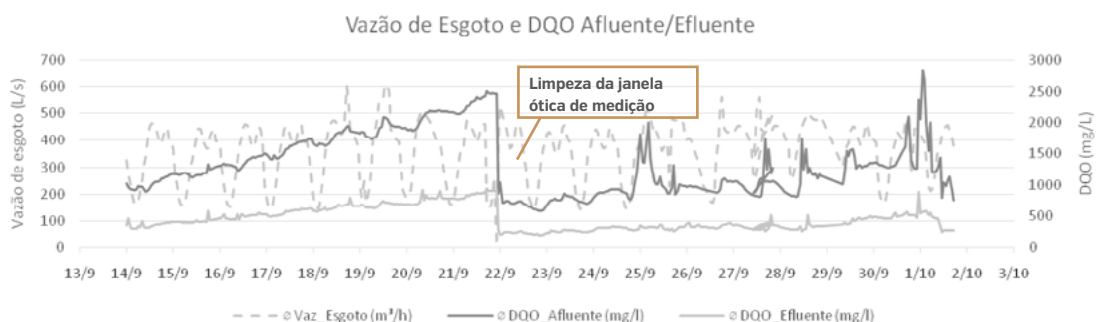
Pode-se observar, na área destacada (Figura 15), que os valores de metano baixaram para cerca de 40 – 50% e a concentração de oxigênio alcançou 16%, em vista da citada entrada de ar na tubulação. Esse é um exemplo de episódio em que os valores foram excluídos da análise das taxas de produção de biogás e relações unitárias.

Conforme destacado anteriormente, as sondas de DQO tiveram de ser enviadas ao fornecedor para troca, o que atrasou a coleta de dados de DQO em tempo real. Das ETEs investigadas, cinco receberam a sonda de DQO, após os reparos, somente em dezembro de 2015. Além disso, os problemas apresentados pelos conjuntos moto-bomba utilizados para a coleta e transporte de amostras líquidas até a sonda também acarretaram períodos significativos sem medição de DQO.

Em complemento, o eventual acúmulo de sujeira nas sondas, em vista de limpezas manuais menos sistemáticas, ocasionou o surgimento de *drifts* na leitura de dados em algumas estações. Entende-se por *drift* a transição lenta das concentrações medidas causada pela contaminação das janelas de medição ótica, conforme exemplificado na Figura 16 (período entre 13/09 e 22/09). A descrição detalhada deste processo encontra-se na Nota Técnica anexa a este Relatório.

**Figura 16:** Exemplo de período com *drift* dos valores de DQO devido ao acúmulo de sujeira na sonda.

Cabe ressaltar que os picos de DQO, devido ao acúmulo momentâneo de sujeira na sonda, foram excluídos da análise dos dados.



**Fonte:** Autores [2016].

### *2.3.6. Análise dos dados: principais aspectos*

Dos dados brutos, sempre que possível, foram extraídos os períodos mais confiáveis e de maior estabilidade nas medições, por exemplo, aqueles após a limpeza e a calibração dos equipamentos de medição. O conjunto de dados foi analisado sistematicamente para identificar *outliers* a serem descartados, em vista de suspeita acerca da confiabilidade experimental de algum dado. Para tanto, empregou-se a metodologia de análises *interquartis* (TRIOLA, 2008) concomitantemente à interpretação individual de cada valor apontado como *outlier*.

Em alguns casos, ainda que com poucos dados confiáveis para alguns parâmetros, optou-se por utilizá-los, tendo ciência do aumento da incerteza dos valores. Tal situação refere-se especificamente aos dados de composição do biogás, quando não executada a calibração do equipamento. Os períodos selecionados para a análise dos dados encontram-se caracterizados na Tabela 6.

*Dentre as ETEs selecionadas, foram analisados os períodos de maior acurácia, plausibilidade e confiabilidade dos dados, sendo que estes constituíram o universo amostral de pesquisa.*







Na Tabela 7, expõe-se a síntese das análises estatísticas realizadas. Os testes estatísticos foram executados com o auxílio do *software Statistica 10*. A seleção de testes não paramétricos associa-se ao comportamento assimétrico dos dados (CALLEGARI-JACQUES, 2003), verificado por meio de análise de distribuição de frequências.

**Tabela 7:** Síntese das análises estatísticas realizadas.

ETAPAS	DESCRIÇÃO	METODOLOGIA
<b>Primeira etapa</b>	Estatística descritiva	Gráficos de <i>Box e Whisker</i> ( <i>box-plot</i> ), séries temporais e gráficos de dispersão
<b>Segunda etapa</b>	Testes de hipóteses <sup>a</sup>	Não paramétrico: Teste U de Mann-Whitney e Teste de Kruskal-Wallis
	Relação entre variáveis <sup>a</sup>	Coefficiente de correlação para postos de Spearman
<b>Terceira etapa</b>	Análise multivariada	Análise de componentes principais

<sup>a</sup> = Os testes de hipóteses e a relação entre variáveis foram realizados com nível de confiança de 95 % ( $\alpha = 0,05$ ).

**Fonte:** Autores [2016].

Caracterizou-se, por meio de estatística descritiva (Primeira etapa – Tabela 7), o comportamento global dos dados das ETEs investigadas quanto aos parâmetros representativos da fase líquida e gasosa, a saber: vazão de esgoto, concentração de  $DQO_{total}$  afluente e  $DQO_{filtrada}$  efluente, vazão e composição do biogás. Estes parâmetros podem ser considerados como essenciais à caracterização do potencial de utilização energética do biogás de reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico. Testes de hipóteses e relação entre as referidas variáveis foram realizados (Segunda etapa – Tabela 7), com o intuito de inferir sobre padrões de produção de biogás.

Ressalta-se que não houve confiabilidade dos dados de caracterização das fases líquida e gasosa da ETE I, à exceção da composição do biogás, em vista de problemas associados tanto aos equipamentos de medição quanto à transmissão dos dados via telemetria. Por este motivo, os resultados associados à ETE I apresentados neste Relatório restringem-se apenas às análises qualitativas de biogás.

Analisou-se, complementarmente, o comportamento horário das vazões de esgoto e biogás durante períodos de aproximadamente uma semana, para todas as ETEs investigadas. Para as ETEs A e C, foi possível selecionar períodos de medição consistente das concentrações de  $DQO_{total}$  afluente e efluente, de modo a caracterizar o comportamento horário ao longo de períodos de uma semana.

Estas investigações permitiram analisar detalhadamente o comportamento da produção de biogás, considerando a carga orgânica removida (em termos de  $DQO_{total}$ ) e fatores de influência como pluviometria e temperatura para as ETEs A e C, em virtude da consistência dos dados obtidos.



As relações entre as principais variáveis interferentes na produção de biogás foram complementarmente exploradas por meio de estatística multivariada, via ferramenta de análise de componentes principais (Terceira etapa – Tabela 7). Em síntese, trata-se de um procedimento que utiliza uma transformação ortogonal para converter um conjunto de observações de variáveis (possivelmente correlacionadas) em conjuntos de valores de variáveis linearmente descorrelacionadas, denominados componentes principais. Após os dados serem devidamente padronizados, uma matriz de semelhança baseada em índices de correlação de *Pearson* é elaborada. A partir desta matriz, determinam-se os autovalores (valores próprios) e autovetores (vetores próprios), que são distribuídos num espaço multidimensional. As variáveis em estudo são, então, projetadas num espaço multidimensional, sem uma prévia hierarquia, baseando-se na covariância ou na correlação de suas características. Os dados são transformados para um novo sistema de coordenadas, de forma que a maior variância por qualquer projeção fica ao longo da primeira coordenada (chamado primeiro componente – CP1), a segunda maior variância fica ao longo da segunda coordenada (CP2), e assim por diante (MAC CONELL, 2015).

## 2.4 Estabelecimento das relações unitárias de produção de metano

A partir da seleção dos dados transmitidos, em concordância com os critérios anteriormente caracterizados, foram calculadas as seguintes relações unitárias associadas à produção de biogás nos reatores anaeróbios:

- >>  $NL CH_4/kg DQO_{removida}$
- >>  $NL CH_4/m^3$  esgoto tratado
- >>  $NL CH_4/hab.d$

O cálculo das relações unitárias anteriormente explicitadas foi executado somente para as ETEs em que houve o envio dos dados operacionais relativos às concentrações de  $DQO_{total}$  afluente e  $DQO_{filtrada}$  efluente. Tal procedimento ocorreu em virtude da baixa confiabilidade dos dados obtidos por meio da sonda *s::can*, associada aos problemas com calibração e limpeza, como caracterizado na Nota Técnica em anexo a este Relatório. Logo, não foi possível estabelecer as relações unitárias referentes à ETE I. Adicionalmente, não foi possível obter os valores de vazão de esgoto e de biogás para um mesmo período associado à ETE G, o que inviabilizou a determinação das relações unitárias para esta estação.

As relações unitárias obtidas foram comparadas com o modelo matemático proposto por Lobato *et al.* (2012), de forma a se verificar a aderência dos resultados às diferentes faixas de produção de biogás e energia estimadas pelo modelo. Por sua vez, a referida modelagem considera o balanço de massa da DQO para esclarecer o fluxo de matéria orgânica em reatores anaeróbios, considerando as seguintes parcelas: (i) parcela convertida em metano presente no biogás; (ii) parcela convertida em metano que escapa dissolvido no efluente e junto ao gás residual (perdas); (iii) parcela devida à redução de sulfato; (iv) parcela que é convertida em lodo; (v) parcela que permanece no efluente.

Isso posto, são considerados três cenários que acarretam em distintos potenciais de recuperação de metano, a saber: (i) Pior cenário; (ii) Cenário Típico e (iii) Melhor Cenário. O Pior Cenário, associado ao menor potencial energético, refere-se a sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato maiores ( $\approx 80$  mg/L), menor eficiência de remoção de DQO ( $\approx 60\%$ ) e maiores índices de perda de metano ( $\approx 34\%$ ). Em contraponto, o Melhor Cenário, em que o potencial energético é maior, refere-se a sistemas operando com esgoto mais concentrado, menores concentrações de sulfato ( $\approx 40$  mg/L), maior eficiência de remoção de DQO ( $\approx 70\%$ ) e menores índices de perda de metano ( $\approx 18\%$ ). O Cenário Típico é intermediário entre aqueles anteriormente descritos, referindo-se a sistemas operando com esgoto de concentração mediana, concentrações de sulfato da ordem de 60 mg/L, eficiências de remoção de DQO de aproximadamente 65% e índices de perda de metano em torno de 26%.

## 2.5 Estimativa do potencial de aproveitamento energético do biogás

O potencial de geração de energia elétrica foi estimado com base na vazão de metano, calculada multiplicando-se a vazão de biogás medida pela concentração média de metano de cada ETE. Assim, em vista poder calorífico inferior do  $\text{CH}_4$ , de aproximadamente 10 kWh/m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> (MORAN *et al.*, 2010), bem como da eficiência elétrica do conjunto motogerador, de cerca de 36% (BRASIL, 2015), foi possível obter a energia elétrica passível de ser gerada (Equação 2):

### Equação 2

$$P = Q_{\text{CH}_4} * \text{PCI}_{\text{CH}_4} * \eta_{\text{elétrico}}$$

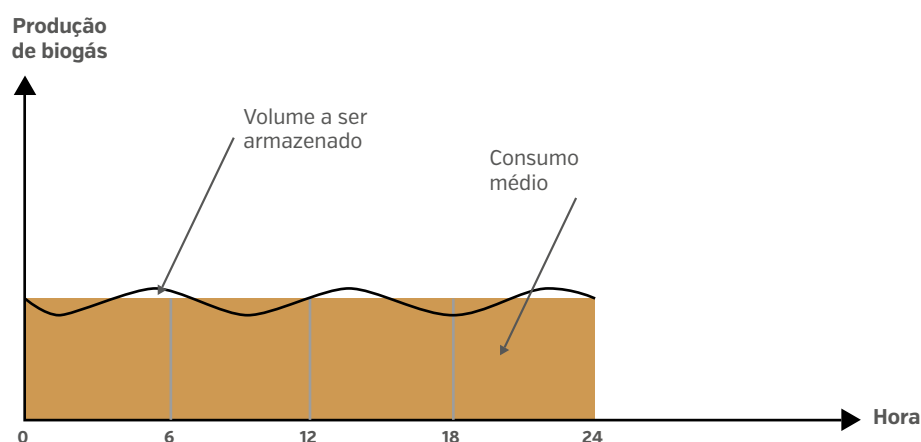
Sendo:

- >> P = potencial de geração de energia elétrica (kWh/d)
- >>  $Q_{\text{CH}_4}$  = vazão de metano (m<sup>3</sup>/d)
- >>  $\text{PCI}_{\text{CH}_4}$  = poder calorífico inferior do metano (10 kWh/m<sup>3</sup>)
- >>  $\eta_{\text{elétrico}}$  = eficiência elétrica do motogerador (36%)

Para se definir a potência elétrica do grupo motor-gerador, considerou-se uma utilização contínua (24 h). Para cada ETE, além da referida potência do motogerador para a respectiva quantidade de biogás coletada, estimou-se também o potencial de geração de energia adicional caso fossem realizadas melhorias nas instalações existentes, como correção de vazamentos. A estação com a maior taxa de produção de biogás por quilograma de DQO removida foi utilizada como referência passível de ser atingida pelas demais ETEs.

O dimensionamento do gasômetro foi realizado com base no gráfico de produção e consumo médio de biogás, conforme indicado no *Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto* (BRASIL, 2015) e na norma alemã DWA M 363 (2010). A Figura 17 exemplifica a metodologia de dimensionamento no caso de digestores anaeróbios de lodo com alimentação contínua, ou seja, com produção de biogás mais estável e maior equivalência com relação à demanda de consumo de biogás. Como a alimentação dos reatores UASB/RALF também é contínua, adotou-se a mesma metodologia.

**Figura 17:** Padrão de produção e consumo de biogás com alimentação e utilização contínua.



Fonte: DWA M 363 (2010).

## 2.6 Emissões de gases de efeito estufa decorrentes da perda de metano

O potencial de emissão de gases de efeito estufa (GEE) associado aos reatores anaeróbios investigados foi estimado em termos de toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ ), considerando: i) a densidade do metano de  $0.717 \text{ kg/m}^3$ ; e ii) o potencial de aquecimento global do metano como 28 vezes superior ao do  $\text{CO}_2$  (IPCC, 2014). A avaliação foi realizada somente para as ETes cujos dados de vazão de metano e carga removida de DQO foram sistematicamente coletados e confiáveis.

Para a caracterização do referido potencial, considerou-se que a diferença entre a quantidade de biogás mensurada nas ETes e a quantidade estimada via modelo matemático (Cenário Típico – LOBATO *et al.* 2012) é devida às perdas gasosas. Por sua vez, tais perdas podem estar associadas aos vazamentos de biogás para a atmosfera, provenientes de falhas na estanqueidade dos reatores e linhas de gás, bem como às emissões fugitivas de metano dissolvido na fase líquida e como gás residual.

Os valores encontrados foram extrapolados para o cenário nacional, considerando um levantamento do número de reatores do tipo UASB/RALF implantados nos estados mais populosos do Brasil (CHERNICHARO *et al.*, 2015). Os resultados foram então confrontados com as estimativas de *Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor de Resíduos* (SEEG, 2016).

# 3

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, primeiramente, são apresentadas as dificuldades encontradas durante o período de monitoramento. Em seguida, apresentam-se os resultados de monitoramento dos parâmetros associados à produção e à composição do biogás, com a respectiva discussão dos fatores interferentes. Sequencialmente, são apresentadas as relações unitárias de produção de biogás obtidas e a respectiva comparação com o modelo matemático de Lobato *et al.* (2012). Por último, são discutidos aspectos técnicos para o aproveitamento energético do biogás nas ETEs investigadas, bem como propostas melhorias para os reatores UASB, visando ao incremento da recuperação de biogás.

### 3.1 Dificuldades enfrentadas durante o projeto

Faz-se importante ressaltar que grandes desafios foram enfrentados em termos de logística, devido ao Projeto Medições contemplar estações de tratamento de esgoto implantadas em seis diferentes unidades federativas do país, de forma que, para visitá-las, percorreu-se cerca de 7.600 km rodoviários.

Adicionalmente, foram utilizados equipamentos importados e inovadores para as condições tipicamente empregadas no país para o monitoramento de ETEs. A seguir, descrevem-se brevemente as principais dificuldades para obtenção de dados confiáveis para cada um dos parâmetros investigados. Para aqueles que demandaram uma elucidação mais extensa, a saber, sonda *s::can* e analisador *INCA 4002*, uma descrição específica foi realizada nas Notas Técnicas que seguem em anexo a este Relatório.

#### 3.1.1. Caracterização da vazão de esgoto afluente

Para a maioria das ETEs investigadas, poucos foram os problemas associados à medição online da vazão de esgoto. Em alguns momentos, houve falha no módulo de telemetria, em vista dos seguintes fatores: *i)* falta de sinal da operadora de telefonia; *ii)* danos na placa analógica ou no modem interno, por vezes em consequência de eventos pluviométricos extremos. Nestes casos, os valores transmitidos não eram confiáveis, tendo sido excluídos ou substituídos por valores reais enviados pelo supervisor da ETE. As disfunções foram acompanhadas, em tempo real, pela equipe da Rotária do Brasil e, quando necessário, os módulos de telemetria foram substituídos.

Como os dados eram transmitidos por corrente elétrica (4 a 20 mA), para cada parâmetro dessa faixa havia um valor distinto. Para algumas ETEs, houve um equívoco na comunicação do referido intervalo, causando distorção entre os valores medidos e aqueles efetivamente recebidos na base de dados. Uma vez identificado o problema, os valores da faixa foram verificados para todas as ETES, inclusive por testes realizados em campo.

#### 3.1.2. Caracterização das concentrações de $DQO_{total}$ e $DQO_{filtrada}$

As análises *online* das concentrações de  $DQO_{total}$  afluente e  $DQO_{filtrada}$  efluente foram a maior dificuldade encontrada no Projeto de Medições, em vista do

defeito de fábrica constatado e demais peculiaridades, como o mau funcionamento de bombas de amostragem. Para a determinação da concentração de  $DQO_{\text{filtrada}}$  efluente do reator UASB, não se obteve êxito nas diversas formas de calibração possíveis. As características da sonda e o detalhamento dos referidos problemas encontram-se descritos na Nota Técnica que segue em anexo a este Relatório.

### 3.1.3. Caracterização da vazão de biogás

O equipamento de medição da vazão de biogás possui um limite inferior de precisão, o qual define a exatidão dos dados medidos. Em algumas ETEs, a vazão de biogás gerada era inferior ao respectivo limite, sobretudo em vista da ocorrência de vazamentos de biogás no reator anaeróbio e tubulações adjacentes. Os valores mensurados nestas condições foram excluídos do banco de dados.

Conforme caracterizado na Metodologia (item 2.3.2.1), para a realização do cálculo da vazão normalizada de biogás, é necessário medir a temperatura e pressão local. Porém, em algumas ETEs, os medidores desses parâmetros apresentaram problemas, transmitindo dados fora do padrão e ocasionando um valor errôneo da produção normalizada de biogás. Nestes casos, os dados de temperatura e pressão foram substituídos pelos registrados em séries históricas.

### 3.1.4. Caracterização da composição do biogás

O equipamento de medição da composição do biogás (*Union Instruments* – modelo Inca 4002) é bastante delicado e preciso, necessitando de calibração periódica. Por esse motivo, um engenheiro foi enviado a campo para verificação dos possíveis problemas e calibração dos equipamentos. Uma análise específica e detalhada do equipamento, contemplando seus limites de uso, encontra-se na Nota Técnica que segue em anexo a este Relatório.

## 3.2 Monitoramento dos parâmetros associados à produção e à composição do biogás

### 3.2.1. Caracterização da fase líquida dos reatores anaeróbios investigados

#### 3.2.1.1. Análise global

Na Tabela 8, apresenta-se uma síntese da caracterização dos parâmetros associados à fase líquida dos reatores anaeróbios investigados, a saber: vazão de esgoto, concentração de  $DQO_{\text{total}}$  afluente e  $DQO_{\text{filtrada}}$  efluente, eficiência de remoção e carga orgânica aplicada e removida.

**Tabela 8:** Caracterização dos parâmetros associados à fase líquida nas ETEs investigadas.

ETE	VAZÃO DE ESGOTO (L/s)			DQO <sub>TOTAL</sub> AFLUENTE <sup>1</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )			DQO <sub>FILTRADA</sub> EFLUENTE <sup>1</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )			EFICIÊNCIA (%)			COV APLICADA (kgDQO.m <sup>-3</sup> . reator.d <sup>-1</sup> )			COV REMOVIDA (kgDQO <sub>removida</sub> .m <sup>-3</sup> . reator.d <sup>-1</sup> )		
	N	Mediana	DP	N	Mediana	DP	N	Mediana	DP	N	Mediana	DP	N	Mediana	DP	N	Mediana	DP
A	408	366	55	103	426	231	103	125	56	103	72	17	97	1,2	0,6	97	0,89	0,5
B	302	340	53	37	616	24	37	119	123	37	82	14	19	2,1	3	19	1,66	0,6
C	465	91	14	32	661	182	32	147	57	32	75	6	31	1,3	0,4	31	1,04	0,4
D	380	97	53	9	1125	164	12	393	33	8	65	6	8	5,1	2,3	7	4,04	1,7
E	380	223	30	44	653	35	39	73	21	38	90	16	21	0,8	0,5	19	0,69	0,4
F	434	431	30	41	720	213	31	92	14	29	87	6	15	1,8	0,5	-	-	-
G	58	1108	195	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H	120	31	18	10	665	381	10	50	57	10	93	8	10	0,4	0,2	10	0,34	0,2
I	147	35	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J	348	79	10	101	435	101	101	55	18	101	87	4	94	0,7	0,2	94	0,6	0,2
Faixas típicas <sup>2,3</sup>	31 - 1108			426 - 720 [635]			55 - 147 [106]			75 - 90 [85]			0,4 - 2,1 [1,3]			0,63 - 1,66 [0,89]		

**N** = número de dados; **DP** = desvio padrão;

<sup>1</sup> Valores provenientes de análises laboratoriais realizadas pelas prestadoras de serviço;

<sup>2</sup> Intervalo entre valores mínimos e máximos observados, com mediana reportada entre colchetes;

<sup>3</sup> Para a determinação das faixas típicas foram consideradas apenas as ETEs cujo conjunto de dados apresentou  $N > 30$ .

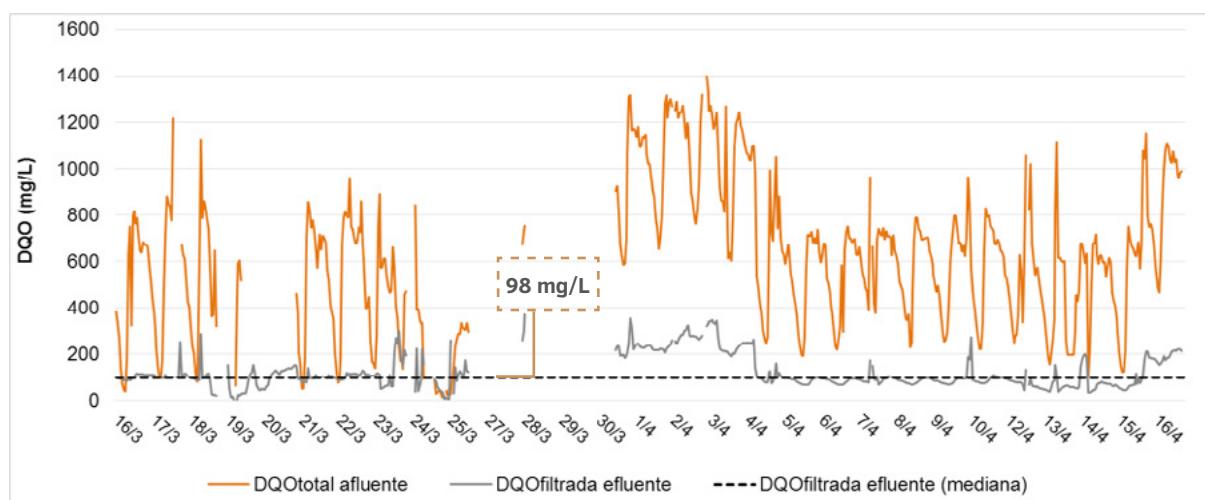
**Fonte:** Autores (2016).

Pode-se constatar, como já consolidado na literatura, que as cargas orgânicas aplicadas aos reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico são efetivamente baixas (CHERNICHARO, 2007), sobretudo em vista das concentrações de DQO afluente notadamente inferiores a 1000 mg/L, à exceção da ETE D. Os reatores anaeróbios investigados apresentaram 85% de eficiência mediana de remoção de carga orgânica, entendida como passível de ser convertida em biogás.

### 3.2.1.2. Análise do comportamento horário das concentrações de $DQO_{total}$ e $DQO_{filtrada}$

Em vista das limitações associadas à caracterização *online* das concentrações de DQO, apresenta-se o comportamento horário deste parâmetro apenas para a ETE C. Nesta estação, foi possível extrair um período de 30 dias de medições *online* confiáveis das concentrações de  $DQO_{total}$  afluente e  $DQO_{filtrada}$  efluente do reator UASB (Figura 18).

**Figura 18:** Séries históricas das concentrações de  $DQO_{total}$  e  $DQO_{filtrada}$  para a ETE C.



Fonte: Hoffmann [2016].

Por meio da Figura 18, pode-se constatar o comportamento temporal, periódico e não estacionário das concentrações de  $DQO_{total}$  afluente, como também reportado por Cabral (2016). Cabe enfatizar, todavia, que a concentração mediana de  $DQO_{filtrada}$  efluente permaneceu em torno 98 mg/L, demonstrando correspondência com o valor de tendência central obtido nas análises laboratoriais para as ETes investigadas (106 mg/L – Tabela 8).

*Em função da tendência central das concentrações de  $DQO_{filtrada}$  efluente dos reatores UASB/RALF (em torno de 100 mg/L), e dadas as limitações associadas, sobretudo, ao monitoramento online desse parâmetro (ver Nota Técnica em anexo), conclui-se que a medição da concentração afluente de  $DQO_{total}$  pode ser suficiente para a predição de cargas orgânicas removidas, as quais estão associadas à produção de biogás.*

**Tabela 9:** Caracterização dos parâmetros associados à fase gasosa nas ETEs investigadas.

ETE	VAZÃO NORMALIZADA DE BIOGÁS (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )			CONCENTRAÇÃO DE CH <sub>4</sub> [%]			CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> [%]			CONCENTRAÇÃO DE H <sub>2</sub> S (ppm)			CONCENTRAÇÃO DE O <sub>2</sub> [%]		
	N	Mediana	DP	N	Mediana	DP	N	Mediana	DP	N	Mediana	DP	N	Mediana	DP
A	257	46	11	276	81	6	276	8	1	167	1703	364	259	0	0
B	301	10	5	94	74	8	94	10	1	93	233	157	94	0,2	0,2
C	413	20	4	261	81	2	261	6	1	204	1529	189	261	0	0
D	337	48	9	112	70	1	112	9	1	112	2470	212	112	0	0
E	132	37	9	187	74	3	187	11	1	187	1405	345	187	0	0
F	410	133	25	147	79	4	146	12	1	91	1991	716	147	0	0
G	201	221	86	130	81	3	130	14	1	130	1672	397	129	0	0,1
H	167	3	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I	-	-	-	100	77	3	190	7	3	98	739	282	95	0,1	0,3
J	165	11	3	147	77	4	150	8	1	66	1985	428	148	0	0,2
Faixas típicas*	3 - 221			70 - 81 [78]			6 - 14 [10]			233 - 2470 [1688]			0 - 0,2 [0]		

\* Intervalo entre valores mínimos e máximos observados, com mediana reportada entre colchetes.

Fonte: Autores (2016).



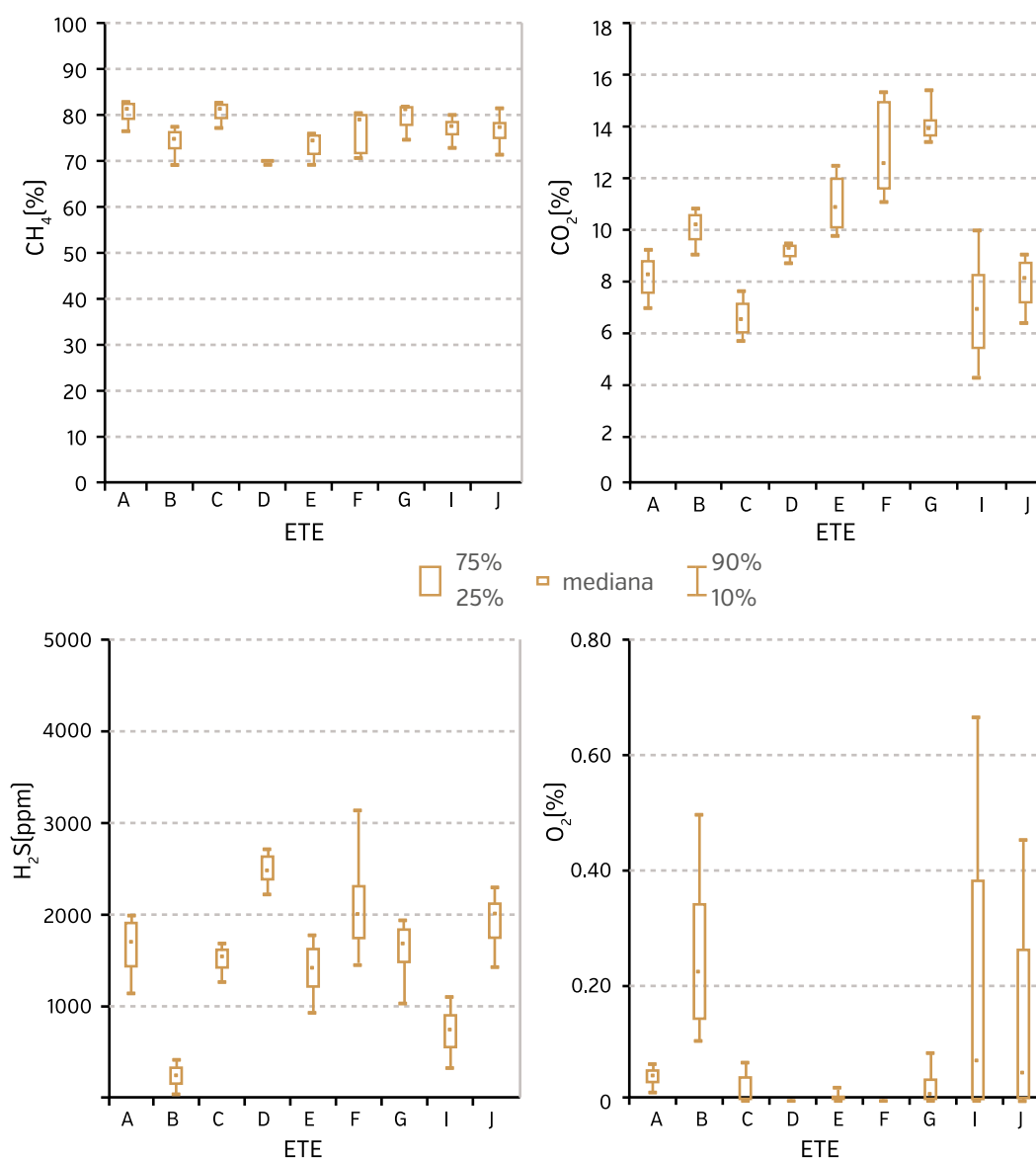
### 3.2.2. Caracterização da fase gasosa dos reatores anaeróbios investigados

#### 3.2.2.1. Análise global

Na Tabela 9, apresenta-se uma síntese da caracterização dos parâmetros associados à fase gasosa dos reatores anaeróbios investigados, a saber: vazão e composição qualitativa do biogás, sendo esta em termos da concentração de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ).

Nota-se que o biogás apresentou elevadas concentrações medianas de metano, entre 70 e 81%. Os valores medianos do teor de  $\text{CO}_2$  variaram entre 6 e 14%, e as concentrações de  $\text{O}_2$  foram tipicamente nulas. Os valores registrados encontram-se nas faixas típicas reportadas na literatura para biogás de reatores UASB tratando esgoto doméstico (NOYOLA et al., 1998; SOUZA et al., 2012; DWA-M 361, 2011). Para melhor visualização dos resultados, foram elaborados os gráficos box-plot, apresentados na Figura 19.

**Figura 19:** Gráficos *box-plot* das concentrações percentuais de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{O}_2$  no biogás.



Em relação aos teores de  $H_2S$ , observou-se uma variação considerável entre as ETEs investigadas, com medianas variando entre 233 e 2470 ppm. Cabe destacar os valores elevados de sulfeto de hidrogênio associados à ETE D. A elevada concentração de DQO afluente (mediana = 1125 mg/L) e consequente carga orgânica volumétrica aplicada (mediana = 5,1 kgDQO.m<sup>-3</sup>.reator.d<sup>-1</sup>) pode ser um importante fator de influência.

As concentrações de  $H_2S$  significativamente mais baixas (*Mann-Whitney* -  $\alpha = 5\%$ ) para a ETE B em relação às demais estações provavelmente estão associadas à oxidação do sulfeto de hidrogênio, em virtude das maiores concentrações de  $O_2$  observadas no biogás desta estação. Por sua vez, os valores mais elevados de oxigênio certamente estão associados à infiltração de ar, em vista de pontos de vazamento na câmara e na linha gás. Situação semelhante parece ter ocorrido com a ETE I. Em ambas as ETEs (B e I), pode-se destacar a correlação estatisticamente significativa (*Spearman* -  $\alpha = 5\%$ ) entre as menores concentrações de  $H_2S$  e as maiores concentrações de  $O_2$ , relativamente às demais estações de tratamento.

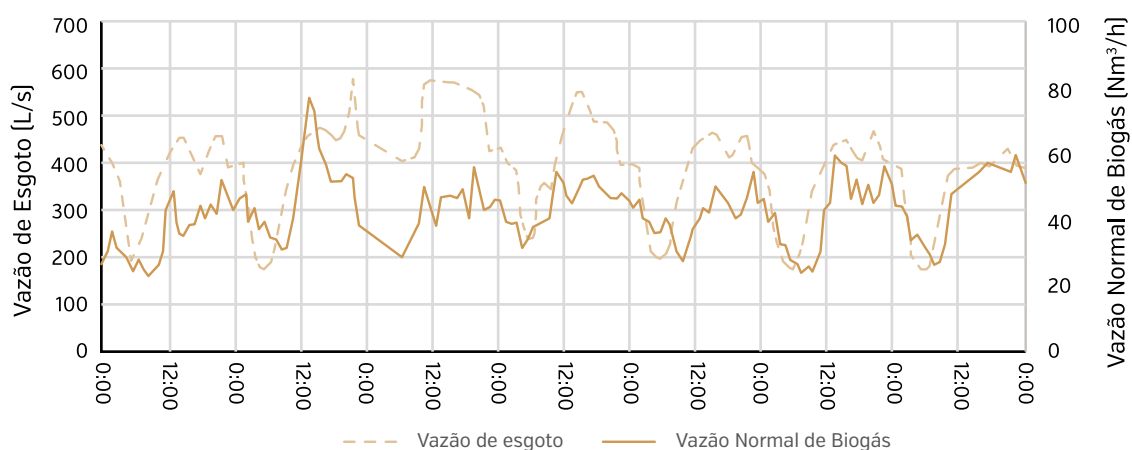
Assim como reportado por Cabral *et al.* (2015), a soma do teor de  $CH_4$  com o de  $CO_2$  é inferior a 100%. A parcela restante refere-se ao  $N_2$ , cuja concentração pode variar entre 10 e 25% (NOYOLA *et al.*, 2006). Os teores verificados (Tabela 9) para estes principais componentes do biogás ( $CH_4$  e  $CO_2$ ) são típicos de reatores UASB tratando esgoto doméstico. A elevada concentração de  $N_2$  pode ser atribuída à solubilização deste gás no esgoto afluente, que, no interior do reator UASB, escapa da fase líquida quando do decréscimo da pressão parcial de  $N_2$ . Por sua vez, as baixas concentrações de  $CO_2$  podem ser atribuídas à elevada solubilidade deste gás, associada às elevadas cargas hidráulicas tipicamente aplicadas aos reatores UASB tratando esgoto doméstico (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

É importante ressaltar que, apesar da elevada concentração mediana de metano evidenciada no biogás dos reatores investigados, a sua recuperação na fase gasosa é tipicamente bem inferior ao valor estequiométrico de 0,35 Nm<sup>3</sup>/kg DQO<sub>removida</sub>, em vista de uma importante parcela que deixa o reator dissolvida com o efluente tratado. Adicionalmente, uma fração substancial da DQO<sub>particulada</sub> não é digerida e deixa o reator junto ao lodo de excesso (CHERNICHARO *et al.*, 2015). Soma-se a estes aspectos o gás residual emitido no topo do compartimento de decantação dos reatores anaeróbios, bem como a possibilidade de vazamentos na linha de coleta do biogás e câmara de gás do separador trifásico, em função de problemas de estanqueidade.

*Tipicamente, sob as condições prevalentes durante o período de investigações do Projeto de Medições (DQO < 1000mg/L e temperatura em torno de 20 °C), a parcela de  $CH_4$  dissolvida no efluente pode ter variado entre 30 e 41% (SOUZA *et al.*, 2011), eventualmente com valores superiores a 50% do metano produzido (NOYOLA *et al.*, 1998). Estas perdas representam não somente um decréscimo do potencial energético, mas também contribuem para as emissões de gases de efeito estufa.*

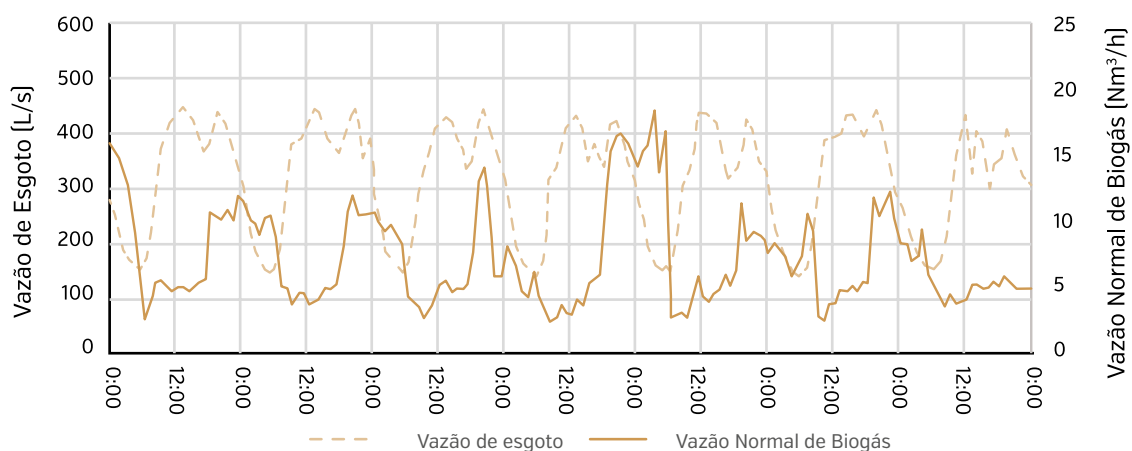
**Figura 20:** ETE A: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás [01 a 07/10/2015].

**3.2.2.2. Análise do comportamento da produção horária de biogás**  
Para demonstrar o comportamento horário da produção de biogás para cada ETE, foram selecionados períodos de uma semana com transmissão regular de dados, sendo elaborados os gráficos apresentados nas Figuras de 20 a 27.



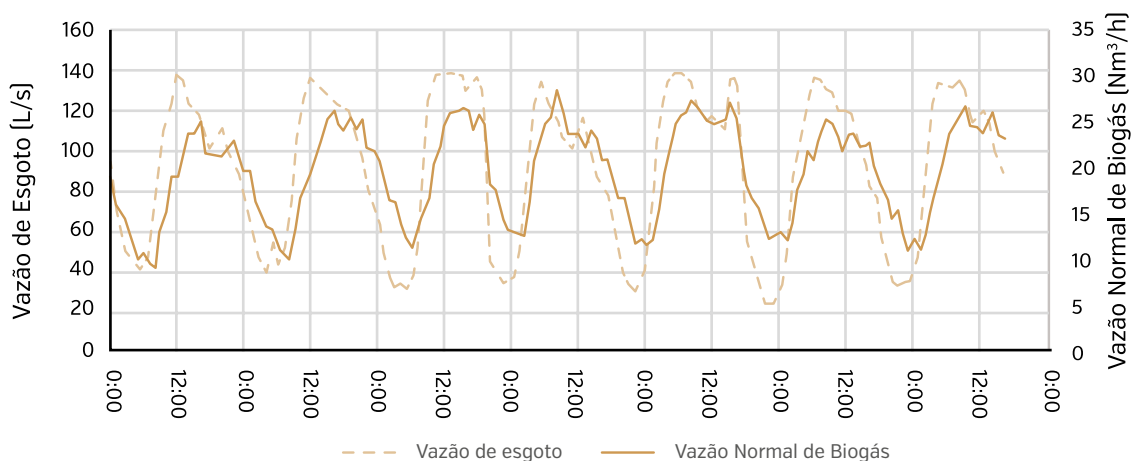
Fonte: Adaptado de Cabral [2016].

**Figura 21:** ETE B: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás [17 a 23/08/2015].

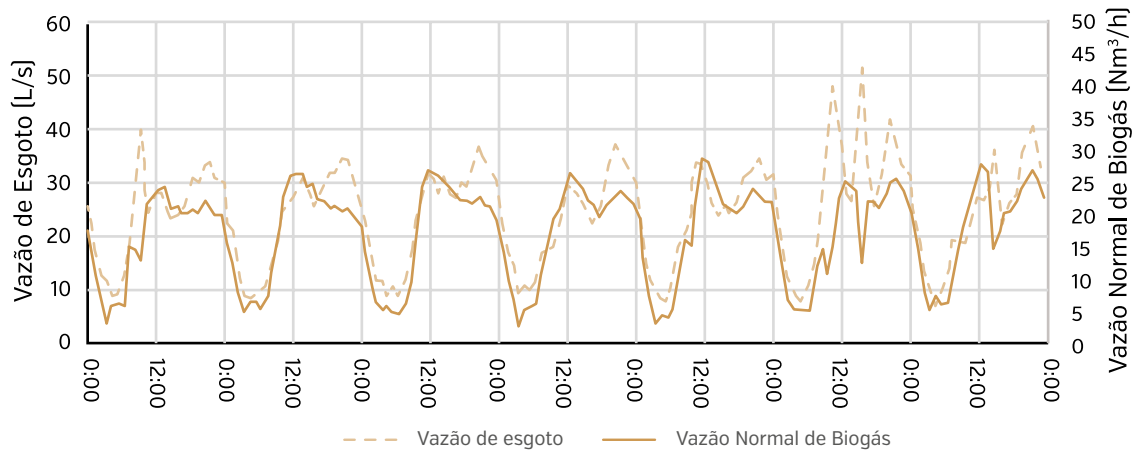


Fonte: Adaptado de Cabral [2016].

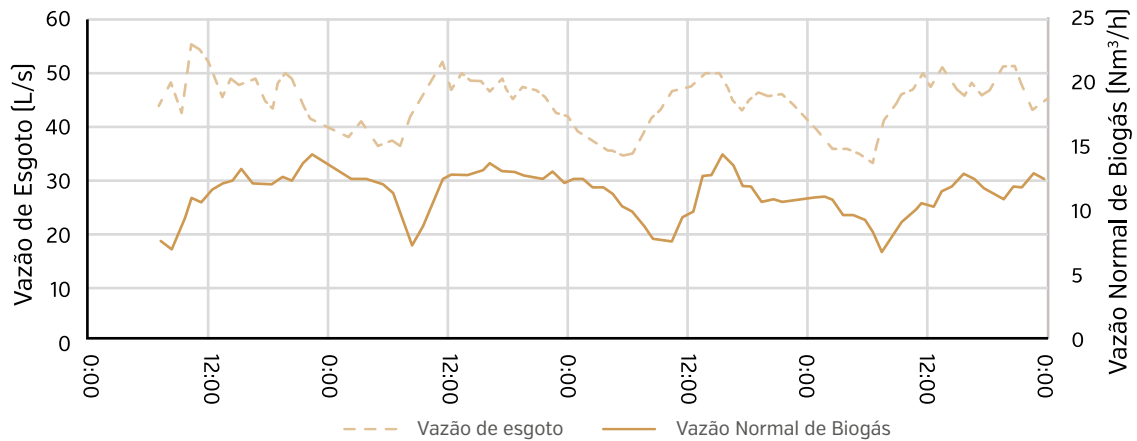
**Figura 22:** ETE C: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás [16 a 22/07/2015].



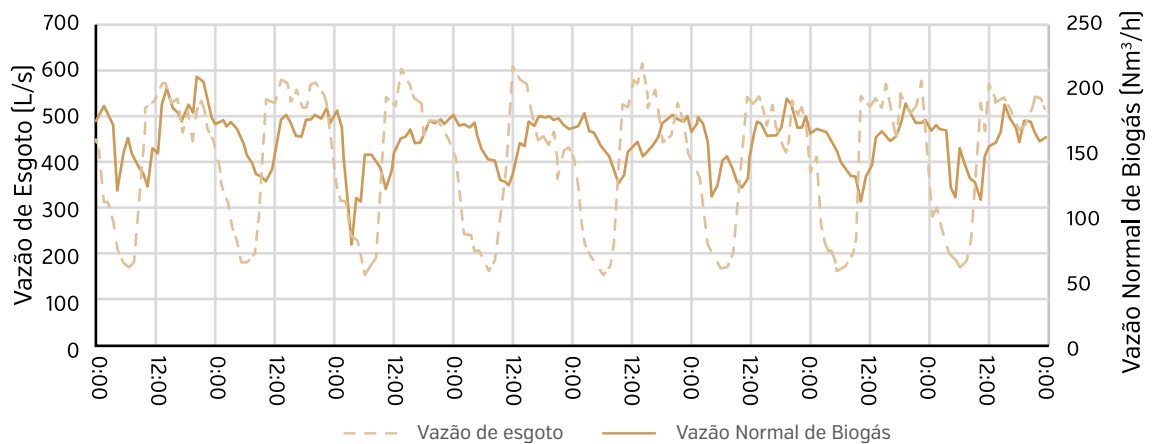
Fonte: Adaptado de Cabral [2016].

**Figura 23:** ETE D: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás [06 a 12/11/2015].

Fonte: Adaptado de Cabral (2016).

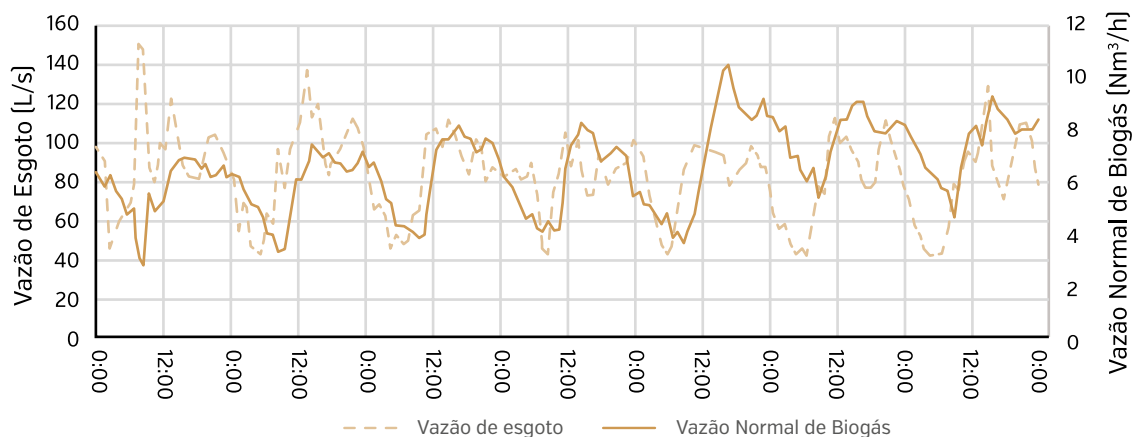
**Figura 24:** ETE E: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás [01 a 04/04/2016].

Fonte: Adaptado de Cabral (2016).

**Figura 25:** ETE F: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás [16 a 23/07/2015].

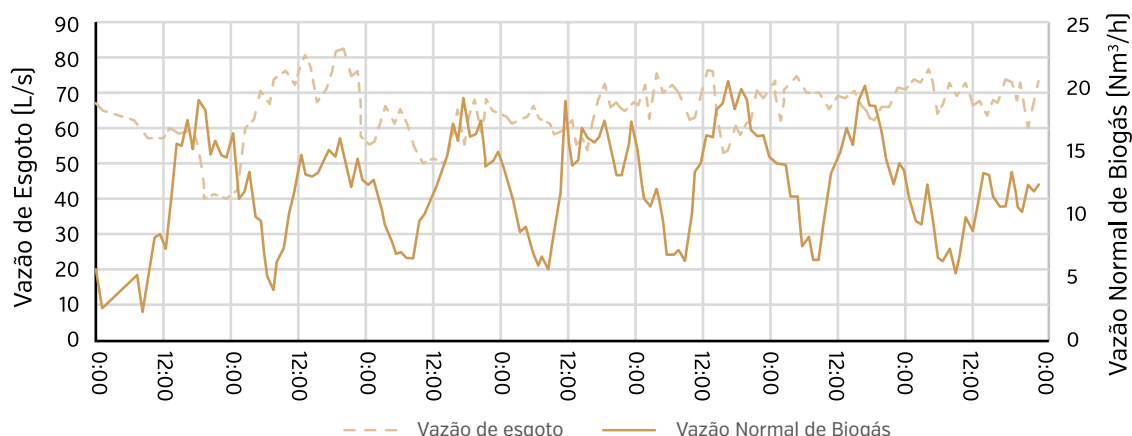
Fonte: Adaptado de Cabral (2016).

Figura 26: ETE H: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás [18 a 24/02/2016].



Fonte: Adaptado de Cabral (2016).

Figura 27: ETE J: médias horárias das vazões de esgoto e de biogás [14 a 21/12/2015].



Fonte: Adaptado de Cabral (2016).

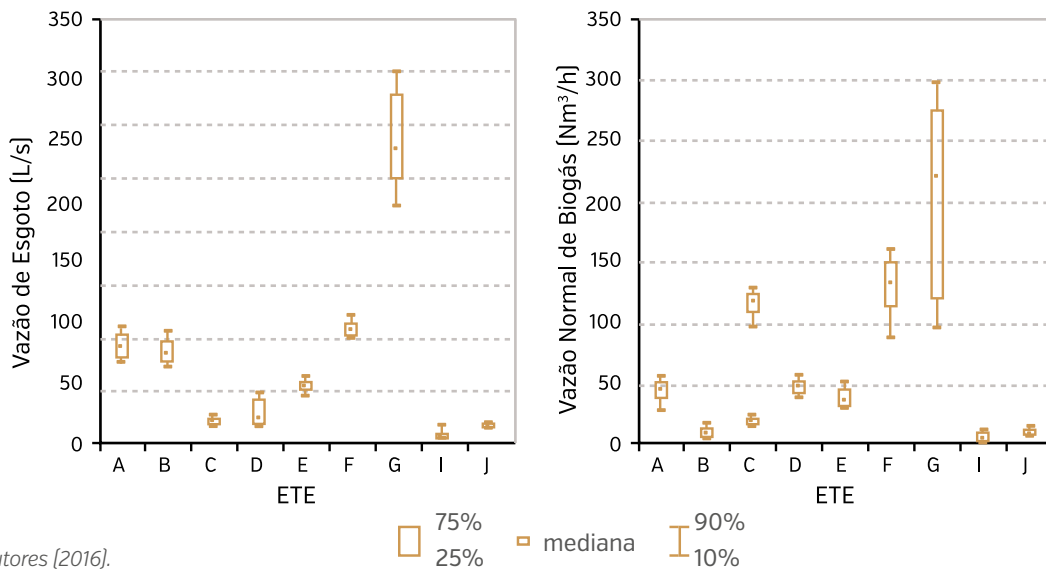
Tal como identificado por Possetti *et al.* (2013), por meio de medições realizadas em reatores UASB em escala real, a produção de biogás nas ETEs investigadas seguiu um comportamento temporal variável, periódico e não estacionário. Da mesma forma, as medições evidenciaram um padrão diário ( $\Delta t = 1$  dia) de produção e desprendimento de biogás.

De forma geral, percebe-se que os valores de vazão de biogás acompanharam o comportamento da vazão de esgoto, todavia com diferentes defasagens de tempo entre os picos de cada um destes parâmetros nas diferentes ETEs. Exceção se faz para a ETE J (Figura 27), visto a existência de um extravasor de esgoto bruto diretamente para a etapa de tratamento aeróbio, fazendo com que a vazão afluente ao reator anaeróbio não sofra variações significativas entre mínimos e máximos. Neste caso, as variações provavelmente estão associadas à oscilação diária da concentração de DQO afluente e consequentemente das cargas orgânicas aplicadas ao reator anaeróbio.

Cabe frisar que as ETEs B, E e H apresentaram valores de vazão de biogás persistentemente inferiores ao limite de precisão do medidor, inviabilizando a produção de dados confiáveis durante longos períodos temporais.

### 3.3 Fatores interferentes na produção de biogás

**Figura 28:** Gráficos *box-plot* das vazões de esgoto e biogás para as ETEs analisadas.



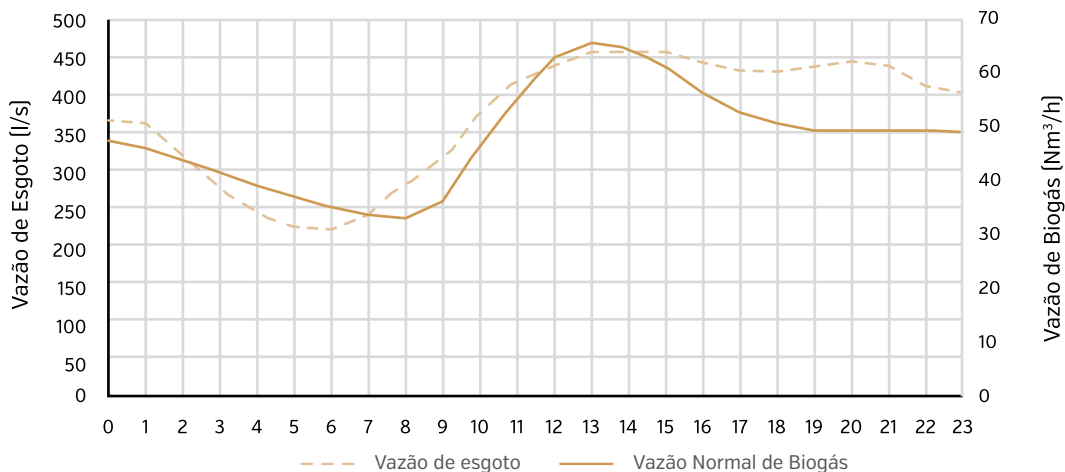
Fonte: Autores [2016].

#### 3.3.1. Relação entre vazão de esgoto, tempo de detenção hidráulica e vazão de biogás

Na Figura 28, são apresentados os gráficos *box-plot* das vazões de esgoto e biogás para as ETEs investigadas. Não se depreende uma clara correspondência entre a vazão de esgoto afluente e a vazão de biogás produzida. Entre estações de porte similar, em termos de vazão de esgoto tratada, a exemplo das ETEs A e F, percebe-se uma variação significativa (*Mann-Whitney* -  $\alpha = 5\%$ ) quanto à produção de biogás.

As diferenças observadas entre as ETEs quanto à produção de biogás podem ser atribuídas a diversos fatores, a saber: *i*) cargas orgânicas volumétricas aplicadas e respectivas eficiências de remoção, por sua vez associadas a aspectos de projeto; *ii*) estado atual das instalações, possibilitando ocorrências de vazamentos para a atmosfera, por exemplo; e *iii*) remoção sistemática de espuma no interior do separador trifásico e outros fatores como controle e rotina operacional.

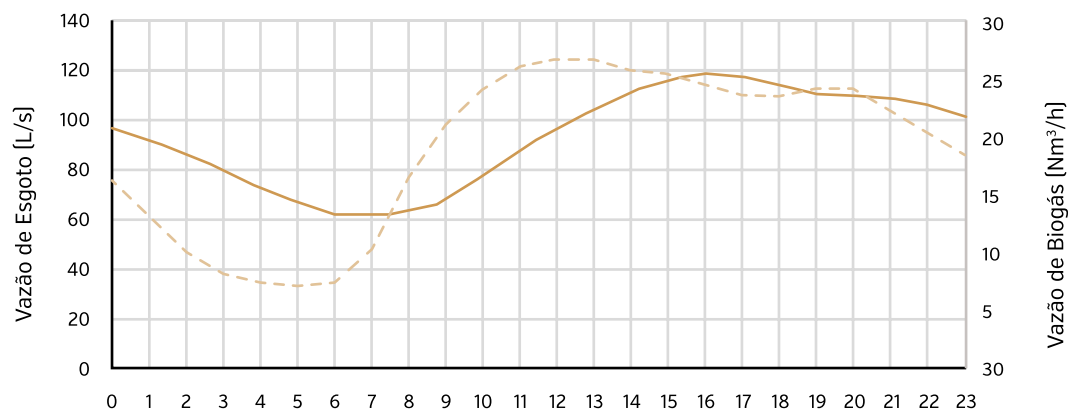
**Figura 29:** ETE A: comportamento diário da produção média de biogás.



Fonte: Autores [2016].

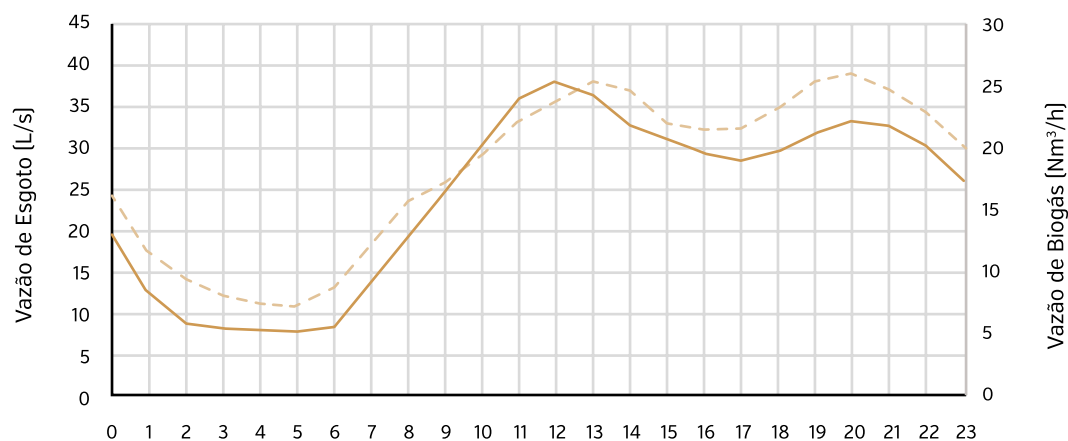
Nas Figuras de 29 a 35, são demonstrados os comportamentos da produção média horária de biogás durante 24 horas para as ETEs investigadas.

Figura 30: ETE C: comportamento diário da produção média de biogás.



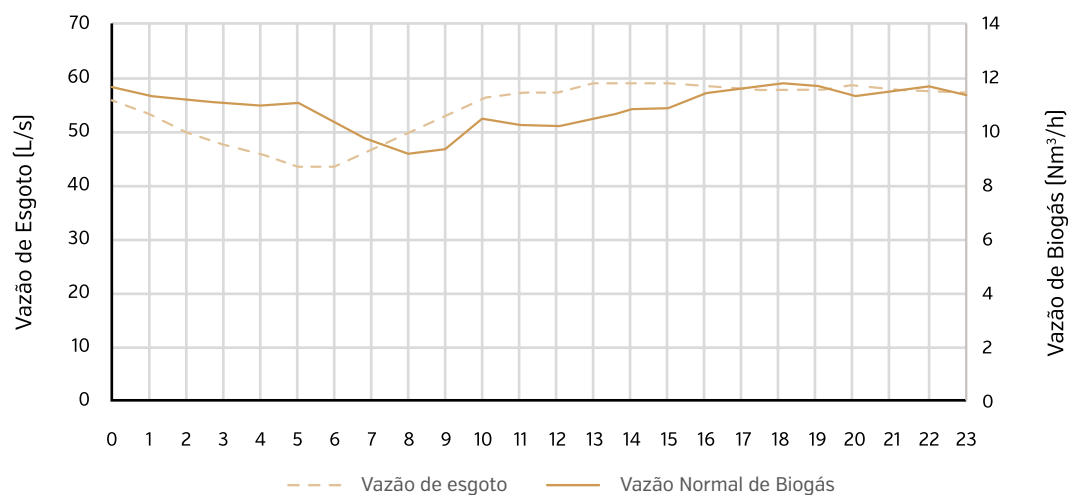
Fonte: Autores [2016].

Figura 31: ETE D: comportamento diário da produção média de biogás.



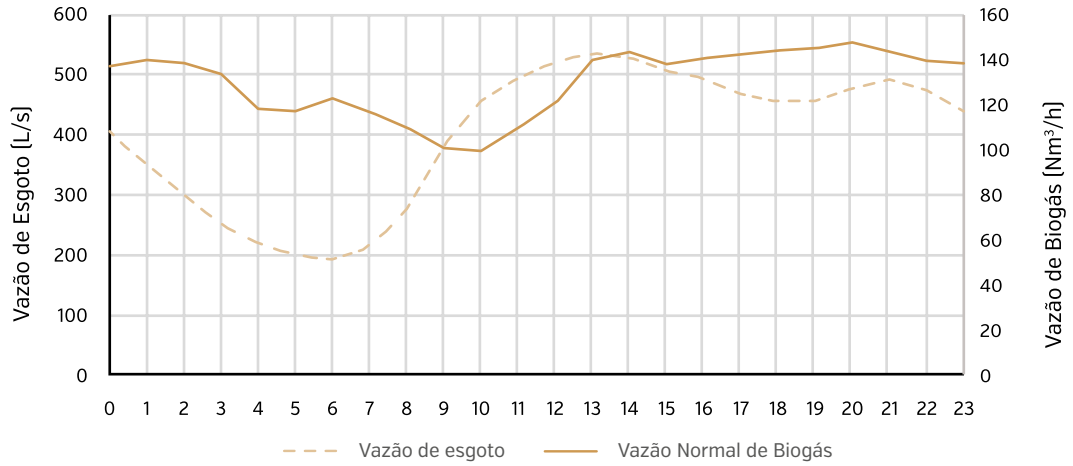
Fonte: Autores [2016].

Figura 32: ETE E: comportamento diário da produção média de biogás.



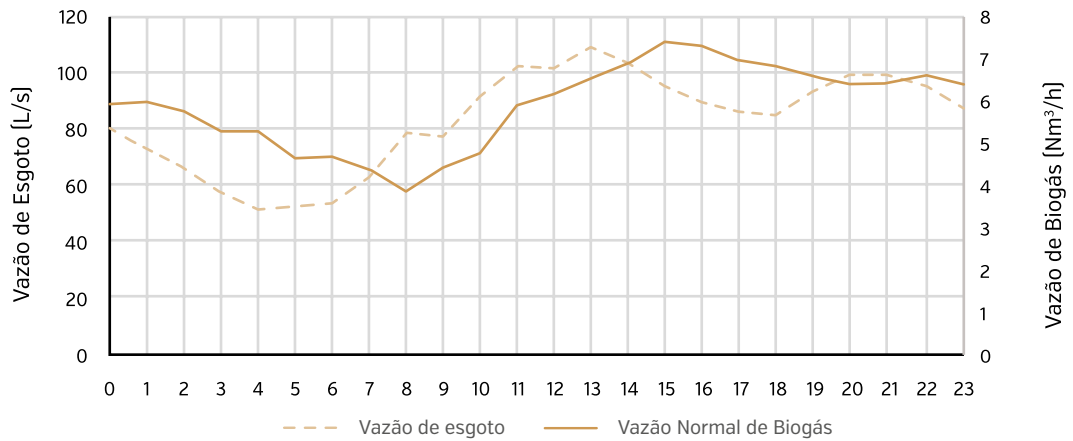
Fonte: Autores [2016].

**Figura 33:** ETE F: comportamento diário da produção média de biogás.



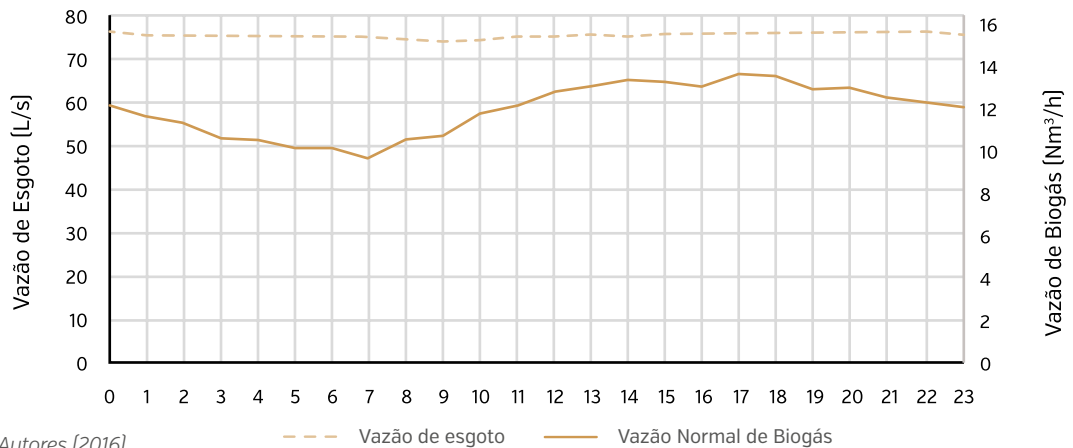
Fonte: Autores [2016].

**Figura 34:** ETE H: comportamento diário da produção média de biogás.



Fonte: Autores [2016].

**Figura 35:** ETE J: comportamento diário da produção média de biogás.



Fonte: Autores [2016].



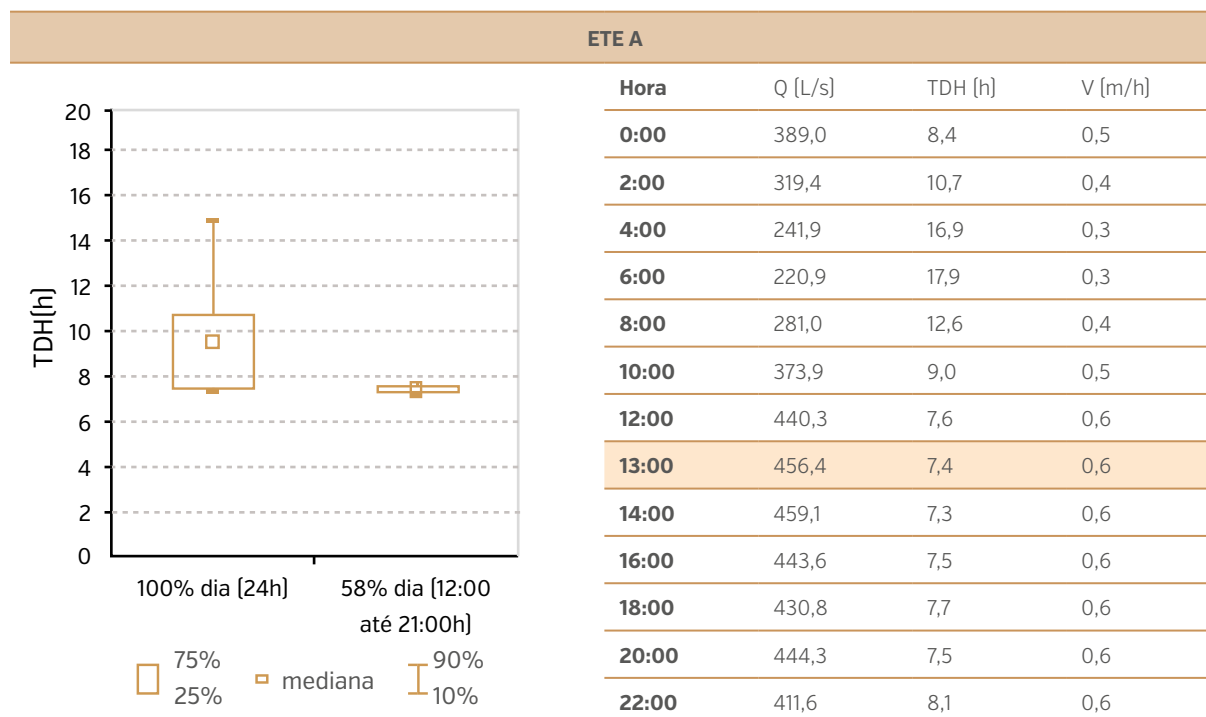
Em geral, os momentos de máxima produção de biogás concentram-se no período da tarde ou início da noite, tendo sido notado que as ETE A, C, E, F e H possuem um comportamento similar, com os picos de vazão de biogás às 13, 16, 18, 14 e 15 horas, respectivamente. Essas estações possuem características parecidas no que tange à qualidade do esgoto (concentração de  $DQO_{total}$ ) e hidrograma de vazão. Percebe-se que os picos de vazão de biogás nas ETEs investigadas associam-se aos momentos de menor tempo de detenção hidráulica (TDH) e, conseqüentemente, maior velocidade ascensional do líquido, conforme demonstrado nas Figuras, 36 a 40.

Ressalta-se, entretanto, que os picos de vazão de biogás provavelmente estão associados aos picos de carga orgânica afluyente aos reatores anaeróbios. Tal constatação pôde ser observada para a ETE A, como apresentado na Figura 43 (item 3.3.2.1). Nesta estação, em virtude da possibilidade de caracterização do comportamento diário da concentração de  $DQO_{afluyente}$ , verificou-se que a produção de biogás segue o padrão de comportamento temporal da carga de matéria orgânica afluyente. Neste caso, a permanência de maiores velocidades ascensionais parece contribuir para a liberação do biogás da fase líquida, sendo o pico de vazão registrado após cerca de uma hora da máxima concentração de DQO diária afluyente.

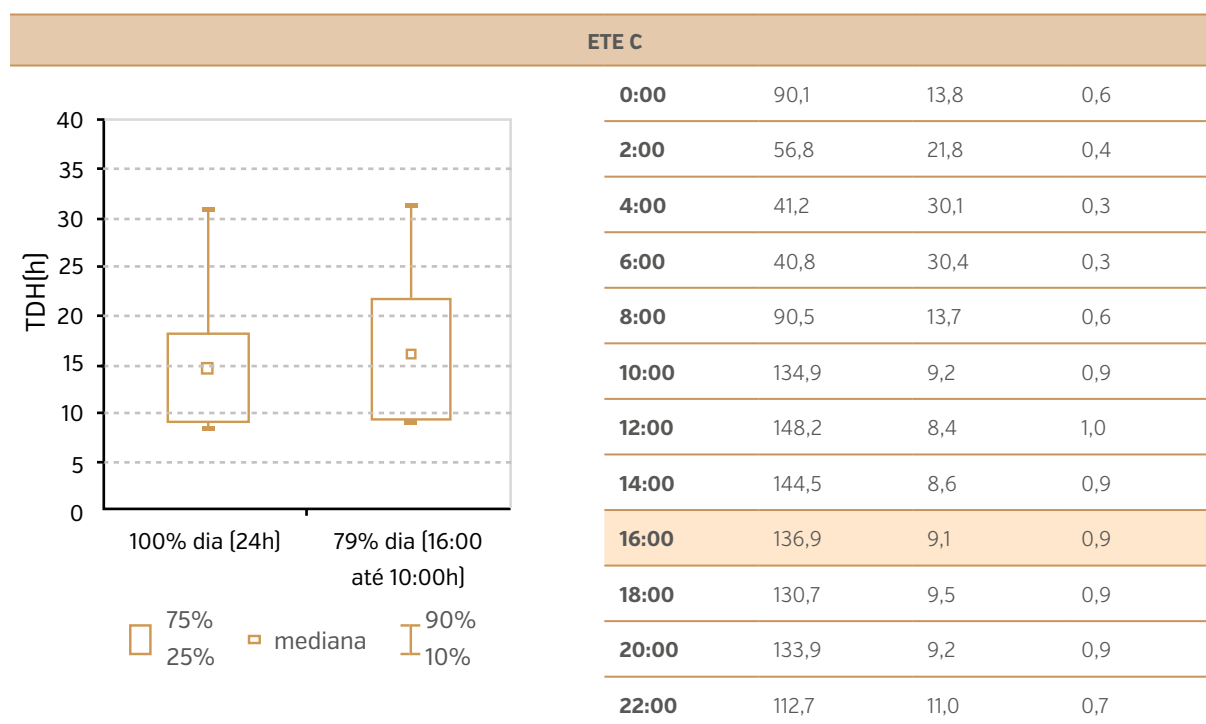
A ETE D (Figura 31) apresentou dois picos de vazão de biogás, às 12 e 20 horas, coincidentes com momentos de maior velocidade ascensional do líquido. Esta ETE apresentou elevadas concentrações de  $DQO_{total}$  afluyente (mediana = 1125 mg/L), atípicas para as estações brasileiras. Adicionalmente, conta com um extravasor para vazões maiores do que 210 L/s, diretamente para a primeira lagoa do fluxograma de tratamento, assim como um segundo extravasor (no canal do tratamento preliminar) que desvia parte do fluxo diretamente para as lagoas no caso de vazões elevadas. Neste caso, portanto, evita-se que o reator UASB sofra choques hidráulicos em eventos pluviométricos, por exemplo.

Quanto à ETE J (Figura 35), a vazão máxima de biogás ocorreu em torno das 17 horas e a variação horária foi menor do que para as demais ETEs, provavelmente em virtude da maior estabilidade de velocidades ascensionais do líquido ao longo do dia. Esta estação conta com extravasor (70 L/s) diretamente ligado ao tanque de lodos ativados, motivo pelo qual o hidrogramas de vazão apresenta pequena amplitude.

No que tange às defasagens entre os picos de vazão de esgoto e biogás, nota-se que, para a ETE A (Figura 29), os picos podem ser considerados coincidentes. Para as ETEs C (Figura 30) e E (Figura 32), a defasagem é de aproximadamente 4 horas. Para a ETE D (Figura 31), observa-se um comportamento distinto: há dois picos de vazão de biogás, sendo que o primeiro ocorre cerca de 1 hora antes do registro de máxima vazão de esgoto e, o segundo, praticamente no momento da vazão de pico da fase líquida. Na ETE F (Figura 33), a máxima vazão de biogás foi registrada após 7 horas do pico da vazão afluyente de esgoto e, para a ETE H (Figura 34), este intervalo foi de 2 horas.

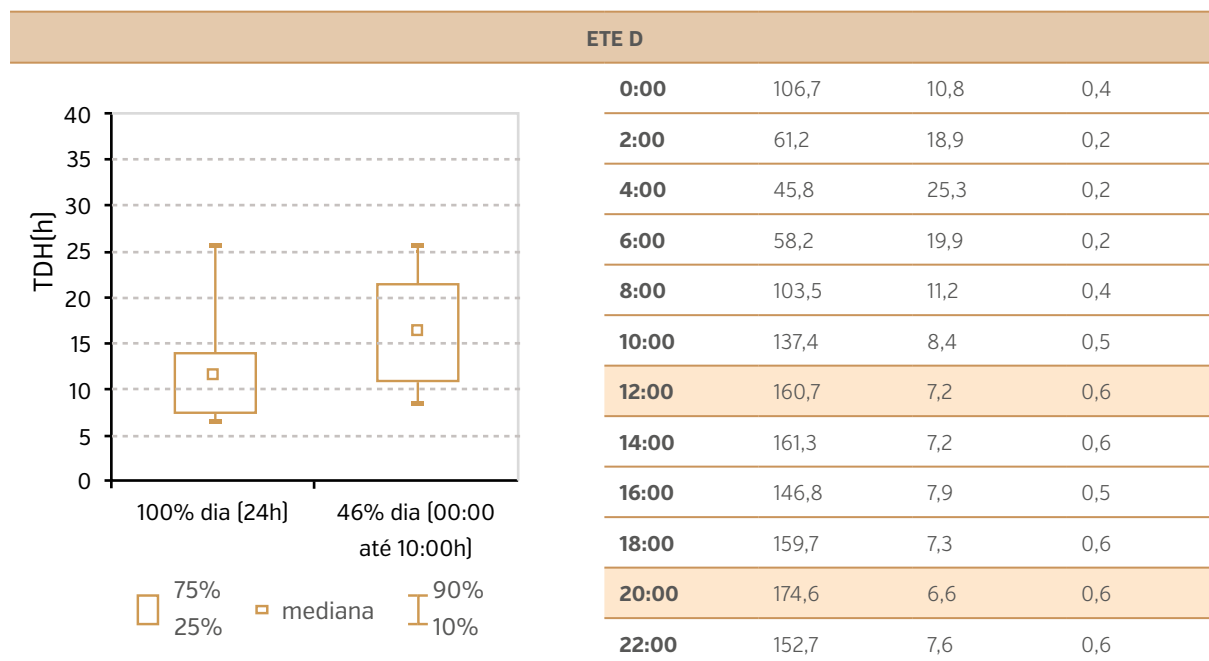
**Figura 36:** Tempos de detenção hidráulica e velocidades ascensionais médias – ETE A.

*Destaque para o horário de pico de vazão de biogás.*

**Figura 37:** Tempos de detenção hidráulica e velocidades ascensionais médias – ETE C.

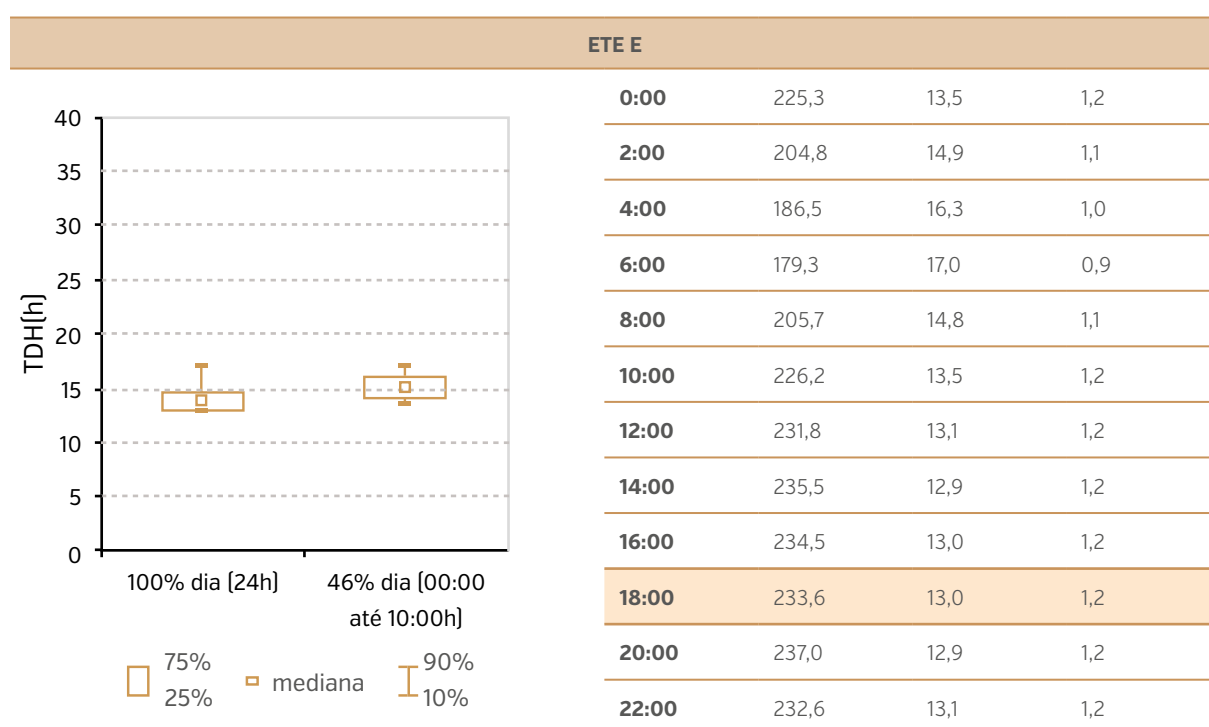
*Destaque para o horário de pico de vazão de biogás.*

Figura 38: Tempos de detenção hidráulica e velocidades ascensionais médias - ETE D.

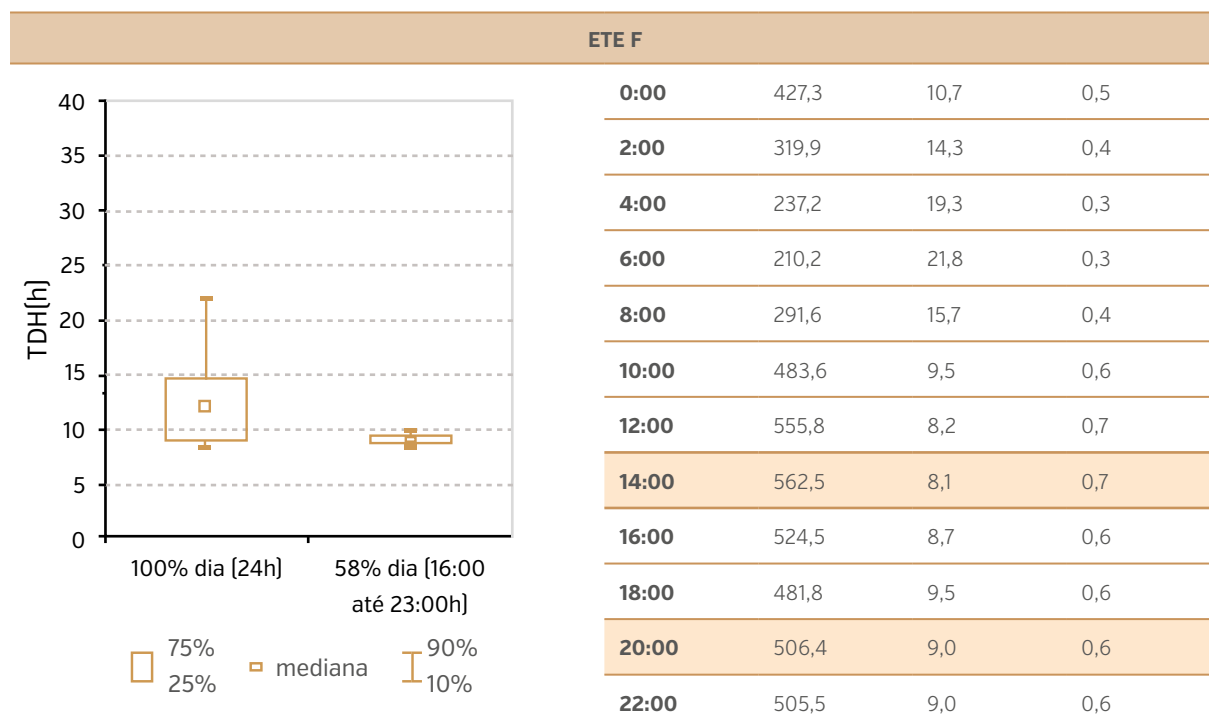


Destaque para os horários de pico de vazão de biogás.

Figura 39: Tempos de detenção hidráulica e velocidades ascensionais médias - ETE E.



Destaque para o horário de pico de vazão de biogás.

**Figura 40:** Tempos de detenção hidráulica e velocidades ascensionais médias – ETE F.

Destaque para os horários de pico de vazão de biogás.

Fonte: Autores [2016].

### 3.3.2. Influência da carga orgânica, pluviometria e temperatura

Valendo-se de períodos de dados mais consistentes para as ETEs A, C e F, investigou-se detalhadamente a relevância das possíveis variáveis interferentes no comportamento da produção de biogás, quais sejam: vazão de esgoto, concentração de DQO afluente, carga orgânica removida, pluviometria e temperatura, como demonstrado nos subitens a seguir.

#### 3.3.2.1. ETE A

Selecionou-se o período entre 12/09/2015 e 22/02/2016 para a análise detalhada referente à ETE A, em vista da coleta e análise sistemática (a cada 3 dias) das concentrações de DQO<sub>total</sub> afluente e DQO<sub>filtrada</sub> efluente, conforme

**Tabela 10:** Estatística descritiva dos parâmetros da ETE A.

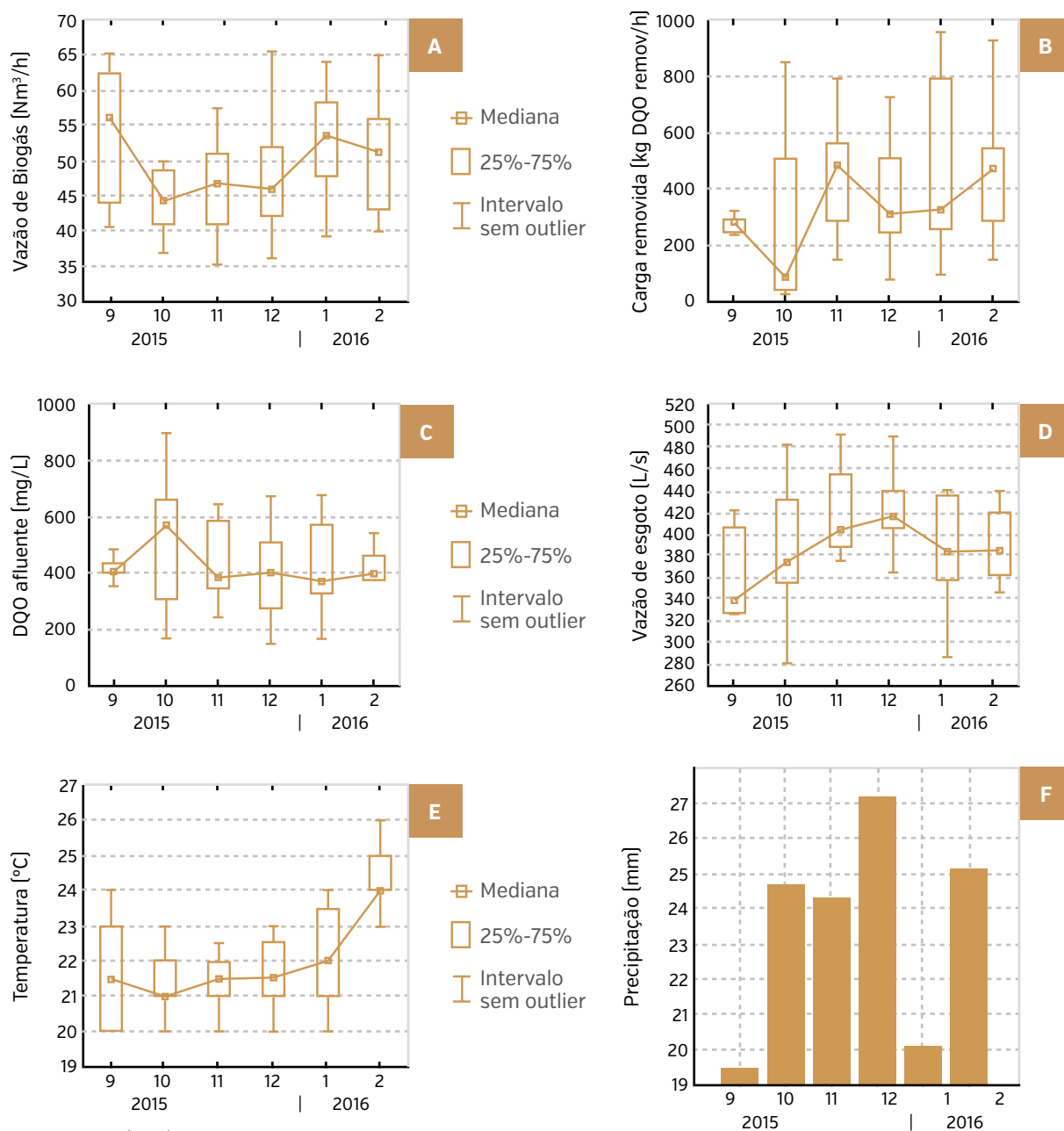
VARIÁVEL	N	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	DP
Vazão de esgoto (L/s)	64	397,4	280,9	492,7	46,8
DQO afluente (mg/L)	68	454	132	1244	225
DQO removida (mg/L)	56	299	19	1144	199
Carga removida (kg DQO remov/h)	56	417,0	24,5	1473,2	276,6

VARIÁVEL	N	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	DP
Temperatura [°C]	68	21,9	20,0	26,0	1,4
Precipitação (mm/d)	68	7,9	0,00	45,0	10,7
Vazão de Biogás (Nm <sup>3</sup> /h)	60	48,8	35,1	65,4	8,0

Fonte: Cabral [2016].

O comportamento temporal das variáveis anteriormente mencionadas pode ser visualizado por meio dos gráficos *box-plot* apresentados na Figura 41 (a-f).

Figura 41: Gráficos *box-plot* para a ETE A das variáveis: (a) Vazão de biogás; (b) Carga orgânica removida; (c) Concentração de DQO afluente; (d) Vazão de esgoto; (e) Temperatura; e (f) Precipitação acumulada.



Fonte: Cabral [2016]

**Tabela 11:** Matriz de correlações entre as variáveis\*.

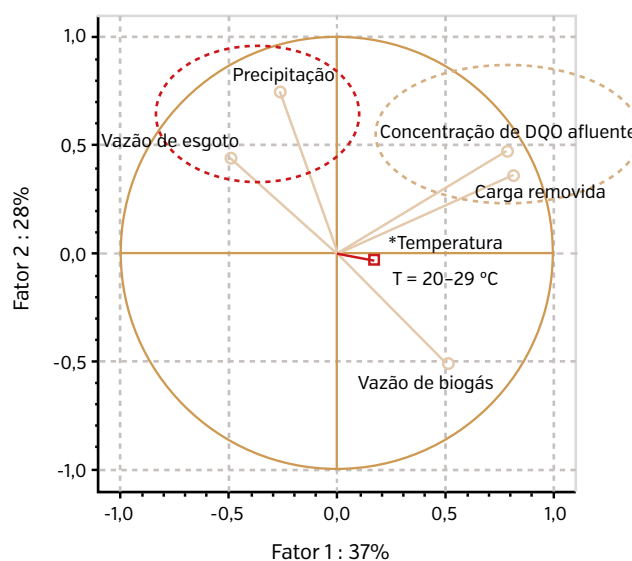
Podem-se notar intervalos (percentis 25-75%) expressivos associados à vazão de biogás no período analisado. Para melhor explicitar a relação entre as variáveis, elaborou-se uma matriz de correlações (*Spearman* -  $\alpha = 5\%$  - Tabela 11), bem como uma análise de componentes principais (Figura 42).

VARIÁVEL	VAZÃO BIOGÁS	VAZÃO ESGOTO	DQO AFL.	CARGA REMOVIDA	PRECIPITAÇÃO	TEMPERATURA
Vazão de Biogás	1,000000	-0,268449	0,305117	0,313709	-0,353712	0,224307
Vazão de esgoto	-0,268449	1,000000	-0,330136	-0,268992	0,376632	-0,164344
DQO afluente	0,305117	-0,330136	1,000000	0,933304	-0,077856	0,042798
Carga removida	0,313709	-0,268992	0,933304	1,000000	-0,134246	0,105031
Precipitação	-0,353712	0,376632	-0,077856	-0,134246	1,000000	0,142206
Temperatura	0,224307	-0,164344	0,042798	0,105031	0,142206	1,000000

\* Correlações marcadas em vermelho tem significância ao nível  $\alpha = 5\%$ .

Fonte: Cabral [2016].

**Figura 42:** Análise dos principais fatores interferentes na produção de biogás na ETE A.



Fonte: Autores [2016].

Observa-se que a vazão de biogás está correlacionada positivamente à concentração de DQO afluente e à carga orgânica removida. Destaca-se que o intervalo temporal analisado (12/09 a 22/02) engloba dois períodos com eventos pluviométricos e, efetivamente, essa variável apresenta correlação negativa com a vazão de biogás, similarmente ao que se observa com a vazão de esgoto. Neste caso, o efeito negativo destas variáveis sobre a produção de biogás provavelmente está associado à contribuição parasitária de águas pluviais na rede de esgotamento sanitário, incrementando a vazão da fase líquida e reduzindo a concentração de DQO afluente nos reatores anaeróbios.

Especificamente em relação à temperatura, para a faixa típica observada durante o Projeto Medições (20-29 °C), esta parece ser uma variável de menor

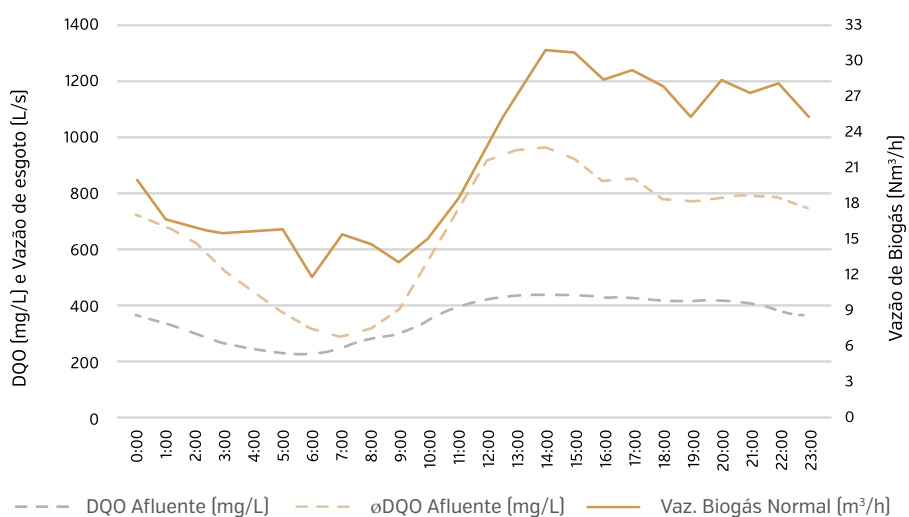
importância em relação ao comportamento da produção de biogás. A estabilidade da eficiência de remoção de carga orgânica para temperaturas variando entre 20 e 25 °C também foi reportada por Van Haandel e Lettinga (1994). Complementarmente, Campello (2009) concluiu que outras variáveis desempenharam papel mais importante do que a temperatura (faixa de variação entre 14 e 24 °C) ao monitorar um reator em escala plena, na cidade de Caxias do Sul.

Todavia, cabe ressaltar que a influência concomitante das variáveis interferentes na produção de biogás, bem como as condições operacionais em sistemas de escala plena, pode mascarar o possível efeito da temperatura na eficiência do reator anaeróbico. A taxa de hidrólise do substrato é sabidamente menor para temperaturas inferiores a 18 °C (CHERNICHARO *et al.*, 2015). Para temperaturas decrescendo de 35 para 15 °C, Campello (2009) observou redução da eficiência de remoção de  $DQO_{total}$ , todavia não houve influência na remoção de  $DQO_{filtrada}$  (experimento em escala piloto). Tal situação provavelmente está associada à perda de sólidos, visto a redução da sedimentabilidade do lodo anaeróbico, a qual tende a decrescer significativamente para temperaturas inferiores a 20 °C (CHAVES, 2015).

*Destaca-se, assim, que as principais variáveis associadas ao incremento da produção de biogás para as ETEs investigadas durante o Projeto Medições foram a concentração de DQO afluente e a carga orgânica removida, muito embora a caracterização horária da variação das concentrações de DQO só tenha sido possível para a ETE A. Por sua vez, os eventos pluviométricos prejudicaram a produção de biogás, visto a interferência do acréscimo da vazão de esgoto na diluição da matéria orgânica afluente às ETEs.*

Adicionalmente, foi possível extrair, para a ETE A, um período confiável de funcionamento da sonda *s::can*, entre os dias 16/06 e 08/07/2016. As curvas características das vazões de esgoto e biogás, assim como das concentrações de  $DQO_{total}$  afluente, são reportadas na Figura 43. Nota-se que, efetivamente, a produção de biogás segue o padrão de comportamento temporal da carga de matéria orgânica afluente (produto entre a concentração de DQO e vazão de esgoto).

**Figura 43:** Curvas das médias horárias de vazão de esgoto, DQO afluente e vazão normalizada de biogás para a ETE A.



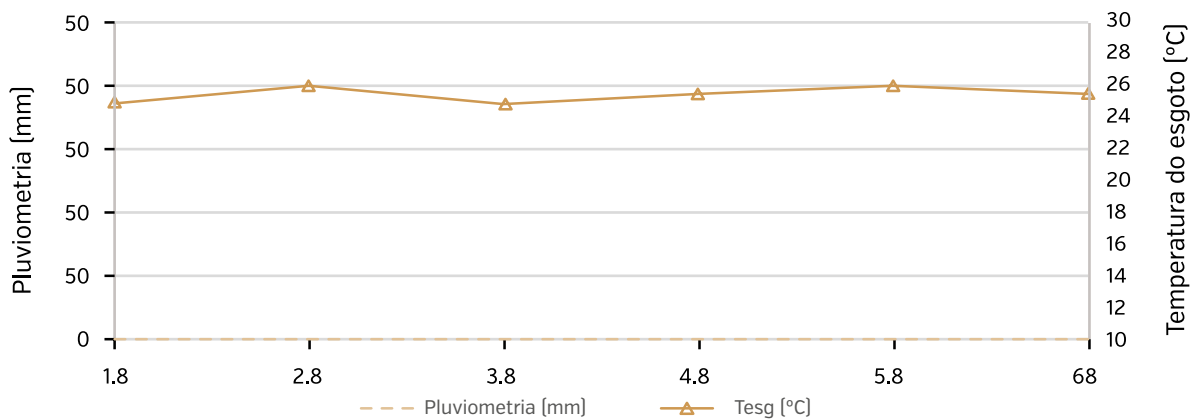
Fonte: Hoffmann [2016].

### 3.3.2.2. ETE C

Para a ETE, C foi possível extrair dois interregnos confiáveis de funcionamento da sonda *s::can*, representativos de dois períodos com características climáticas distintas, a saber: i) período de estiagem e temperatura estável, entre 01/08 e 06/08/2015; e ii) período chuvoso e de maior variação de temperatura, entre 02/12 e 09/12/2015.

#### Análise do período de estiagem

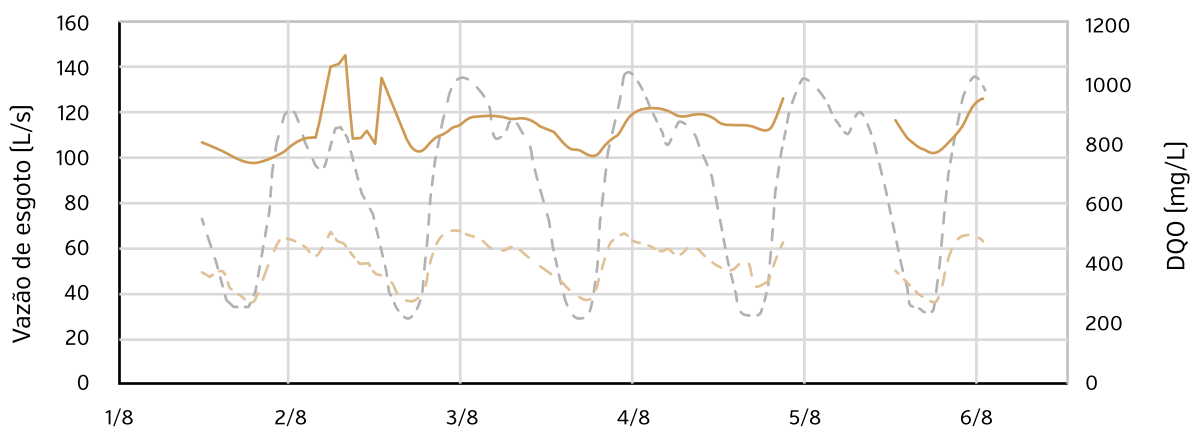
**Figura 44:** Pluviometria e temperatura do esgoto ETE C – período de estiagem.



Fonte: Cabral [2016].

Destaca-se que não ocorreram precipitações no local para o período considerado (volume precipitado acumulado = 0 mm). Complementarmente, nos seis dias que antecederam o intervalo de tempo escolhido, não foram registrados eventos pluviométricos. Por conseguinte, pode-se afirmar que essa amostra temporal selecionada representa um período de estabilidade meteorológica. Percebe-se ainda que não ocorreram variações significativas da temperatura média do líquido ( $T_{\text{média}} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

**Figura 45:** Médias horárias da vazão de esgoto e concentração de DQO na ETE C – período de estiagem.

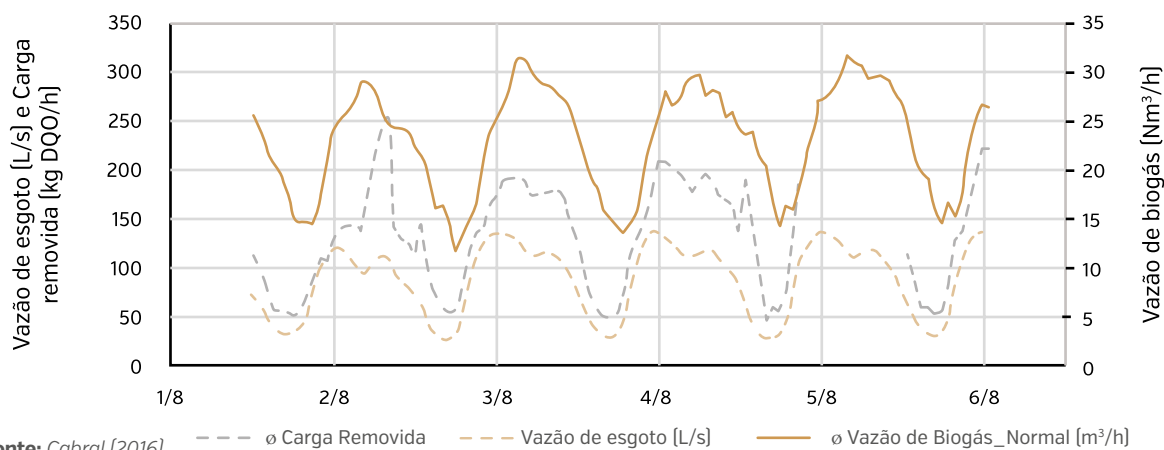


Fonte: Cabral [2016].



**Figura 46:** Médias horárias da vazão de esgoto e biogás e carga de DQOremovida na ETE C - período de estiagem.

Depreende-se um comportamento similar entre as curvas de concentração de DQO, denotando que a eficiência de remoção de carga orgânica (calculadas neste caso com  $DQO_{total}$  de entrada e saída) permaneceu sistematicamente em torno de 65%. A Figura 46 permite observar a carga removida associada ao comportamento da produção de biogás no período.



Fonte: Cabral [2016].

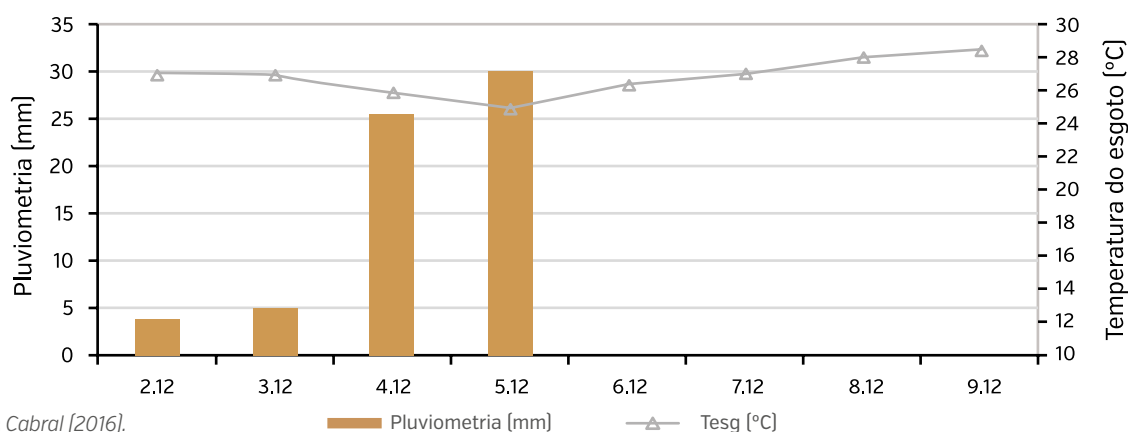
Em vista da estabilidade meteorológica do intervalo temporal analisado, bem como da estabilidade da temperatura do líquido e das eficiências de remoção, pode-se afirmar que o comportamento da produção de biogás (Figura 46) foi influenciado sobremaneira pela concentração de  $DQO_{total}$  afluente. Fica evidente o comportamento temporal variável, periódico e não estacionário da produção de biogás, conforme também reportado por Possetti *et al.* (2013), acompanhando o comportamento das variáveis de vazão de esgoto, DQO de entrada e saída e, conseqüentemente, da carga orgânica removida.

Cabe destacar, todavia, que a variabilidade da produção de biogás está certamente associada a outras variáveis cujo isolamento ainda é um desafio, a exemplo de aspectos operacionais como a remoção de espuma. Ao passo que ausência de seu descarte pode criar barreira física à coleta do gás, procedimentos operacionais e frequências de remoção adequados podem resultar em perdas negligenciáveis de biogás (FLÓREZ, 2016).

**Figura 47:** Pluviometria e temperatura do esgoto na ETE C - período chuvoso.

#### Análise do período chuvoso

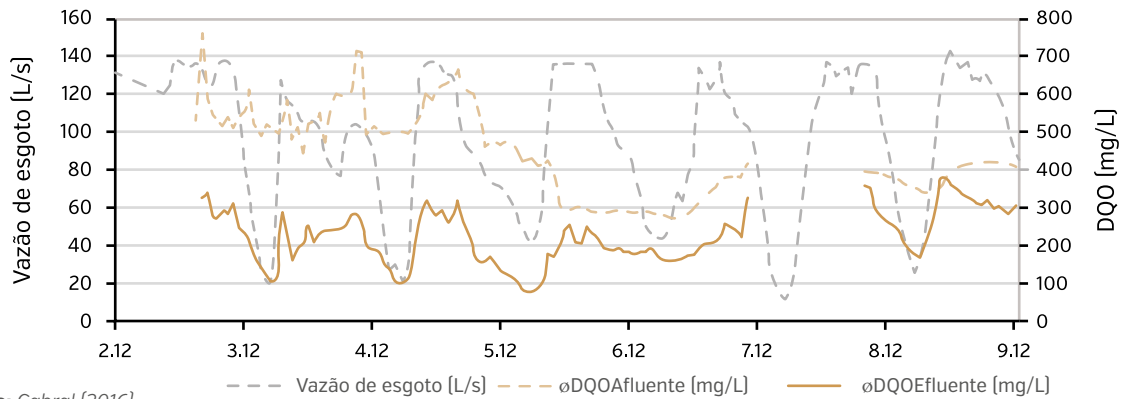
Na Figura 47, podem-se visualizar as variáveis de precipitação acumulada e a temperatura do líquido, que definem o período chuvoso entre 02/12 a 09/12/2015.



Fonte: Cabral [2016].

**Figura 48:** Médias horárias da vazão de esgoto e concentração de DQO na ETE C - período chuvoso.

Nota-se, por meio da Figura 48, uma precipitação acumulada de aproximadamente 57 mm entre os dias 04 e 05/12, concomitantemente com uma diminuição de cerca de 4 °C na temperatura do líquido. O comportamento da vazão média de esgoto e das concentrações de DQO<sub>total</sub> afluyente e efluente do reator UASB são apresentados na Figura 48.



Fonte: Cabral [2016].

**Figura 49:** Médias horárias da vazão de esgoto e biogás e carga de DQO<sub>removida</sub> na ETE C - período chuvoso.

Novamente, depreende-se um comportamento similar entre as curvas de concentração de DQO<sub>total</sub> até o dia 05/12. A partir desta data, percebe-se uma nítida perda de eficiência na remoção de carga orgânica, para valores inferiores a 40%. A Figura 49 permite observar a carga orgânica removida (calculada neste caso com DQO<sub>total</sub> de entrada e saída) associada ao comportamento da produção de biogás no período.



Fonte: Cabral [2016].

Pode-se inferir que os eventos pluviométricos não acarretaram em aumento expressivo da vazão de esgoto afluyente à ETE, em vista da existência de estrutura de extravasão. Todavia, é nítido o decréscimo da concentração de DQO afluyente, em virtude do efeito de diluição da matéria orgânica via intrusão de água pluvial na rede coletora de esgoto.

A redução da eficiência de remoção de carga orgânica (em termos de kgDQO<sub>total</sub>) provavelmente esteve associada a picos de vazão de esgoto afluyente, os quais ocasionam diminuição do tempo de detenção hidráulica e conseqüente incremento de velocidades ascensionais, propiciando o arraste

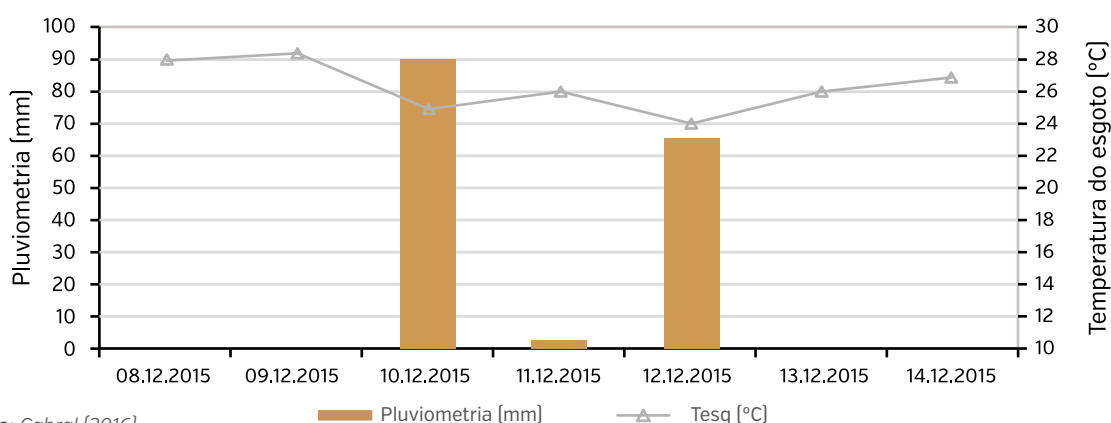
e a perda de sólidos junto ao efluente. Estes eventos, ao passo que reduzem as concentrações afluentes de DQO, propiciam também a perda de biomassa metanogênica ativa, impactando a recuperação da produção de biogás em períodos subsequentes às precipitações. Adicionalmente, outro aspecto a ser considerado refere-se à maior capacidade de dissolução do metano na fase líquida quando dos decréscimos na temperatura (NELTING *et al.*, 2015), implicando em menor produção de biogás.

Para o período em análise, houve significativa alteração no padrão de produção de biogás (Figura 49). Em comparação ao período de estiagem anteriormente detalhado, registrou-se um decréscimo de aproximadamente 70% na vazão de biogás entre os dias 05 e 06/12. O restabelecimento do padrão precedente ao evento pluviométrico ocorreu apenas no segundo dia sem precipitação (07/12).

A diluição da matéria orgânica em função de ocorrências pluviométricas foi apontada por Possetti *et al.* (2013) como provável motivo para diminuição da produção de biogás em uma ETE de grande porte no município de Curitiba (PR). Adicionalmente, Waiss e Possetti (2015) verificaram uma tendência de redução nas vazões de biogás à medida que os registros pluviométricos tornam-se mais intensos, sobretudo para eventos acima de 10 mm, similares àqueles observados nos dias 04 e 05/12 na ETE C.

Para o período posterior ao dia 08/12, os dados associados à concentração afluente de DQO<sub>total</sub> para a ETE C não foram obtidos. Não obstante, optou-se por caracterizar um período chuvoso adicional (Figura 50), entre 08/12 e 14/12, dada a magnitude dos eventos pluviométrico observados. Nesse contexto, registrou-se uma precipitação acumulada de 159 mm no referido período, com chuvas concentradas de 91 mm no dia 10/12 e 66 mm no dia 12/12.

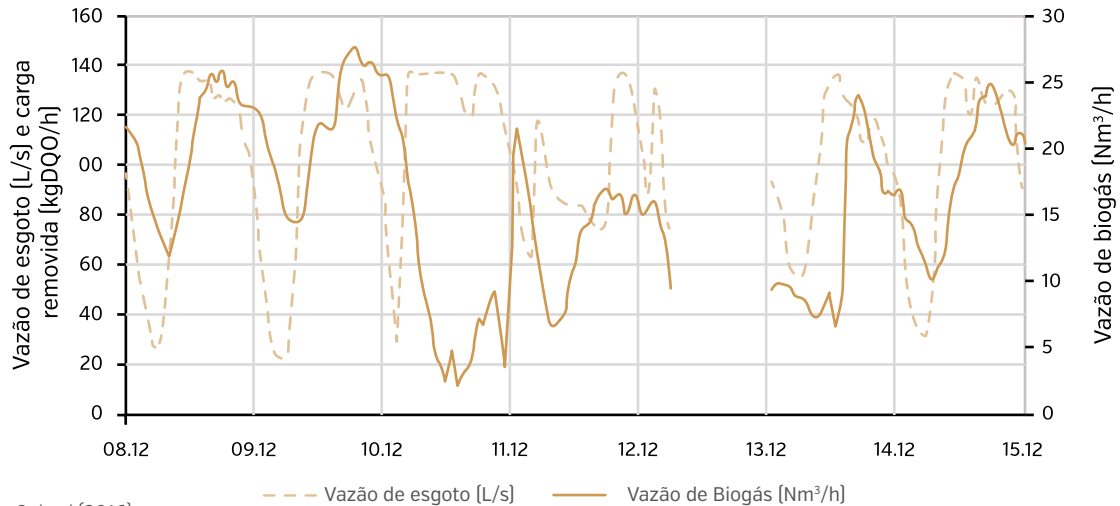
**Figura 50:** Pluviometria e temperatura do esgoto na ETE C - período chuvoso [análise complementar].



Fonte: Cabral [2016].

Na Figura 51, são reportadas as vazões médias de esgoto e biogás para o período chuvoso complementar analisado (08/12 a 14/12). O evento pluviométrico associado ao dia 10/12 acarretou uma queda acentuada (superior a 80%) na produção de biogás.

**Figura 51:** Médias horárias da vazão de esgoto e biogás na ETE C – período chuvoso [análise complementar].



Fonte: Cabral [2016].

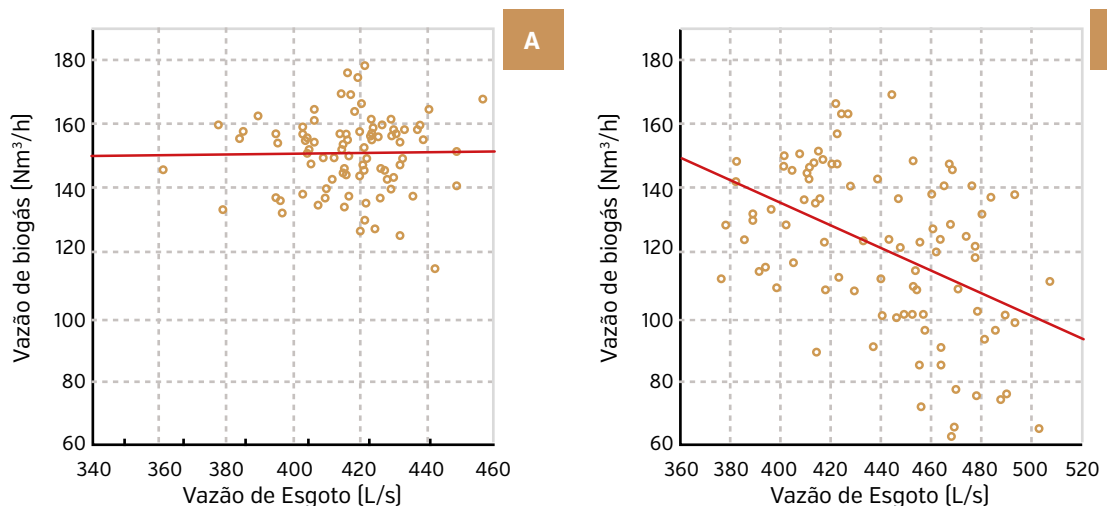
Findados os três dias chuvosos (10 a 12/12), percebe-se que a retomada do comportamento da produção de biogás ao padrão antecedente aos eventos pluviométricos ocorre após cerca de dois dias, embora ainda com vazões mínimas e máximas aquém das verificadas no período de estiagem predecessor.

### 3.3.2.3. ETE F

Como elemento complementar à discussão sobre os efeitos de eventos pluviométricos no comportamento da produção de biogás nas ETEs investigadas, apresenta-se, na Figura 52 (a-b), os gráficos de dispersão entre as vazões médias diárias de esgoto e biogás para a ETE F.

**Figura 52:** Gráficos de dispersão entre a vazão média diária de biogás e a vazão média diária de esgoto na ETE F para: (a) período de estiagem (junho a agosto); e (b) período chuvoso (janeiro a março).

Para tanto, foram considerados um período de estiagem (junho a agosto – 2015) e um período chuvoso (janeiro a março – 2016). No primeiro, as vazões médias de esgoto e de biogás foram, respectivamente, 417 L/s e 151 Nm<sup>3</sup>/h. Já para os meses chuvosos, as vazões médias de esgoto e de biogás foram de 441 L/s e 121 Nm<sup>3</sup>/h, respectivamente, com acentuada tendência da produção de gás decrescer com o aumento da vazão de esgoto (Figura 52 – b).



Fonte: Cabral et. al [2016].

Nota-se que, para o período de estiagem, o aumento da vazão de esgoto afluente pouco influencia a vazão de biogás. Ainda que não tenha sido possível a coleta *online* sistemática de dados de concentração de DQO, pode-se inferir que a carga orgânica média aplicada permaneceu constante, em vista de possíveis reduções na concentração afluente de DQO. Todavia, aspectos operacionais não contemplados nesta análise não podem ser relegados a segundo plano, a exemplo da existência de pontos de fuga de biogás.

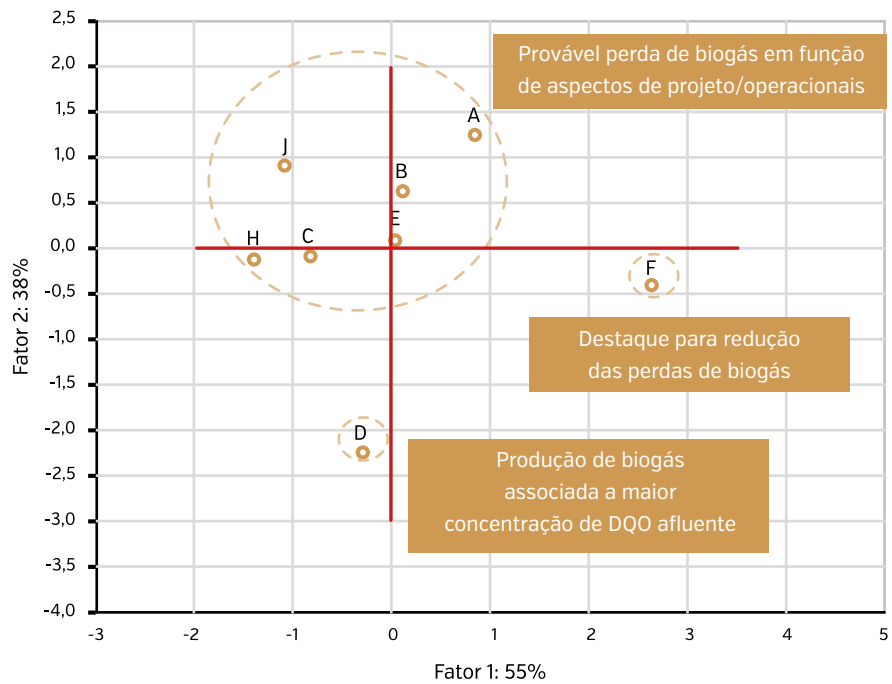
*De fato, a intrusão de água pluvial no sistema de coleta de esgoto sanitário, além de poder contribuir para a redução do tempo de detenção hidráulica e eventual perda de biomassa, promove a redução das concentrações de DQO<sub>total</sub> afluente, de maneira que o conjunto de fatores associados aos eventos pluviométricos influenciam significativamente as taxas de produção de biogás em reatores do tipo UASB/RALF.*

### 3.3.3 Síntese dos fatores interferentes na produção de biogás

Na Figura 53, apresentam-se os resultados de uma análise de componentes principais (ACP) em que se considerou a interveniência entre concentração de DQO<sub>total</sub> afluente e as vazões de esgoto e biogás. Associados, tais fatores parecem explicar cerca de 93% da variabilidade dos dados. A configuração espacial obtida permite inferir três grupamentos distintos de estações de tratamento, a saber:

- >> As ETEs A, B, C, E, H e J estão em um grupo cujos menores valores de taxas de produção de biogás parecem estar associados às perdas gasosas, em virtude de aspectos de projeto e/ou operacionais.
- >> A ETE D apresenta valores de taxas de produção de biogás mais elevados em vista das maiores concentrações de DQO<sub>total</sub> afluente e, conseqüentemente, maior carga orgânica volumétrica aplicada (mediana = 5,1 kgDQO/m<sup>3</sup>.dia).
- >> A ETE F destaca-se provavelmente em função de valores de taxas de produção de biogás mais próximos de um cenário típico de produção de biogás (vide item 3.4), em vista de intervenções associadas à garantia da estanqueidade dos reatores anaeróbios.

**Figura 53:** Análise dos principais fatores interferentes na produção de biogás entre as ETEs investigadas.



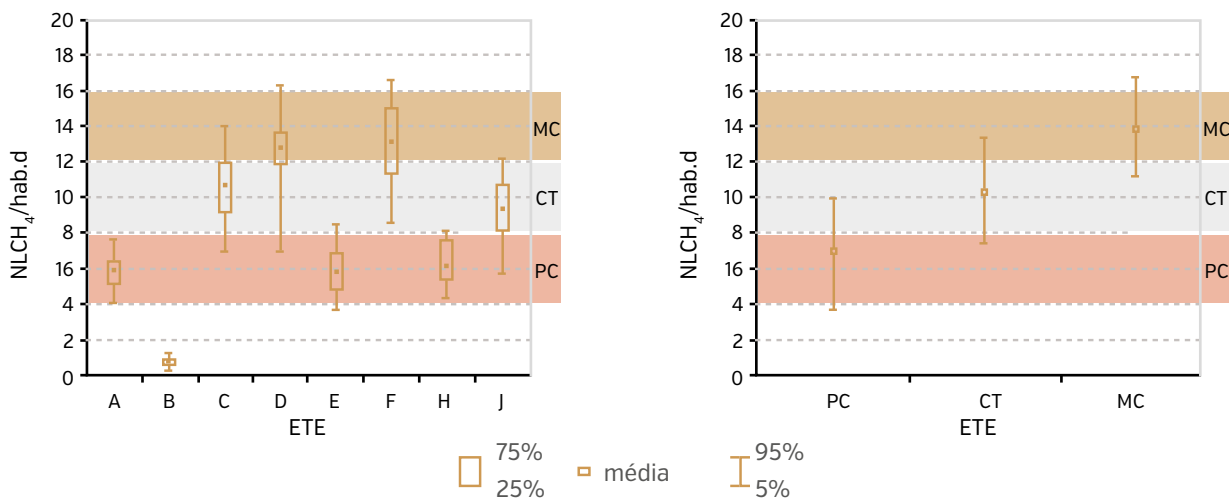
Fonte: Autores [2016].

### 3.4 Relações unitárias de produção de metano

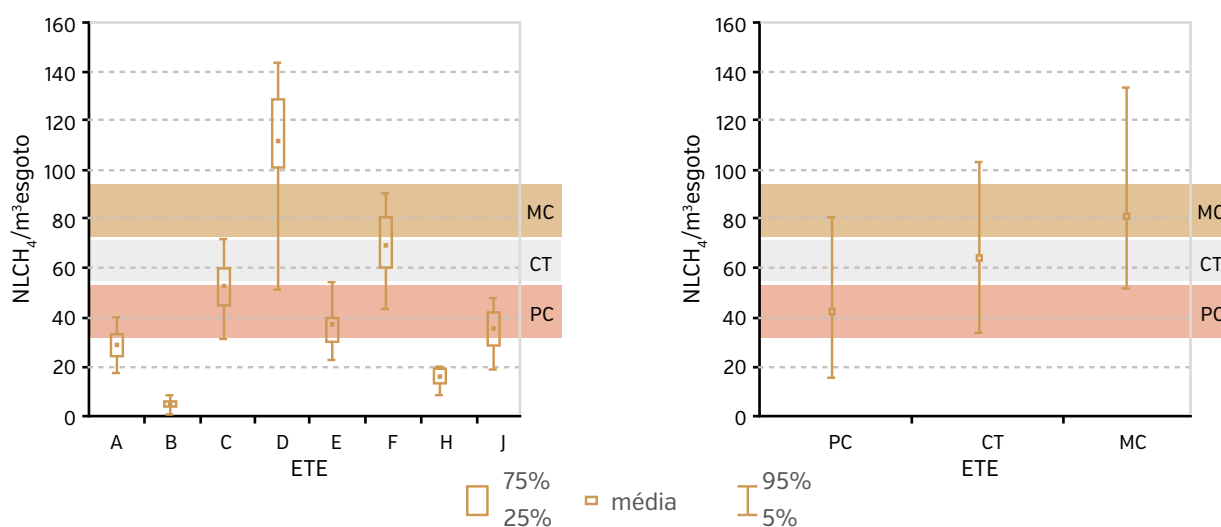
A partir dos resultados das medições de vazão de esgoto, vazão de biogás, teor de metano e carga de DQO<sub>removida</sub> (DQO<sub>total</sub> afluente e DQO<sub>filtrada</sub> efluente) nos reatores anaeróbios investigados, foram determinadas as relações unitárias de produção de metano, confrontando-as com o matemático proposto por Lobato *et al.* (2012).

Para permitir a mesma base de comparação entre as ETEs avaliadas, foi adotada a contribuição per capita de 110 g DQO/hab.d, calculando-se a população equivalente a partir da concentração média de DQO<sub>total</sub> afluente e vazão média afluente de esgoto. Nos gráficos *box-plot* da Figura 54, é possível visualizar a variação das relações unitárias para cada estação.

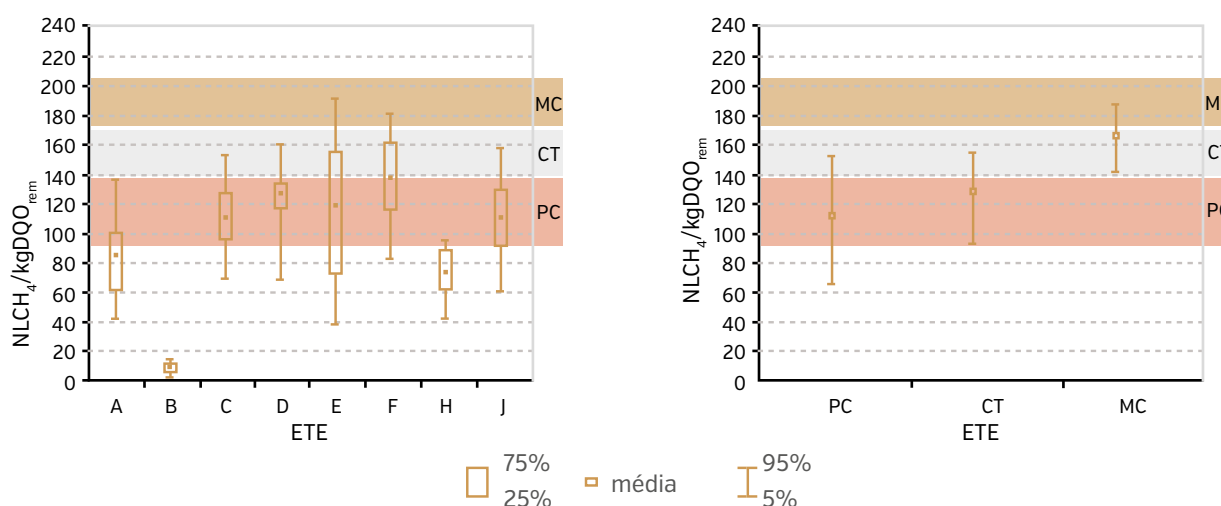
**Figura 54:** *Box-plot* das relações unitárias obtidas da produção de biogás [lado esquerdo] quanto a 1) per capita; 2) vazão de esgoto tratado; e 3) carga orgânica removida, em comparação aos cenários do modelo de Lobato *et al.* [2012] (lado direito).



Cenários: PC = Pior Cenário; CT = Cenário Típico e MC = Melhor Cenário.



Cenários: PC = Pior Cenário; CT = Cenário Típico e MC = Melhor Cenário.



Cenários: PC = Pior Cenário; CT = Cenário Típico e MC = Melhor Cenário.

Fonte: Autores [2016].

Em comparação ao modelo proposto por Lobato *et al.* (2012), pode-se observar que as relações unitárias para as ETEs A e H associadas à produção de metano per capita ( $NLCH_4/hab.d$ ), bem como por carga orgânica removida ( $NLCH_4/kgDQO_{rem}$ ) e por vazão de esgoto tratado ( $NLCH_4/m^3_{esgoto}$ ), ficaram abaixo da previsão do Pior Cenário. Destaca-se que, na detecção de vazamentos de biogás na superfície dos reatores anaeróbios foram constatadas fugas para a atmosfera através de fissuras e também de tubulações mal seladas, ocasionando maiores perdas de gás que as estimadas pelo modelo.

A ETE B apresentou valores consideravelmente abaixo do Pior Cenário para todas as relações unitárias determinadas, os quais não podem ser atribuídos somente à existência de vazamentos. Um conjunto de fatores pode estar associado aos valores registrados, a exemplo da topologia do reator (características geométricas de projeto – Tabela 2 e Tabela 3), a qual pode influenciar a deficiência de produção e, principalmente, de captura do biogás. Adicionalmente, há que mencionar a falta de precisão do medidor de biogás para baixas vazões. Posto isso, as relações unitárias obtidas para essa

estação não foram consideradas na interpretação dos valores de referência obtidos pelo Projeto Medições.

Para as ETEs C, E e J, verifica-se uma aproximação do Pior Cenário modelado quando da observação das relações unitárias de produção de metano por carga orgânica removida e por vazão de esgoto tratado. Todavia, ao se considerar a produção de metano per capita, nota-se que a média dos valores verificados para as ETEs C e J adere-se ao Cenário Típico modelado. Notam-se elevadas eficiências de remoção de carga orgânica (Tabela 8), apesar de também tenham sido detectados vazamentos de gás nestas estações.

Para a ETE D, a relação unitária associada à produção de metano per capita ficou próxima do Melhor Cenário do modelo de Lobato *et al.* (2012), ao passo que se considerada a produção de metano por vazão de esgoto tratado, nota-se que a média dos valores registrados esteve acima do Melhor Cenário. Todavia, a concentração mediana de DQOtotal afluente a esta estação é significativamente (*Kruskal-Wallis* -  $\alpha = 5\%$ ) mais elevada que nas demais ETEs, provavelmente devido ao baixo consumo per capita de água potável da região. Dessa maneira, considerando-se a relação unitária associada à produção de metano por carga orgânica removida, a ETE D se aproximaria do Pior Cenário modelado.

Quanto à ETE F, esta se enquadrou no Cenário Típico reportado por Lobato *et al.* (2012). Destaca-se que essa estação passou por detecção de vazamentos de biogás e medidas de vedação dos reatores UASB nos últimos dois anos. Provavelmente, este é um fator crucial para a melhor adequabilidade da ETE F aos valores do Cenário Típico do modelo matemático utilizado, comparativamente às demais estações investigadas no Projeto Medições. Nesta estação, a produção média específica de metano foi de 13,4 NLCH<sub>4</sub>/hab.d (17,0 NLbiogás/hab.d).

*Evidencia-se a importância de se utilizar a relação unitária de produção de metano por carga orgânica removida (NLCH<sub>4</sub>/kgDQO<sub>rem</sub>) para que se possam obter estimativas mais precisas de produção de biogás em reatores tipo UASB/RALF. Tal relação unitária permite uma comparação mais fidedigna entre estações de tratamento, ao passo que contempla as variáveis de concentração de DQO e eficiência do reator.*

Na Tabela 12, apresenta-se uma síntese da comparação entre as ETEs investigadas, considerando os fatores intervenientes para a determinação da produção de metano por carga orgânica removida. Nota-se uma considerável variação entre as medianas das estações monitoradas, com valores variando entre aproximadamente 73 e 138 NLCH<sub>4</sub>/kgDQO<sub>remov</sub>.



**Tabela 12:** Tabela comparativa das relações unitárias de produção de metano para as ETEs investigadas.

ETE	NLCH <sub>4</sub> / KGDQO <sub>REMOV</sub>	CLASSIFICAÇÃO <sup>1</sup>	REATOR	DETECÇÃO DE VAZAMENTOS	DQO	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE DQO <sup>2</sup>	TEMP. (°C)
F	138,3	CT	UASB	Baixa	684	87%	23
D	125,3		UASB	Baixa	1146	65%	24
E	118,7	PC	UASB	Elevada	714	90%	22
C	112,1		RALF	Média	670	75%	29
J	110,3		UASB	Média	431	87%	28
A	84,8	PC*	UASB	Elevada	476	72%	20
H	72,5		UASB	Elevada	656	93%	24

<sup>1</sup> CT = Cenário típico; PC = Pior Cenário; PC\* = Abaixo do pior cenário

<sup>2</sup> Eficiência calculada em função da DQO<sub>total</sub> afluente e DQO<sub>filtrada</sub> efluente (vide item 2.3.1).

Fonte: Autores (2016).

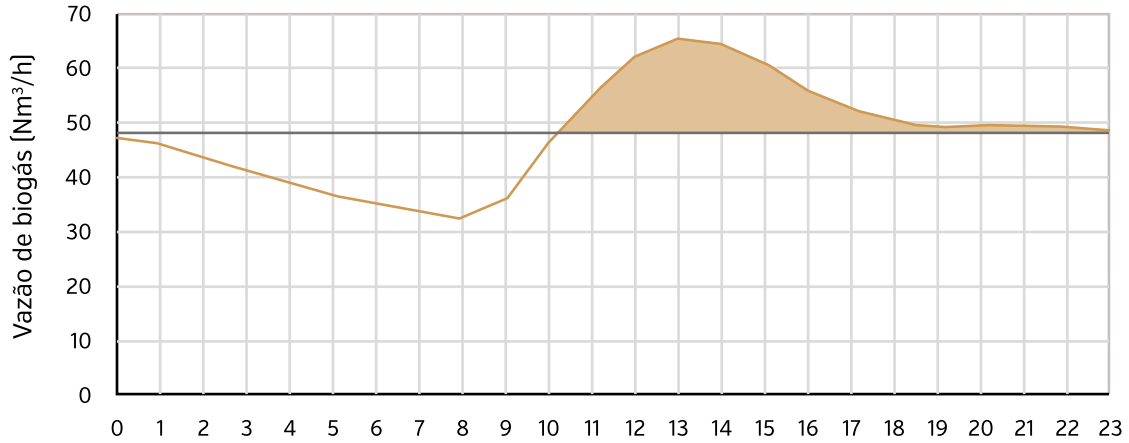
*Ressalta-se que um fator determinante para a classificação das estações em relação aos cenários do modelo matemático é a detecção de vazamentos de biogás para a atmosfera. Adicionalmente, a topologia do reator (características geométricas de projeto) pode corroborar a deficiência de produção e, principalmente, de captura do biogás.*

### 3.5 Subsídios para o aproveitamento energético do biogás nas ETEs investigadas

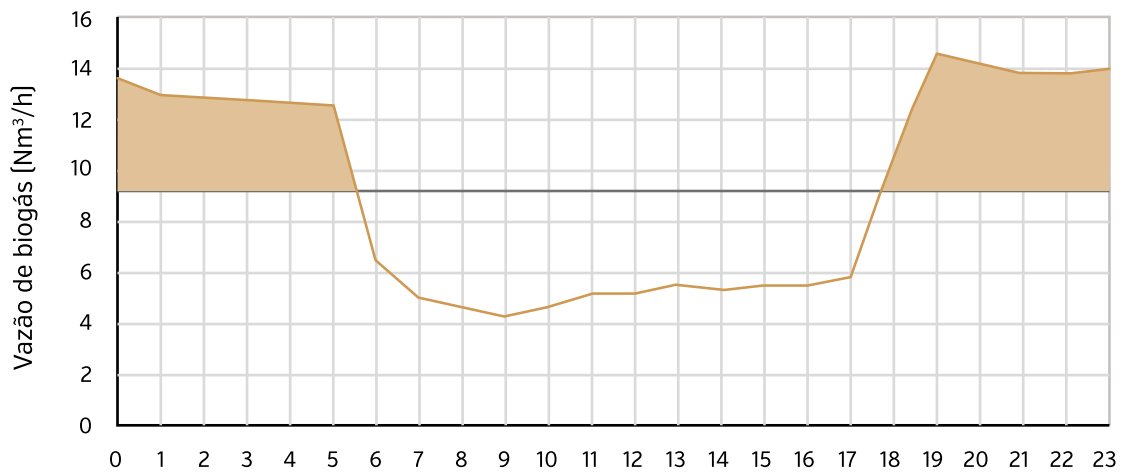
Em função do comportamento típico da produção de biogás, notadamente temporal, periódico e não estacionário, bem como das características qualitativas do biogás evidenciadas pelo Projeto Medições, caracteriza-se a necessidade de implantação das etapas de armazenamento e tratamento para consecução do aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica. Os subsídios para etapas anteriormente mencionadas são apresentados nos itens 3.5.1 a 3.5.3, a seguir.

#### 3.5.1. Armazenamento do biogás

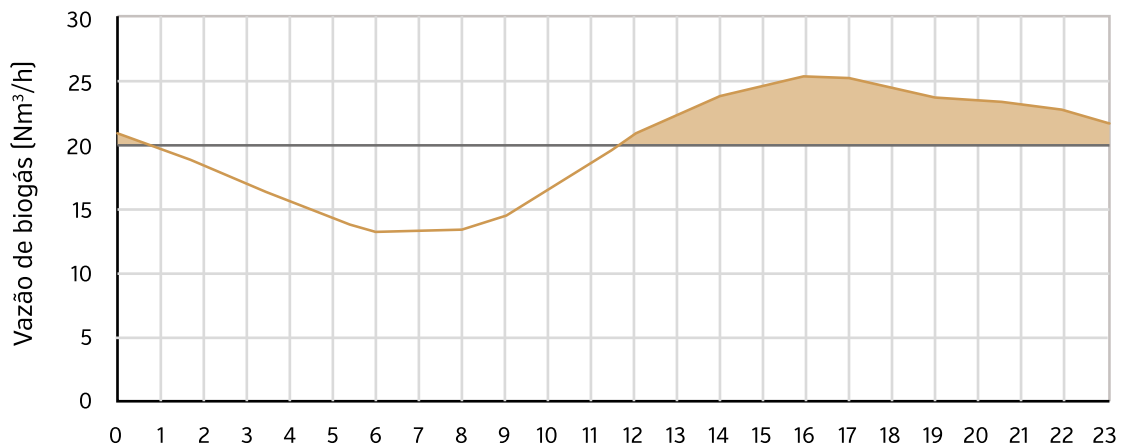
O volume mínimo necessário para o gasômetro foi determinado em função dos gráficos de produção e consumo médio de biogás para o aproveitamento contínuo na unidade de geração de energia elétrica (motor Ciclo Otto). Os referidos gráficos são apresentados nas Figuras de 55 a 63.

**Figura 55:** Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE A.

Fonte: Autores [2016].

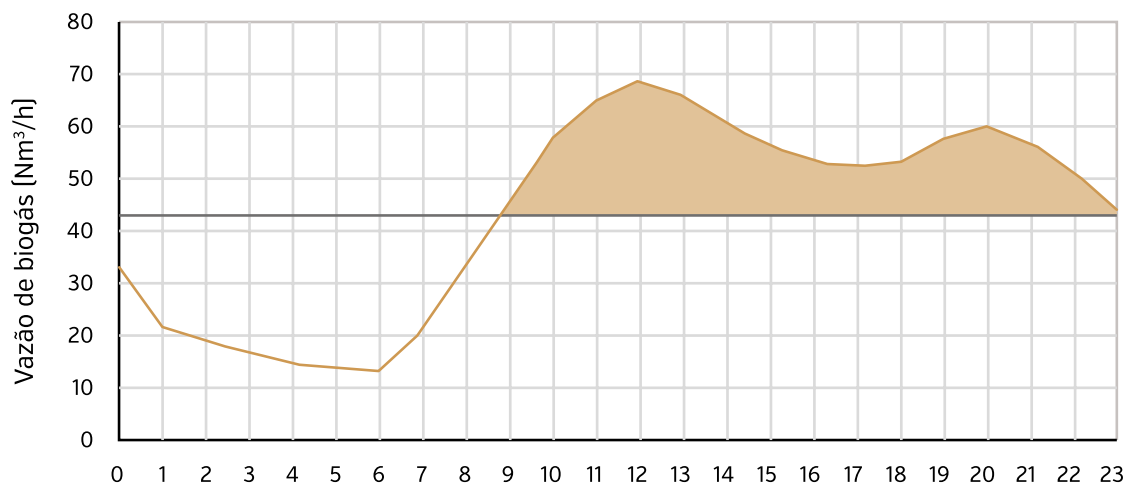
**Figura 56:** Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE B.

Fonte: Autores [2016].

**Figura 57:** Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE C.

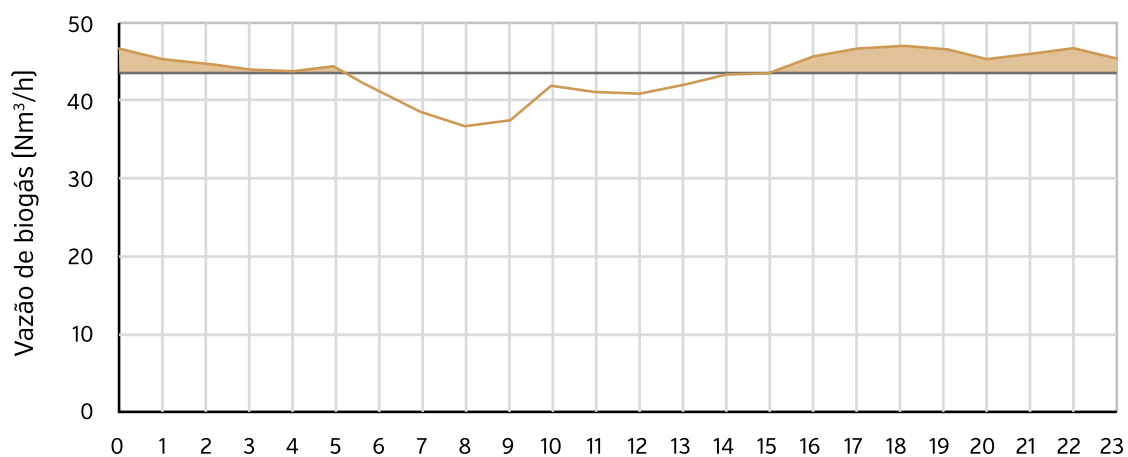
Fonte: Autores [2016].

**Figura 58:** Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE D.



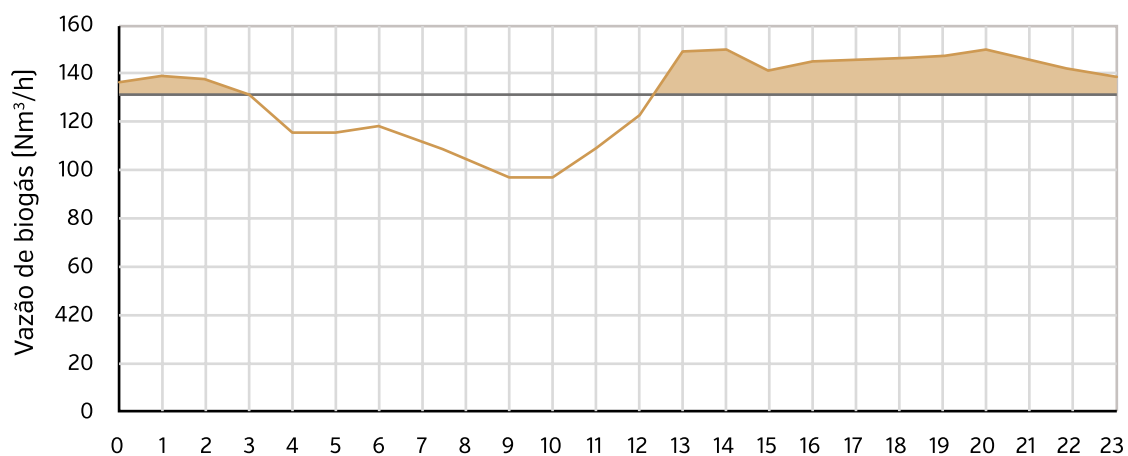
Fonte: Autores [2016].

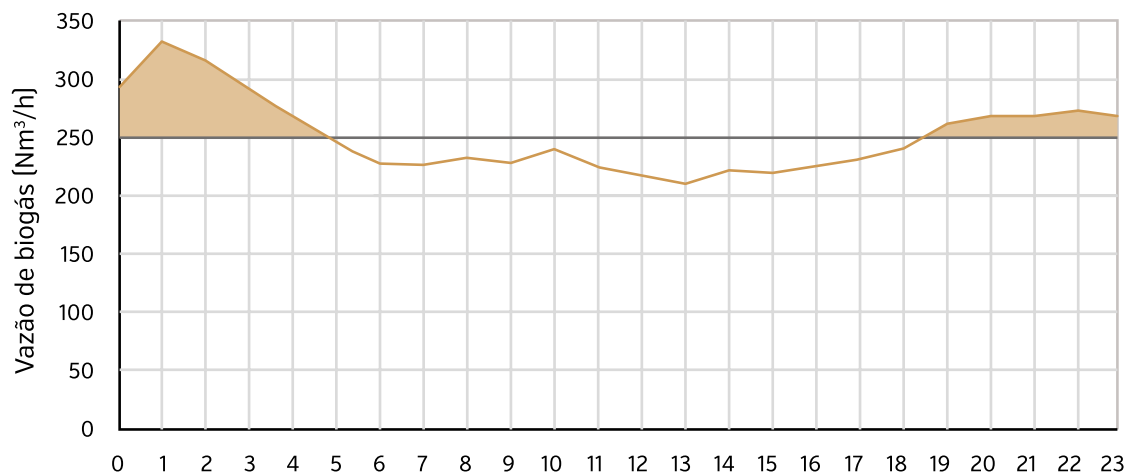
**Figura 59:** Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE E.



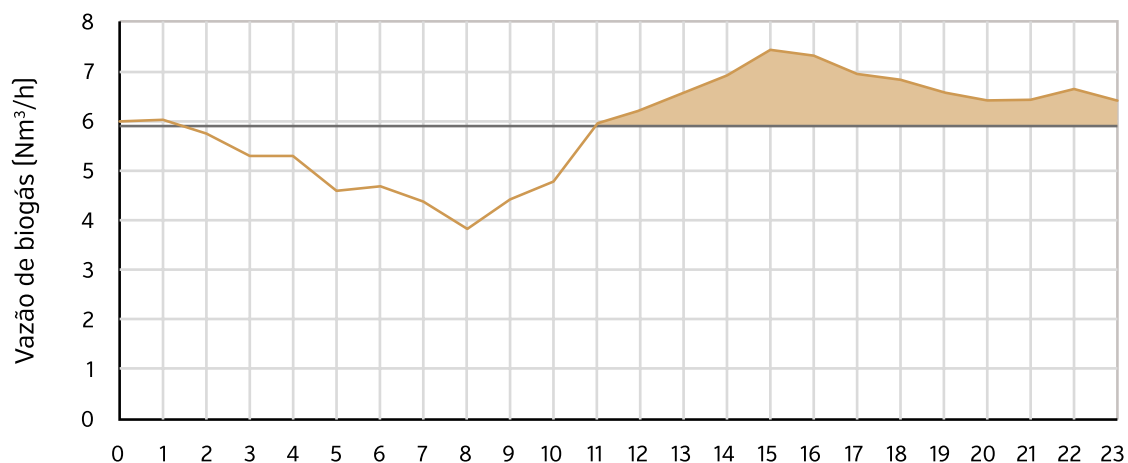
Fonte: Autores [2016].

**Figura 60:** Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE F.

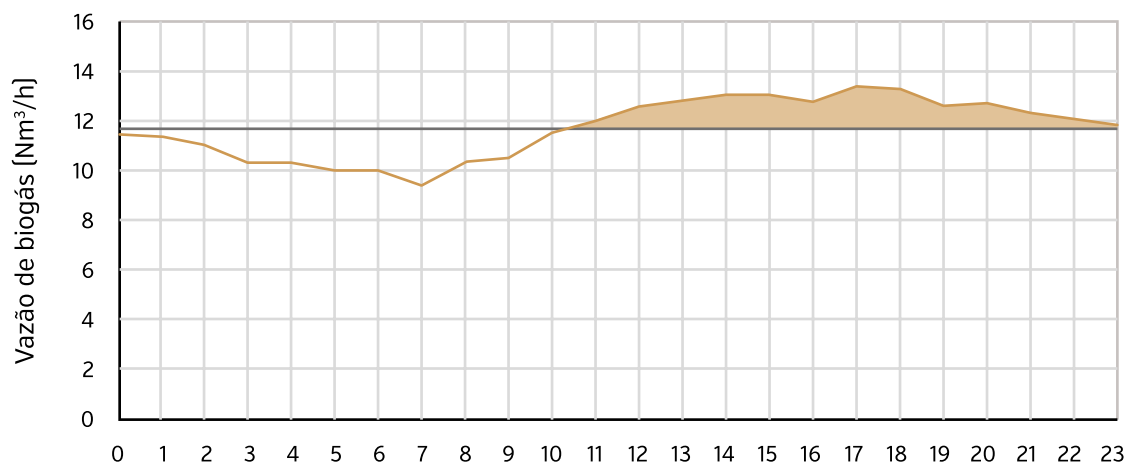


**Figura 61:** Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE G.

Fonte: Autores [2016].

**Figura 62:** Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE H.

Fonte: Autores [2016].

**Figura 63:** Produção e consumo médio de biogás para aproveitamento contínuo na ETE J.

Fonte: Autores [2016].

**Tabela 13:** Volume mínimo do gasômetro com relação à produção diária de biogás.

A área destacada abaixo de cada curva representa a quantidade mínima de gás a ser armazenada. Os resultados do cálculo de volume de armazenamento estão apresentados na Tabela 13.

ETE	Vazão de biogás (Nm <sup>3</sup> /d)	Volume calculado (m <sup>3</sup> )	% da produção diária
A	1152	90,1	8%
B	221	48,0	22%
C	476	43,9	9%
D	1033	201,2	20%
E	1043	29,2	2,8%
F	3126	158,3	5%
G	6025	324,3	5%
H	142	10,0	7%
J	281	11,8	4%

Fonte: Autores (2016).

Percebe-se que, para a maioria das ETes investigadas, o volume mínimo necessário do gasômetro ficou abaixo de 10% da vazão média diária de biogás, sendo que apenas para as ETes B e D os valores foram superiores a 20%, visto a maior variação da produção de biogás durante o dia.

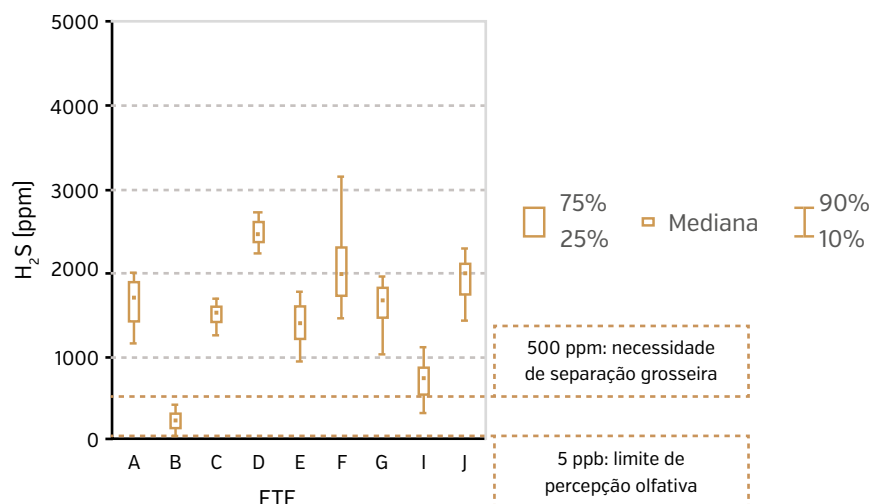
Portanto, como referenciado na norma alemã DWA M 363 (2010), tanto mais a característica de produção se aproxime daquela de consumo, menor o volume necessário de armazenamento do gasômetro. Adicionalmente, para digestores de lodo com alimentação contínua e semicontínua, a norma em questão indica que o volume de armazenamento deve corresponder de 30 a 50% do volume diário de biogás gerado.

Logo, considerando-se que: *i*) os reatores tipo UASB/RALF possuem alimentação contínua; *ii*) os resultados associados à produção média de biogás indicam padrões de variabilidade diária; e *iii*) o volume de armazenamento deve permitir que as oscilações de produção de biogás sejam compensadas, considera-se que 30% do volume diário de biogás gerado seja apropriado para o dimensionamento dos gasômetros, conforme reportado por Cabral (2016).

### 3.5.2. Tratamento do biogás

O teor de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) no biogás demonstrou variação diária e significativa variabilidade (Kruskal-Wallis -  $\alpha = 5\%$ ) entre as ETes investigadas (Figura 64), todavia cerca de 90% dos dados globais estiveram acima de 500 ppm. Cabe destacar que as maiores concentrações de H<sub>2</sub>S foram verificadas para a ETE D, sendo que aproximadamente 45% dos dados registrados foram superiores a 2500 ppm.

**Figura 64:** Gráfico *box-plot* da concentração de H<sub>2</sub>S.



Fonte: Autores [2016].

Em vista do potencial corrosivo do ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), derivado da reação do sulfeto de hidrogênio com a água, recomenda-se um teor máximo de H<sub>2</sub>S de 130 ppm para a utilização de motogeradores, objetivando o aproveitamento energético do biogás (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008; SOREANU *et al.*, 2011). Logo, os resultados desta pesquisa indicam a necessidade de tratamento seletivo do biogás para remoção de H<sub>2</sub>S e recuperação do metano.

Os métodos de remoção seletiva de H<sub>2</sub>S no biogás podem físicos, químicos ou bioquímicos (CHERNICHARO *et al.*, 2011). Em vista das concentrações típicas observadas nos reatores anaeróbios investigados (90% dos dados superiores a 500 ppm) e tomando-se como finalidade o uso do biogás para fins energéticos, poder-se-ia aplicar, primeiramente, um processo visando à separação grosseira do H<sub>2</sub>S, no próprio gasômetro, por exemplo. Uma possibilidade seria a utilização de sistema de biodessulfuração, como recomendado no *Guia de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto* (BRASIL, 2015). Posteriormente, um sistema de dessulfuração com adsorção por carvão ativado poderia ser empregado, por exemplo. Tais sistemas podem ser utilizados em escala comercial até uma concentração máxima afluyente de 500 ppm, podendo proporcionar um grau de pureza inferior a 1 ppm de H<sub>2</sub>S para o gás tratado (BRASIL, 2015).

Cabe ainda ressaltar a importância do controle de emissões fugitivas e estanqueidade dos reatores anaeróbios no que se refere ao controle de odores. O sulfeto de hidrogênio apresenta elevada solubilidade em meio líquido, todavia os gradientes hidráulicos na saída do reator anaeróbio podem propiciar sua liberação. Adicionalmente, o limite de percepção olfativa para o H<sub>2</sub>S ocorre em concentrações extremamente baixas, da ordem de 5 ppb, o que reforça a preocupação com as emissões odorantes (WEF, 1995; STUETZ & FRECHEN, 2001).

### 3.5.3. Aproveitamento energético

Em vista dos valores de vazão média de biogás e teor de metano caracterizados durante o Projeto Medições, estimou-se o potencial de geração de energia elétrica e a respectiva potência da unidade de aproveitamento energético (motor Ciclo Otto). Na Tabela 14, são apresentados os resultados obtidos. Para efeito de comparação, foram estimados também os valores associados ao Cenário Típico do modelo matemático proposto por Lobato *et al.* (2012).

**Tabela 14:** Estimativas de geração de energia elétrica e da potência do motogerador para as ETEs monitoradas.

ETE	PARÂMETRO	COM BASE NOS RESULTADOS OBTIDOS PELO PROJETO MEDIÇÕES	COM BASE NO CENÁRIO TÍPICO DE LOBATO ET AL. (2012)	DIFERENÇA	DIFERENÇA (%)
<b>A</b>	Pot. Instalada [kWel]	138	286	147	107%
	Geração de En. Elétrica [kWh/d]	3.319	6.855	3535	
<b>B</b>	Pot. Instalada [kWel]	26	377	350	1.323%
	Geração de En. Elétrica [kWh/d]	636	9.047	8.411	
<b>C</b>	Pot. Instalada [kWel]	57	97	40	70%
	Geração de En. Elétrica [kWh/d]	1.375	2.335	959	
<b>D</b>	Pot. Instalada [kWel]	118	194	76	64%
	Geração de En. Elétrica [kWh/d]	2.843	4.660	1.817	
<b>E</b>	Pot. Instalada [kWel]	99	192	93	95%
	Geração de En. Elétrica [kWh/d]	2.366	4.603	2.238	
<b>F</b>	Pot. Instalada [kWel]	377	-	-	-
	Geração de En. Elétrica [kWh/d]	9.055	-	-	
<b>G</b>	Pot. Instalada [kWel]	605	956	352	58%
	Geração de En. Elétrica [kWh/d]	14.515	22.954	956	
<b>H</b>	Pot. Instalada [kWel]	11	38	26	235%
	Geração de En. Elétrica [kWh/d]	270	2.512	1.763	
<b>J</b>	Pot. Instalada [kWel]	33	61	28	85%
	Geração de En. Elétrica [kWh/d]	789	1.459	670	

Fonte: Autores (2016).

Considerando as indicações recentes de porte da unidade de geração de energia para a viabilidade técnico-econômica de um projeto de aproveitamento de biogás de reatores UASB (VALENTE, 2015; ROSENFELDT *et al.*, 2015; BRASIL, 2016b), percebe-se que somente as ETEs F e G estariam acima da escala mínima de viabilidade (200 kW).

Considerando-se o consumo de energia elétrica da ETE F (ano base: 2013), equivalente a 473.000 kWh/mês, destaca-se que a energia passível de ser gerada pelo aproveitamento energético do biogás poderia fornecer aproximadamente 60% do consumo total da estação. Ressalta-se que essa ETE passou por reformas e impermeabilização do reator anaeróbio, e, principalmente, pela detecção e reparo de vazamentos de biogás. Esse é um indicativo da possibilidade de que melhorias físicas e operacionais nas demais ETEs investigadas poderiam maximizar a recuperação de biogás. Destaca-se que, considerando o equivalente populacional da ETE F como 185.679 habitantes (calculado a partir de uma contribuição per capita de 100 gDQO/hab.d), ter-se-ia uma produção média de energia de aproximadamente 17,8 kWh/hab.a.

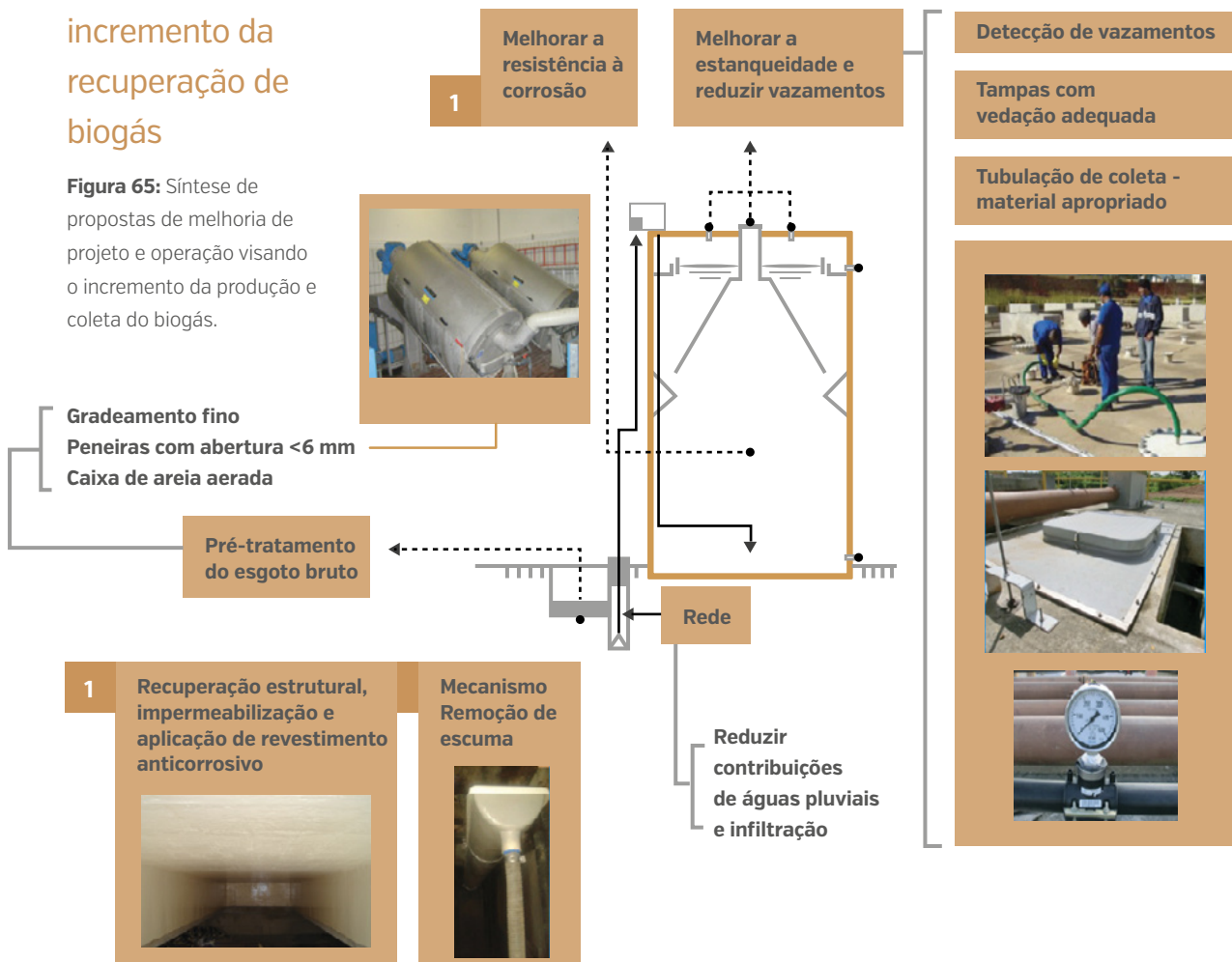
Em um Cenário Típico, os cálculos apontam para que as ETEs A e B tenham viabilidade técnico-econômica para implantação de unidade de

aproveitamento de biogás. Já para as ETEs D e E, seria recomendado um estudo detalhado de avaliação, em vista das escalas mínimas de viabilidade indicadas por Rosenfeldt *et al.* (2015) e Valente (2015), de 200 kW e 255 kW, respectivamente.

Tendo em conta que, tradicionalmente, os projetos de reatores do tipo UASB/RALF no Brasil não contemplavam, até o presente, o aproveitamento energético de biogás, pode-se presumir que os reatores existentes no país apresentam vazão de biogás captada provavelmente próxima de um Pior Cenário, semelhantemente ao observado no âmbito do Projeto Medições. Não obstante, para reatores UASB que contemplem melhorias de projeto, a exemplo das tentativas efetuadas na ETE F, considera-se que há clara possibilidade de atingir as condições características do Cenário Típico e, eventualmente, do Melhor Cenário proposto pelo modelo matemático de Lobato *et al.* (2012).

### 3.6 Propostas de melhoria dos reatores UASB visando ao incremento da recuperação de biogás

**Figura 65:** Síntese de propostas de melhoria de projeto e operação visando o incremento da produção e coleta do biogás.





Nota-se, no desenho esquemático, a preocupação preliminar com o sistema de coleta de esgoto, objetivando-se a redução de contribuições parasitárias de água pluvial, que, por sua vez, promovem a diluição do esgoto afluyente e, eventualmente, sobrecargas hidráulicas quando não empregados mecanismos de extravasão. Estes, por sua vez, devem necessariamente figurar entre os itens de projeto, em vista do significativo incremento de vazão proveniente da intrusão de águas pluviais.

Na entrada da ETE, as medidas iniciam-se no pré-tratamento, com o melhoramento da remoção de sólidos grosseiros e gordura, por meio de peneiras com aberturas menores do que 6 mm e caixas de areia aeradas, por exemplo. Tais alternativas podem evitar obstruções nas tubulações de distribuição de fluxo nos reatores anaeróbios, minimizando fluxos preferenciais e/ou zonas mortas, bem como reduzir a formação de espuma no interior dos separadores trifásicos.

No reator UASB propriamente dito, as medidas sugeridas associam-se a: i) melhoria da resistência à corrosão; ii) melhoria da estanqueidade; e iii) melhoria da remoção de espuma no interior do separador trifásico. Em relação às primeiras, reforça-se a necessidade de impermeabilização e aplicação de revestimento anticorrosivo nas paredes internas do reator que não estão em contato com o líquido. As medidas de melhoria da estanqueidade contemplam a utilização de tampas com vedação adequada para as câmaras de gás dos separadores trifásicos, bem como o emprego de tubulação em material apropriado para a linha de gás (aço AISI 316 Ti ou PEAD), como recomendado no *Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto* (BRASIL, 2015).

No que tange ao terceiro aspecto anteriormente elencado, devem ser previstos mecanismos de remoção de espuma dentro do reator, visando à redução de problemas operacionais associados ao bloqueio da passagem do gás, ruptura de separadores trifásicos e obstrução de válvulas de segurança. Entre as soluções comprovadamente funcionais, a remoção hidrostática de espuma via controle da pressão interna na câmara de gás dos separadores trifásicos (ROSA *et al.*, 2012) pode ser uma importante alternativa.

### 3.6.2. Emissões de Gases de Efeito Estufa decorrentes das perdas de metano

De forma geral, reatores anaeróbios podem ser fontes consideráveis de emissão de gases de efeito estufa (GEE) se o biogás não for recuperado ou queimado, neste caso visando à oxidação térmica do metano (IPCC, 2014). Ainda que uma destas condições seja assegurada, especificamente em relação aos reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, há que se considerarrem os vazamentos de biogás devido a eventuais falhas na estanqueidade, bem como as emissões fugitivas de biogás dissolvido na fase líquida ou como gás residual, escapando no compartimento de decantação dos reatores. A distinção entre estas parcelas de perdas de metano não foi efetuada no presente trabalho.

O potencial de emissões de GEE (em  $tCO_{2eq}/ano$ ) associado aos reatores anaeróbios investigados (ETEs A, C, E e J) é apresentado na Tabela 15. Adicionalmente, apresentam-se os respectivos valores anuais per capita de emissões de GEE, considerando-se os equivalentes populacionais das ETEs avaliadas.

**Tabela 15:** Potencial de emissões de GEE em tCO<sub>2</sub> equivalentes.

ETE	VAZÃO DE METANO MEDIDA [Nm <sup>3</sup> /h] <sup>1</sup>	VAZÃO DE METANO ESTIMADA [Nm <sup>3</sup> /h] <sup>2</sup>	EP (hab.) <sup>3</sup>	TCO <sub>2EQ</sub> /ano	TCO <sub>2EQ</sub> /hab.ano
A	37,3	70,3	122.465	5.804	0,047
C	16,2	25,6	47.246	1.653	0,035
E	27,4	55,1	114.377	4.871	0,043
J	8,5	14,6	26.992	1.073	0,040
<b>Faixas típicas<sup>4</sup></b>	8,5 – 37,3	14,6 – 70,3	26.992 – 122.465	1073 – 5804	0,035 – 0,047 [0,041]

<sup>1</sup> Resultados obtidos pelo Projeto Medições; <sup>2</sup> Vazões estimadas a partir do Cenário Típico do modelo de Lobato et al. (2012);

<sup>3</sup> Equivalente populacional, adotando-se per capita de 110gDQO/hab.d; <sup>4</sup> Intervalo entre valores mínimos e máximos observados, com média reportada entre colchetes

**Fonte:** Autores (2016).

Observa-se um *per capita* médio de emissões de GEE de 0,041 tCO<sub>2eq</sub>/hab. ano. Extrapolando-se os resultados para o contexto nacional, tem-se que um equivalente populacional de 22.973.017 habitantes é atendido por reatores do tipo UASB/RALF em seis estados brasileiros das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, considerando o Distrito Federal (CHERNICHARO *et al.*, 2015). Logo, estima-se uma emissão anual de aproximadamente 945.751 tCO<sub>2eq</sub>.

De acordo com as *Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor de Resíduos* (SEEG, 2016), esse valor representa 7% do total de emissões para o setor de tratamento de efluentes líquidos domésticos (ano base 2014). As emissões decorrentes das perdas de metano dos reatores tipo UASB/RALF, nas regiões anteriormente mencionadas, representariam menos de 0,07% do total de emissões para todos os setores considerados no inventário nacional, a saber: energia, processos industriais, agropecuária, mudança no uso da terra e florestas e tratamento de resíduos.

# 4

## CONCLUSÕES

O Projeto Medições objetivou avaliar o comportamento da produção e qualidade do biogás produzido em reatores anaeróbios tipo UASB e RALF tratando esgoto doméstico, visando à caracterização dos potenciais aproveitamentos energéticos. Para tanto, dez estações de tratamento de esgoto foram monitoradas no Brasil. As principais conclusões são delineadas a seguir.

### Fatores interferentes na produção de biogás

- » A produção de biogás apresentou variação espacial (de local para local) e temporal, sendo significativamente impactada por eventos pluviométricos. Mostrou-se também dependente das condições de projeto (topologia dos reatores) e construção (estanqueidade). Aspectos associados à operação certamente têm forte interveniência, carecendo de estudos mais aprofundados.

### Aspectos quali-quantitativos da produção de biogás

- » O teor de metano encontrado no biogás não apresentou variação significativa ao longo do período de monitoramento para as ETEs investigadas, sendo que a concentração mediana variou de 70 a 81%. Tais resultados confirmam que a concentração de metano no biogás produzido em reatores UASB tratando esgoto doméstico é própria para o aproveitamento em unidades de cogeração de eletricidade e calor (CHP).
- » O teor de sulfeto de hidrogênio encontrado no biogás apresentou variação diária e entre as ETEs monitoradas, sendo que 75% dos resultados apresentaram valores inferiores a 2000 ppm. Estes resultados indicam a necessidade de tratamento do biogás para remoção de  $H_2S$ , caso o aproveitamento energético seja considerado.

### Relações unitárias de produção de metano

- » As relações unitárias de produção de metano variaram entre 72 e 138  $NLCH_4/kgDQO_{remov}$ . Para estações com boa vedação do reator e da linha de gás, as relações unitárias se aproximaram do Cenário Típico do modelo proposto por Lobato *et al.* (2012), todavia a maioria das ETEs apresentou relações unitárias próximas do Pior Cenário previsto pelo referido modelo. A boa aderência dos resultados desta pesquisa às diferentes faixas de produção de metano estimadas pelo modelo indica que este pode ser utilizado como ferramenta inicial para se estimar a produção de biogás e energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico.
- » Embora as relações unitárias de produção de metano sejam mais precisas quanto da análise em relação às cargas orgânicas removidas ( $NLCH_4/kgDQO_{remov}$ ), para as ETEs cuja topologia favoreça a produção e coleta do biogás, bem como operem com concentrações típicas de DQO afluente e boas condições de vedação dos reatores

anaeróbios, é possível se estimar uma relação entre a produção de metano e a vazão de esgoto tratado ou equivalente populacional. Como verificado para a ETE F, a produção média específica de metano foi de 13,4 NLCH<sub>4</sub>/hab.d (17,0 NLbiogás/hab.d), ou ainda, aproximadamente 17,8 kWh/hab.a.

- >> As possíveis perdas de biogás indicadas por Lobato *et al.* (2012), associadas ao conteúdo de metano dissolvido no efluente e vazamentos para a atmosfera, certamente estão presentes em todas as ETes investigadas. Esses aspectos são importantes e não podem ser negligenciados na análise de viabilidade técnico-econômica do aproveitamento energético de biogás de reatores UASB.

#### Aproveitamento energético de biogás nas ETes investigadas

- >> Para o dimensionamento de gasômetros no caso de uso contínuo do biogás em CHP, recomenda-se um volume de 30% do biogás produzido por dia.
- >> As ETes F e G apresentaram resultados de potencial de geração de energia elétrica acima da escala mínima de viabilidade, com potência do conjunto de cogeração estimada em 377 e 605 kW, respectivamente.
- >> A provável grande parcela de perda de biogás para a atmosfera, na maioria das ETes investigadas, reduz a viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás. Esse fato reforça a necessidade de melhorias nos reatores existentes no Brasil e de adaptações nos novos projetos. Ademais, afirma-se que este fato não pode ser negligenciado, em vista da emissão de GEE (metano) e emissões odorantes (H<sub>2</sub>S).
- >> O potencial calculado de redução das emissões de GEE caso os reatores existentes no Brasil atinjam o Cenário Típico foi de 945.751tCO<sub>2eq</sub> ao ano. Esse valor representa 7% do total de emissões para o setor de tratamento de efluentes domésticos (ano base 2014).

# 5

## RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Tendo em vista as constatações efetuadas no âmbito do Projeto Medições, sugerem-se algumas recomendações para a sequência das investigações:

- » Caracterização detalhada dos parâmetros de fase líquida (entrada e saída) dos reatores UASB, visando comprovar claramente a existência de perda de sólidos e a diminuição de eficiência de remoção de  $DQO_{total}$  durante eventos pluviométricos, bem como a extensão dos impactos na remoção de  $DQO_{filtrada}$ ;
- » Caracterização efetiva dos valores horários de concentração de  $DQO_{total}$  afluente e  $DQO_{filtrada}$  efluente dos reatores anaeróbios, objetivando o incremento de qualidade das análises multivariadas;
- » Realização de análise de viabilidade técnico-econômica, considerando os valores de investimento (CAPEX), de operação (OPEX) e de receitas, e tomando em conta os valores de tarifa de energia em cada região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12209 – Elaboração de Projetos Hidráulico-Sanitários de Estações de Tratamento de Esgoto**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2011. 57 p.

BRASIL – Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, DF. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2014. 2 ed. 80 p.

BRASIL – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/ Probiogás. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2015. 183 p.

BRASIL – Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília, DF. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2016a. 3 ed. 84 p.

BRASIL – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades/ Probiogás. **Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás**. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2016b. 1 ed. 145 p.

CABRAL, B. G. C.; PLATZER, C. J.; ROSENFELDT, S.; HOFFMANN, H.; CHERNICHARO C.A.L. **Caracterização do biogás gerado no tratamento de efluentes domésticos em reatores UASB no Brasil**. In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais. Rio de Janeiro/RJ, 2015.

CABRAL, B. G. C.; PLATZER, C. J.; CHERNICHARO C.A.L.; HOFFMANN, H.; BELLI FILHO, P. **Avaliação do Biogás Produzido em Reatores UASB em ETE**. In: XX Exposição de Experiências Municipais em Saneamento, Anais. Jaraguá do Sul/ SC, 2016.

CABRAL, B. G. C. **Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário**. Dissertação [Mestrado em Engenharia Ambiental] – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2016.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: Princípios e Aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 255 p.

CAMPELLO, R. P. **Desempenho de reatores anaeróbios de manto de lodo (UASB) operando sob condições de temperatura típicas de regiões de clima temperado**. Dissertação [Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental] – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2009.

CHAVES, S. R. M. **Influência da temperatura e do tempo de permanência sobre o desempenho de reatores UASB tratando esgoto doméstico**. Dissertação [Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental] – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. [Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 5].

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J.B.; NOYOLA, A. BRESSANI-RIBEIRO, T. **Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges**. Reviews in Environmental Science and Bio/technology, v. 14, n. 4, p.649-679, 2015.

CHERNICHARO, C.A.L., STUETZ, R. M., SOUZA, C.L., MELO, G.C.B. **Contribuição para o projeto de biofiltros aplicados ao tratamento de emissões odorantes provenientes de reatores anaeróbios**. Revista DAE, c. 186, p. 56-62, 2011.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction**. Wiley-VCH, Weinheim. 443 p. 2008.

DWA-M 363. **Origem, Tratamento e Utilização do Biogás**. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2010.

FLÓREZ, C.A.D. **Avaliação de protocolos de descarte e desidratação da espuma acumulada no interior de separadores trifásicos de reatores UASB**. Dissertação [Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos] - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Minas Gerais, 2016.

HOFFMANN, D. "Beitrag zur Ermittlung der möglichen Biogas- und Energieerträge großer Kläranlagen in Brasilien unter realen Betriebsbedingungen" - Dissertação [mestrado] - Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften - Suderburg - 78 p. 2016. [não publicado].

HÖNTZSCH. **Vortex VA**. Disponível em: <<http://www.hoentzsch.com/en/products/categories/m/vortex-va/>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

IPCC. Climate change 2014. **Synthesis Report**. 2014.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: **Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. **Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater**. Water Science and Technology, v. 66, p. 2745-2753, 2012.

MAC CONELL, E.F.A.; ALMEIDA, P.G.S.; MARTINS, K.E L.; ARAÚJO, J.C; CHERNICHARO, C.A.L. **Bacterial community involved in the nitrogen cycle in a down-flow sponge-based trickling filter treating UASB effluent**. Water Science and Technology, v. 72, n. 1, p. 116-122, 2015.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D.D.; BAILEY M.B. [2010]. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 7th ed.: John Wiley & Sons.

NELTING, K., CAICEDO, C., WEICHHREBE, D., ROSENWINKEL, K-H. **Influence of UASB reactor configuration and operation conditions on the dissolved methane quantities in the effluent.** In: 14th World Congress on Anaerobic Digestion, Proceedings, 2015.

NOYOLA, A., CAPDEVILLE, B., ROQUES, H. **Anaerobic treatment of domestic sewage with a rotating-stationary fixed-film reactor.** Water Research, 22, 1585-1592, 1998.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. **Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery.** Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology, v. 5, p. 93-114, 2006.

POSSETI, G. R. C., JASINSKI, V.P., MESQUITA, N.C, KRIGUEL, K., CARNEIRO, C. **Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico.** In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais. Goiânia/GO, 2013.

ROSA, A.P., LOBATO, L.C.S., CHERNICHARO, C.A.L., MARTINS, D.C.R.B, MACIEL, F.M., AND BORGES, J.M. **Improving performance and operational control of UASB reactors via proper sludge and scum discharge routines.** Water. Practice and Technology, v. 7, n. 3, 11 p. 2012.

ROTÁRIA DO BRASIL. Acervo interno da empresa. 2014

ROTÁRIA DO BRASIL. Acervo interno da empresa. 2015

ROTÁRIA DO BRASIL. Acervo interno da empresa. 2016

S::CAN [Austria] [Org.]. **Spectrometer probes.** Disponível em: <<http://s-can.at/>>. Acesso em: 30 mar. 2015.

SOUZA, C. L. **Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgotos domésticos em reatores UASB.** Tese [Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos] – Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2010.

SOUZA, C.L., CHERNICHARO, C.A.L., AQUINO, S.F. **Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions.** Water Science and Technology, v. 64, n. 11, 2259-2264, 2011.

SOUZA, C.L., CHERNICHARO, C.A.L., MELO, G.C.B. **Methane and hydrogen sulfide emissions in UASB reactors treating domestic wastewater.** Water Science and Technology, v. 65, n. 7, 1229-1237, 2012.

UNION. **INCA 4000.** Disponível em: <<http://union-instruments.com/inca4000-serie.html>>. Acesso em: 26 mar. 2015.



ROSENFELDT, S.; CABRAL, C. B. G.; PLATZER, C. J.; HOFFMANN, H.; ARAUJO, R.A. **Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE.** In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais. Rio de Janeiro/RJ, 2015.

SEEG, 2016. **Emissões de GEE do setor resíduos.** Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. 2016. 26 p.

SOREANU, G., BÉLAND, M., FALLETTA, P., EDMONSON, K., SVOBODA, L., AL-JAMAL, M., SETO, P. **Approaches concerning siloxane removal from biogas - A review.** Canadian Biosystems Engineering. 53: 8.1-8.18, 2011.

STUETZ, R. M., FRECHEN, F.-B. **Odours in Wastewater Treatment: Measurement, Modelling and Control.** IWA Publishing, London. 2001.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil.** Dissertação [Mestrado em Planejamento Energético] – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística.** 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgoto: um manual para regiões de clima quente.** Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994.

WAISS, T. C. F.; POSSETI, G. R. C. **Influência de eventos de chuva na produção de biogás de reatores anaeróbios alimentados com esgoto doméstico.** In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais. Rio de Janeiro/RJ, 2015.

WEF. **Odor Control in Wastewater Treatment Plants, Manual of Practice No. 2.** ASCE, New York, 282 pp. 1995.

## Anexo 1

## Nota técnica

Sonda *s::can* de DQO  
para medição em paralelo de DQO no  
afluente e efluente de reator UASB

Produto: *carbo::lyser* da empresa austríaca  
*s::can* com controlador *con::lyte*

## SUMÁRIO

---

84	1 APRESENTAÇÃO DA SONDA CARBO::LYSER EM RELAÇÃO ÀS CONDIÇÕES ESPECÍFICAS DO PROJETO
----	--

---

86	2 TECNOLOGIA E PRINCÍPIO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA CARBO::LYSER
----	--

---

89	3 EXPERIÊNCIAS COM A INSTALAÇÃO DA SONDA S::CAN
89	3.1 Instalações <i>in situ</i> de forma <i>by pass</i>
90	3.2 Instalações <i>in situ</i> de forma livre

---

92	4 MEDIDAS DE MANUTENÇÃO LOCAL DA SONDA S::CAN E EXPERIÊNCIAS
92	4.1 Calibração Global
92	4.2 Calibração <i>Offset</i>
93	4.3 Calibração Linear
94	4.4 Metodologia para a calibração local
95	4.5 Limpeza automática e manual da sonda, problema do <i>drift</i> e experiências
97	4.6 Referência Zero

---

98	5 RESULTADOS DA PESQUISA COMPLEMENTAR
----	---------------------------------------

---

104	6 PERSPECTIVA DE USO DA SONDA CARBO::LYSER NAS CONDIÇÕES DAS ETes NO BRASIL
-----	--

---

## 1

## APRESENTAÇÃO DA SONDA CARBO::LYSER EM RELAÇÃO ÀS CONDIÇÕES ESPECÍFICAS DO PROJETO

A sonda **carbo::lyser** da empresa austríaca **s::can** é uma **sonda multiparâmetros** que identifica, diretamente no meio líquido (*in situ*), contaminações em base de compostos de carbono (**compostos orgânicos**) e vem sendo utilizada, por exemplo, em águas superficiais, águas subterrâneas, água potável ou esgoto, seja no esgoto bruto, seja nos efluentes após os diversos processos de seu tratamento. A sonda pode ser instalada diretamente no meio líquido a ser analisado (elevatória, canal, reator) ou de maneira externa, por exemplo, dentro de uma tubulação ou de um frasco que está sendo alimentado com o efluente a ser analisado.

O princípio de medição do **carbo::lyser** é a **UV-ViS espectrometria**, ou seja, a absorvância ao longo de **espectro inteiro de luz UV e luz visível (VIS) com comprimento de onda entre 190 a 720 nm**. O **carbo::lyser** oferece, principalmente, a medição de 10 parâmetros:

- >> **UV254<sub>total</sub> e UV254<sub>filtrado</sub>** (indicação geral para contaminações orgânicas);
- >> **DQO<sub>total</sub> e DQO<sub>filtrado</sub>** (Demanda Química de Oxigênio Total/Filtrado);
- >> **DBO<sub>5</sub>** (Demanda Biológica de Oxigênio do esgoto);
- >> **COT e COD** (Carbono Orgânico Total/Dissolvido);
- >> **SST** (Sólidos Suspensos Totais) e **Turbidez**;
- >> **Temperatura**.

A medição óptica do **UV-Vis espectrometria** é realizada por meio de um **método indireto de análise**; os valores obtidos correspondem aos **equivalentes dos parâmetros em questão**, comparados a suas **medições por meio do método convencional**. Por outro lado, o uso de espectro inteiro de absorvância de luz UV e luz visível disponibiliza o máximo possível de **informações para compensar as principais influências perturbadoras na medição óptica**, tais como turbidez e coloração, e assim garante a maior precisão possível.

A sonda **carbo::lyser** oferece 4 grupos de 4 parâmetros, cada grupo corresponde a uma calibração global, tendo a temperatura como quarto parâmetro comum.

- >> 1. SST com UV254<sub>total</sub> e UV254<sub>filtrado</sub>;
- >> 2. SST com DQO<sub>total</sub> e DBO;
- >> 3. SST com DQO<sub>total</sub> e DQO<sub>filtrado</sub>;
- >> 4. Turbidez com COT e COD.

O **controlador con::lyte**, por sua vez, permite medir e visualizar 4 parâmetros em paralelo. Para a medição nos reatores UASB do projeto, os parâmetros mais relevantes foram **SST, DQO<sub>total</sub>, DQO<sub>filtrada</sub> e temperatura**. Por outro lado, o modelo básico de controladores **con::lyte** conta somente com duas saídas análogas, permitindo a **transmissão online de dois parâmetros**, enquanto os outros dois parâmetros podiam apenas ser visualizados na tela do controlador **con::lyte**.

Outra limitação na transferência de dados estava na necessidade de medir, com apenas uma sonda, a **qualidade do esgoto afluente e efluente ao UASB**. Isto significa que foi necessário instalar duas matrizes de referência para os parâmetros de  $DQO_{total}$  e  $DQO_{filtrado}$ , ou seja, ocupar dois espaços ( $DQO_{total}$  e  $DQO_{filtrado}$ ) para medir a qualidade de afluente e outros dois ( $DQO_{total}$  e  $DQO_{filtrado}$ ) para medir a qualidade do efluente. Por outro lado, para o parâmetro SST, decidiu-se medir o afluente e o efluente com a mesma matriz. Desta maneira, os quatro espaços da medição permitiram aplicar duas alternativas:

- >> Opção A: 1. Afluente  $DQO_{total}$ ; 2. Efluente  $DQO_{total}$ ; 3. SST afluente e efluente; 4. Temperatura
- >> Opção B: 1. Afluente  $DQO_{total}$ ; 2. Efluente  $DQO_{filtrado}$ ; 3. SST afluente e efluente; 4. Temperatura

A **opção A** volta-se para a **prática da operação do UASB**, informando sobre a **eficiência total de reator UASB, a qualidade do seu efluente e a correspondente carga para o pós-tratamento**. Já a **opção B** responde melhor à **pesquisa sobre o comportamento dos processos biológicos da degradação no UASB**, sem considerar, principalmente, eventos de perda de lodo, pois a concentração de SST no efluente tem impacto na  $DQO_{total}$ , mas não na  $DQO_{filtrada}$ .

Como a  $DQO_{filtrada}$  é calculada a partir da concentração de SST e o comportamento da curva de SST ainda não era conhecido, optou-se, inicialmente, pela opção A de calibração global com **transmissão online dos resultados ao banco de dados de: 1) Afluente  $DQO_{total}$ ; 2) Efluente  $DQO_{total}$** .

Para os demais dados, a saber, **3) SST e 4) Temperatura no efluente e afluente, acordou-se que estes seriam registrados no local por meio da leitura do sensor, preenchendo-se as tabelas semanais** preparadas para este fim.

Porém, cabe destacar que cinco sondas que voltaram da manutenção de fábrica foram enviadas com outras calibrações globais. Em uma destas sondas (ETE E), foi encontrada uma calibração global que permitia medir  $DQO_{total}$  no afluente e efluente. Para as demais, a única solução foi transferir novos arquivos de calibração global por meio de um controlador específico. Para a ETE H, essa transferência foi realizada na Rotária do Brasil. As outras 3 ETES permaneceram medindo  $DQO_{total}$  afluente,  $DQO_{filtrada}$  efluente e SST.

Ressalta-se que as Figuras apresentadas a seguir são, em sua maioria, do acervo da Rotária do Brasil e, portanto, optou-se por não citar a fonte repetidamente. Em caso distinto, a fonte está especificada abaixo da Figura.

## 2

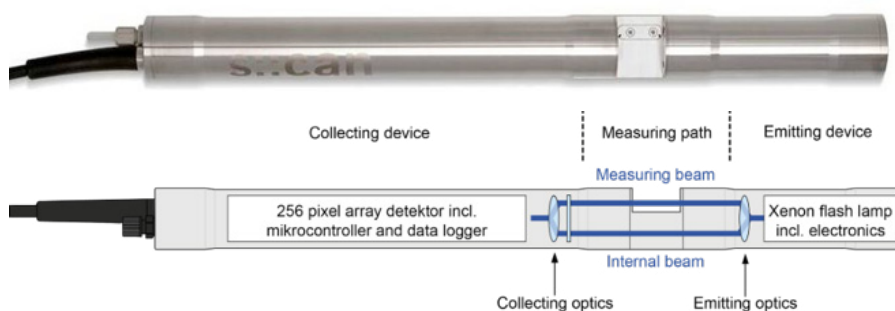
## TECNOLOGIA E PRINCÍPIO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA CARBO::LYSER

A metodologia aplicada nas sondas espectrométricas da *s::can* é baseada na **absorção de luz ultravioleta (UV) e luz visível (VIS)**. Com isso, podem ser detectados principalmente os **compostos orgânicos das moléculas carbônicas insaturadas** que apresentem, por exemplo, uma ligação dupla entre dois átomos de carbono, ou seja, o estado insaturado da molécula representa o nível elevado de reatividade necessária para absorver a radiação de luz.

Para tal medição, a sonda tem duas janelas que se encontram opostas dentro de uma lacuna de medição (Figura 1). **A janela fonte conta, em sua parte traseira, com uma lâmpada de xenon que emite um feixe de luz direcionado à janela oposta, a qual possui um detector de luz de tipo 256 pixel matriz em seu interior.** Para a medição, existem duas vias de luz: a via interna (feixe interno) e via pelo meio (feixe de medição). O percurso do feixe interno serve para registrar o espectro de luz sem absorbância; enquanto isso, no percurso pelo meio, certa quantidade de luz é absorvida, garantindo que a luz chegue ao detector com intensidade enfraquecida. O detector grava ambos os resultados e, desta maneira, calcula a absorbância.

*A diferença entre a radiação de luz que foi emitida e a que foi recebida ao longo de todo o comprimento da onda UV-VIS informa sobre os tipos de substâncias dissolvidas neste meio e, quanto maior a concentração de uma substância específica, maior a absorção em uma onda ou gama específica de ondas.*

**Figura 1:** Sonda de medição de DQO,foto e esquema da *s::can*.



**Figura 2:** Abertura de medição de 2 mm.



**Fonte:** Hoffmann [2016].

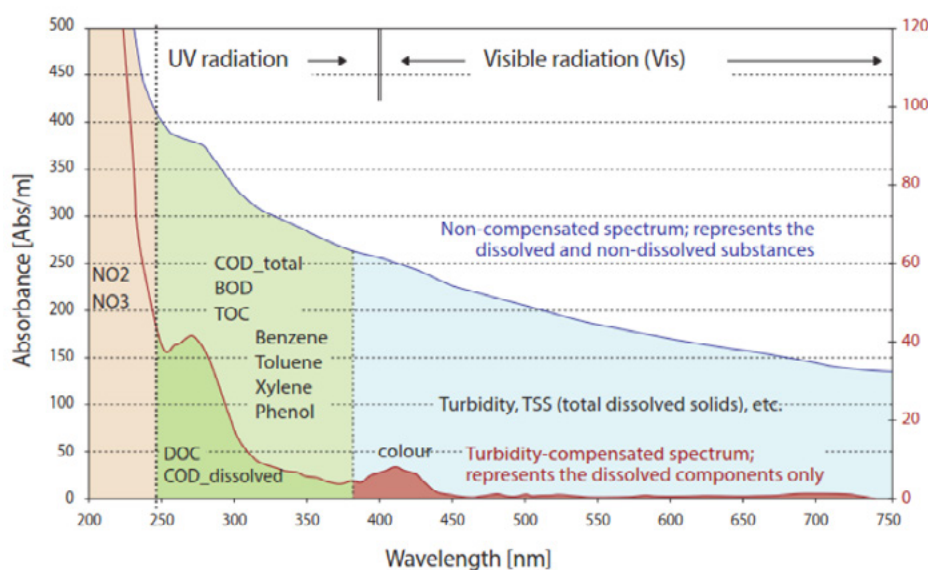
A **distância entre as janelas de medição** é variável, visto que as sondas são produzidas com uma distância de 30 mm, a qual pode ser reduzida para até 0,2 mm. As maiores distâncias são utilizadas para a medição de água potável ou outros tipos de águas limpas, na qual a faixa de concentração (range) do contaminante é menor. Para efluentes com carga e turbidez elevada, é necessário diminuir a passagem de luz para o receptor, aumentando a faixa de concentrações a detectar. **No projeto PROBIOGÁS, as sondas foram fornecidas com uma abertura de 2 mm de distância (Figura 2).**

A **caracterização de cada parâmetro** depende da sua atribuição a certo comprimento de onda de absorbância, que fica gravado no detector interno sob a forma de **matrizes específicas** (Figura 3). O cálculo da  $DQO_{total}$ , por exemplo, é baseado na absorbância ao longo de 250 nm a 370 nm, enquanto os sólidos (SST) absorvem na faixa de luz visível, ou seja, nos comprimentos com nível de energia mais baixo. O cálculo para a  $DQO_{filtrada}$  exige, principalmente, que o equivalente DQO de SST seja subtraído da  $DQO_{total}$ .

A faixa de concentração dos parâmetros depende, ainda, do tipo de meio que é definido pela matriz na “Calibração Global”, ou seja, o resultado da transformação da absorbância em concentração depende se este está sendo processado em base de uma matriz de água potável, esgoto bruto ou esgoto tratado. Cada uma destas matrizes foi formada a partir de uma série de dados referenciais, para os quais as absorbâncias foram atribuídas aos resultados de análises laboratoriais. **A S::can usou, para a programação de suas matrizes, as referências de mais de 300.000 amostras realizadas em escala internacional.**

Adicionalmente, os dados brutos de absorbância do parâmetro em questão estão sendo **compensados no seu processamento pelas influências perturbadoras**, tal como turbidez ou cor do efluente. Isto representa **mais uma diferença da sonda UV-Vis**, que capta todo o espectro da absorbância, comparada à metodologia SAC (*Spectral Absorption Coefficient* ou Coeficiente de Absorção Espectral) que capta apenas uma única absorbância sem considerar as influências laterais.

**Figura 3:** Espectro da água e efluentes, gravado com sonda UV-VIS



Fonte: S::can [2008].



Outra função importante é o **controle automático da lâmpada de xenon**, que é realizado **durante cada medição**. Com isto, o processo registra a quantidade de energia proveniente da lâmpada e compara-o com o registro da fábrica. Se houver diferença, a sonda **indicará “NaN” (leitura não possível)**, sinalizando a necessidade de adaptar o ponto zero ou um problema técnico interno da sonda.

Finalmente vale ressaltar que as **sondas *s::can* de tipo *spectro::lyser*** (com controlador *con::cube*) podem avaliar, diferentemente do *carbo::lyser*, o ***fingerprint* de um efluente, visualizando o espectro inteiro de absorbância de um meio específico**. Isto pode ser utilizado, por exemplo, para **selecionar os comprimentos representativos** para cada efluente, ou seja, **criar uma matriz própria** para os casos em que um efluente ainda não tenha matriz própria ou **não permita a calibração correta em base de matrizes existentes**. As características da sonda de medição utilizada no presente projeto são descritas na **Tabela 1**.

**Tabela 1:** Características da sonda de medição de DQO.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIÇÃO
Material da sonda	Aço inoxidável ISOI 1.4571 ou equivalente
Faixa DQO <sub>total</sub> afluente	0 a 3.750 mg DQOtotal/L
Faixa DQO <sub>total</sub> efluente	0 a 1.250 mg DQOtotal/L
Faixa DQO <sub>filtrado</sub> afluente	0 a 1250 mg DQOfiltrado/L
Faixa DQO <sub>filtrado</sub> efluente	0 a 300 mg DQOfiltrado/L
Faixa SST	0 a 2.500 mg SST/L
Terminal de saída	4-20 mA
Saídas de relé:	Dois, configurável
Indicação	Display LCD
Proteção	Painel de controle IP 65 e sonda IP 68
Comprimento do cabo	7,50 m

Fonte: *S::can*

*Para a interpretação dos resultados, deve-se levar em consideração que não se trata de uma medição direta, mas sim da relação entre: 1) A parte de moléculas carbonáceas insaturadas que absorvem certa quantidade luz, e, 2) Sua provável contribuição ao parâmetro composto em questão. A matriz de absorbância de cada efluente pode ser adaptada, principalmente, por meio de uma seleção de comprimentos representativos para seu espectro específico. O projeto partiu da suposição de que o afluente e o efluente de UASB correspondem às matrizes “afluente ETE” e “efluente ETE”, respectivamente, e somente será necessária a adaptação da matriz existente ao tipo de efluente local (calibração local). De modo geral, pode se esperar uma variação (erro) de 10% (fornecedor) e 15-20% (experiências em escala, por exemplo, na Alemanha) entre os resultados da medição espectrométrica.*

## 3

## EXPERIÊNCIAS COM A INSTALAÇÃO DA SONDA S::CAN

A complexidade da instalação das sondas *online* varia dependendo do tipo de uso. O fornecedor *s::can* oferece acessórios e manuais para realizar as diferentes instalações.

Sondas como a *carbo::lyser* foram desenvolvidas principalmente para seu uso *in situ*, sem a necessidade de tratamento da amostra. Comparado a uma análise em laboratório, a **medição *in situ* apresenta algumas vantagens**, principalmente a prevenção de possíveis erros devido à amostragem, ao transporte, ao armazenamento ou à diluição da amostra. Por outro lado, para garantir a representatividade dos resultados da medição *in situ*, é importante escolher o lugar correto para a instalação, garantir a mistura e a velocidade necessária do efluente para a medição e **instalar um sistema de autolimpeza da unidade de medição** da sonda. No caso da *carbo::lyser*, a limpeza automática foi realizada utilizando ar comprimido.

A medição *in situ* pode ser realizada de diferentes maneiras: a sonda pode ser instalada livre (na elevatória ou reator) ou em *by pass*.

*Resultados: A necessidade do projeto de utilizar uma sonda para medir a concentração na entrada e na saída do UASB exigiu sua instalação em *by pass*. Neste caso, a sonda é instalada em uma tubulação externa, que é alimentada pelas bombas automatizadas com o afluente e o efluente do UASB. No final do projeto, foram instaladas, de maneira experimental, em uma ETE, duas sondas de maneira livre, uma sonda na caixa de entrada e outra sonda na caixa de saída do UASB.*

### 3.1 Instalações *in situ* de forma *by pass*

A instalação de forma *by pass* (Figura 4) foi escolhida, pois só havia uma sonda disponível por ETE e era necessário realizar as medições com esgoto afluente e efluente ao UASB. A alternância de uso da sonda para medição do afluente e do efluente foi feita por meio de bombas automatizadas que eram acionadas de 15 em 15 minutos.

**Figura 4:** Instalação completa do *carbo::lyser* em *by pass* com sifão duplo.



Por outro lado, a necessidade de alimentar este sistema com bombas submersas dificultou bastante o projeto de medição. As bombas foram instaladas, por exemplo, em uma caixa de entrada do reator UASB (Figura 5) e em uma elevatória a montante do pós-tratamento do efluente do UASB. Para não ultrapassar a velocidade máxima recomendada (3m/s), estas bombas devem ter potência menor (por exemplo, Ferrari ZXW 750 A ou UNI 100M STD da Sulzer), reduzindo ainda mais a gama de modelos disponíveis. O maior problema foi a presença de partículas plásticas, gorduras compactas e lodos densos (Figura 6), acumulados tanto na entrada quanto na saída do UASB, entupindo frequentemente as bombas.

Figura 5: Bomba submersa na caixa de entrada UASB.



Figura 6: Acumulação de lixo na caixa de entrada de UASB.



*O pré-tratamento é de suma importância para o bom funcionamento do sistema by pass. Ao longo do projeto, houve momentos em que não foi possível medir a DQO, ocorrendo, em boa parte do tempo, devido às bombas queimadas. A instalação de bombas dentro de uma cesta melhorou o resultado. Por outro lado, as cestas também sofrem com entupimento devido a cabelos e fios, cabendo sinalizar que as ETEs que realizaram manutenção frequente e até limpeza diária de suas bombas conseguiram operar a medição de DQO praticamente sem paradas.*

### 3.2 Instalações *in situ* de forma livre

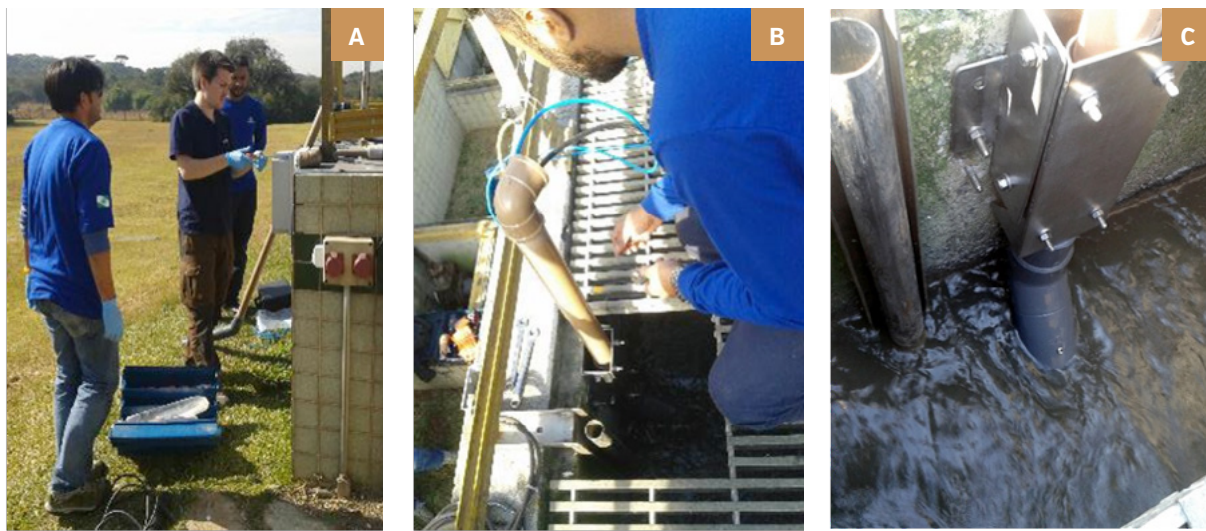
A instalação livre na elevatória foi implementada de forma experimental somente em uma estação, durante 6 semanas. Neste caso, foi instalada a sonda **carbo::lyser** com calibração global “afluente” na entrada do UASB e a sonda **spectro::lyser** com calibração global “efluente” na saída UASB, ambas conectadas ao **controlador con::cube**.

Este tipo de instalação precisa de um **acessório especial para a colocação segura da sonda na parede** (Figuras 7a a 7c). Para a instalação livre, a **s::can** fornece um **portador de inox para a fixação** da sonda na parede do reator/elevatória/poço e uma **peça em forma de tubo** (Figura 7c) com aber-

**Figura 7:** Instalação livre da sonda de DQO. (a) Suporte com a sonda para instalação livre; (b) Suporte com a sonda instalada livre; (c) Fixação e parte inferior da sonda instalada.

tura para a janela de medição, que permite a colocação segura da sonda no fluxo do efluente, com instalação em 90 ou 45° (Figura 7b e 7c).

Deve-se selecionar um local com suficiente turbulência e mudança mínima de nível. Outro ponto importante para a instalação livre é que a parte elétrica deve ser protegida (Figura 7b) contra entradas de água.



*A instalação livre, comparada ao by pass, é menos complexa e elimina o problema com a manutenção das bombas. Por outro lado, a limpeza da sonda pode ser um pouco mais exigente: a sonda deve ser retirada pelo menos uma vez por semana para limpeza manual de todo o equipamento e suporte (não somente das janelas em si) para garantir o funcionamento da medição. Como resultado positivo, nesta ETE onde a instalação de forma livre foi testada, a ocorrência de drifts diminuiu significativamente.*



# 4

## MEDIDAS DE MANUTENÇÃO LOCAL DA Sonda S::CAN E EXPERIÊNCIAS

Neste capítulo, serão explicados os princípios da calibração local, limpeza e ajuste do Ponto Zero para a sonda carbo::lyser.

*No início do projeto, foi realizada a calibração offset (item 4.2), por ser a calibração de mais fácil execução. Porém, após as comparações com os valores de laboratórios, a s::can recomendou a realização da calibração linear, com duas amostras para cada parâmetro a ser calibrado. Entretanto, mesmo com essa nova calibração, houve dificuldade em encontrar dois pontos suficientemente distantes e representativos para não distorcer a curva. Ao final do projeto, após muitas investigações, chegou-se à conclusão de que esta calibração deve ser feita de forma diferente do que indica o manual da s::can. Esta nova maneira de calibrar **utiliza pelo menos 10 dados comparativos entre sonda e laboratório, sendo mais precisa.***

*Adicionalmente, um dos maiores problemas foi o aparecimento de um drift nos dados (transição lenta das concentrações medidas causada pela contaminação das janelas de medição ótica). Nestes casos, foi necessária a limpeza da sonda manual de 1 a 3 vezes por semana.*

### 4.1 Calibração Global

Para o projeto, as sondas da s::can tinham **calibração global** específica para medir: 1) Afluente  $DQO_{total}$ ; 2) Efluente  $DQO_{total}$ ; 3) SST afluente e efluente; e, 4) Temperatura. Algumas sondas tinham outras calibrações globais que podiam ser escolhidas por meio do con::lyte.

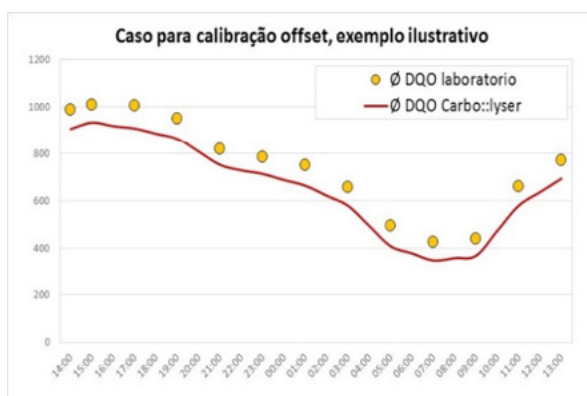
**A seleção de uma nova calibração global** exige que a sonda já tenha os arquivos de calibrações salvos e, caso não haja, estes podem ser baixados e transferidos por meio do equipamento **con::nect tool**, que serve para realizar a conexão direta de um computador com a sonda. A transferência é feita por meio do **software ana::pro**.

*A **calibração global** reúne uma determinada escolha de parâmetros que podem ser lidos na base de sua matriz (neste caso afluente e efluente da ETE). A calibração local serve para adaptar os espectros dos parâmetros de cada calibração global com o meio em questão mediante a **calibração offset (um ponto) ou calibração linear (dois pontos).***

### 4.2 Calibração Offset

A **calibração offset** (ou de um ponto) é escolhida nos casos em que **exista uma diferença constante nas absorções**. Por exemplo: no caso de um efluente com **uma turbidez mais alta** que a média das amostras que formaram a matriz na calibração global da sonda, o resultado da concentração de  $DQO_{total}$  pode resultar continuamente mais alto, simplesmente porque a relação atual entre absorbância total e a concentração real da  $DQO_{total}$  fica maior do que na matriz. **Neste caso, pode ser suficiente mover a linha do**

**Figura 8:** Gráfico 1 – Exemplo ilustrativo para caso de calibração offset. Gráfico 2 – Retas e equação para o exemplo da calibração offset.



$$Y = A * X + B$$

**y** Concentração pelo laboratório

**a** Inclinação (matriz) da curva

**x** Concentração pela sonda

**b** Parâmetros offset

Na calibração *offset*, o espectro se adapta a uma reta entre os resultados da sonda e os resultados de laboratório (Figura 8). Neste exemplo, a inclinação inicial de equação ( $a = 1,0004$ ) se mantém suficientemente perto do valor 1, para que a distância entre os valores **possa ser corrigida de forma constante com o parâmetro b** ( $b = 76,558$ ).

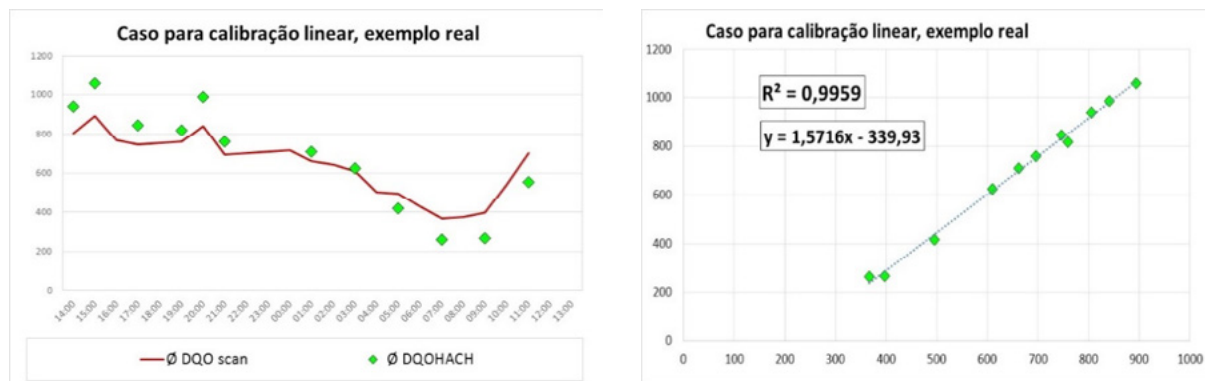
**A calibração local deve ser baseada em uma série de dados que comprovem com certeza suficiente o tipo de calibração e possibilitem ainda escolher os resultados entre sonda e laboratório de forma crítica e desta maneira aumentar a precisão na calibração. O coeficiente de determinação  $R^2$  sempre deve se manter perto de 1 e a calibração *offset* é indicada pelo fator “a” (inclinação) perto de 1 (0,95 – 1,05).**

### 4.3 Calibração Linear

A calibração “Linear” (ou de dois pontos) existe para os casos em que a discordância entre os valores da sonda e os de laboratório não é representável mediante uma calibração “Offset”. Neste caso, realizam-se ao menos duas leituras de amostras, uma de concentração perto do menor ponto da faixa de valores e outra perto do ponto máximo. Como explicado anteriormente, também neste caso, é importante que se tenha uma série de dados, para ter a certeza necessária sobre a adequação da calibração.

A Figura 9 (Gráficos 3 e 4) demonstra um exemplo de um teste de calibração realizado no projeto e a relação matemática entre os resultados da sonda e do laboratório. Neste caso, o fator “a” (inclinação) com valor de 1,5716 indica a necessidade de realizar calibração linear.

**Figura 9:** Gráfico 3 – Exemplo ilustrativo para um caso de calibração linear. Gráfico 4 – Reta e equação para o exemplo da calibração linear.



Neste exemplo real, foram feitas amostras durante 24 horas, de modo a coletar demonstrativos representativos da faixa de concentrações nesta estação. Recomenda-se, em alguns casos, coletar amostras durante um período maior e, com o tempo, ir aperfeiçoando a equação, por exemplo, coletar amostras com concentrações mais altas (períodos sem chuva) e mais baixas (época chuvosa). Este exemplo real serve também para entender porque o uso de água limpa como ponto baixo mudaria a inclinação da curva de maneira incorreta.

A calibração linear é indicada com fator “a” (inclinação) abaixo do valor 0,95 ou acima de 1,05. Neste caso, também é necessário usar uma série de dados que cubra toda a faixa de concentrações esperadas para o efluente em questão, sem usar água limpa. Os dados discrepantes devem ser descartados.

#### 4.4 Metodologia para a calibração local

Uma vez encontrada a relação para a calibração local com base em certo número de dados consistentes ( $n > 10$ ), ou seja, resultado correspondente com a calibração *offset* (4.2) ou calibração linear (4.3), a calibração local pode ser feita de 2 maneiras:

##### Opção 1. Gravação das novas referências na matriz da sonda.

Entrando na calibração local com uma referência (se for calibração *offset*) ou duas referências (se for calibração linear) que devem ser calculadas por meio da fórmula estabelecida anteriormente, ou seja, sem enviar amostras novamente ao laboratório. O passo a passo de como acessar as telas de calibração local no controlador é apresentado no POP em anexo.

##### Opção 2. Planilha de cálculos, sem mudança da calibração na memória de sonda.

Esta opção não faz nenhuma alteração no controlador da sonda. Esta permanece com a calibração global e os valores transmitidos são inseridos em equação previamente estabelecida em uma planilha do tipo *Excel*.

A **modificação da calibração local na memória da sonda** (opção 1) tem a vantagem de que os **dados no painel correspondem já ao resultado da calibração**. Por outro lado, existem riscos de equívoco na gravação da calibração local e, **uma vez mudadas as referências, deve ser iniciada uma nova tabela de calibração**, porque a base de dados mudou. Sem modificar as referências na matriz (opção B), a curva de calibração pode ser completada e aperfeiçoada continuamente na base de matriz original. Neste caso, os resultados devem ser considerados como **dados brutos** que ainda **devem ser processados por meio da fórmula de calibração estabelecida e continuamente atualizada**.

Obs: Um fator que gerou erros em algumas ETEs foi a lógica do programa de mudança entre as calibrações. É de suma importância entender que a **volta para a calibração “Global”** automaticamente **tira todas as referências de calibração local realizadas anteriormente**. Porém, em caso de mudança de uma **calibração local “Linear” para uma calibração local “Offset”**, o equipamento **mantém a inclinação da calibração linear**, ou seja, a calibração vai manter a inclinação (fator “a”) da calibração local existente e as novas referências vão unicamente alterar o fator “b”. Caso a **intenção seja apagar a calibração local anterior**, deve-se primeiramente voltar à calibração “Global”.

Em **todos os menus de calibrações é indicada a inclinação (fator “a”)** e é recomendado que, antes de sair do menu, observe-se se o fator mencionado representa o cálculo correto.

---

#### 4.5 Limpeza automática e manual da sonda, problema do *drift* e experiências

As sondas espectrométricas carbo::lyser (e spetro::lyser) vêm equipadas com sistema de autolimpeza por meio de ar comprimido, que deve reduzir, segundo informação da s::can, a necessidade de **limpeza manual a cada duas semanas**. No projeto, o tipo de meio (**esgoto bruto e efluente de UASB**) **provocou um *drift* acentuado em algumas estações** (ver Figura 11). Este efeito provém do acúmulo de impurezas na janela de medição (ver Figura 10).

Para a auto-limpeza, um compressor deve estar ligado a uma válvula pneumática. Esta válvula é acionada pelo controlador, em que é possível visualizar e alterar os intervalos de limpeza da sonda. A cada intervalo, gera-se um impulso ou jato de ar entre as janelas de medição para remover qualquer sujeira. A pressão do ar comprimido deve situar-se entre 2-6 bar, sendo que, quanto maior a pressão, menor tende a ser a necessidade de limpeza manual.

No projeto, foi programada **uma limpeza a cada 3 medições durante 8 segundos**. A **pressão inicial de 2-3 bar** e após discussões com a s::can, **foi aumentada para 5 bar**. Isto diminuiu o problema de *drift* em algumas ETEs, mas o mantém em outras (especialmente ETE A).

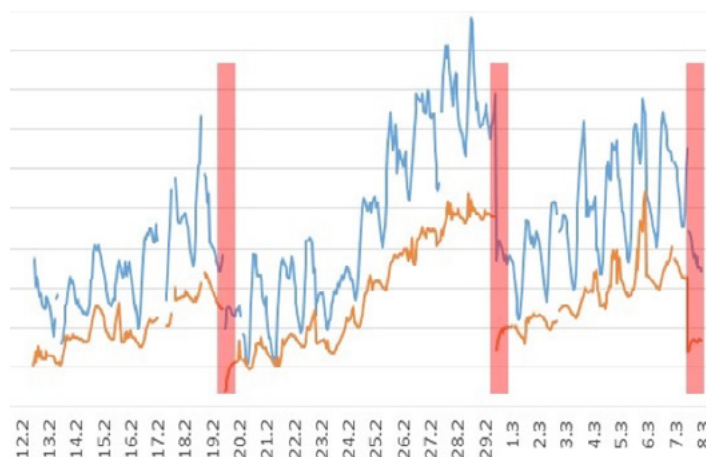
A experiência do projeto PROBIOGÁS, sistematizado pela primeira vez na dissertação de Cabral (2016), mostrou que, nestas condições, há necessidade de realizar pelo menos 1 ou 2 limpezas manuais por semana a fim de reduzir o *drift*. No trabalho de Cruz (2016), há uma proposta de **cálculo para reajustar as concentrações que foram afetadas pelo *drift***, que pode ser utilizado, exclusivamente, entre duas limpezas com resultado muito expressivo, assim como demonstra a Figura 11.



**Figura 10:** Carbo::lyser antes de limpeza manual.



**Figura 11:** Exemplo para o drift entre 3 ações de limpeza manual na ETE A, medido no by pass.



**Figura 12:** Procedimento *function check*.



Fonte: S::can [2014].

A sonda totalmente limpa mostra para Q o valor “0”. Os números positivos indicam os graus de contaminação da sonda (“+1” para contaminação fraca e “+2” para contaminação forte). Os números negativos indicam erro da sonda ou uma referência zero incorreta, feita com água não totalmente limpa, conforme discutido na seção 4.6.

O problema do drift é tipicamente provocado por impurezas presentes no esgoto bruto. Porém, na ETE A, com a configuração de 2 sondas, verificou-se que o drift foi muito mais significativo na medição de DQO efluente do UASB. O drift pode ser controlado de melhor forma com o aumento da pressão do ar de limpeza para até 8 bar. No projeto, o aumento da pressão de 3 para 5 bar resultou em algumas melhorias. Com maior êxito, mostrou-se ainda a instalação livre das duas sondas (conforme seção 3.2). Neste caso, a limpeza automática foi ativada antes de cada medição (com intervalo de medição de uma vez por minuto), ao mesmo tempo, a duração de limpeza foi reduzida para 2 segundos e a pressão do ar foi aumentada a 7 bar. Durante a operação de 6 semanas, não foi observado mais nenhum drift para o afluente do UASB, permitindo a realização de uma limpeza quinzenal, conforme a indicação da s::can. No efluente do UASB, o drift teve apenas uma pequena melhora. Suspeita-se, portanto, que, no by pass, com medição em paralelo de ambos os meios, o esgoto

*efluente contribuía muito mais ao drift do que o afluente. Recomenda-se analisar esta situação em outras ETEs, medindo, por exemplo, por certo tempo, somente o afluente ao UASB.*

## 4.6 Referência Zero

A referência de zero é o **valor da extinção de luz em água destilada**. As sondas vêm com uma referência zero feita na fábrica. Ao longo do tempo de uso, ocorre perda de energia no espectro de luz emitida pelas lâmpadas de xenon. **O ajuste da referência zero serve exatamente para compensar o desgaste da lâmpada** ou, dentro de certos limites, também **pequenos outros desgastes no material da unidade de medição**. O desgaste das fontes de luz é geralmente tão baixo que uma nova referência pode ser feita até uma vez por ano ou, alternativamente, quando a sonda mostrar o erro “NaN”.

No menu do con::lyte, a opção “executar *check*” é seguida diretamente pela opção “*set reference zero* (referência zero)”. Esta última foi selecionada despropositadamente por algumas ETEs e/ou sem o preparo adequado das condições para ajustar a referência zero de maneira correta. Neste caso, os dados coletados após esse procedimento não podem ser usados. A ETE C fez uma nova referência zero mensalmente, isso por indicação de uma mensagem no próprio controlador, provavelmente em razão de um problema interno da sonda que logo depois se manifestou (erro *dark noise*). Neste caso, existem, ao longo do tempo, muitos saltos nos resultados e estes se explicam provavelmente por uma série de calibrações Zero que não estavam corretas. **Cada ajuste de referência zero muda a matriz de dados e conseqüentemente altera os resultados.**

**Resultado:** *o ajuste da referência zero é uma operação delicada, que não deve ser realizada mais do que uma vez ao ano. Recomenda-se desinstalar a sonda para fazer este ajuste nas condições de laboratório. A sonda, mais especificamente, a unidade de medição, deve ser limpa completamente várias vezes e deve-se assegurar que a água destilada não possua nenhuma poluição.*

## 5

## RESULTADOS DA PESQUISA COMPLEMENTAR

Para melhor caracterizar o afluente e o efluente do UASB, foi realizada, na ETE A, uma calibração com 12 amostras comparativas. As amostras foram coletadas durante 24 horas com o uso de *amostradores* automáticos (Figura 13) na caixa de entrada e de saída do UASB e analisadas em laboratório a partir das seguintes metodologias:

1. 22 amostras de afluente e 24 amostras de efluente do UASB com sondas *carbo::lyser* (afluente) e *spectro::lyser* (efluente) e controlador *connect* para visualização dos resultados no *laptop*, utilizando 400 mL de cada amostra numa proveta de 1 L (Figura 14), leitura de parâmetros:  $DQO_{total}$ ,  $DQO_{filtrado}$ , SST e pelo menos 3 repetições de medição para cada amostra, agitando a sonda entre cada medição para reduzir o efeito da sedimentação.
2. Das amostras, foram escolhidas 12 do afluente e 12 do efluente para análise no laboratório. As análises foram de  $DQO_{total}$  com dois tipos de *kit*, HACH e M&N (Figura 16),  $DQO_{filtrada}$ , apenas com HACH, filtrado a vácuo com filtros 0,45 $\mu$ m, sendo utilizada, para medição de SST, apenas a amostra filtrada. Todas as medições foram feitas em dois paralelos. As análises de M&N ( $DQO_{total}$ ) foram feitas diretamente na ETE (Figura 16) e as amostras para os demais parâmetros foram estabilizadas no dia seguinte com Ácido Sulfúrico e analisadas uma semana depois.

**Figura 13:** Amostrador com amostras horárias.



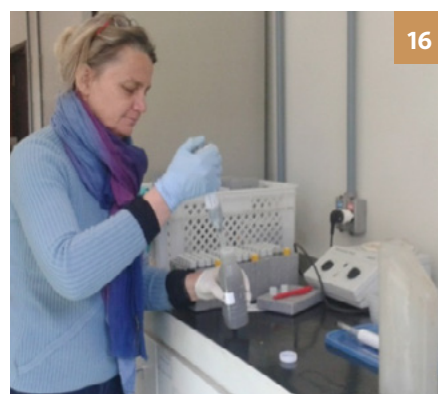
**Figura 14:** Medição das amostras com as sondas de *s::can*.



**Figura 15:** Guardar as amostras para análise comparativa.



**Figura 16:** Análise de  $DQO_{total}$  com Kit no laboratório da ETE.



**Crítica à metodologia:** a medição com a sonda na proveta (Figura 13), em comparação à medição dentro do reator, tem a vantagem de ter um melhor controle sobre as condições e permite, ainda, **coletar uma amostra totalmente idêntica para análise comparativa** no laboratório. Por outro lado, é diferente das condições *in situ*, **não podendo ser evitada sedimentação de sólidos durante a medição na proveta**. Uma vez iniciada a medição (sinal acústico), aguardam-se 3 a 5 segundos até que se inicie a medição (feixe de luz).

Segundo a *s::can*, não se esperam variações maiores que 2 mg/L na medição da mesma amostra, mas, neste ensaio, as variações na amostra (com movimento da sonda antes de cada medição) eram , para a  $DQO_{total}$ , por exemplo, entre 1 e 30 mg/L.

Exemplos de variações encontradas:

- >> Amostra das 16h de efluente: 1. 261,8 mg/L; 2. 264,3 mg/L; 3. 266,2 mg/L;
- >> Amostra das 19h de afluente: 1. 760,6 mg/L; 2. 746,4 mg/L; 3. 768,1 mg/L.
- >> Em caso de maiores variações, as medições foram repetidas ou um valor foi descartado.

A **avaliação dos resultados** mostra grandes diferenças principalmente entre o desempenho da sonda para o esgoto afluente (Figura 17) e para o efluente (Figura 18) do UASB. Foi detectado que a sonda, de maneira geral, subestimou os valores de SST e  $DQO_{total}$  para o efluente do UASB. Porém, entre 0h e 5h, aparecem picos da medição com sonda, sendo que os valores de laboratório não acompanharam estes picos.

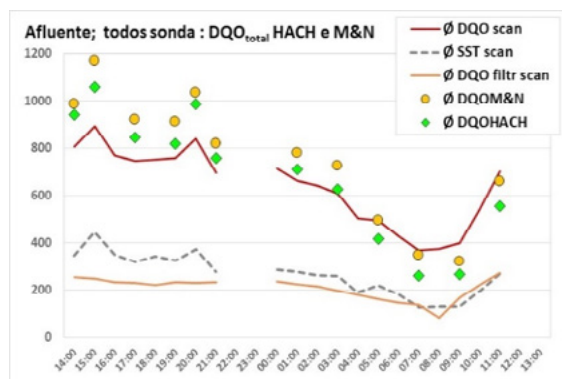
Com relação à  $DQO_{total}$ , observa-se que, entre os valores analisados em laboratório com *kit*, os **resultados da M&N ficam continuamente acima dos valores da HACH**. O correto, para a mesma base de comparação, é que a medição seja feita ao mesmo tempo, paralelamente, mas isto não foi feito. Além disso, cabe lembrar que as análises não foram tratadas igualmente, sendo as da M&N realizadas na hora, enquanto as da HACH sofreram acidificação no dia seguinte e foram analisadas uma semana depois.

O comportamento dos valores de  $DQO_{total}$  (Figuras 17 e 18) entre HACH e M&N em comparação com a sonda (afluente e efluente) comprova que, pelo menos, não há um erro sistemático no *kit* de análises.

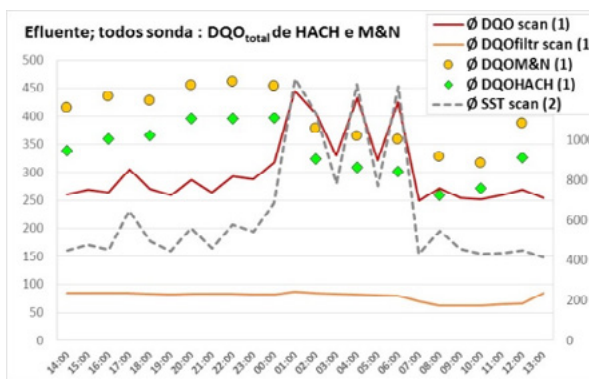
O resultado para  $DQO_{total}$  **entre a sonda e o *kit* para o esgoto afluente tem uma relação excelente (Figura 19) com  $R^2$  próximo a 1,0**. A relação de  $DQO_{total}$  para o efluente (Figura 20) chega somente a uma relação de  $R^2 = 0,85$ , já tirando 5 pares de valores que abaxariam a correlação ainda mais. Por outro lado, a faixa de concentrações analisadas neste caso é relativamente pequena (250–290 mg/L para sonda e 250–390 mg/L para HACH) e isso limita um resultado melhor para a relação.

As Figuras 21 (afluente) e 22 (efluente) mostram as **correlações entre SST e  $DQO_{total}$**  medidos pela sonda, **provando que a matriz da sonda define esta correlação** e, por isso, no efluente (entre 0 e 5 horas), ambos parâmetros ficam elevados juntos, mesmo as análises de laboratório não indicando nenhum aumento de DQO.

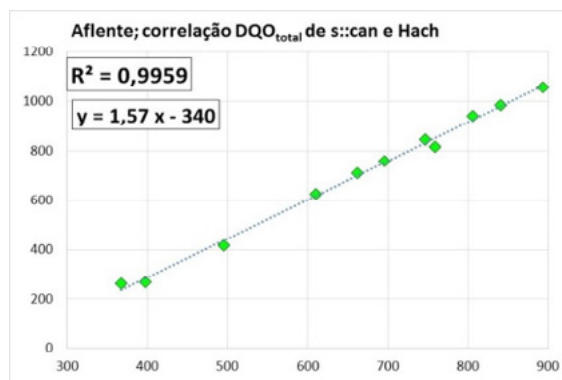
**Figura 17:** Afluente; relações entre DQO<sub>total</sub> da sonda com kit de HACH e M&N.



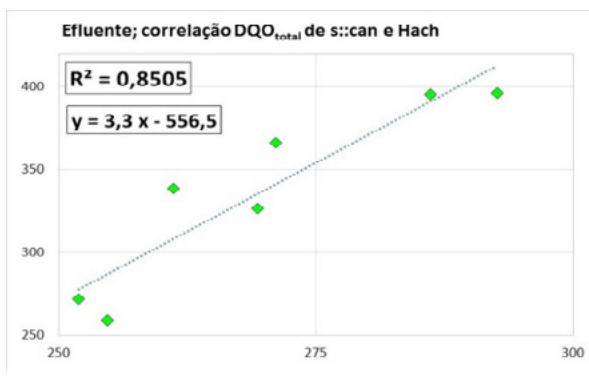
**Figura 18:** Efluente; relações entre DQO<sub>total</sub> da sonda com kit de HACH e M&N.



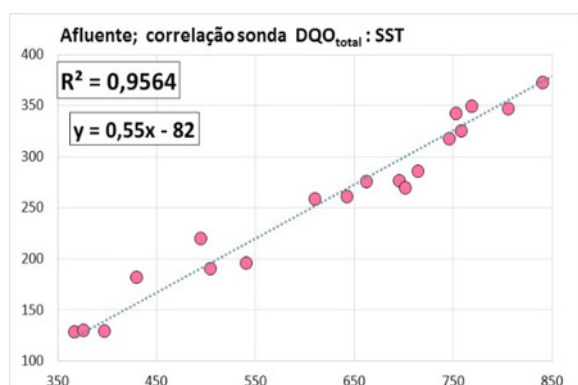
**Figura 19:** Afluente; DQO<sub>total</sub> Sonda e HACH [11 de 12 pares de valores].



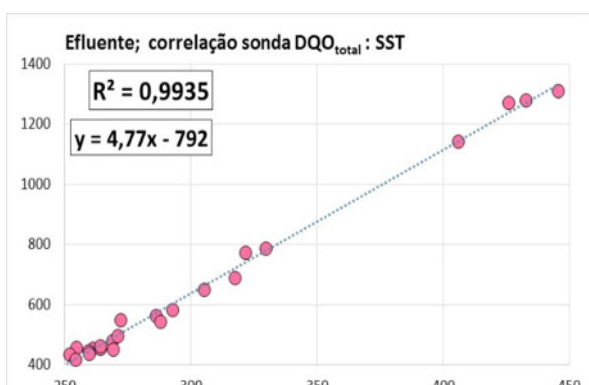
**Figura 20:** Efluente; DQO<sub>total</sub> Sonda e HACH [7 de 12 pares de valores].



**Figura 21:** Afluente; Sonda parâmetros DQO<sub>total</sub> :SST [22 de 22 medições].



**Figura 22:** Efluente; Sonda parâmetros DQO<sub>total</sub> :SST [24 de 24 medições].



Com relação à DQO<sub>filtrada</sub>, na Figura 23 (afluente) e na Figura 24 (efluente), os valores entre a sonda e o kit de HACH também variam. Novamente, observa-se que a faixa de concentrações analisadas é ainda relativamente muito pequena, especialmente para o efluente (163–254 mg/L para a sonda e 73–130 mg/L para HACH).



Para o afluente, foram retirados 4 pares de resultados que ficaram fora da relação, resultando em um  $R^2 = 0,96$  (Figura 25). Para o efluente, foram retirados novamente os 5 pares (Figura 26), resultando uma relação com  $R^2 = 0,9$ , ou seja, comparado ao parâmetro  $DQO_{total}$ , o afluente tem uma relação tendencialmente pior para o parâmetro de  $DQO_{filtrado}$ , mas, para o efluente, a relação é tendencialmente melhor.

Figura 23: Afluente: DQOfiltrada; comparação sonda s::can e HACH.

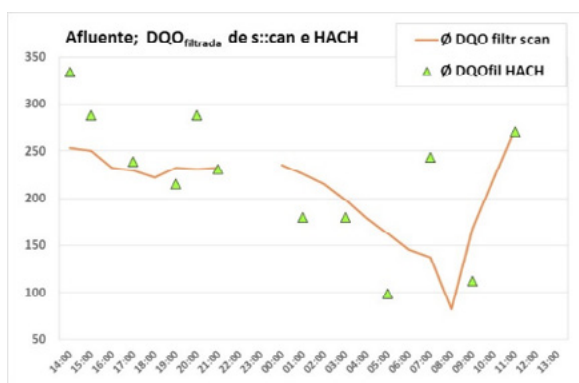


Figura 24: Efluente: DQOfiltrada; comparação sonda s::can e HACH.

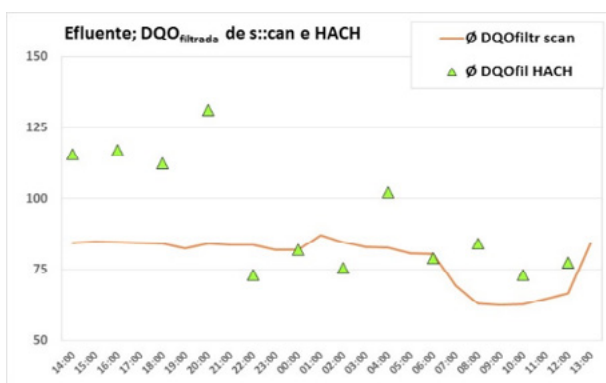


Figura 25: Afluente; DQOfiltrada  
Sonda: HACH [8 de 12 pares de valores].

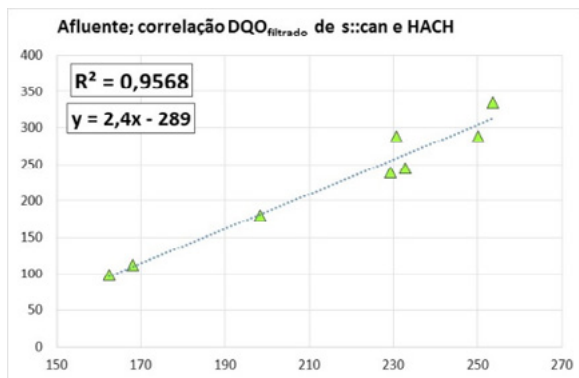
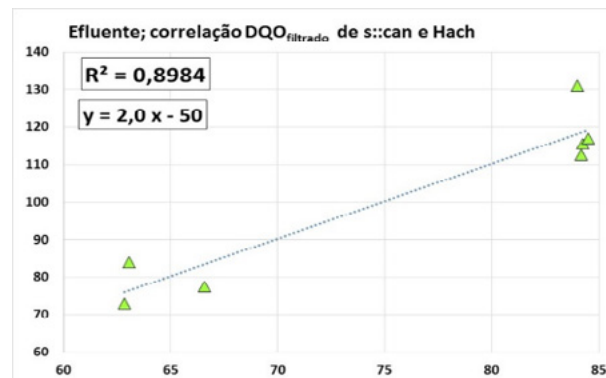


Figura 26: Efluente; DQOfiltrada  
Sonda: HACH [7 de 12 pares de valores].



A relação de SST entre a sonda e o laboratório é muito mais complexa. Recomendam-se fazer análises diferenciadas para afluente (Figura 27) e efluente (Figura 28), com eixos separados para SST laboratório e sonda.

Observa-se, por exemplo, que, para o afluente, parece que a sequência dos resultados da sonda é mais lógica que os resultados do laboratório e o mesmo aplica-se para o efluente, com exceção do aumento das concentrações medidas pela sonda entre 0 e 5 horas. Isso significa que, diferentemente da DQO (especialmente  $DQO_{total}$ ), os resultados de laboratório para SST parecem ser um pouco mais inconsistentes, o que pode ser explicado facilmente com a conservação da amostra com ácido sulfúrico e a metodologia de filtração e secagem de volumes de amostras muito pequenos (10 a 40 ml).

Conseqüentemente, não podem ser esperadas boas relações entre os resultados de laboratório e da sonda. Para o **afluente** (Figura 29), a melhor relação foi de  $R^2 = 0,88$  resultado do uso de 7 pares, ou seja, retirando 5 pares. Para o **efluente** (Figura 30), a melhor relação foi de  $R^2 = 0,5$  retirando os 4 pares de valores entre 0h e 5h. Neste caso, a retirada de mais pares não contribuía para a melhoria do resultado.

Figura 27: Afluente; relação SST sonda com resultados do laboratório.

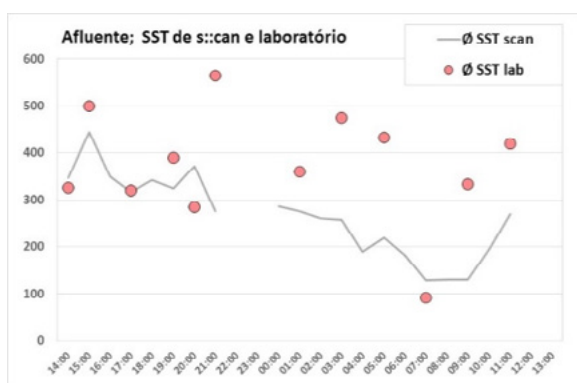


Figura 28: Efluente; relação SST sonda com resultados do laboratório.

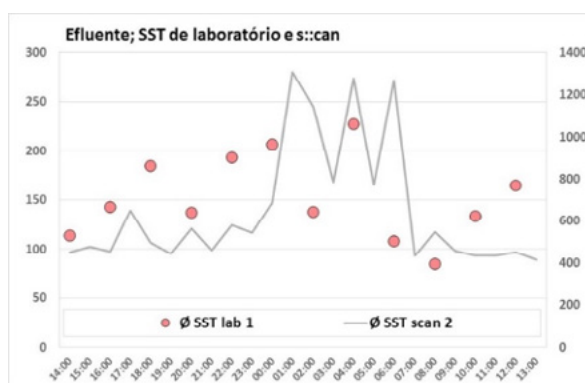


Figura 29: Afluente; SST Sonda: laboratório [7 de 12 pares de valores].

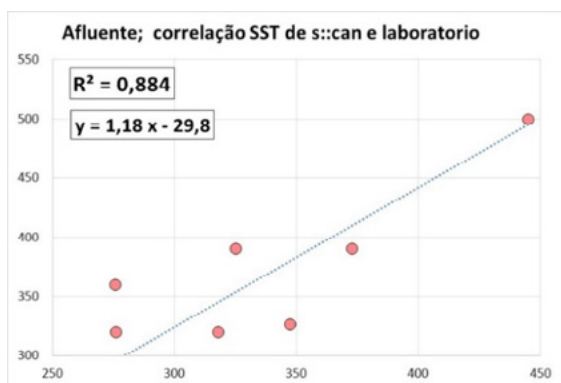
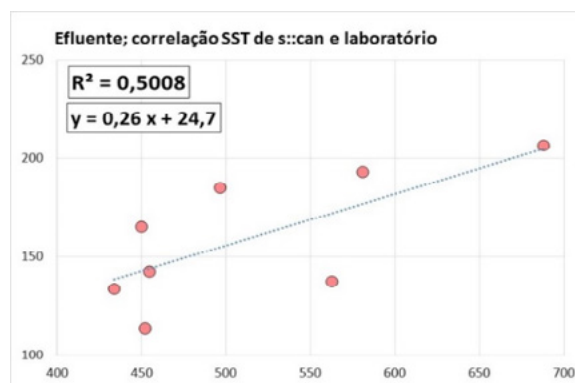


Figura 30: Efluente; SST Sonda: laboratório [8 de 12 pares de valores].



Neste caso, a faixa de concentrações era pequena somente para o efluente e os valores de laboratório (Laboratório, 114-207 mg/L; sonda 434-688 mg/L). Por outro lado, diferente do parâmetro de DQO, um aumento da base de dados e uma faixa maior de concentrações não vão resultar em uma melhor relação, se não, deve ser considerado que, neste caso, **parte das inconsistências vem de dados de laboratório**.

Uma observação importante deste ensaio, com relação aos SST, era o comportamento da sonda nas medições de amostras no efluente entre 0 e 5h. Em certo sentido, essa **observação pode comprovar que a matriz do “efluente ETE” não parece ser adequada para o efluente de reatores UASB**.

A razão para o aparecimento dos picos ainda **não foi suficientemente pesquisada**: uma possível explicação é que, na saída do UASB, pode haver

partículas (provavelmente de coloração negra) que provocam uma absorvância relativamente forte de luz e esta absorvância é interpretada pela matriz da sonda como matéria orgânica não solúvel (SST e  $DQO_{total}$ ), conforme a relação documentada na Figura 18 e Figura 28.

Se esta possibilidade estiver correta, deve ainda ser esclarecido, por exemplo: 1) As características destas partículas; será que sua aparição realmente é limitada ao efluente de UASB, ou também podem aparecer, por exemplo, no esgoto bruto que passou por certos processos anaeróbios na rede; 2) Até que nível pode ser possível e recomendável eliminar de uma matriz este tipo de absorvância.

*Do ensaio sistemático de calibração entre sonda s::can e laboratório para os parâmetros  $DQO_{total}$ ,  $DQO_{filtr.}$  e SST na “ETE A”, resultaram as seguintes correlações máximas:*

**Entrada UASB/afluente:**

$DQO_{total}$   $R^2= 1,00$  (comparando 11 de 12 pares)

$DQO_{filtr.}$   $R^2= 0,96$  (comparando 07 de 12 pares)

SST  $R^2= 0,88$  (comparando 07 de 12 pares)

**Saída UASB/efluente:**

$DQO_{total}$   $R^2= 0,85$  (comparando 07 de 12 pares)

$DQO_{filtr.}$   $R^2= 0,90$  (comparando 07 de 12 pares)

SST  $R^2= 0,50$  (comparando 08 de 12 pares)

*Com relação à  $DQO$ , pode-se esperar uma melhor relação à medida que a base de dados for aumentando. Com relação ao parâmetro de SST, observaram-se certos limites também pelo resultado de laboratório.*

*O aumento (picos) das concentrações de SST e  $DQO_{total}$  no efluente de UASB observadas neste ensaio e a baixa relação de resultados para  $DQO_{total}$  e  $DQO_{filtrada}$  entre sonda e laboratório comprovam que, para esta ETE, a matriz de efluente de ETE fornecida pela s::can não se aplica e é necessária uma matriz própria para o efluente de UASB. Recomenda-se repetir o ensaio em outras ETES para comparar os resultados.*



## 6

## PERSPECTIVA DE USO DA SONDA CARBO::LYSER NAS CONDIÇÕES DAS ETES NO BRASIL

A pesquisa sistemática sobre a **calibração e uso de sondas de DQO** e a **separação de afluente e efluente** possibilitou finalmente gerar resultados mais confiáveis para o objetivo original do projeto: **a relação entre a carga do UASB e a produção de biogás referente aos fatores de influência.**

Uma das principais conclusões que foram obtidas com relação à medição de DQO, conforme apresentado no relatório de análise conjunta, é que a **eficiência do UASB para remoção de DQO não sofre grandes mudanças ao longo de tempo**, ou seja, a concentração de  $DQO_{total}$  da saída segue a curva de concentração de entrada quase sempre de mesma forma, e a carga removida fica **em torno de 60%**.

*Assim, os futuros projetos de medição podem se concentrar na continuação da medição de DQO afluente ao UASB, para obter as relações entre biogás produzido e carga aplicada/removida. A medição de DQO no afluente pode ser feita no sistema de by pass, desligando temporariamente a bomba de efluente, ou, nas ETES onde, técnica e economicamente, for possível, instalar duas sondas, o afluente e efluente poderão ser analisados de forma independente.*

*Esta decisão considera especialmente os problemas não resolvidos para a medição de efluente de UASB: 1) O drift que não foi possível controlar, nem aumentando a pressão para 8 bar e instalação livre; 2) Os picos observados no efluente do UASB; e, 3) A falta de correlação entre os resultados de laboratório e de sonda ( $DQO_{total}$  e  $DQO_{filtrado}$ ).*

*Estas observações são com base na experiência com a ETE A e implicam a necessidade de uma matriz própria para o efluente de UASB, isso deve ser pesquisado ainda nas demais ETES.*

### **Anexo - Procedimento Operacional Padrão da sonda de monitoramento da fase líquida**

O procedimento operacional padrão apresentado a seguir foi elaborado por Reis (2016).

# 1

## PRINCÍPIO DO MÉTODO

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um dos principais parâmetros de qualidade das águas residuárias, permitindo uma medição indireta da quantidade de matéria orgânica presente. Em laboratório, o teste de DQO é feito por meio da ação de um forte oxidante (dicromato de potássio) em meio ácido sobre a amostra de esgoto. Com um tempo de duração de apenas duas a três horas, o teste dá uma indicação do oxigênio requerido para a estabilização da matéria orgânica.

A sonda s::can funciona pelo princípio da espectrometria UV-VIS. Uma lâmpada emite um feixe de luz que passa por um meio e cada molécula de substância dissolvida absorve radiação em um comprimento de onda conhecido, o que provoca enfraquecimento do feixe de luz. A intensidade do feixe após passar pelo meio é então medida por um detector ao longo de uma série de comprimentos de onda. Assim, a concentração de substâncias do meio determina o nível de absorção da amostra, logo quanto maior a concentração, maior o enfraquecimento do feixe de luz. A sonda pode medir DQO na faixa de 0 a 3250 mg/L e Sólidos Suspensos Totais (SST) na faixa de 0 a 2500 mg/L, podendo operar na faixa de temperatura de -10 a 50 °C.

Os dados de DQO e SST são medidos pela sonda, que é acompanhada de um controlador Con::lyte. Esses dados são medidos a cada 1 min e, a cada 5 min, é transmitido o valor médio das últimas cinco medições, por sistema de telemetria SCADAweb, onde ficam armazenados em um banco de dados *online*.

O equipamento utiliza um sistema de autolimpeza a ar pressurizado, com as seguintes condições operacionais: limpeza com duração de 5 s, ativada a cada três ciclos de medições, cada um com duração de 1 min. A medição pela sonda é inativada durante 20 s após a conclusão da limpeza. O compressor de ar é do tipo Ferrari MEGA AIR C-6L, com um motor de 750 W, tensão nominal de 220 V, vazão máxima de 150 L/min, pressão máxima de 8 bar e reservatório de ar com volume de 6 L. Recomenda-se a operação do compressor com uma pressão de 6 bar.

Além da limpeza automática a ar comprimido, é recomendada a limpeza manual da sonda s::can. A frequência do procedimento deve ser estabelecida de acordo com as características do esgoto afluente à ETE, mas recomenda-se que seja feito no mínimo uma vez por semana.

# 2

## LIMPEZA MANUAL DA SONDA

O controle da sonda é feito pelo controlador Con::lyte, representado na Figura 1, onde podem ser vistos os botões **Enter**, **Esc**, setas de seleção e **Function**.

**Figura 1:** Controlador Con::lyte com representação de seus botões.

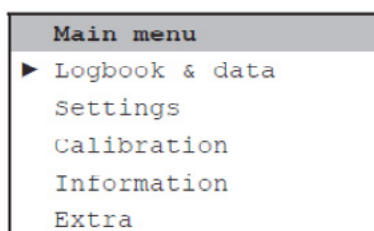


Realizar **TODOS** os seguintes procedimentos, na ordem indicada:

### 2.1 Interromper a medição da sonda

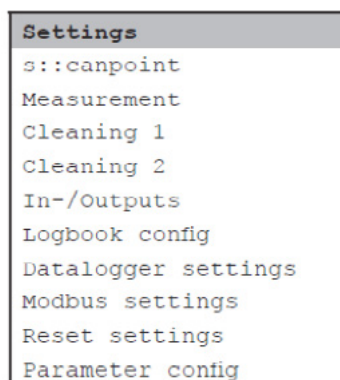
**Figura 2:** Tela inicial de configuração.

1. Pressione **Enter**. A seguinte tela será exibida:



2. Aperte a **seta** para baixo (▼), posicionando a seleção sobre **Settings**.  
3. Aperte **Enter**. A seguinte tela será exibida:

Figura 3: Tela Settings



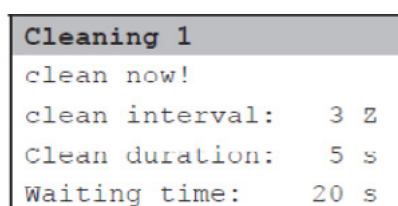
4. Aperte a seta para baixo até posicionar a seleção sobre **Measurement**. Aperte **Enter**.
5. Selecione **Status**, aperte **Enter**.
6. Pressione a seta para baixo. Você deverá ler **paused** e então, pressionar **Enter**.

## 2.2 Interromper o suprimento de ar comprimido

7. Pressione **Esc** duas vezes, até retornar à tela Settings (Figura 3).
8. Pressione a seta para baixo, posicionando a seleção sobre **Cleaning 1**, aperte **Enter**.

A seguinte tela será exibida:

Figura 4: Tela de configuração da limpeza a ar comprimido.



9. Pressione a seta para baixo, posicionando a seleção sobre **clean interval**, aperte **Enter**.
10. Aperte a seta para baixo, até inserir o valor **0 (zero)** e aperte **Enter**.

## 2.3 Interromper a chegada de vazão à sonda

11. Na porta do painel elétrico, gire as três chaves de modo que estejam apontadas para cima (posição "0").

**Figura 5:** Painel elétrico com modo afluente e efluente desligados.



## 2.4 Remoção da sonda do suporte

**Figura 6:** Suporte da sonda com indicação da porca de encaixe.

Porca superior



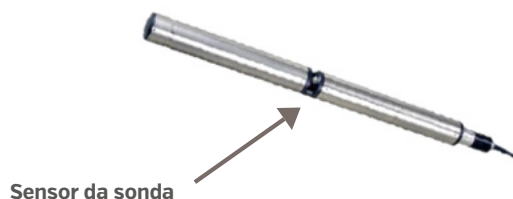
12. Desrosqueie a porca superior (indicada na Figura 6) levemente, para não soltar os anéis interiores.

13. Remova a sonda.

## 2.5 Limpeza da sonda

14. Aqueça um volume de água a ser despejado em um balde, suficiente para que a sonda seja imersa até a altura do sensor (Figura 7). A água deverá ser aquecida até uma temperatura de 30 a 35°C.

**Figura 7:** Sonda com indicação do sensor.



15. Certifique-se de que a temperatura da água não está acima de 40°C para não danificar a sonda.
16. Mergulhe a sonda neste balde de água por 3 minutos.
17. Com um algodão, limpe o sensor da sonda com solução de ácido clorídrico 3%.
18. Limpe a sonda e a janela de vidro do suporte com água destilada (Figura 8).

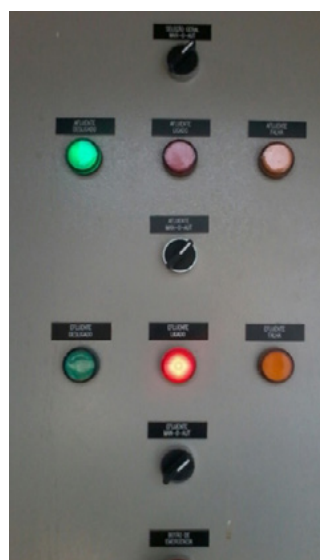
**Figura 8:** Sonda com janela de vidro indicada.



## 2.6 Reinício da medição, do suprimento de ar comprimido e da chegada de vazão à sonda

19. Recoloque a sonda no suporte e rosqueie a porca superior. O leitor da sonda deve ficar centralizado no suporte, conforme Figura 8.
20. Na tela do controlador, aperte **Enter**.
21. Selecione na ordem: **Settings** (Figura 2), **Measurement** (Figura 3), **Status**.
22. Pressione a seta para baixo e selecione **active**. Aperte **Enter**.
23. Pressione **Esc** duas vezes até retornar à tela **Settings** (Figura 3). Aperte **Enter**.
24. Selecione **Cleaning 1**, aperte **Enter**.
25. Selecione **clean interval**, aperte **Enter**.
26. Com as setas do painel, insira o valor 3 e aperte **Enter**.
27. Na porta do painel elétrico, gire as três chaves para o modo automático (Figura 9).

**Figura 9:** Painel elétrico com modo automático ligado.



## 2.7 Checagem da limpeza

A fim de se verificar o resultado do processo de limpeza manual, deve-se imergir a sonda em água destilada, que será usada para medição de referência, e então realizar os passos indicados na Figura 10 para obter o parâmetro *Quality number* (Q). O menu *G-Serie* é exibido ao selecionar a opção *Calibration* na tela inicial de configuração (Figura 2).

<p><b>G-Serie</b> Global calibration ▶ Function check</p>	<p><b>Function check</b> ▶ Execute check! Set reference zero</p>	<p><b>Please wait...</b> Check running... Remaining time: 30 s</p>	<p><b>Information</b> Check finished. Quality number Q=0</p>
---	--	--	--

**Figura 10:** Sequência de telas indicadas no controlador *s::can* para checagem de limpeza manual.

O parâmetro Q pode assumir valores entre -2 e +2. Se Q=0, a sonda encontra-se satisfatoriamente limpa. Os números positivos indicam os graus de contaminação da sonda (“+1” para contaminação fraca e “+2” para contaminação forte). Assim, mediante Q>0, deve-se limpar a seção de medição da sonda e então realizar o procedimento de checagem em água destilada novamente. Se após três tentativas o procedimento ainda não resultar em Q=0, o suporte da *s::can* deverá ser contatado, o que pode ser feito via contato com a empresa Rotária do Brasil (Telefone de contato: +55 (48) 3234-3164).

O valor Q<0 indica erro no funcionamento da sonda ou medição de referência inadequada, feita com água não totalmente limpa. Assim, deve-se preparar uma nova amostra de água destilada e então realizar o procedimento de checagem novamente. Se após três tentativas o procedimento ainda não resultar em Q=0, a Rotária do Brasil deverá ser contatada.



# 3

## CALIBRAÇÃO DA SONDA

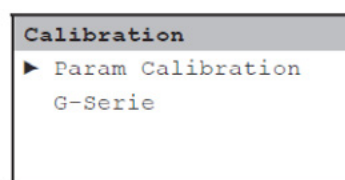
### 3.1 Calibração *offset*

**Atenção:** É importante realizar os procedimentos de 1 a 16 seguidamente, ou seja, as amostras de esgoto devem ser coletadas no mesmo horário em que serão solicitadas as medições instantâneas que serão armazenadas pela sonda, as quais deverão ser feitas conforme itens 6 a 15.

1. Faça a coleta de amostras de esgoto bruto e efluente dos reatores UASB. Em laboratório, deverão ser feitas análises de  $DQO_{total}$  e SST do esgoto bruto, e  $DQO_{filtrada}$  do efluente dos reatores UASB.
2. Na tela inicial de configuração (Figura 2), selecione **Calibration**.
3. Aperte a seta para cima (▲), de forma a inserir o password: **1**.

A seguinte tela será exibida:

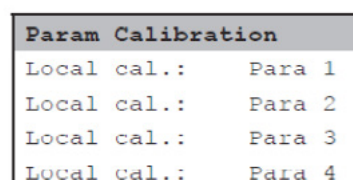
Figura 11: Tela de Calibração 1.



4. Selecione **Param Calibration**.

A seguinte tela será exibida:

Figura 12: Tela de Calibração 2.



5. Selecione **Local cal.: Para 1**.

A seguinte tela será exibida:



Figura 13: Tela de calibração 3.

Local cal.	Para 1
Calib.:	Local
Calib.Type:	Linear
Sample 1:	-100.22
Quality:	0.97
Act. Value:	1.60
Lab 1:	2.00
Sample 2:	-46.78
Quality:	0.97
Act. Value:	1.60
Lab 2:	18.00
Calibrate!	

6. Selecione **Calib. Type** e aperte **Enter**. Com a seta para baixo, insira **Offset**.
7. Pressione **Esc**.
8. Selecione **Sample 1** e aperte **Enter**.
9. Pressione **Esc**.
10. Selecione **Local cal.: Para 2** e aperte **Enter**.
11. Selecione **Sample 1** e aperte **Enter**.
12. Pressione **Esc**.
13. Selecione **Local cal.: Para 3** e aperte **Enter**.
14. Selecione **Sample 1** e aperte **Enter**.
15. Pressione **Esc** até retornar à tela inicial.

Após obter os resultados de laboratório, faça os seguintes procedimentos:  
Repita os procedimentos indicados nos itens 2 a 5.

16. Selecione **Lab 1** e aperte **Enter**. Insira o valor medido em laboratório para  $DQO_{total}$  do esgoto bruto.
17. Pressione **Esc**.
18. Selecione **Local cal.: Para 2** e aperte **Enter**.
19. Selecione **Lab 1** e aperte **Enter**. Insira o valor medido em laboratório para  $DQO_{filtrada}$  do efluente dos reatores UASB.
20. Pressione **Esc**.
21. Selecione **Local cal.: Para 3** e aperte **Enter**.
22. Selecione **Lab 1** e aperte **Enter**. Insira o valor medido em laboratório para SST do esgoto bruto.
23. Selecione **Calibrate!** e aperte **Enter**.

A mensagem **o.k.** será exibida, indicando que a calibração foi concluída.

OBS: se o processo não resultar em sucesso, a mensagem **Error** será exibida e o sistema manterá a última calibração realizada. Deverá então ser

realizada mais uma tentativa de calibração e caso essa também não resulte em sucesso, deverá ser contatado o suporte da Rotária do Brasil.

### 3.2 Calibração linear

Para esse tipo de calibração, é necessário realizar coletas de amostras de esgoto afluyente para que sejam feitas análises de DQO<sub>total</sub> e SST em laboratório. Simultaneamente, devem ser coletados os valores desses parâmetros indicados no *display* do Con::lyte, a fim de que sejam obtidos dados para construção de uma curva em Excel, a qual será utilizada para calibração dos dados gerados pela sonda.

Deve ser dedicado um dia para realização desses procedimentos, sendo ideal a coleta de dados a cada uma hora. Recomenda-se que no mínimo 10 amostras de esgoto afluyente sejam coletadas e que ao mesmo tempo sejam registrados os valores mostrados pela sonda, sendo que quanto maior a quantidade de amostras, maior será a precisão da curva a ser construída. A Figura 14 traz o exemplo de um quadro de anotações dos dados coletados, o qual foi fornecido ao operador responsável na ETE Laboreaux, em Itabira/MG, e pode ser utilizado em outras ETES.

**Figura 14:** Quadro para registro de dados coletados para realização da calibração linear, utilizado na ETE Laboreaux.

**Operacionalização do sistema de medição e monitoramento das características da fase líquida e da produção de biogás na ETE Laboreaux – Itabira/MG**

**Quadro de anotação para coletas de Calibração da Sonda S::can**

Coleta 1	DQO total		SST	
	Sonda	Lab.	Sonda	Lab.
Hora				

Coleta 2	DQO total		SST	
	Sonda	Lab.	Sonda	Lab.
Hora				

Coleta 3	DQO total		SST	
	Sonda	Lab.	Sonda	Lab.
Hora				

Coleta 4	DQO total		SST	
	Sonda	Lab.	Sonda	Lab.
Hora				

Coleta 5	DQO total		SST	
	Sonda	Lab.	Sonda	Lab.
Hora				

Coleta 6	DQO total		SST	
	Sonda	Lab.	Sonda	Lab.
Hora				

Coleta 7	DQO total		SST	
	Sonda	Lab.	Sonda	Lab.
Hora				

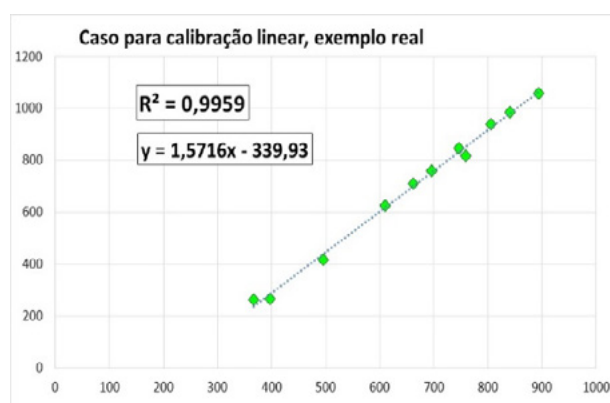
Coleta 8	DQO total		SST	
	Sonda	Lab.	Sonda	Lab.
Hora				

Coleta 9	DQO total		SST	
	Sonda	Lab.	Sonda	Lab.
Hora				

Coleta 10	DQO total		SST	
	Sonda	Lab.	Sonda	Lab.
Hora				

De posse dos dados coletados, devem ser construídas duas curvas em Excel, uma para calibração de  $DQO_{total}$  e outra para SST. Os registros de laboratório devem ficar no eixo y e os da sonda, no eixo x, de forma se obter uma equação dos dados de laboratório em função dos dados indicados pela sonda. Assim, deve-se plotar em um gráfico as medições de cada intervalo de uma hora e, em seguida, verificar a linha de tendência e sua equação indicada pelo Excel, sendo recomendado escolher o tipo de curva que apresentar o maior coeficiente de correlação ( $R^2$ ). A Figura 15 mostra um exemplo de calibração linear obtido em uma das ETEs do PROBIOGÁS.

**Figura 15:** Curva de calibração linear para DQO de uma das ETEs do PROBIOGÁS.



Finalmente, com as equações obtidas com os gráficos de  $DQO_{total}$  e SST, pode-se corrigir os dados gerados pela sonda, os quais podem ser acessados no sistema SCADAweb. Para isso, substitui-se os valores de x de cada equação pelos valores indicados no sistema, obtendo-se então os valores corrigidos de  $DQO_{total}$  e SST.

# 4

## REFERÊNCIAS

*s::can* [Austria] [Org.]. **Spectrometer probes**. Disponível em: <<http://s-can.at/>>  
Acesso em: 30 mar. 2015.

Rotária do Brasil e Consórcio AKUT. Ficha técnica. **Sonda *s::can* de DQO para medição em paralelo de DQO no afluente e efluente UASB**. Agosto de 2016.

## Anexo 2

## Nota técnica

Sensor UNION INSTRUMENTS INCA 4002  
para medição da composição do biogás

## SUMÁRIO

---

119	1 APRESENTAÇÃO DO MEDIDOR DE GASES
120	2 TECNOLOGIA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO
123	3 EXPERIÊNCIAS COM A INSTALAÇÃO
124	4 EXPERIÊNCIA DE CALIBRAÇÃO
125	5 REGISTROS DE PROBLEMAS
125	5.1 Umidade no Sistema de Medição
125	5.2 Error Cal Set
125	5.3 H <sub>2</sub> S Age
125	5.4 Error Flow Gas
125	5.5 Error Flow Gas
126	5.6 Válvula de Controle de Fluxo de Gás de Calibração e de Purga
126	5.7 Fusível de Sobrecarga
127	6 CONCLUSÕES DE USO DO INCA

---

## 1

## APRESENTAÇÃO DO MEDIDOR DE GASES

A *Union Instruments* é uma empresa do sul da Alemanha, especializada em instrumentação para gases. A série **INCA** é um dispositivo de medição de gás modular capaz de utilizar diferentes sensores e sistemas de bombeamento configuráveis para análise de gases multi-compostos. No projeto de medições, o INCA 4002 estava presente nas 10 instalações para a medição de biogás de efluentes sanitários.

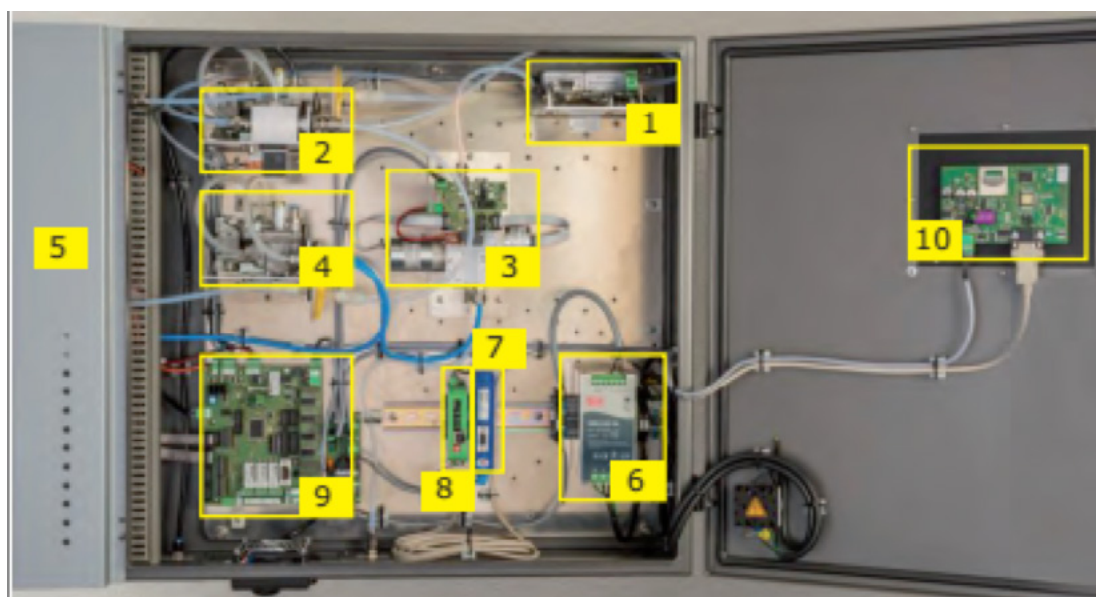


# 2

## TECNOLOGIA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

**Figura 1:** Componentes do INCA 4002 para análise de gases.

O INCA é um sistema modular de análise de gases, no qual cada sensor apresenta metodologia analítica conectada a uma central de automação dos ciclos de medição. A Figura 1 apresenta o equipamento internamente, sendo possível visualizar os diferentes sensores, bombas e componentes eletrônicos de automação.



- |   |  |
|---|--|
| 1. Unidade do NDIR  | 6. Unidade de fonte de energia                                       |
| 2. Bomba para gás de análise  | 7. Interface PROFIBUS [NA]   |
| 3. Unidade $\mu$ Pulse e sensores eletroquímicos, à direita $H_2S$ , à esquerda $O_2$ | 8. Interface Ethernet [para serviço remoto] [NA];                    |
| 4. Bomba para gás de depuração  | 9. Módulo de entrada/saída [I/O]                                     |
| 5. Resfriador de gás e bomba de drenagem automática condensada                        | 10. Unidade central com relógio em tempo real e memória em cartão SD |

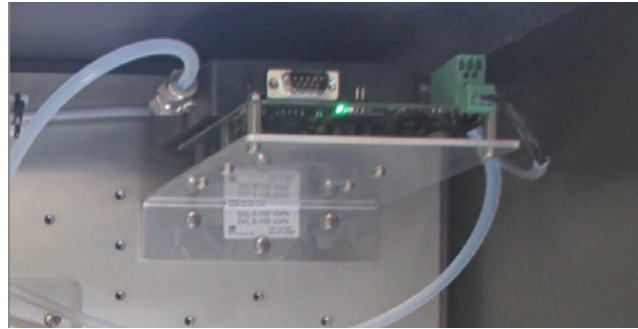
**Fonte:** UNION INSTRUMENTS (2014).

**NDIR (Non Diffraction Infra Red):** utiliza as propriedades dos gases de absorver radiação de luz no comprimento de onda infravermelho. A unidade NDIR, apresentada na Figura 2, consiste em filtros adequados para selecionar uma determinada radiação do espectro da fonte de luz, que representa o comportamento típico de absorção do gás em questão. Esta radiação passa por uma célula de medição cheia de gás da amostra. A atenuação da radiação que ocorre neste processo mostra o grau de concentração do gás. Os sensores têm as seguintes metodologias analíticas:

$CH_4$ : Medição por infravermelho não dispersivo, leitura efetuada pela unidade NDIR (1);

$CO_2$ : Medição por Infravermelho não dispersivo, leitura também efetuada pela unidade NDIR (1).

**Figura 2:** Sensor infravermelho não dispersivo. Unidade responsável pela análise dos gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ .



**Fonte:** Rotária do Brasil [2015].

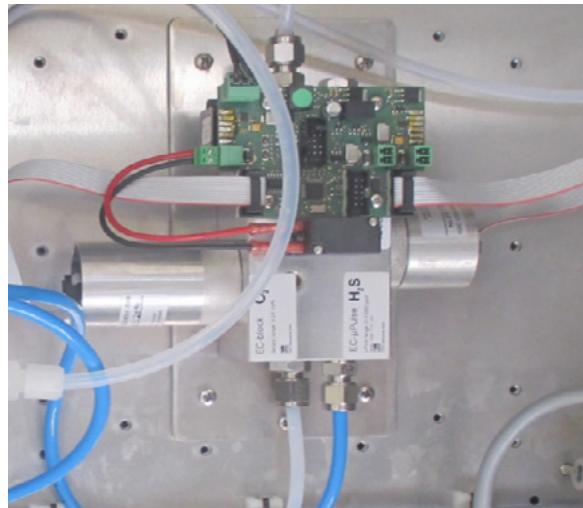
**Célula eletrolítica:** reação que causa a liberação de elétrons, portanto uma corrente mensurável que corresponde ao arranjo chamado célula eletroquímica. Esta consiste em pelo menos dois eletrodos que agem cataliticamente, conectados por um meio condutor de eletricidade (eletrólito) e um circuito. Na borda do eletrodo, ocorre uma reação entre o gás e o eletrólito, gerando uma corrente que indica o grau de concentração do gás.

$\text{H}_2\text{S}$ : célula eletrolítica, leitura efetuada na unidade  $\mu\text{Pulse}$  (3)

$\text{O}_2$ : célula eletrolítica, leitura efetuada na unidade  $\mu\text{Pulse}$  (3)

Na Figura 3, é possível visualizar a Unidade  $\mu\text{Pulse}$  com os sensores eletroquímicos:  $\text{H}_2\text{S}$ , à direita; e  $\text{O}_2$ , à esquerda.

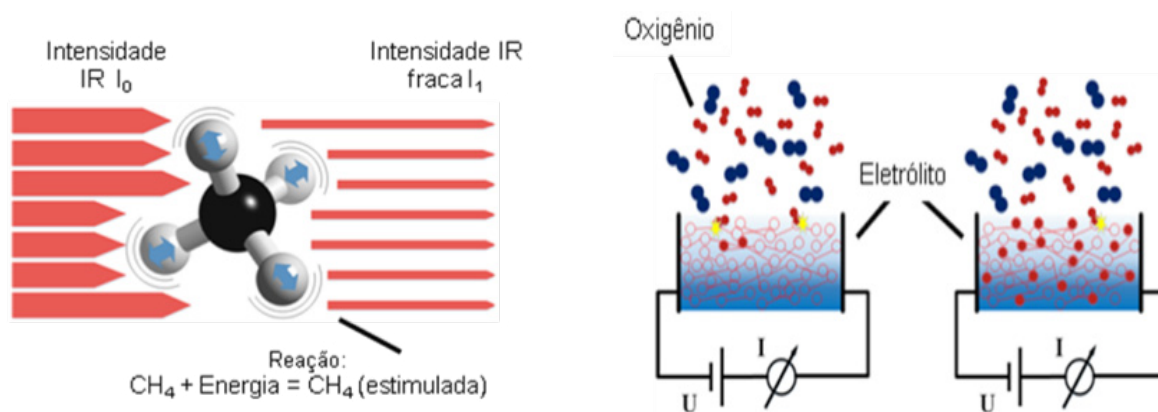
**Figura 3:** Unidade  $\mu\text{Pulse}$  responsável pela automação e conexão dos sensores de  $\text{H}_2\text{S}$  (direita) e  $\text{O}_2$  (esquerda) por células eletrolíticas.



**Fonte:** Rotária do Brasil [2015].

A Figura 4 apresenta os princípios de funcionamento dos sensores supracitados.

**Figura 4:** Princípio de funcionamento dos Sensores: (a) Infravermelho não dispersivo [medição de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ ]; (b) Eletroquímicos [medição de  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{O}_2$ ].



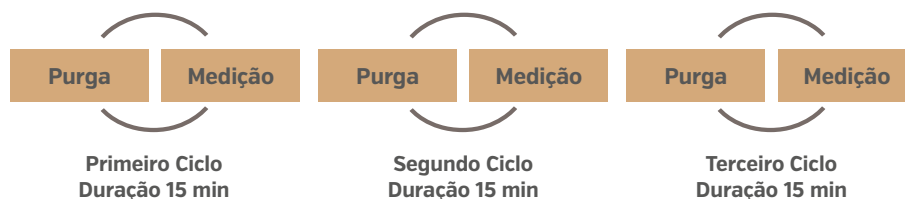
#### Ciclo de operação

O INCA, conforme salientado anteriormente, é um conjunto de sensores, bombas e automação justapostos para a obtenção das concentrações de gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ) que compõem a mistura do biogás.

*O sistema de medição funciona em duas etapas principais (Figura 5):*

- 1 – **Purga do sistema:** isto é, remoção de qualquer resquício de gás do processo de medição anterior;
- 2 – **Medição:** captação do gás de processo (biogás) para análise nos diferentes sensores.

**Figura 5:** Ilustração dos ciclos de operação do INCA 4002.



Fonte: Rotária do Brasil [2016].

O ciclo completo de purga e medição tem duração total de 15 minutos, sendo 5 minutos para purga e 10 minutos para medição. As tarefas complementares são completamente configuráveis pelos usuários, com base nos ciclos. Isto é, pode-se, por exemplo, efetuar a medição de  $\text{H}_2\text{S}$  a cada 20 ciclos, para preservar a durabilidade do medidor de  $\text{H}_2\text{S}$ , tendo assim uma nova leitura a cada 5 horas. Outras tarefas, como a calibração com ar atmosférico, podem também ser realizadas em um determinado número de ciclos executados pelo equipamento.

## 3

## EXPERIÊNCIAS COM A INSTALAÇÃO

O instrumento de medição de gás INCA 4002 é formado pela junção de 10 itens num *case* compacto, com automação e controle estabelecidos de fábrica (Figura 6a). Para o usuário final, a instalação é bastante simples, pois necessita apenas de conexão com a energia elétrica e com o gás a ser analisado.

Para a escolha do local de instalação do medidor, foram observadas as exigências mínimas do equipamento, por exemplo, a escolha do local de instalação da mangueira de amostragem de biogás e do quadro de medição da composição (Figura 6b). A distância máxima entre eles, segundo o fabricante, deve ser de 100 m (UNION, 2015). Atentou-se também para o descarte desta amostra de gás, sendo necessária a instalação de uma mangueira de saída que transporte o gás para fora do local de instalação do quadro.

**Figura 6:** Medição da composição de biogás: [a] Quadro de medição da Union; [b] Tomada da amostra de gás.



**Fonte:** Rotária do Brasil [2015].

# 4

## EXPERIÊNCIA DE CALIBRAÇÃO

O equipamento de medição INCA 4002 apresenta um sistema de autocalibração por meio do ar atmosférico. Neste procedimento, são realizadas a calibração dos pontos zero de metano e  $H_2S$ , bem como o valor máximo (SPAN) de  $O_2$ . Essa autocalibração é parte da rotina do INCA no ciclo de leitura.

Os demais pontos zero e de SPAN devem ser calibrados com uma mistura conhecida e específica de gases (especificação da mistura e dos acessórios necessários em Anexo). O procedimento de calibração, especificamente, é simples e de fácil execução, porém os requisitos técnicos e legais para a aquisição, transporte e manuseio dos gases utilizados não é corriqueiro ou mesmo de rápida execução, uma vez que são poucas as empresas especializadas em fornecer gases sob a demanda do cliente com as características exatas. Além disso, normalmente, a quantidade mínima para aquisição é muito superior ao necessário para um único equipamento ou até mesmo para os dez existentes no projeto.

Além disso, cabe destacar que, por se tratar de gases comprimidos, a maioria das transportadoras classifica o transporte destes como sendo o de resíduos perigosos, tornando o traslado consideravelmente caro e sem possibilidade de envio aéreo, ocorrendo somente por meio rodoviário em transporte dedicado. Para esse projeto, foi necessário percorrer 7.600 km por meio rodoviário para realizar a calibração em todas as 10 estações.

O procedimento de calibração em si é simples, porém deve ser feito em conexão com *software* específico do equipamento, no caso, o INCA Control instalado em um computador portátil, para controle do histórico de cada sensor e dos dados de calibração, como é possível observar na Figura 7.

Com relação à realização da calibração, notou-se que, em diversas ocasiões, houve a necessidade de mais de uma iteração para que ocorresse a correta calibração. Isto é, o procedimento de calibração passando um gás conhecido e comparando à leitura do equipamento foi realizado até 4 vezes para que a leitura de calibração ficasse ao menos com 2% da real constituição do gás de calibração. Isto ocorreu pela necessidade de recálculo do fator de calibração iterativamente para o alcance do resultado conforme o gás de calibração.

**Figura 7:** Calibração do medidor de composição de biogás em campo, realizada pela Rotária do Brasil.



**Fonte:** Rotária do Brasil [2015].



# 5

## REGISTROS DE PROBLEMAS

---

### 5.1 Umidade no Sistema de Medição

O sistema de desumidificação de gás não foi suficientemente eficiente em 2 ocasiões, permitindo a passagem de água misturada ao gás pela tubulação, sensores NDIR e  $\mu$ Pulse, acarretando na avaria permanente dos sensores.

---

### 5.2 Error Cal Set

É importante lembrar que a calibração não é realizada exclusivamente por meio de um gás conhecido, ela ocorre também automaticamente por meio da calibração com o ar atmosférico ao longo da vida útil do INCA 4002. Caso, ao longo da vida útil do equipamento, ocorra discrepância entre a medição do ar e a configuração pré-estabelecida para o ar atmosférico, será apresentado erro. Este pode ser sanado ao se executara calibração do ar sob controle do *software* em conjunto com a calibração com um gás conhecido.

---

### 5.3 H<sub>2</sub>S Age

A metodologia de análise do gás H<sub>2</sub>S ocorre por meio de uma célula eletrolítica, sendo o gás, ao longo do eletrodo, consumido progressivamente por meio das reações. Assim, com o passar do tempo, existe um natural desgaste evidenciado pelo equipamento, tendo como indicador a idade do sensor. A solução apresentada é a troca do sensor eletrolítico.

---

### 5.4 Error Flow Gas

Esse erro se apresenta quando o fluxo de gás de análise não é condizente com o funcionamento das bombas de sucção e do sistema de aspersão do gás analisado. O erro pode ser originado pelos seguintes fatores: 1) má conexão da mangueira de processo, não criando vácuo e reduzindo as pressões do sistema; 2) entupimento das mangueiras, válvulas, entre outros dispositivos do sistema de medição e coleta de biogás 3) entupimento do aparato  $\mu$ Pulse, por apresentar passagem muito fina, passível de obstrução por partículas; 4) entupimento do sistema de dispersão do gás analisado; e, 5) problema nas bombas de sucção de gás, responsáveis pela movimentação do gás no sistema.

---

### 5.5 Error Flow Gas

Como o sistema de medição de gás funciona sob pressão negativa, caso haja afrouxamento ou má conexão das mangueiras de fluxo de gás de análise, a pressão negativa não será proporcionada no sistema e, conseqüentemente, ocorrerá problema de fluxo do gás.

---

### 5.6 Válvula de Controle de Fluxo de Gás de Calibração e de Purga

Em um caso, foi verificada a queima da placa elétrica de controle da válvula de gás de calibração/purga, pelos indícios e marcas. Durante a verificação, percebeu-se que tal fato ocorreu por um curto, circuito devido ao gotejamento da conexão do condensador sobre a placa.

---

### 5.7 Fusível de Sobrecarga

Houve, também, a queima de fusível por sobrecarga da corrente de alimentação. Apesar do procedimento de substituição ser considerado simples, o fusível idêntico ao fabricado (fusível de atuação lenta) não é comumente encontrado em todas as regiões do Brasil, porém o similar de atuação rápida é facilmente encontrado.

# 6

## CONCLUSÕES DE USO DO INCA

O INCA 4002 é um equipamento de fácil instalação, manutenção e operação. Apresenta robusta automação de controle de dados de monitoramento, uma vez que possui inúmeros controles e contra verificações dos dados de monitoramento.

Apesar de tais vantagens e facilidades operacionais, a realidade brasileira conta com equipes operacionais que nem sempre são integradas, de modo geral, com sistemas de medição e instrumentos, levando ainda em conta a interface em língua inglesa, dificultando ou distanciando o operador dos sistemas de medição.

Além disso, o equipamento apresentou dificuldades em operar na situação específica do projeto, principalmente por medir o biogás de UASB sem nenhum tratamento prévio (como secagem de gás e dessulfurização) e ainda instalado em local sem ar condicionado, onde as temperaturas subiram às vezes a valores bastante altos. Assim sendo, diversos componentes tiveram sua vida útil reduzida por conta disso.

Vale ressaltar que o mesmo equipamento, segundo as informações da UNION INSTRUMENTS, funcionou sem problemas em outros países de clima quente, mas instalado em contêiner com ar condicionado e com a medição do gás antes de seu uso no CHP; ou seja, previamente tratado, seco e já com concentrações muito mais baixas de  $H_2S$ .

Como conclusão do projeto, para explorar seu potencial pleno, recomenda-se utilizar esses medidores em ambiente condicionado para tal, com sistema de refrigeração (ar-condicionado) instalado na casa de operação. Com relação à necessidade de calibração com gases comprimidos, com restrições de transporte aéreo, nas condições geográficas do Brasil, percebe-se que este continua a ser um processo relativamente exigente e recomenda-se contratar um serviço especializado



### Anexo – Mistura de gás para calibração e seus acessórios

ITEM	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE
1	Mistura = Sulfeto de Hidrogênio 25ppm ( $\mu\text{mol/mol}$ ) + Metano 99,9975 % [Balanço]	
	Qualidade: Pureza mínima: $\text{CH}_4 = 3,5$ e $\text{H}_2\text{S} = 1,8$	
	Acondicionamento	
	Cilindro de Alumínio	0,1 m <sup>3</sup>
	Capacidade: 0,1 m <sup>3</sup>	
	Tipo Cilindro: 1 litro	
	Conexão: CGA 180	
2	Cilindro de Alumínio destinado ao acondicionamento de Misturas, com válvula de fechamento.	1 peça
	Volume hidráulico: 1 litro	1 peça
	Válvula para fechamento do cilindro	1 peça
3	Regulador de Pressão	
	Regulador para cilindro	
	Pressão máxima na entrada no Union (20 mbar), essa informação deve ser passada ao fornecedor.	1 peça
	Para um cilindro grande, foram necessários 2 reguladores de pressão: 1 de duplo estágio e 1 fornecido pela Union.	

Fonte: Rotária do Brasil [2015].



Por meio da:



MINISTÉRIO DAS  
CIDADES



Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7958-070-3



9 788579 580703

