

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Gustavo Mockaitis

**REDUÇÃO DE SULFATO EM BIORREATOR OPERADO EM
BATELADA E BATELADA ALIMENTADA SEQUÊNCIAIS
CONTENDO BIOMASSA GRANULADA COM AGITAÇÃO
MECÂNICA E “DRAFT-TUBE”**

São Carlos

2008

Gustavo Mockaitis

**REDUÇÃO DE SULFATO EM BIORREATOR OPERADO EM
BATELADA E BATELADA ALIMENTADA SEQUÊNCIAIS
CONTENDO BIOMASSA GRANULADA COM AGITAÇÃO
MECÂNICA E “DRAFT-TUBE”**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte das exigências para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia (Área de concentração: Hidráulica e Saneamento).

Orientador: Prof. Dr. José Alberto Domingues Rodrigues

São Carlos

2008

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M688r Mockaitis, Gustavo
Redução de sulfato em biorreator operado em batelada alimentada seqüenciais contendo biomassa granulada com agitação mecânica e "*Draft-Tube*" / Gustavo Mockaitis; orientador José Alberto Domingues Rodrigues. -- São Carlos, 2008.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2008.

1. Tratamento de águas residuárias. 2. Redução de sulfato. 3. Estratégia de alimentação. 4. ASBR. 5. Batelada alimentada. 6. *Draft-tube*. 7. Biomassa granulada. 8. Tratamento anaeróbio. I. Título.

*Para Jomar Mockaitis, Nanci Carboni Mockaitis,
Eric Mockaitis, Hilda Voltani Carboni, Silvia
Yaniero Fernandes e Pingo, minha amada família,
pelo amor e grande apoio que me dedicam.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a agradeço Deus, pois este trabalho trata de apenas um pequeno estudo de um pequeno aspecto de sua infinita obra, e pela confiança em mim depositada, mesmo quando minha vontade vacilou.

Aos amigos espirituais, mensageiros de Deus, que me transmitiam otimismo, força, garra e principalmente inspiração, mesmo quando eu não merecia.

Aos meus pais, Prof. Jomar Mockaitis e Profa. Nanci Carboni Mockaitis, pelo grande amor, esforço, confiança e sacrifício, sem os quais tornariam este trabalho um objetivo inatingível para mim. Muito obrigado, pai e mãe, eu amo muito vocês!

Ao Prof. Dr. José Alberto Domingues Rodrigues, pela orientação, dedicação, força de vontade, garra, amizade e, sobre tudo paciência, estando sempre estando disposto a me corrigir quando necessário e sempre acreditando tanto no meu trabalho como em mim.

À Profa. Dra. Suzana Maria Ratusznei, pela co-orientação, atenção e amizade.

Ao Prof. Dr. Edson Luiz Silva (Tininho), pelas sugestões, atenção, amizade e principalmente pela fé que deposita em mim.

Ao Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior, pelas inestimáveis sugestões e discussões na minha banca de mestrado.

Ao Dr. Arnaldo Sarti, pela experiência que me passou através de suas sugestões e discussões.

Ao Prof. Dr. Marcelo Zaiat, pela amizade, apoio, sugestões e ajuda (nos vemos no doutorado!).

Ao Prof. Dr. Eugenio Foresti, pelas sugestões e grande experiência.

Ao Ms.C. Leonardo Henrique Soares Damasceno, não só pela amizade desde os tempos de iniciação científica, mas também pela grande ajuda nos métodos analíticos.

Agradeço e me despeço carinhosamente do Prof. Dr. Walter Borzani, cujos conselhos de longa data começam a dar frutos em mim. Infelizmente, Deus precisou de reforços no seu time de gênios, e chamou esta bela e magnífica pessoa para junto dele.

Agradeço a Universidade de São Paulo, e a Escola de Engenharia de São Carlos, que concretizaram este trabalho e realizaram (e continuam realizando) um grande sonho.

Aos professores do departamento de hidráulica e saneamento, pelo valioso conhecimento que me passaram.

Aos funcionários do departamento de hidráulica e saneamento, pela grande atenção e paciência.

À Escola de Engenharia Mauá e ao Instituto Mauá de Tecnologia que além da cessão pelas instalações e apoio na etapa experimental do trabalho, possibilitaram a minha formação como engenheiro, através da dedicação de todo o seu corpo docente. Fica também meu imenso agradecimento a todos os professores da minha graduação.

Agradeço especialmente ao grande colega Gregor Franz Friedl, pelo imenso auxílio, tanto na parte experimental como nas discussões, além de momentos inestimáveis de amizade e descontração no laboratório.

À todos os meus colegas de sala, que por um ano tive a honra destas formidáveis companhias. Por todos os estudos e trabalhos em grupo, discussões, festas, churrascadas, cervejadas e tudo mais. As portas de minha casa sempre estarão abertas a vocês!

Aos Engenheiros Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho, Guilherme Peixoto (Pesçoço), Ricardo Bidone (Gaúcho) e Diego Ruas (DiBeatles), e também a bióloga Flávia Bottino pela amizade especial.

À Silvia Yaniero Fernandes, e também a minha filhinha(o) que está chegando, minhas fontes de amor e carinho, por todos os momentos especiais e pelo lar que estamos construindo. Muito obrigado por me fazer ser uma pessoa melhor do que eu sou!

À FAPESP, instituição luminosa, que sempre acreditou no meu trabalho, concedendo mais uma vez uma bolsa de estudos (Processo 05/57.139-4) e também todo o financiamento que tornou o projeto possível (Processo 05/51.702-9).

Finalmente, agradeço a todos que me ajudaram direta e indiretamente neste projeto, que por um lapso de memória eu possa haver esquecido. Muito obrigado a todos vocês!

“We still think in terms of conquest.

We still haven't become mature enough to think of ourselves as only a tiny part of a vast and
incredible universe.

But man is a part of nature and his war against nature is inevitably a war against himself.

Now, I truly believe that we must come to terms with nature, and I think we are challenged as
mankind has never been challenged before to prove our maturity and our mastery, not of
nature, but of ourselves.”

Rachel Carson (1907-1964)

RESUMO

MOCKAITIS, G. (2008). *Redução de Sulfato em Biorreator Operado em Batelada e Batelada Alimentada Seqüenciais Contendo Biomassa Granulada com Agitação Mecânica e “Draft-Tube”*. 349p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

O presente projeto avaliou um reator anaeróbio operado em batelada e batelada alimentada seqüenciais (ASBR), em ciclos de 8 horas, utilizando biomassa granulada e agitação mecânica em um “draft-tube”, alimentado com água residuária sintética (500 mgDQO.L^{-1}), contendo sulfato em diferentes relações $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$. Em todos os ensaios o reator apresentou uma operação estável, produzindo alcalinidade e com concentração de ácidos voláteis totais em níveis adequados. Para os tempos de alimentação de 10 min, 3 h e 6 h, respectivamente, as eficiências de remoção de sulfato foram de 30, 72 e 72% nas operações nas quais o reator foi alimentado com uma relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34. Nos ensaios nos quais o reator foi alimentado na relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 0,67, as eficiências para a redução de sulfato foram de 25, 58 e 55%, respectivamente. Na operação com relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 0,34, as eficiências para redução de sulfato foram de 23, 37 e 27%, respectivamente. Desta maneira, pode-se concluir que as operações em batelada alimentada favoreceram a remoção de sulfato, enquanto foi observado que nas operações em batelada a remoção de matéria orgânica atingiu melhores eficiências.

Palavras-chave: redução de sulfato; estratégia de alimentação; ASBR; batelada alimentada; draft-tube; biomassa granulada e tratamento anaeróbio.

ABSTRACT

MOCKAITIS, G. (2008). *Sulfate Reduction in Bioreactor in Sequencing Batch and Fed-Batch Containing Granulated Biomass with Mechanical Stirring and Draft-Tube*. 349p. Ms.C Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

This present work evaluate an anaerobic sequencing batch reactor (ASBR), fed in batch and fed-batch, and cycles of 8 hours, using granulated biomass and mechanical stirring in a draft-tube, fed with synthetic wastewater (500 mgCOD.L^{-1}), enriched with sulfate in some COD/[SO₄²⁻] relations. In all operations the reactor showed a stable operation, producing alkalinity and maintaining the volatile acids in adequate levels. Considering the fed periods of 10 min, 3 h and 6 h, respectively, the removal efficiencies of the sulfate was 30, 72 e 72%, in the operations when the reactor was fed with a COD / [SO₄²⁻] relation of 1,34. In the essays when the reactor was fed in COD/[SO₄²⁻] relation of 0,67, the efficiencies of the sulfate reduction was 25, 58 e 55%, respectively. When the reactor was operated with COD/[SO₄²⁻] relation of 0,34, the efficiencies of sulfate reduction 23, 37 e 27%, respectively. Thus, is possible to conclude that the operations in fed-batch increased the efficiency of sulfate removal, at what time was observed that in batch operations the organic matter removal attained improved efficiencies.

Keywords: sulfate reduction; feeding strategy; ASBR; fed batch; draft-tube; granulated biomass and anaerobic treatment.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1 – Ciclo biogeoquímico do enxofre (Adaptado de MADIGAN *et al.*, 2002). **51**
- Figura 3.2 – Concentração de equilíbrio das formas de sulfeto em meio aquoso. A área com hachura espaçada indica a faixa de pH para a digestão anaeróbia e a área com hachura estreita indica a faixa ótima para a metanogênese (LENS, *et al.*, 1998). **52**
- Figura 3.3 – Resumo dos resultados obtidos nas simulações realizadas por Omil *et al.* (1997): A – Efeito do pH, B – Efeito da composição do inóculo (X_{AM}/X_{BRS} – Relação de concentração de *Archaea* metanogênicas por bactérias redutoras de sulfato), e C – Efeito do tempo de retenção celular, no tempo necessário para a conversão de sulfato no substrato, considerando eficiências de 10, 50 e 90%. **70**
- Figura 4.1 – ASBR com agitação mecânica com impelidor tipo hélice e “draft-tube”. **88**
- Figura 4.2 – Posicionamento e dimensionamento do “draft-tube” no biorreator. O esquema “A” foi utilizado nas operações de batelada enquanto o esquema “B” foi utilizado nas operações em batelada alimentada. **89**
- Figura 4.3 – Sistema de automação e bombas e reator anaeróbio. **90**
- Figura 4.4 – Montagem do “draft-tube” para as operações em batelada. **91**

Figura 4.5 – Montagem do “draft-tube” para as operações em batelada alimentada.	91
Figura 4.6 – Impelidor tipo hélice utilizado em todas as condições experimentais.	92
Figura 5.1 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF}) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF}) no reator operado durante o ensaio preliminar.	105
Figura 5.2 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado durante o ensaio preliminar.	105
Figura 5.3 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}) no reator operado durante o ensaio preliminar.	106
Figura 5.4 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- (C_{HS}) no reator operado durante o ensaio preliminar.	107
Figura 5.5 – Comportamento do pH no reator operado durante o ensaio preliminar.	108
Figura 5.6 – Concentração de ácidos voláteis totais (AVT) e alcalinidade a bicarbonato (AB) no reator operado durante o ensaio preliminar.	108
Figura 5.7 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF} ; Gráfico B) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).	114

- Figura 5.8 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **115**
- Figura 5.9 – Concentração de sulfato (C_{SO4}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **116**
- Figura 5.10 – Relação entre carga de sulfato removida (CSR) e carga orgânica removida para amostras filtradas (COR_{SOF}), no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **117**
- Figura 5.11 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e sulfeto na forma HS^- (C_{HS}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **120**
- Figura 5.12 – Concentração de sulfito (C_{SO3}) e pH no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **121**
- Figura 5.13 – Concentração de ácidos voláteis totais (AVT) e alcalinidade a bicarbonato (AB) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **122**
- Figura 5.14 – Comparação entre as médias de concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição I. **123**

- Figura 5.15 – Comparação entre as médias das cargas orgânicas volumétricas (COA , COR_{SOT} , COR_{SOF} ; Gráfico A) e cargas orgânicas específicas ($COAE$, $CORE_{SOT}$, $CORE_{SOF}$; Gráfico B) no reator operado na condição I. **123**
- Figura 5.16 – Comparação entre as médias de concentração de sulfato (C_{SO_4} ; Gráfico A) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4} ; Gráfico B) no reator operado na condição I. **124**
- Figura 5.17 – Comparação entre as médias das cargas volumétricas de sulfato (CSA , CSR ; Gráfico A) e cargas específicas de sulfato ($CSAE$, $CSRE$; Gráfico B) no reator operado na condição I. **125**
- Figura 5.18 – Perfis de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF} ; Gráfico A) e de concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **126**
- Figura 5.19 – Perfis de concentração de sulfato (C_{SO_4}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **127**
- Figura 5.20 – Perfis de sulfetos totais dissolvidos (STD; Gráfico A), de sulfeto na forma HS^- (C_{HS} ; Gráfico B) e de sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S} ; Gráfico C) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **128**
- Figura 5.21 – Perfis de concentração de sulfito (C_{SO_3}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **129**

- Figura 5.22 – Perfis de ácidos voláteis totais (AVT; Gráfico A) e de alcalinidade a bicarbonato (AB; Gráfico B) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **130**
- Figura 5.23 – Perfis de pH (pH; Gráfico A) e de potencial de oxi-redução (POR; Gráfico B) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **131**
- Figura 5.24 – Perfis de concentração de metano (C_{CH_4} ; Gráfico A) e de concentração de dióxido de carbono (C_{CO_2} ; Gráfico B) no biogás produzido pelo reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic). **132**
- Figura 5.25 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF} ; Gráfico B) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc). **137**
- Figura 5.26 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc). **139**
- Figura 5.27 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc). **140**

Figura 5.28 – Relação entre carga de sulfato removida (CSR) e carga orgânica removida para amostras filtradas (COR_{SOF}), no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).	141
Figura 5.29 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- (C_{HS}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).	142
Figura 5.30 – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) e pH no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).	143
Figura 5.31 – Concentração de ácidos voláteis totais (AVT) e alcalinidade a bicarbonato (AB) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).	144
Figura 5.32 – Comparação entre as médias de concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição II.	145
Figura 5.33 – Comparação entre as médias das cargas orgânicas volumétricas (COA , COR_{SOT} , COR_{SOF} ; Gráfico A) e cargas orgânicas específicas ($COAE$, $CORE_{SOT}$, $CORE_{SOF}$; Gráfico B) no reator operado na condição II.	146
Figura 5.34 – Comparação entre as médias de concentração de sulfato (C_{SO_4} ; Gráfico A) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4} ; Gráfico B) no reator operado na condição II.	146
Figura 5.35 – Comparação entre as médias das cargas volumétricas de sulfato (CSA , CSR ; Gráfico A) e cargas específicas de sulfato ($CSAE$, $CSRE$; Gráfico B) no reator operado na condição II.	147

- Figura 5.36 – Perfis de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF} ; Gráfico A) e de concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc). **148**
- Figura 5.37 – Perfis de concentração de sulfato (C_{SO4}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc). **149**
- Figura 5.38 – Perfis de sulfetos totais dissolvidos (STD; Gráfico A), de sulfeto na forma HS^- (C_{HS} ; Gráfico B) e de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S} ; Gráfico C) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc). **150**
- Figura 5.39 – Perfis de concentração de sulfito (C_{SO3}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc). **151**
- Figura 5.40 – Perfis de ácidos voláteis totais (AVT; Gráfico A) e de alcalinidade a bicarbonato (AB; Gráfico B) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc). **152**
- Figura 5.41 – Perfis de pH (pH; Gráfico A) e de potencial de oxi-redução (POR; Gráfico B) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc). **153**

- Figura 5.42 – Perfis de concentração de metano (C_{CH_4} ; Gráfico A) e de concentração de dióxido de carbono (C_{CO_2} ; Gráfico B) no biogás produzido pelo reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc). **154**
- Figura 5.43 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF} ; Gráfico B) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **159**
- Figura 5.44 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **161**
- Figura 5.45 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **162**
- Figura 5.46 – Relação entre carga de sulfato removida (CSR) e carga orgânica removida para amostras filtradas (COR_{SOF}), no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **163**
- Figura 5.47 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- (C_{HS}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **164**

- Figura 5.48 – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) e pH no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **165**
- Figura 5.49 – Concentração de ácidos voláteis totais (AVT) e alcalinidade a bicarbonato (AB) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **166**
- Figura 5.50 – Comparação entre as médias de concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição III. **167**
- Figura 5.51 – Comparação entre as médias das cargas orgânicas volumétricas (COA , COR_{SOT} , COR_{SOF} ; Gráfico A) e cargas orgânicas específicas ($COAE$, $CORE_{SOT}$, $CORE_{SOF}$; Gráfico B) no reator operado na condição III. **167**
- Figura 5.52 – Comparação entre as médias de concentração de sulfato (C_{SO_4} ; Gráfico A) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4} ; Gráfico B) no reator operado na condição III. **168**
- Figura 5.53 – Comparação entre as médias das cargas volumétricas de sulfato (CSA , CSR ; Gráfico A) e cargas específicas de sulfato ($CSAE$, $CSRE$; Gráfico B) no reator operado na condição III. **169**
- Figura 5.54 – Perfis de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF} ; Gráfico A) e de concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **170**
- Figura 5.55 – Perfis de concentração de sulfato (C_{SO_4}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **171**

- Figura 5.56 – Perfis de sulfetos totais dissolvidos (STD; Gráfico A), de sulfeto na forma HS^- (C_{HS} ; Gráfico B) e de sulfeto de hidrogênio ($\text{C}_{\text{H}_2\text{S}}$; Gráfico C) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **172**
- Figura 5.57 – Perfis de concentração de sulfito (C_{SO_3}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **173**
- Figura 5.58 – Perfis de ácidos voláteis totais (AVT; Gráfico A) e de alcalinidade a bicarbonato (AB; Gráfico B) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **174**
- Figura 5.59 – Perfis de pH (pH; Gráfico A) e de potencial de oxi-redução (POR; Gráfico B) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **175**
- Figura 5.60 – Perfis de concentração de metano (C_{CH_4} ; Gráfico A) e de concentração de dióxido de carbono (C_{CO_2} ; Gráfico B) no biogás produzido pelo reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc). **176**
- Figura 5.61 – Comparação das concentrações de matéria orgânica total do efluente (Gráfico A), assim como as eficiências de remoção de matéria orgânica total (Gráfico B) obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III. **177**

- Figura 5.62 – Comparação das concentrações de matéria orgânica filtrada do efluente (Gráfico A), assim como as eficiências de remoção de matéria orgânica filtrada (Gráfico B) obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III **178**
- Figura 5.63 – Comparação das cargas orgânicas volumétricas brutas removidas (COR_{SOT} , Gráfico A) e cargas orgânicas volumétricas filtradas removidas (COR_{SOF} , Gráfico B), obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III. As linhas tracejadas indicam as médias dos valores de cargas orgânicas volumétricas aplicadas. **180**
- Figura 5.64 – Comparação das cargas orgânicas específicas totais (Gráfico A) e cargas orgânicas específicas filtradas (Gráfico B), aplicadas e removidas, obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III. **181**
- Figura 5.65 – Comparação das concentrações de sulfato do afluente e do efluente (C_{SO_4} , Gráfico A), assim como as eficiências de redução de sulfato (E_{SO_4} , Gráfico B) obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III. As linhas correspondem às médias dos valores de concentração de sulfato no afluente, associadas aos histogramas pelas respectivas cores. **182**
- Figura 5.66 – Comparação das cargas de sulfato removidas, volumétricas (CSR , Gráfico A) e específicas ($CSRE$, Gráfico B), obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III. As linhas correspondem às médias dos valores das cargas de sulfato volumétricas aplicadas, associadas aos histogramas pelas respectivas cores. **184**
- Figura 5.67 – Relação entre cargas de sulfato removidas, volumétricas (CSR , Gráfico A) e específicas ($CSRE$, Gráfico B), com as cargas aplicadas de sulfato correspondentes, para os ensaios em batelada (B), batelada alimentada de 3 horas (FB I) e batelada alimentada de 6 horas (FB II). **186**

- Figura 5.68 – Relação entre cargas de matéria orgânica filtrada removidas, volumétricas (COR_{SOF} , Gráfico A) e específicas ($CORE_{SOF}$, Gráfico B), com as cargas aplicadas de sulfato correspondentes, para os ensaios em batelada (B), batelada alimentada de 3 horas (FB I) e batelada alimentada de 6 horas (FB II). **189**
- Figura 5.69 – Microscopia de contraste de fase realizada no inóculo antes do início das operações. [Notação: (a) bacilos de extremidades arredondadas; (b) morfologia filamentosa semelhante à *Methanosaeta*]. **192**
- Figura 5.70 – Microscopia de contraste de fase realizada no inóculo após o término das operações (após a condição III). [Notação: (a) cocos; (b) bacilos curvos; (c) bacilos de extremidades arredondadas]. **193**

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades morfológicas e fisiológicas de alguns gêneros das bactérias redutoras de sulfato (Balows <i>et al.</i> , 1991).	59
Tabela 3.2 – Informações complementares sobre alguns gêneros das bactérias redutoras de sulfato.	60
Tabela 3.3 – Comparação de resultados e parâmetros de projeto de vários biorreatores abordados na literatura.	66
Tabela 3.4 – Referências bibliográficas e observações das configurações de biorreatores utilizados na redução de sulfato abordadas na Tabela 3.3.	67
Tabela 4.1 – Composição da água residuária sintética.	93
Tabela 4.2 – Concentração de Na ₂ SO ₄ e de SO ₄ ²⁻ para cada relação DQO/[SO ₄ ²⁻], mantendo-se a concentração de matéria orgânica em 500 mgDQO.L ⁻¹ .	94
Tabela 4.3 – Métodos analíticos utilizados e o correspondente no <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> (1995).	95
Tabela 4.4 – Tempos de enchimento e reação para as estratégias de alimentação.	98
Tabela 4.5 – Condições experimentais da influência da relação DQO/[SO ₄ ²⁻] e da estratégia de alimentação e a duração em dias.	99
Tabela 5.1 – Quantidade de biomassa no reator (X _{SVT}) e concentração de biomassa no reator (C _{XSVT}) durante os ensaios em batelada e batelada alimentada.	102

Tabela 5.2 – Resultados médios das variáveis monitoradas na operação do ensaio preliminar, operado em batelada e com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$.	104
Tabela 5.3 – Resultados médios das variáveis monitoradas na operação do reator na condição I, operado com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$.	112
Tabela 5.4 – Cargas volumétricas e específicas aplicadas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato no reator na condição I operando com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$.	113
Tabela 5.5 – Cargas volumétricas e específicas removidas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato no reator na condição I operando com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$.	113
Tabela 5.6 – Resultados médios das variáveis monitoradas na operação do reator na condição II, operado com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67$.	135
Tabela 5.7 – Cargas volumétricas e específicas aplicadas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato no reator na condição II operando com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67$.	136
Tabela 5.8 – Cargas volumétricas e específicas removidas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato no reator na condição III operando com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$.	136
Tabela 5.9 – Resultados médios das variáveis monitoradas na operação do reator na condição II, operado com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$.	157
Tabela 5.10 – Cargas volumétricas e específicas aplicadas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato no reator na condição III operando com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$.	158

- Tabela 5.11 – Cargas volumétricas e específicas removidas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato no reator na condição III operando com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$. **158**
- Tabela 5.12 – Funções ajustadas às médias experimentais, relacionando as cargas aplicadas de sulfato às cargas removidas de sulfato, em base volumétrica e específica. **187**
- Tabela 5.13 – Funções ajustadas às médias experimentais, relacionando as cargas aplicadas de sulfato às cargas removidas de matéria orgânica, em base volumétrica e específica. **190**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Alcalinidade a bicarbonato ($\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$).
ASBR	Reator anaeróbio operado em bateladas seqüenciais (<i>Anaerobic Sequencing Batch Reactor</i>).
AT	Alcalinidade total ($\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$).
AVT	Ácidos voláteis totais ($\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$).
BRS	Bactérias Redutoras de Sulfato.
COE	Carga orgânica específica ($\text{mgDQO}\cdot\text{gSVT}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$).
COV	Carga orgânica volumétrica ($\text{gDQO}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$).
CSE	Carga de sulfato específica ($\text{mgSO}_4^{2-}\cdot\text{gSVT}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$).
CSV	Carga de sulfato volumétrica ($\text{gSO}_4^{2-}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$).
DQO	Demanda química de oxigênio ($\text{mgDQO}\cdot\text{L}^{-1}$).
EESC/USP	Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
EGSB	Reator contínuo e manta de lodo granular expandida. (<i>Expanded Granular Sludge Blanket</i>).

IMT	Instituto Mauá de Tecnologia.
rpm	Rotações por minuto.
SST	Sólidos solúveis totais (mg.L ⁻¹).
SSV	Sólidos solúveis voláteis (mg.L ⁻¹).
ST	Sólidos totais (mg.L ⁻¹).
STD	Sulfeto total dissolvido (mg.L ⁻¹).
SVT	Sólidos voláteis totais (mg.L ⁻¹).
UASB	Reator anaeróbico contínuo de fluxo ascendente e manta de lodo (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>)
UFRGS	Universidade federal do Rio Grande do Sul.
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos.

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Eficiência de conversão de sulfato, matéria orgânica ou matéria oxidável (%).
E_{SF}	Eficiência de conversão de matéria oxidável para amostras filtradas (%).
E_{ST}	Eficiência de conversão de matéria oxidável para amostras brutas (%).
E_{SOF}	Eficiência de conversão de matéria orgânica para amostras filtradas (%).
E_{SOT}	Eficiência de conversão de matéria orgânica para amostras brutas (%).
E_{SO4}	Eficiência de conversão de sulfato (%).
C_{HS}	Concentração de sulfeto na forma HS^- ($mgHS^-.L^{-1}$).
C_{H2S}	Concentração de ácido sulfídrico ($mgH_2S.L^{-1}$).
C_{SOF}	Concentração de matéria orgânica filtrada ($mgDQO.L^{-1}$).
C_{SOT}	Concentração de matéria orgânica bruta ($mgDQO.L^{-1}$).
C_{SO4}	Concentração de sulfato ($mgSO_4^{2-}.L^{-1}$).
C_{SF}	Concentração de matéria oxidável filtrada ($mgDQO.L^{-1}$).
C_{ST}	Concentração de matéria oxidável bruta ($mgDQO.L^{-1}$).

C_{ST}^{af}	Concentração de matéria orgânica bruta para o afluente ($mgDQO.L^{-1}$).
COA	Carga orgânica volumétrica aplicada ($gDQO.L^{-1}.d^{-1}$).
COAE	Carga orgânica específica aplicada ($mgDQO.gSVT^{-1}.d^{-1}$).
COR	Carga oxidável ou orgânica volumétrica removida ($gDQO.L^{-1}.d^{-1}$).
COR_{ST}	Carga oxidável volumétrica removida para amostras brutas ($gDQO.L^{-1}.d^{-1}$).
COR_{SF}	Carga oxidável volumétrica removida para amostras filtradas ($gDQO.L^{-1}.d^{-1}$).
COR_{SOT}	Carga orgânica volumétrica removida para amostras brutas ($gDQO.L^{-1}.d^{-1}$).
COR_{SOF}	Carga orgânica volumétrica removida para amostras filtradas ($gDQO.L^{-1}.d^{-1}$).
CORE	Carga oxidável ou orgânica específica removida ($mgDQO.gSVT^{-1}.d^{-1}$).
$CORE_{ST}$	Carga oxidável específica removida para amostras brutas ($mgDQO.gSVT^{-1}.d^{-1}$).
$CORE_{SF}$	Carga oxidável específica removida para amostras filtradas ($mgDQO.gSVT^{-1}.d^{-1}$).
$CORE_{SOT}$	Carga orgânica específica removida para amostras brutas ($mgDQO.gSVT^{-1}.d^{-1}$).
$CORE_{SOF}$	Carga orgânica específica removida para amostras filtradas ($mgDQO.gSVT^{-1}.d^{-1}$).
CSA	Carga de sulfato volumétrica aplicada ($gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$).

CSAE	Carga de sulfato específica aplicada ($\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
CSR	Carga de sulfato volumétrica removida ($\text{gSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
CSRE	Carga de sulfato específica removida ($\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).
I _{STD}	Concentração do sulfeto total dissolvido em termos de DQO ($\text{mgDQO} \cdot \text{L}^{-1}$).
I _{SO3}	Concentração do sulfito em termos de DQO ($\text{mgDQO} \cdot \text{L}^{-1}$).
pKa	Constante de equilíbrio para pares ácido-base conjugados.
POR	Potencial de oxiredução (mV).
T.O.	Tempo de operação (mV).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	39
2 OBJETIVOS	41
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	43
3.1. O Íon Sulfato em Águas Residuárias	44
3.2. Os Impactos Ambientais Relacionados ao Íon Sulfato	46
3.3. O Ciclo Biogeoquímico do Enxofre	51
3.4. O Processo Anaeróbio e as Bactérias Redutoras de Sulfato	55
3.5. Biorreatores Anaeróbios	61
3.5.1 Reator Anaeróbio Operado em Bateladas Seqüenciais (ASBR)	61
3.5.2 Vantagens e Desvantagens de Reatores Descontínuos	64
3.5.3. Reatores Anaeróbios no Tratamento de Águas Residuárias Contendo Sulfato	65
3.5.4. Reatores Anaeróbios Contínuos no Tratamento de Águas Contendo Sulfato	68

3.5.5. Reatores Anaeróbios Operados em Batelada no Tratamento de Águas Contendo Sulfato	73
3.6. Considerações Finais	75
4 MATERIAIS E MÉTODOS	77
4.1. Fundamentos Teóricos	77
4.1.1. Matéria Oxidável e Matéria Orgânica	77
4.1.2. Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S) e Sulfeto na Forma HS ⁻ Dissolvidos	79
4.1.3. Cargas Volumétricas	81
4.1.4. Cargas Específicas	83
4.1.5. Eficiências de Conversão	85
4.2. Materiais	88
4.2.1. Configuração do ASBR com agitação mecânica e “draft-tube”	88
4.2.2. Inóculo	92
4.2.3. Água Residuária – Esgoto Sintético Enriquecido com Sulfato	93
4.3. Métodos	95
4.3.1. Análises Físico-Químicas	95

4.3.2. Procedimento Experimental	97
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	101
5.1 Ensaio Preliminar	103
5.2 Condição I – Reator Tratando Água Residuária na Relação DQO/[SO ₄ ²⁻] = 1,34	110
5.3 Condição II – Reator Tratando Água Residuária na Relação DQO/[SO ₄ ²⁻] = 0,67	133
5.4 Condição III – Reator Tratando Água Residuária na Relação DQO/[SO ₄ ²⁻] = 0,34	155
5.5 Análise Comparativa dos Resultados das Condições Experimentais	177
5.6 Exames Microbiológicos	191
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	195
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
APÊNDICES	207
APÊNDICE A - VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NOS ENSAIOS PRELIMINARES	209
APÊNDICE B - VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO Ia	221

APÊNDICE C - VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO Ib	235
APÊNDICE D - VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO Ic	249
APÊNDICE E - VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIa	263
APÊNDICE F - VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIb	277
APÊNDICE G - VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIc	291
APÊNDICE H - VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIIa	305
APÊNDICE I - VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIIb	319
APÊNDICE J - VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIIc	333

1 INTRODUÇÃO

O estudo da redução de sulfato das águas residuárias é de suma importância ambiental, visto que diversos processos industriais geram este tipo de resíduo. A presença do íon sulfato nos recursos hídricos pode reduzir o pH, promovendo a morte de seres sensíveis a esta alteração, além de ser digerido anaerobiamente nos corpos hídricos formando o ácido sulfídrico que apresenta uma toxicidade elevada.

Vários reatores têm sido propostos nos últimos anos, a partir do desenvolvimento da tecnologia anaeróbia, tanto voltado para a remoção de matéria orgânica e de sulfato como para remoção de nutrientes e compostos tóxicos e recalcitrantes. Dentre estas novas tecnologias, destaca-se o reator anaeróbio operado em bateladas seqüenciais (ASBR), desenvolvido inicialmente pelos grupos de pesquisa da Universidade do Estado de Ottawa (Canadá). No Brasil, esta configuração é estudada principalmente no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, no Departamento de Engenharia Química e de Alimentos da Escola de Engenharia Mauá do IMT, e no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos.

Poucos trabalhos abordam a redução de sulfato em sistemas como o ASBR, ainda mais trabalhos que abordem o tempo de enchimento do reator como fator que influencia diretamente o desempenho desta configuração, visto que em reatores operados em batelada em escala real, devido ao seu grande volume, não podem ser enchidos em um tempo curto. Assim, a operação em batelada alimentada contribui para uma maior flexibilização do ASBR.

Neste contexto, a operação do biorreator em batelada alimentada permite modificar a estratégia de alimentação, podendo reduzir o choque da concentração de sulfato nas comunidades microbianas presentes no reator, modificando a relação “DQO/[SO₄²⁻] *in situ*” em relação ao afluente, contribuindo ainda mais para a flexibilidade de operação deste tipo de biorreator quando a aplicação de esgoto real.

Também se deve considerar que a literatura aborda de maneira mais presente a utilização de substratos orgânicos de simples degradação como lactato, etanol e ácidos graxos, tal que se nota uma necessidade de investigação de substratos mais complexos, potencializando assim a utilização destes substratos em escala real, observando que tais substratos podem ser encontrados de maneira bem difundida entre as águas residuárias domésticas e industriais.

Um outro aspecto importante é a utilização do “draft-tube” como forma de melhorar a homogeneização do sistema, fazendo com que a transferência de massa interfira menos nos resultados obtidos, além de ser interessante visando a utilização em reatores em escala plena porque otimiza a utilização de energia na agitação.

Dessa forma, o presente projeto esclarece algumas características técnicas e de projeto de um biorreator operado em batelada alimentada seqüencial no tratamento de água residuária sintética contendo sulfato. Vale destacar a importância do conhecimento dos processos bioquímicos que regem a remoção anaeróbia do sulfato, quando em condições sulfetogênicas e em condições metanogênicas, e principalmente estudar o efeito da batelada alimentada como estratégia de alimentação de forma a aprimorar o desempenho do biorreator.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do projeto de pesquisa foi avaliar o desempenho do biorreator anaeróbio aplicado ao tratamento de uma água residuária sintética contendo sulfato operado em batelada e batelada alimentada seqüenciais (ASBR), contendo biomassa granulada com agitação mecânica em um “draft-tube”, sob os aspectos de remoção da matéria orgânica e de sulfato.

Desta forma, foram estabelecidos como objetivos específicos:

- (a) Investigar a interação entre a remoção da matéria orgânica, a remoção de sulfato e a relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ na alimentação (afluente) do biorreator ASBR utilizando-se três níveis de valores – acima, igual e abaixo do requerimento teórico estequiométrico, no qual a matéria orgânica se apresenta em quantidade suficiente para o completo consumo do sulfato pela sulfetogênese.
- (b) Estudar a interação entre a remoção da matéria orgânica, a remoção de sulfato e a estratégia de alimentação utilizando-se três modos de alimentação – batelada (alimentação em 10 min), batelada alimentada I (alimentação em 3 h) e batelada alimentada II (alimentação em 6 h), para cada relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ estudada.
- (c) Interpretar a interação entre a relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ e a estratégia de alimentação, buscando otimizar tanto a eficiência da redução de sulfato como a de matéria orgânica, sempre observando a estabilidade do sistema.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta a importância ambiental do íon sulfato, fornece informações fundamentais sobre a remoção biológica deste íon e contextualiza o presente trabalho entre os estudos de redução de sulfato já realizados.

A organização deste capítulo foi realizada de forma a primeiramente informar sobre a presença do íon sulfato e o impacto que esta espécie química pode causar no meio ambiente. Logo após estão apresentadas informações sobre o ciclo biogeoquímico do enxofre, ou seja, a forma na qual o enxofre é carregada pelos processos naturais no meio ambiente.

Os processos de tratamento de efluentes são baseados na otimização dos processos naturais. Assim, elucidados alguns dos fundamentos do ciclo biogeoquímico do enxofre, serão abordados os fundamentos dos processos anaeróbios, bem como alguns dos mecanismos de redução bioquímica do sulfato pelas bactérias redutoras de sulfato (BRS).

Em seguida, os biorreatores anaeróbios serão abordados, de forma que se apresente os fundamentos dos reatores descontínuos e uma comparação, em termos de desempenho e aplicabilidade, com os reatores contínuos; para que, desta maneira, possa se apresentar os reatores anaeróbios utilizados na redução de sulfato, contínuos e descontínuos, abordados pela literatura e assim estabelecer adequadamente as necessidades de pesquisa no campo da redução biológica de sulfato em biorreatores anaeróbios.

3.1. O Íon Sulfato em Águas Residuárias

A forma mais estável e difundida dos compostos de enxofre é o íon sulfato, e este pode ser encontrado nos mais diversos tipos de águas residuárias, desde o esgoto sanitário, na concentração de 20 a 50 mg.L⁻¹ (METCALF e EDDY, 1991), até em descartes industriais, em concentrações que podem variar entre 12.000 a 35.000 mg.L⁻¹ (SILVA, 2005).

Conforme Lens *et al.* (1998b) as emissões de águas contaminadas por sulfato podem ter duas origens, naturais ou antropogênicas. As emissões naturais são oriundas principalmente de águas oceânicas e de sais minerais inorgânicos presentes no solo, nos quais o sulfato pode ser dissolvido pela percolação de águas pluviais e carregado para camadas inferiores do solo, onde podem sofrer biotransformações pelas BRS, produzindo desta maneira sulfetos, que combinados com metais pesados assumem uma forma insolúvel. Estes sulfetos insolúveis podem ser reoxidados por águas subsuperficiais (por exemplo percolação de água pluvial), gerando águas ricas em sulfato.

As emissões antropogênicas compreendem desde as águas de esgoto doméstico, até emissões industriais de compostos de enxofre (enxofre, sulfitos, sulfatos, etc.) que podem vir a serem convertidos a sulfato no meio ambiente durante o ciclo biogeoquímico do enxofre. Dentre as emissões industriais de compostos de enxofre, podem-se destacar as indústrias de papel, de processamento de alimentos, de explosivos, de xenobióticos em geral, como tensoativos, e também atividades que fazem a combustão de combustíveis fósseis.

Outra forma conhecida de emissão de sulfato no ambiente também é por meio de atividades de mineração, principalmente em águas de drenagem, que apresentam

características ácidas, resultado da degradação microbiana de minerais. Salienta-se que a liberação de gases sulfurosos na atmosfera vindo de atividades industriais, como SO_2 e SO_3 , contribuem para a presença do íon sulfato (através da chuva ácida) no meio ambiente.

O descarte não controlado de efluentes contendo sulfato ou seus precursores permite uma série de impactos, principalmente no desbalanceamento no ciclo biogeoquímico do enxofre (LENS *et al.*, 1998b). O acúmulo de sedimentos ricos em sulfato em corpos hídricos naturais é um problema global e pode causar a liberação de sulfetos tóxicos que podem provocar danos ao meio ambiente (PSENNER, 1994). A presença deste íon está relacionada também com a acidez, que é considerada como sendo o maior problema de impacto ambiental em terrenos passíveis de serem afetados por correntes ácidas, como de atividades de mineração (MOOSA *et al.*, 2002), especialmente aqueles que possuem uma capacidade de neutralização mínima (CIVEROLO *et al.*, 2003).

3.2. Os Impactos Ambientais Relacionados ao Íon Sulfato

A literatura científica sobre os impactos ambientais relacionados ao sulfato tem focado diversos estudos de caso pelo mundo, tanto do ponto de vista da avaliação e previsão destes impactos como também pela remediação e prevenção da ação deletéria deste poluente no meio ambiente. Psenner (1994) avaliou o problema da acidificação de águas naturais, e determinou que os principais impactos em corpos hídricos eram ocasionados pela disposição inadequada de nutrientes e de resíduos ácidos, provocando os fenômenos da eutrofização e acidificação, respectivamente.

Do aspecto físico-químico, o sulfato é responsável por baixos valores de pH e altas concentrações de alumínio e metais pesados; biologicamente, o íon é responsável por extinção de peixes e invertebrados sensíveis à alteração de pH. A poluição dos recursos hídricos por este íon afeta o uso da água pelo ser humano, podendo conferir toxicidade à água tanto para vegetais e animais e também ser um grande gerador de corrosão, quando reduzido a sulfeto. (PSENNER, 1994; FERNANDES, *et al.*, 1998).

A literatura relativa a impactos ambientais causados especificamente pelo sulfato é dispersa, porém este fator pode trazer vantagens na avaliação da ação destes compostos no meio ambiente, pois cada estudo de caso traz informações distintas e relevantes ao considerar o panorama global.

O impacto do resíduo de demolição da construção civil no meio ambiente foi assunto do trabalho de Tränkler *et al.* (1996) e mostra os estudos e experiências feitas entre 1986 e 1996 na área. Na Alemanha, boa parte desse resíduo está sendo reutilizado (cerca de 2/3 da

massa total) e a outra parte está sendo descartada. Mostrou-se que a qualidade de lixo e os impactos ambientais ligados à lixiviação desse resíduo dependem em primeiro lugar do modo de demolição e separação das impurezas, mas dependem também do tratamento, que pode ocorrer através de lavagem ou tratamento seco. A concentração de sulfato nas amostras da água de drenagem após o tratamento seco foi de 20 até 15420 mg.kg⁻¹, sendo esta a substância com a maior concentração, e após lavagem entre 60 e 1620 mg.kg⁻¹.

Fernandes *et al.* (1998) estudaram o impacto ambiental pela drenagem ácida (Acid Rock Drainage, ARD) e pela radioatividade em uma mina de urânio e nas instalações de moagem, em Poços de Caldas, Brasil. O estudo foi focado no transporte de radionuclídeos dos resíduos de mineração que ocorreu concomitantemente com a drenagem ácida, e demonstrou que a precipitação dos radionuclídeos chumbo (Pb) e rádio (Ra), na forma de sulfato, é o principal mecanismo da redução da concentração (e atividade nuclear) na água de drenagem ácida neste tipo de atividade. Entretanto, o enxofre e as suas formas iônicas estão geralmente associados à mineração de urânio, bem como uma série de metais pesados, e estão presentes na pirita, na forma de sulfeto de ferro (FeS₂) e a oxidação deste mineral, gerando ácido sulfúrico (H₂SO₄), pode causar uma solubilização e conseqüente arraste de alguns metais pesados e radionuclídeos pela água de drenagem.

A lixiviação do sulfato a partir da disposição de resíduos da construção civil contendo gesso, como em “drywalls”, foi estudado por Townsend e Jang (2001), especialmente após o reprocessamento visando à confecção de solos recuperados, e concluíram que na maioria dos casos estudados a concentração se manteve abaixo de 250 mg.L⁻¹, citado como limite de potabilidade da água.

O impacto ambiental causado por tensoativos aniônicos (como detergentes) foi realizado por Cserhádi *et al.* (2002), e muitos destes compostos contém o íon sulfato como

ânion (especialmente os detergentes), tal que as medidas de avaliação do impacto, assim como as mitigadoras são passíveis de comparação com as do sulfato na forma livre. Devido a sua ampla utilização, o dano ambiental destes tensoativos são importantes, entretanto são sazonais e diminuem a concentração no esgoto sanitário com a distância de distritos residenciais indicando que a maior fonte emissora destes tensoativos é o esgoto doméstico. O trabalho concluiu que o tratamento desses efluentes contendo sulfatos de alquila deve ser eficiente na remoção deste composto, pois um tratamento incompleto pode resultar em uma contaminação de águas subterrâneas.

Na Finlândia, efluentes de drenagem ácida de solos causaram grandes danos no ecossistema de mais de 30 rios na época da chuva (JOUKAINEN e YLI-HALLA, 2002). A razão foi que muitos desses solos usados para fins agrícolas não estão sendo reconhecidos como solos ácidos pelos sistemas de classificação de solo (WRB, *World Reference Base for Soil Resources*, FAO 1998), pois o nível dos materiais sulfúricos se encontra em camadas muito profundas para serem diagnosticados (110 – 200 cm). A drenagem desses solos não calcários promove oxidação de materiais sulfúricos e, em consequência, a produção de ácido sulfúrico e concentração de sulfato que chega até 770 mg.L⁻¹ e em média 12 mg.L⁻¹ na foz do rio Kyrönjoki (1990 – 2000), tal que o pH nesse local foi determinado em 5,4.

O trabalho de Civerolo *et al.* (2003) abordou o problema de correntes ácidas em solos susceptíveis ao impacto por acidez (solos com baixa alcalinidade), na região da Montanha Adirondack, U.S.A., analisando as concentrações de sulfato no ambiente, na precipitação e em águas lânticas. O estudo mostrou o monitoramento das emissões de dióxido de enxofre e de sulfato na forma de aerossol ao longo do tempo, realizado pelo *State Department of Environmental Conservation*, e mostrou um declínio na concentração de sulfato no meio ambiente. A avaliação do impacto foi vinculada a uma projeção temporal da concentração de

sulfato através de uma regressão linear utilizando um filtro de média móvel a fim de eliminar dados não tendenciosos (picos de concentração devido a causas diversas), demonstrando um declínio na concentração ambiental de SO_2 e SO_4^{2-} como sendo o resultado da política de redução da quantidade de compostos sulfurosos nos combustíveis e o fechamento de antigas usinas termoelétricas no meio da década de 90. Da mesma maneira, o lago Brooktrout, na mesma região, que seria considerado um lago “morto” há 20 anos, encontra-se hoje quase recuperado devido às adaptações na política ambiental.

Depósitos não controlados de lixo criam grandes problemas para potabilidade de águas subterrâneas por causa da baixa biodegradabilidade das suas águas de drenagem, como mostrou um estudo feito por Chofqi *et al.* (2004) sobre um depósito de lixo sólido em El Jadida, na costa oeste do Marrocos. A falta de uma impermeabilização e a falta de um sistema de drenagem causou um nível muito alto de sulfato no aquífero (1000 mg.L^{-1}), sendo que o valor recomendado pelo OMS (Organização Mundial de Saúde) é de 400 mg.L^{-1} . A poluição do aquífero foi favorecida pelo nível baixo d'água, uma alta permeabilidade do solo e o clima semi-árido. Vale salientar que a água de alguns dos 60 poços analisados ao redor deste depósito ainda é utilizada para uso diário de alimentação, irrigação e alimentação animal.

Apresentados estes panoramas, pode-se verificar que cada caso possuiu uma peculiaridade, porém, como regra geral, os impactos podem ser verificados principalmente no solo e no meio hídrico. No solo observa-se tanto problemas de acidez como de solubilização de metais pesados (CIVEROLO *et al.*, 2003). Enquanto isso, nos recursos hídricos, os impactos são mais evidentes, pela própria presença de metais pesados (FERNANDES *et al.*, 1998) como pela elevação da acidez da água (JOUKAINEN e YLI-HALLA, 2002). Esta dispersão de abordagens da literatura é natural, visto que cada localidade estudada apresenta características distintas, principalmente do ponto de vista sócio-econômico, além da geração

de sulfato advir de diferentes fontes. Importante ressaltar que os impactos ambientais no solo repercutem nos recursos hídricos devido ao carreamento ou lixiviação dos compostos deletérios.

A compreensão dos ciclos biogeoquímicos do enxofre de uma forma global e a partir dos panoramas gerais traçados, podem-se estabelecer peculiaridades locais, permitindo se chegar a uma forma mais otimizada de avaliação destes impactos e, conseqüentemente, um melhor planejamento tanto de prevenção como de mitigação dos mesmos.

3.3. O Ciclo Biogeoquímico do Enxofre

O ciclo do enxofre é um processo natural, no qual várias espécies de microrganismos, por meio de reações de transformações sequenciais, convertem átomos de enxofre em uma variedade de estados de oxidação, o que concorre para este processo ser mais complexo que o ciclo do nitrogênio (MADIGAN *et al.*, 2002). A Figura 3.1 mostra o ciclo biogeoquímico do enxofre. De um modo geral, as bactérias oxidadoras de enxofre (BOE) e sulfeto (BOS) produzem sulfato (SO_4^{2-}) e as bactérias redutoras de sulfato (BRS) usam o íon como acceptor de elétrons na respiração anaeróbia, produzindo sulfeto de hidrogênio (H_2S).

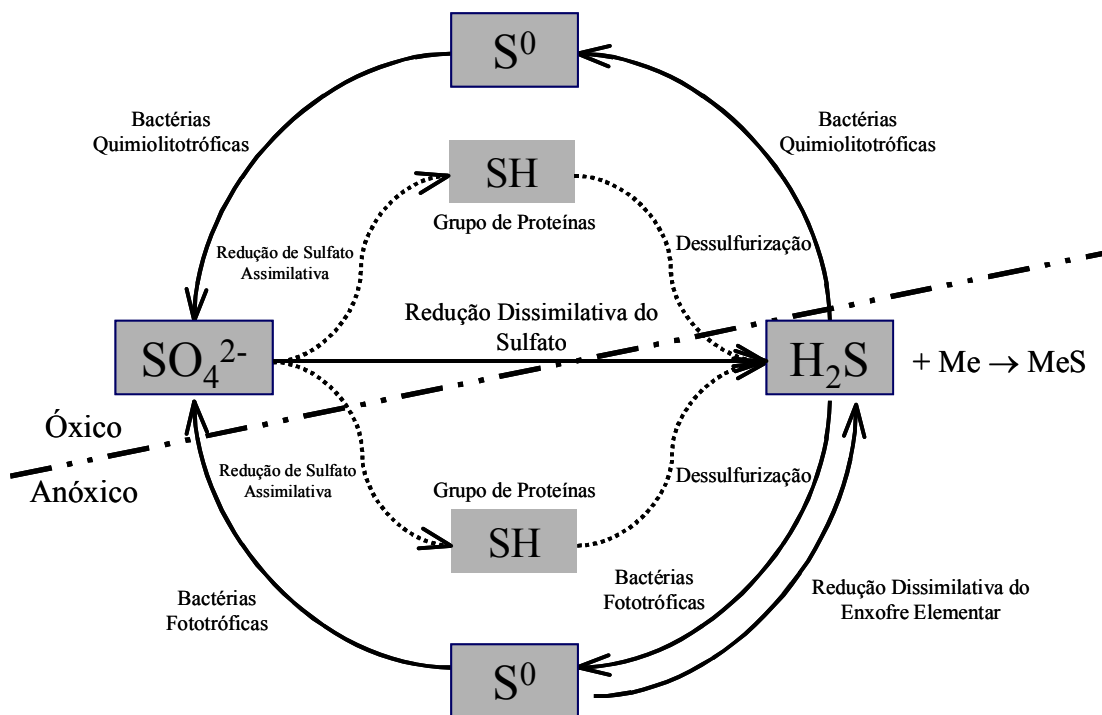


Figura 3.1 – Ciclo biogeoquímico do enxofre (Adaptado de MADIGAN *et al.*, 2002).

O gás mais volátil dentro dos compostos de enxofre é o sulfeto de hidrogênio (H_2S), que é produzido pelas bactérias redutoras de sulfato ou emitido por fontes geoquímicas como de fontes sulfurosas (*sulfur springs*) e de atividade vulcânica. Apesar de sua volatilidade, a forma de sulfeto é dependente do pH, sendo que as formas HS^- e S^{2-} são mais solúveis, e estão presentes em pH mais altos; enquanto o H_2S predomina em pH mais baixos (MADIGAN *et al.*, 2002). A Figura 3.2 demonstra a concentração de equilíbrio das formas de sulfeto em meio aquoso em função do pH.

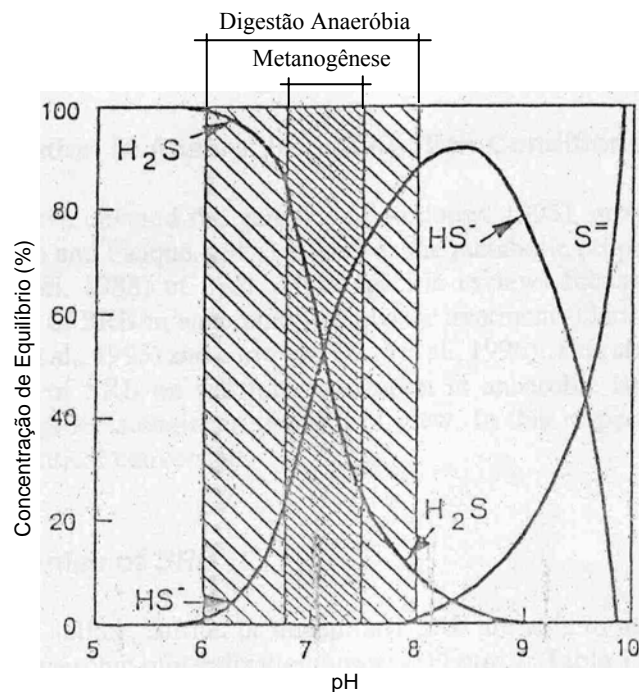


Figura 3.2 – Concentração de equilíbrio das formas de sulfeto em meio aquoso. A área com hachura espaçada indica a faixa de pH para a digestão anaeróbia e a área com hachura estreita indica a faixa ótima para a metanogênese (LENS, *et al.*, 1998).

O trabalho de Muthumbi *et al.* (2001) apresenta uma relação entre a concentração de sulfeto total dissolvido, $S^{2-}/HS^-/H_2S$, (STD) e a concentração de sulfeto de hidrogênio livre, H_2S , (C_{H_2S}) dependente do pH, mostrada pela Equação 3.1:

$$C_{H_2S} (mg \cdot L^{-1}) = \frac{STD (mg \cdot L^{-1})}{1 + 10^{pH - pKa}} \quad (3.1)$$

Na qual:

C_{H_2S} é a concentração de sulfeto de hidrogênio (H_2S) dissolvido ($mgH_2S \cdot L^{-1}$).

STD é a concentração de sulfeto total dissolvido ($mg \cdot L^{-1}$).

Salientando que o pKa do par HS^-/H_2S é de 7,02. Nesta equação não foi considerado o íon sulfeto na forma S^{2-} porque este íon não ocorre na faixa de pH da digestão anaeróbia, conforme ilustrado anteriormente pela Figura 3.2.

Em condições aeróbias, o sulfeto (HS^-) é oxidado rapidamente e espontaneamente em pH neutro. As bactérias oxidadoras de enxofre (das quais a maioria são aeróbias) podem catalisar a oxidação do sulfeto, entretanto devido à velocidade e a espontaneidade da reação, a oxidação do sulfeto ocorre mais significativamente na interface entre as regiões aeróbias e anóxicas. Além disso, se o meio apresenta luminosidade, ainda pode ocorrer a oxidação fototrófica do sulfeto pelas bactérias fototróficas sulfurosas.

Madigan *et al.* (2002), ainda citaram que o enxofre molecular (S^0) é quimicamente estável, porém é prontamente consumido pelas bactérias oxidadoras de enxofre, como as do gênero *Thiobacillus*. Esta oxidação tem como produto o íon sulfato (SO_4^{2-}) e prótons, sendo que a oxidação do enxofre pode ser caracterizada pela queda do pH. O elemento enxofre, na forma molecular, pode ser oxidado ou reduzido pelas bactérias redutoras de enxofre, e a redução de enxofre molecular para sulfetos pode ser realizada principalmente pelas *Archaea* hipertermófilas, porém as bactérias redutoras de sulfato também podem realizar estas reações, podendo-se concluir que a redução de enxofre na natureza ocorre por grupos filogeneticamente distintos, capazes de reduzir S^0 até H_2S , entretanto, os *habitats* das

bactérias redutoras de enxofre são geralmente os mesmos das redutoras de sulfato, tal que, ecologicamente, os dois grupos coexistem.

Investigações vêm sendo feitas com o objetivo de utilizar os processos sulfetogênicos, ou seja, processos nos quais as bactérias redutoras de sulfato (BRS) utilizam o íon como aceptor final de elétrons, como alternativa biotecnológica no tratamento de águas residuárias contaminadas com formas oxidadas do enxofre. Nestes ambientes, as BRS competem com bactérias acidogênicas (BAc), acetogênicas (BHAc) e *Archaea* metanogênicas (AM) por substratos como hidrogênio, acetato, etanol, metanol, etc., e desviam a rota metabólica da produção de metano para a de produção de sulfeto de hidrogênio. Isto faz com que seja necessário determinar a fração relativa de substrato que será convertida em H₂S ao invés de CH₄ (LENS *et al.*, 1995).

3.4. O Processo Anaeróbio e as Bactérias Redutoras de Sulfato

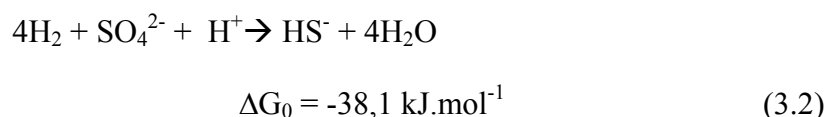
O tratamento anaeróbio de águas residuárias é um processo biológico que ocorre sem a presença de oxigênio molecular, no qual diferentes microorganismos promovem a transformação de compostos orgânicos mais complexos (carboidratos, lipídios, proteínas) em produtos mineralizados, e compostos inorgânicos oxidados como NO^{3-} e SO_4^{2-} em compostos mais reduzidos.

Deve-se salientar que, embora as BRS sejam estritamente anaeróbias, o estudo de Dolla *et al.* (2006) sobre a resistência das BRS ao oxigênio, mostrou que as BRS podem ser encontradas em condições temporariamente aeróbias, tal que as bactérias utilizam-se de estratégias como deslocamento dos microrganismos para regiões anóxicas, criação de microambientes anóxicos através de floculação, agregação de O_2 e sistemas enzimáticos desenvolvidos para redução e eliminação de O_2 .

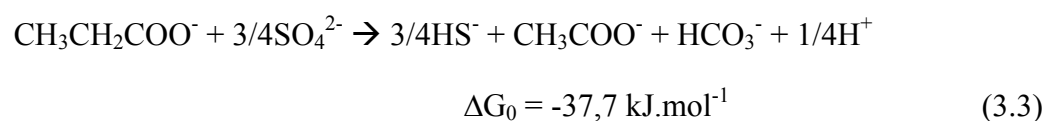
O processo anaeróbio, na presença de sulfato, pode ser dividido em cinco etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese, metanogênese e sulfetogênese. Na hidrólise, os microrganismos degradam a matéria orgânica mais complexa em compostos dissolvidos mais simples como aminoácidos e lipídeos. Durante a acidogênese, estes compostos dissolvidos, gerados no processo de hidrólise, são convertidos em ácidos graxos, que pelo processo da acetogênese, formam principalmente acetato, hidrogênio e CO_2 . Os substratos gerados pelos processos de acidogênese e acetogênese podem ser consumidos durante a metanogênese onde o CH_4 pode ser produzido pelas *Archaeas* metanogênicas de forma autotrófica (metanogênese hidrogenotrófica) ou heterotrófica (metanogênese acetoclástica).

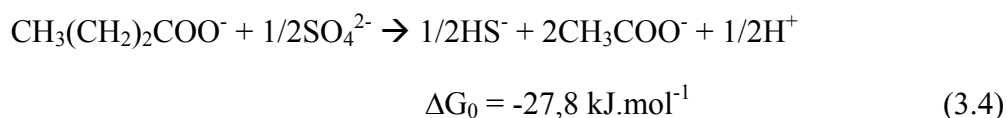
Durante a sulfetogênese, o H₂S e suas formas iônicas (HS⁻ e S²⁻) podem ser produzido pelas bactérias redutoras de sulfato (BRS), a partir da oxidação de compostos complexos até acetato (bactérias oxidadoras incompletas, *Desulfobacter*, *Desulfobacterium*, *Desulfonema*, *Desulfosarcina*, *Archaeoglobus*, *Desulfoorhabdus*); ou ainda oxidando substratos mais simples como o próprio acetato ou lactato até CO₂ (bactérias oxidadoras completas, *Desulfomicrobium*, *Desulfobulbus*, *Desulfobotulus*, *Thermodesulfobacterium*, *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*) (MADIGAN *et al.* 2002).

Durante este processo, o íon de sulfato é utilizado como acceptor de elétrons exógeno para que ocorra a oxidação da matéria orgânica. Dentre os doadores de elétrons neste processo metabólico, destacam-se o H₂, lactato, propionato, acetato, etanol e alguns álcoois. A utilização de hidrogênio como doador de elétrons na redução de sulfato é dada pela seguinte reação apresentada pela Equação 3.2:

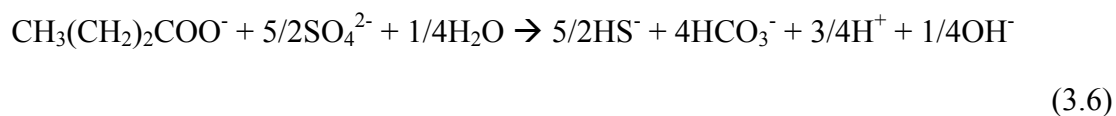
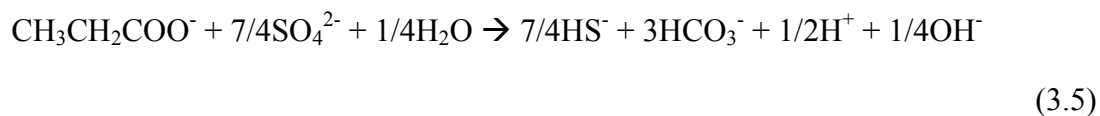


Pode-se verificar, pelo valor da energia livre de Gibbs (ΔG_0), que o processo global é favorável do ponto de vista termodinâmico. Outra forma, também termodinamicamente favorável, de redução do sulfato é pela oxidação do propionato (Equação 3.3) ou butirato (Equação 3.4), tal que se forme acetato pelo processo de oxidação incompleta do substrato orgânico:

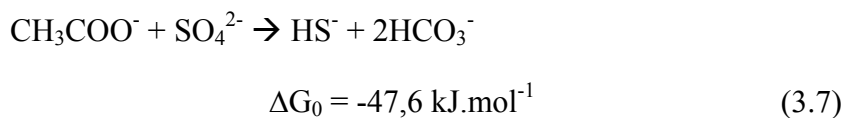




Os mesmos substratos (propionato e butirato) podem ser oxidados de maneira completa, sem a formação de acetato, como demonstrado respectivamente pelas reações ilustradas pelas Equações 3.5 e 3.6, embora o trabalho de Thauer *et al.* (1977)¹ *apud* Lens *et al.* (1998b), não forneça as energias livres de Gibbs para estas reações:



Por fim, o acetato pode sofrer uma oxidação completa pelas BRS, também favorável termodinamicamente, conforme demonstrado na Equação 3.7:



¹ THAUER, R.K.; JUNGERMANN, K.; DRECKER, K. Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteria. **Bacteriology Reviews**, v. 41, p. 221-227, 1977.

As bactérias redutoras de sulfato (BRS) se apresentam em um espectro muito amplo de microorganismos procariontes, cujos principais gêneros se encontram descritos na Tabela 3.1, juntamente com algumas características morfológicas e fisiológicas, bem como a utilização dos principais doadores de elétrons utilizados; na Tabela 3.2 estão apresentadas informações complementares relativas aos números indicados em alguns gêneros.

A redução biológica do sulfato em digestores anaeróbios em geral é considerada como indesejável, pois o SO_4^{2-} oxida o material orgânico que deixa de ser transformado em CH_4 formando H_2S no processo, que além de nocivo e corrosivo, possui um odor desagradável e pode ser tóxico para os microorganismos envolvidos no processo de metanogênese. Porém, em condições especiais, como tratamento anaeróbio de águas residuárias e tratamento de lodo com metais pesados, a presença de sulfeto pode ser vantajosa, pois os sulfetos de metais pesados possuem uma solubilidade muito baixa em água, o que reduz a concentração desses metais, conseqüentemente diminuí a concentração das formas iônicas solúveis desses metais, reduzindo seu potencial tóxico para a atividade biológica. Além disso, os sulfetos podem ser reoxidados bioquimicamente a enxofre molecular em condições aeróbias, o que concorreria para a recuperação deste enxofre como um subproduto deste processo com valor agregado.

Tabela 3.1 – Propriedades morfológicas e fisiológicas de alguns gêneros das bactérias redutoras de sulfato (Balows *et al.*, 1991).

Gênero	Morfologia	T _{Ótima} (°C)	Oxidação da Matéria Orgânica ^B	Doadores de Elétrons ^A									
				H ₂	Acetato	Propionato	Ácidos Graxos	Etanol	Lactato	Succinato, Fumarato	Frutose, Glicose	Ácidos Fenílicos	
<i>Desulfovibrio</i> ⁽¹⁾	Vibrio	30-38	I	+	-	-	-	+	+	±	±	-	
<i>Desulfomicrobium</i>	Oval ou Bacilo	28-37	I	+	-	-	-	±	+	+	-	-	
<i>Desulfobulbus</i>	Oval	28-39	I	+	-	+	-	+	+	-	-	-	
<i>Desulfobacter</i> ⁽²⁾	Oval ou Vibrio	28-32	CAC	±	+	-	-	±	-	-	-	-	
<i>Desulfobacterium</i> ⁽³⁾	Oval	20-35	CO	±	(+)	(±)	±	±	±	-	-	±	
<i>Desulfococcus</i> ⁽⁴⁾	Coco	28-35	CO	-	(+)	+	+	+	+	-	-	+	
<i>Desulfosarcina</i>	Oval	33	CO	+	(+)	+	+	+	+	±	-	+	
<i>Desulfomonile</i> ⁽⁵⁾	Bacilo	37	C	+	-	ND	ND	-	-	-	-	+	
<i>Desulfonema</i>	Filamentos	30-32	C	±	(+)	+	+	-	±	+	-	±	
<i>Desulfobotulus</i>	Vibrio	34	I	-	-	-	+	-	+	-	-	-	
<i>Desulfoarcutus</i>	Vibrio	35-39	CO	-	(+)	(+)	+	-	-	-	-	-	
<i>Desulfotomaculum</i> ⁽⁶⁾	Bacilo	30-38	I ou CO	±	±	±	±	+	±	±	±	±	
<i>Thermodesulfobacterium</i>	Bacilo	65-70	I	+	-	-	-	-	+	-	-	ND	
<i>Archaeoglobus</i> ⁽⁷⁾	Coco	82-83	CO	+	-	ND	ND	ND	+	+	+	ND	

^A Simbologia: +, utilizado; (±), pouco utilizado ou não utilizado; -, não utilizado; ND, não determinado.

^B Simbologia: C, oxidação completa até CO₂ por vias desconhecidas; CAC, oxidação completa pela via do ciclo de Krebs; CO, oxidação completa pela via da monóxido de carbono desidrogenase/C₁; oxidação incompleta até acetato como produto final.

Tabela 3.2 – Informações complementares sobre alguns gêneros das bactérias redutoras de sulfato.

Gênero	Observações
<i>Desulfovibrio</i> ⁽¹⁾	Algumas espécies podem utilizar metanol, glicerol, glicina, alanina, colina e furfural como fonte de carbono.
<i>Desulfobacter</i> ⁽²⁾	O lactato pode ser utilizado por algumas poucas espécies.
<i>Desulfobacterium</i> ⁽³⁾	Algumas espécies podem utilizar metanol, glutarato, glutamato, fenol, alanina, nicotinato e indol como fonte de carbono.
<i>Desulfococcus</i> ⁽⁴⁾	Algumas espécies podem utilizar acetona como fonte de carbono.
<i>Desulfomonile</i> ⁽⁵⁾	Algumas espécies podem utilizar 3- ou 4-anisato como fonte de carbono.
<i>Desulfotomaculum</i> ⁽⁶⁾	Algumas espécies podem utilizar metanol ou alanina como fonte de carbono. Podem se apresentar como espécies termofílicas, possuem uma temperatura ótima de desenvolvimento na faixa de 50-65 °C.
<i>Archaeoglobus</i> ⁽⁷⁾	Pode utilizar amido ou peptídeos como fonte de carbono. Único representante do domínio <i>Archaea</i> presente na Tabela 3.1; sendo os demais microorganismos do domínio <i>Eukarya</i> .

3.5. Biorreatores Anaeróbios

3.5.1 Reator Anaeróbio Operado em Bateladas Seqüenciais (ASBR)

Atualmente, existem várias configurações de biorreatores utilizados para a remoção da matéria orgânica em tratamento de águas residuárias. Dentre os tipos de biorreatores desenvolvidos que podem efetuar a remoção do sulfato de águas residuárias os mais difundidos são: reator anaeróbio operado em batelada seqüencial – ASBR (DAGUE *et al.*, 1992); reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo – UASB (LETTINGA *et al.*, 1980, aplicado na remoção de sulfato por MIZUNO *et al.*, 1994); reator anaeróbio de leito expandido – EGSB (KATO *et al.*, 1994, aplicado por SMUL *et al.*, 1997 na remoção de sulfato) e o reator anaeróbio de leito fixo operado em batelada alimentada seqüencial – ASBBR (RODRIGUES *et al.*, 2003; ORRA *et al.*, 2004).

Um dos primeiros estudos sobre a aplicação do conceito do ASBR na remoção de matéria orgânica de águas residuárias foi o trabalho de Dague *et al.* (1992) baseado nas descobertas sobre floculação da biomassa no fim dos anos 60 sendo que os estudos mostraram que a operação do reator em batelada permite o tratamento de água residuária em um reator único sem sistema adicional de decantação (DAGUE *et al.*, 1992; NDON *et al.*, 1997), portanto a operação do ASBR é muito simples e ocorre em quatro estágios que constituem um ciclo: enchimento, reação, sedimentação e esvaziamento. Os estudos de Dague *et al.* (1992) elucidaram a origem e o conceito do reator, além de mostrarem os resultados de tratamento de

substrato altamente solúvel (leite desnatado em pó) e esgoto de suínos, sendo concluído que o ASBR tem características únicas que permitem que o processo de tratamento atinja altas conversões do substrato em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). A alta razão entre substrato e microrganismos (F/M) no começo do ciclo de alimentação leva a uma alta velocidade de conversão nesta fase, já a razão baixa de F/M traz o efeito desejado de floculação e sedimentação da biomassa. Os melhores resultados quanto à retenção de biomassa e estabilidade em remoção de DQO foram obtidos com relação inicial de F/M igual a 0,5.

Shizas *et al.* (2002) investigaram sobre o melhoramento do desempenho do ASBR modificando os parâmetros de operação. O reator que tinha sido operado tratando glicose com uma carga orgânica de $2,1 \text{ kgDQO} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ foi submetido a uma carga de choque de $3,2 \text{ kgDQO} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. Foram examinadas cinco combinações diferentes de afluente, tempo de ciclo, e razão entre tempo de enchimento e tempo de ciclo (F/C). O estudo mostrou que uma razão alta de F/C diminuiu o acúmulo de ácidos no sistema permitindo um pH mais alto. Este benefício se dá devido à dinâmica de produção e de consumo de ácidos no reator. Assim, notou-se que um tempo mais longo de enchimento melhorou o desempenho do reator no tratamento de um substrato de rápida acidificação como glicose. Para razões idênticas de F/C com cargas orgânicas iguais e tempos mais curtos de ciclo com concentrações iniciais de substrato mais baixas também melhoraram a eficiência do ASBR.

Orra *et al.* (2004) estudaram a degradação de água residuária sintética em um ASBBR com diferentes estratégias de alimentação, variando os tempos de preenchimento do reator na operação em batelada alimentada em 6, 60, 120, 240 e 360 minutos e em batelada sequenciais. O trabalho mostrou que durante a operação em batelada, os coeficientes cinéticos aparentes se mantiveram em todas as condições experimentais, e que durante a batelada alimentada estes

coeficientes diminuíram conforme o aumento do tempo de preenchimento do reator.

Sarti *et al.* (2005) realizaram um estudo da degradação de esgoto sanitário utilizando ASBR em quatro configurações diferentes para tratamento de $1,95 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ de esgoto sanitário. Três unidades eram do tipo ASBR convencional e outro tipo ASBBR com suporte inerte (espuma de poliuretano). Os reatores foram inoculados e os ciclos operacionais tinham duração de oito horas. Os dois reatores ASBR com recirculação de líquido não apresentaram desempenho satisfatório na remoção de matéria orgânica e de sólidos solúveis. Os melhores resultados mostraram o ASBR com agitação mecânica com eficiência média de 60% e 85% e o ASBBR com 65% e 75%, respectivamente.

Os biorreatores de ambos os trabalhos de Orra *et al.* (2004) e Sarti *et al.* (2005), não operaram com águas residuárias enriquecidas com sulfato, porém a operação de um ASBR em batelada alimentada torna-se interessante devido, de modo geral, à flexibilidade operacional que esta configuração apresenta, possibilitando controlar a adição de matéria orgânica, promovendo uma diluição, semelhante à proporcionada pela alimentação contínua do afluyente.

Sarti *et al.* (2006) avaliaram o desempenho de dois ASBR diferenciados pelo tipo de imobilização de biomassa. O primeiro reator foi operado com suporte inerte (espuma de poliuretano) e o segundo com biomassa granular. Ambas as unidades foram projetadas para tratar $2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ de esgoto doméstico. A concepção da configuração ASBBR, em escala piloto, baseou-se no trabalho de Ratusznei *et al.* (2000). Durante a fase experimental de 70 dias observou-se uma adaptação rápida dos reatores ao inóculo e uma similaridade significativa no desempenho dos reatores.

3.5.2 Vantagens e Desvantagens de Reatores Descontínuos

A operação de reatores anaeróbios em batelada traz algumas vantagens comparadas aos sistemas anaeróbios contínuos devido à alta flexibilidade de operação com relação ao controle do tempo de ciclo, o que possibilita conseqüentemente um melhor controle da qualidade do efluente, atingindo maiores velocidades de conversão de substratos no início do ciclo e uma alta produção de biogás, ao mesmo tempo possibilitando uma operação simples com custos reduzidos. Concentrações mais baixas de substrato no fim do ciclo otimizam a floculação da biomassa e permitem a separação da fase sólida da fase líquida sem que haja necessidade de um decantador secundário, além de possibilitar o tratamento de águas residuárias produzidas de maneira intermitente. A opção de operar o reator em batelada alimentada minimiza a relação substrato/microrganismos no começo do ciclo diminuindo possíveis efeitos tóxicos do substrato e seus subprodutos. Outros fatores que afetam o desempenho do reator são a agitação, a configuração geométrica do reator e a estratégia de alimentação (ZAIAT *et al.*, 2001).

Além das vantagens citadas no aspecto operacional, por sua simplicidade, reatores operados em batelada também podem ser utilizados para estudos de cinética das reações bioquímicas, pois não há fluxos de entrada e de saída durante a fase reacional. São facilmente adaptáveis à escala de laboratório, necessitando poucos equipamentos auxiliares ou pouca instrumentação (LEVENSPIEL, 1999).

Como desvantagens desta configuração, em relação aos reatores contínuos, pode-se citar um elevado custo operacional, uma menor uniformidade de produto além de exigir um tempo de carregamento, aquecimento, descarga e limpeza (MORAES *et al.*, 2004).

3.5.3. Reatores Anaeróbios no Tratamento de Águas Residuárias Contendo Sulfato

O tratamento de águas residuárias contendo sulfato pode ser realizado através de biorreatores, cujos microrganismos podem reduzir o sulfato (SO_4^{2-}) para o íon sulfeto em suas diversas formas (S^{2-} , HS^- e H_2S) principalmente pelas bactérias redutoras de sulfato (BRS), em condições sulfetogênicas, e utilizando a matéria orgânica como fonte doadora de elétrons; e o íon sulfeto resultante desta degradação pode ser oxidado a enxofre molecular pelo intermédio de bactérias aeróbias. Lens *et al.* (1998b) estabeleceram uma razão teórica entre a DQO e a concentração de sulfato, baseados na estequiometria da redução de sulfato a sulfeto, fazendo uma relação de equivalência do oxigênio (DQO) com o sulfato como aceptor de elétrons. Quando esta relação assume um valor igual a 0,67, o biorreator torna-se, em teoria, totalmente sulfetogênico, pois a quantidade de matéria orgânica nesta condição é suficiente para que haja a completa redução do sulfato; sendo que para valores maiores o reator também realiza a metanogênese (ressaltando que em razões menores que 2,0 já pode ser observado uma predominância da atividade sulfetogênica) o que possibilita a remoção da matéria orgânica excedente; para valores menores que 0,67, é necessária a adição de doadores de elétrons (na forma de matéria orgânica) de forma que todo o sulfato possa ser removido.

A Tabela 3.3 compara os principais parâmetros de projeto e desempenhos de vários biorreatores no processo de tratamento de águas residuárias contendo sulfato, enquanto a Tabela 3.4 enumera as literaturas relacionadas a estes resultados e algumas informações adicionais sobre as configurações.

Tabela 3.3 – Comparação de resultados e parâmetros de projeto de vários biorreatores abordados na literatura.

Reator	Volume		COV ($\text{mg.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$)	TDH / TB (d)	T (°C)	$[\text{SO}_4^{2-}]$ (mg.L^{-1})		DQO (mg.L^{-1})		DQO / $[\text{SO}_4^{2-}]$	Ref.
	Útil	Biomassa				Afluente	Efluente	Afluente	Efluente		
Cla	n.d.	0,2 L	10k	n.d.	35	76 – 8,6k	29 – 8,5k	≈ 5k	n.d.	50 - 5	[1]
Cla	n.d.	0,2 L	10k	n.d.	35	71 – 9,3k	0 – 8,8k	≈ 5k	n.d.	50 - 5	[1]†
CDm	2 L	n.d.	500 – 2k	20 - 5	35	68	0 – 3,3	10k	1,2k – 1,8k	148	[2]
CDm	2 L	n.d.	500 – 2k	20 - 5	35	667	7 – 20	10k	1,7k – 2,9k	15	[2]
CDm	2 L	n.d.	500 – 2k	20 - 5	35	1,7k	712 – 830	10k	2,7k – 4,3k	6	[2]
CDm	2 L	n.d.	250 – 1k	20 - 5	35	1,7k	823 – 1,0k	5k	2,1k – 2,5k	3	[2]
CDm	2 L	n.d.	125 – 500	20 - 5	35	1,7k	823 – 1,1k	2,5k	2,0k – 2,2k	1,5	[2]
CGa	5,5 L	2,2 L	14k – 2,4k	0,16 – 0,22	30	1,2k – 4,6k	380 – 2,3k	500 – 2k	62 – 797	0,5	[3]
CGa	5,5 L	2,2 L	7,6k	0,27	30	3,7k	2,7k	1,5k	327	0,4	[3]†
CGa	5,5 L	2,2 L	11,3k – 12,3k	0,19 – 0,21	30	4,5k – 4,6k	3,2k – 2,7k	2,1k – 2,5k	447 – 928	0,5 – 0,6	[3]‡
Blar	1,4 L	n.d.	4k	1	30	1,6k	1,3k	6k	4,7k	3,75	[4]
Blar	1,4 L	n.d.	4k	1	30	1,6k	288	6k	1,3k	3,75	[4]†

Nomenclatura dos reatores com relação à:

- Estratégia de alimentação: C = Contínuo; B = Batelada; BA = Batelada alimentada;

- Biomassa: I = Imobilizada; G = Granulada; D = Crescimento disperso;

- Fluxo: a = Ascendente; d = Descendente; h = Horizontal; m = Mistura perfeita;

- Agitação: s = Mecânica; r = Recirculação da fase líquida

- n.d.: Não divulgado / não informado

Tabela 3.4 – Referências bibliográficas e observações das configurações de biorreatores utilizados na redução de sulfato abordadas na Tabela 3.3.

Referência	Observação
[1] Isa <i>et al.</i> (1986)	Fonte de carbono: Acetato
[1]† Isa <i>et al.</i> (1986)	Fonte de carbono: Acetato + Etanol
[2] Mizuno <i>et al.</i> (1994)	Fonte de carbono: Butirato; Reator tipo quimiostato; DQO efluente considerada somente na conversão de metano
[3] Omil <i>et al.</i> (1996)	Fonte de carbono: Acetato, Propionato e Butirato (Razão em DQO 1:1:1)
[3]† Omil <i>et al.</i> (1996)	Fonte de carbono: Acetato, Propionato e Butirato (Razão em DQO 5:3:2)
[3]‡ Omil <i>et al.</i> (1996)	Fonte de carbono: Acetato, Propionato e Butirato (Razão em DQO 1:2:2)
[4] Mohan <i>et al.</i> (2005)	Sem bioenriquecimento da biomassa
[4]† Mohan <i>et al.</i> (2005)	Biomassa bioenriquecida

3.5.4. Reatores Anaeróbios Contínuos no Tratamento de Águas Contendo Sulfato

A redução de sulfato em reatores biológicos contínuos por vias anaeróbias está sendo estudada em diferentes enfoques por vários grupos de pesquisa, dada a sua importância. Isa *et al.*, (1986a) e (1986b) observaram, em um reator anaeróbio contínuo com biomassa imobilizada e fluxo ascendente, que para concentrações de sulfeto de hidrogênio a partir de $1000 \text{ mgH}_2\text{S.L}^{-1}$ (como produto da sulfetogênese), a atividade metanogênica sofreu um decaimento de cerca de 12%, e as bactérias metanogênicas (acetoclásticas e hidrogenotróficas) sofreram inibição, talvez por haver uma adaptação destas morfologias ao H_2S . Entretanto, as próprias bactérias redutoras de sulfato sofreram inibição pelo H_2S , embora não se possa inferir se houve um efeito tóxico do produto do metabolismo ou se houve precipitação de micronutrientes na forma de traços de metais como seus sulfetos correspondentes, prejudicando a disponibilidade dos mesmos à biomassa e causando efeitos inibidores. Salienta-se que os autores trabalharam com uma relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 50 até 5, para uma concentração de matéria orgânica de aproximadamente $5000 \text{ mgDQO.L}^{-1}$, obtendo eficiências de redução de sulfato de até 38%.

Omil *et al.* (1996), estudaram o efeito da velocidade ascensional e da concentração de sulfato na degradação de ácidos graxos voláteis em um reator operado de modo contínuo com fluxo ascendente contendo biomassa granulada e em condições sulfetogênicas. O reator foi alimentado com uma mistura de acetato, propionato e butirato, em três relações distintas, contendo macro e micronutrientes. A relação entre DQO e a concentração de sulfato foi mantida em 0,5. O trabalho mostrou que as bactérias redutoras de sulfato foram mais eficientes que as metanogênicas na remoção da matéria orgânica nas condições apresentadas,

demonstrando que a degradação da matéria orgânica é bem sucedida em reatores UASB, e que velocidades ascensionais maiores tem um efeito negativo na remoção desta matéria orgânica através da sulfetogênese.

Em um trabalho posterior, Omil *et al.* (1997) realizaram uma simulação dinâmica da competição entre as bactérias metanogênicas e as bactérias redutoras de sulfato pelo substrato orgânico disponível. Para relações de DQO/[SO₄²⁻] menores que 2,0, as bactérias redutoras de sulfato utilizaram completa e rapidamente todo o propionato e o butirato, sendo que houve uma competição pela utilização do acetato entre as bactérias metanogênicas e as redutoras de sulfato. Baseando-se nas propriedades cinéticas dos grupos bacterianos, foi construído um modelo matemático, cuja simulação mostrou que o tempo necessário para que houvesse a predominância das bactérias redutoras de sulfato foi grande.

Tal comportamento foi ocasionado devido à diferença relativa entre as velocidades específicas de crescimento de cada consórcio microbiano, por fatores que são dependentes do pH, composição do inóculo e tempo de retenção celular, mostrando que o pH na faixa de 8,0 – 8,5 foi mais favorável para que as bactérias redutoras de sulfato predominassem em um período mais curto, bem como um inóculo inicial contendo maior proporção de bactérias redutoras de sulfato em detrimento das *Archaea* metanogênicas. Tempos de retenção celular menores também favoreceram o crescimento mais rápido das BRS. Os gráficos representados pela Figura 3.3 mostram o tempo necessário para haver a conversão de sulfato com eficiências de 10, 50 e 90%, em relação ao pH, composição do inóculo (em termos da razão entre a concentração de *Archaea* metanogênicas e as bactérias redutoras de sulfato) e tempo de retenção celular.

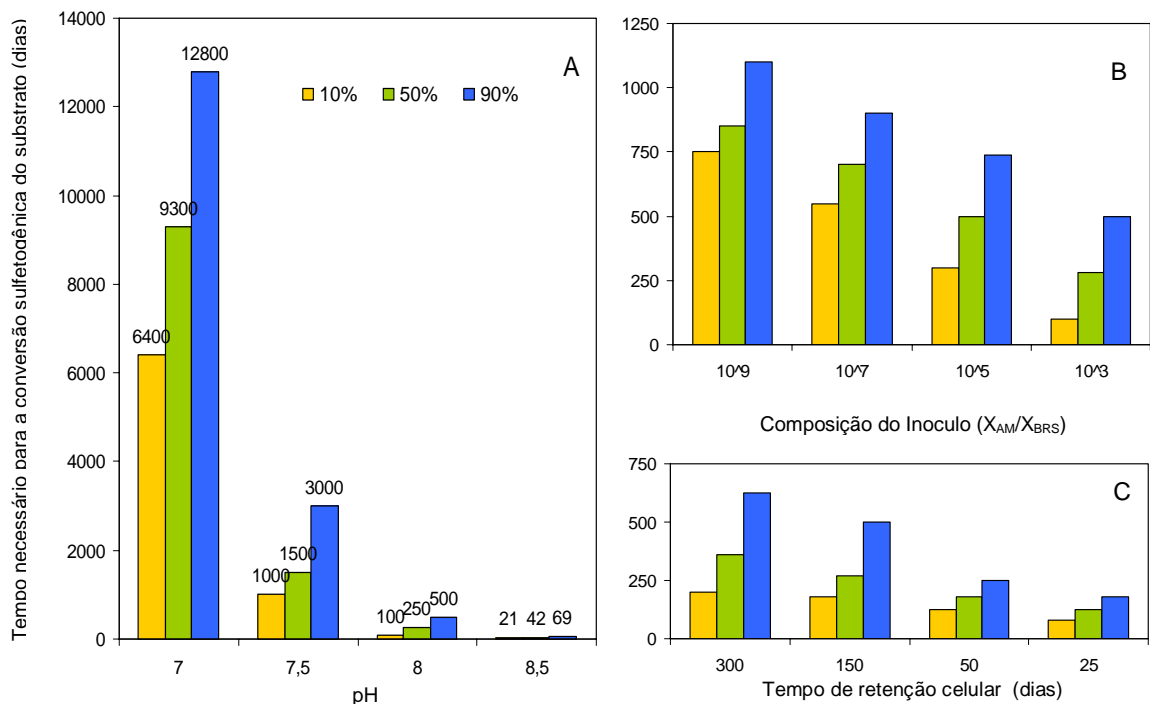


Figura 3.3 – Resumo dos resultados obtidos nas simulações realizadas por Omil *et al.* (1997): A – Efeito do pH, B – Efeito da composição do inóculo (X_{AM}/X_{BRS} – Relação de concentração de *Archaea* metanogênicas por bactérias redutoras de sulfato); e C – Efeito do tempo de retenção celular, no tempo necessário para a conversão de sulfato no substrato, considerando eficiências de 10, 50 e 90%.

Lens *et al.* (1998a) operaram um reator UASB alimentado com uma razão DQO/[SO₄²⁻] de 0,5, tal que a concentração de sulfato afluente variou de 1000 a 5000 mgSO₄²⁻.L⁻¹, utilizando ácidos voláteis como fonte de carbono. O tempo de detenção hidráulica também foi variado neste trabalho em um intervalo entre 2,2 e 1,7 h, tal que a remoção média de sulfato foi de 35% e a carga de sulfato removida variou entre 7,0 e 10,5 gSO₄²⁻.d⁻¹.

O’Flaherty *et al.* (1999) também estudaram essa competição entre as bactérias redutoras de sulfato e as *Archaea* metanogênicas analisando o efeito da adição de sulfato na degradação de ácidos graxos voláteis e do etanol em um reator anaeróbio híbrido operado de

modo contínuo. Inicialmente, o reator foi inoculado com lodo não adaptado ao sulfato, e durante o ensaio foi submetido a uma concentração de sulfato de 4000 mg.L^{-1} , o que resultou em uma inibição completa de degradação de propionato e uma forte inibição da atividade das *Archaea* metanogênicas acetoclásticas.

Testes de toxicidade mostraram que a metanogênese acetoclástica foi a etapa mais afetada pela inibição por sulfeto (inibição por produtos do metabolismo), tal que foi observada uma redução de 50% na produção de metano pelas *Archaea* metanogênicas acetoclásticas nas concentrações de sulfeto de hidrogênio livre de 69 a $150 \text{ mgH}_2\text{S.L}^{-1}$, em uma faixa de pH de 6,5 a 8,0. O estudo mostrou ainda que quantidades significativas de BRS estiveram presentes no lodo não adaptado ao sulfato, e que na ausência de sulfato as BRS podem crescer utilizando uma rota metabólica fermentativa pela acetogênese, utilizando etanol (LAANBROECK² *et al.*, 1982, *apud* O'FLAHERTY *et al.*, 1999). A inoculação do reator com lodo adaptado ao sulfato resultou no crescimento de BRS no biofilme e o restabelecimento da remoção da matéria orgânica.

Silva *et al.* (2002) observaram a viabilidade de redução de sulfato em água residuária industrial utilizando reator anaeróbio de leito fixo com fluxo horizontal (RAHLF), constatando que o etanol pode estimular o processo sulfetogênico no tratamento de águas residuárias que requerem a adição de fonte de carbono e doador de elétrons externos em relações $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ menores que 0,62.

Estudos cinéticos, realizados em reatores contínuos de mistura, referentes à redução anaeróbica do sulfato, utilizando acetato como fonte de carbono, foram realizados por

² LAANBROEK, H.J.; ABEE, T.; VOOGD, I.L. Alcohol conversions by *Desulfobulbus propionicus* Lindhorst in the presence and absence of sulphate and hydrogen. **Archives of Microbiology**, n. 133, p. 178-184, 1982.

Moosa *et al.* (2002) e Moosa *et al.* (2005), verificando os efeitos da concentração de sulfato e da temperatura, respectivamente, em reatores contínuos com capacidade de 1 L (0,8 L meio / 0,2 L biomassa), operados a 20, 25, 30 e 35 °C. Foram estudadas as concentrações iniciais de 1,0; 2,5; 5,0 e 10,0 kg.m⁻³ de sulfato, e em todos os casos a velocidade de redução de sulfato aumentou linearmente conforme se aumentava o carregamento volumétrico, sendo que a velocidade máxima de reação aumentava conforme se aumentava a concentração afluyente de sulfato. Concluiu-se que tanto o aumento da temperatura como da concentração inicial de sulfato tiveram influência positiva velocidade de redução de sulfato.

Um reator UASB foi operado por Weijma *et al.*, (2003), alimentado com uma concentração de sulfato afluyente de 2000 mgSO₄²⁻.L⁻¹ em uma relação DQO/[SO₄²⁻] de 0,67, utilizando metanol como substrato orgânico, obtendo 10% de eficiência de remoção média de sulfato, correspondendo a 0,48 gSO₄²⁻.L⁻¹.d⁻¹ de carga removida de sulfato, em um tempo de detenção hidráulica de 10 h.

3.5.5. Reatores Anaeróbios Operados em Batelada no Tratamento de Águas Contendo Sulfato

Ghigliazza *et al.* (2000) estabeleceram considerações quanto à cinética e ao processo de redução biológica de sulfato para reduzir sulfatos solúveis (Na_2SO_4) e fracamente solúveis (CaSO_4), obtendo uma remoção de 98% em um reator operando em batelada alimentada utilizando propionato como fonte de carbono, e não notaram diferenças substanciais entre a redução de sulfato na forma de Na_2SO_4 ou de CaSO_4 .

Os reatores ASBR possuem uma alta flexibilidade com relação ao tempo de ciclo, o que possibilita obter uma qualidade desejada para o efluente tratado (ZAIAT *et al.*, 2001); entretanto, esta configuração apresenta alguns pontos críticos de controle, como a mistura (que pode ser melhorada através de agitação mecânica ou recirculação da fase líquida) e relação inicial de substrato/microrganismos. Nesse sentido, a operação em batelada alimentada minimiza esta relação inicial de substrato/microrganismos, podendo diminuir qualquer efeito tóxico ou de inibição cinética por excesso de substrato que a água residuária possa impactar no biorreator. Devido a estes fatores, outras relações de competição entre as bactérias redutoras de sulfato e as bactérias metanogênicas podem se estabelecer, o que poderá resultar em diferentes graus de eficiência do processo e também geração de diferentes produtos intermediários e na forma de biogás.

Mohan *et al.* (2005) estudaram um reator anaeróbio operado em bateladas seqüenciais com a biomassa imobilizada no tratamento de água residuária contendo sulfato, na razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 3,75. O foco do trabalho foi estudar a eficiência do processo através de adaptações na biomassa alimentando o reator com um meio que favorecesse o

desenvolvimento das BRS antes da operação do reator com a água residuária. O reator que não passou por este processo de adaptação mostrou uma eficiência de remoção de matéria orgânica de 25 – 35%, e de redução de sulfato de 16 – 27%; já o reator cuja biomassa foi previamente adaptada apresentou uma eficiência média de 78% na remoção de matéria orgânica e de até 82% na redução de sulfato.

O estudo da redução de sulfato em um reator anaeróbio em batelada seqüencial (ASBBR), utilizando diferentes materiais suporte para a imobilização da biomassa, foi proposto por Silva (2005), utilizando água residuária sintética elaborada conforme o trabalho de Torres (1992). Foi possível observar que diferentes suportes levaram a diferentes equilíbrios microbianos, e que na relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ igual a 3,2 as bactérias redutoras de sulfato foram mais competitivas na utilização de substratos orgânicos e hidrogênio que as bactérias acidogênicas e metanogênicas. Com a diminuição desta relação para 1,3 não foi detectada a presença de metano no biogás, além do processo de redução de sulfato ser mais favorável. Ainda foi observado que a suplementação de etanol no ASBBR levava a um aumento no teor de ácidos voláteis e que para dosagens de etanol superiores a estequiométrica houve um comprometimento do processo devido ao acúmulo de ácidos voláteis, que podem inibir as bactérias redutoras de sulfato.

3.6. Considerações Finais

O tratamento anaeróbio de águas residuárias contendo sulfato e as características metabólicas das bactérias redutoras de sulfato é um tema recente, mesmo que abordado com frequência na literatura. Entretanto, considerando os impactos ambientais indiretos pela disposição inadequada de águas residuárias contendo sulfato em concentrações altas ainda é um problema a ser melhor investigado, fazem-se necessários estudos de novas alternativas, ou então para um conhecimento mais profundo dos processos que regem a redução biológica do sulfato.

Grande parte da literatura disponível sobre o estudo do metabolismo das BRS referem-se às fontes de carbono simples e de fácil degradação como etanol, acetato e lactato (ISA *et al.*, 1986; MIZUNO *et al.*, 1994; OMIL *et al.*, 1996; O'FLAHERTY *et al.*, 1999; GHIGLIAZZA *et al.*, 2000; MOOSA *et al.*, 2002 e MOOSA *et al.*, 2005), sendo menos frequentes e mais recentes os trabalhos utilizando substratos complexos (SILVA, 2005 e MOHAN *et al.*, 2005). Reatores que operam com fontes de carbono mais simples tem, em geral, um cunho fundamental, demonstrando a necessidade de se expandir estes fundamentos para águas residuárias contendo fontes de carbono mais complexas, sempre buscando relações com os estudos já realizados.

Observam-se também muitos trabalhos realizados em reatores contínuos, contrastando com a escassez de estudos em reatores operados em batelada e batelada alimentada, especialmente aqueles operados com diferentes estratégias de alimentação, ou seja a influência do tempo de alimentação. Assim, as vantagens das configurações de reatores operados em batelada e batelada alimentada sequenciais tornam interessantes a realização de

maiores estudos quando aplicados ao tratamento de água residuária contendo sulfato, no tocante à eficiência e estabilidade tanto da remoção de sulfato quanto da remoção de matéria orgânica na forma de DQO, verificando-se a relação entre desempenho e estratégia de alimentação, focando na concentração de sulfato e matéria orgânica afluente e no tempo de enchimento (tempos de alimentação e de ciclo).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Fundamentos Teóricos

Na análise do desempenho e estabilidade do biorreator, algumas variáveis da operação de sistemas de tratamento de águas residuárias contendo sulfato são calculadas a partir de valores medidos, de forma que se considerem os produtos da sulfetogênese.

4.1.1. Matéria Oxidável e Matéria Orgânica

A análise da Demanda Química de Oxigênio (DQO) determina a quantidade de matéria oxidável na amostra. Como normalmente os níveis de matéria oxidável inorgânica são baixos e pouco influem no resultado da análise, convencionou-se admitir o valor de DQO como uma medida da matéria orgânica oxidável; entretanto, em sistemas onde as concentrações de sulfeto, sulfito e outras espécies inorgânicas não totalmente oxidadas são expressivas, é necessário considerar a presença destas substâncias no cálculo da concentração de matéria orgânica oxidável, já que o que é realmente determinado é a concentração de matéria oxidável total.

Admitindo que na água residuária só existam a matéria orgânica, o sulfeto (na forma de STD) e o sulfito como substâncias passíveis de oxidação, devemos considerar a Equação 4.1 para amostras brutas e a Equação 4.2 para amostras filtradas:

$$C_{ST} = C_{SOT} + (I_{STD} + I_{SO_3}) \quad (4.1)$$

$$C_{SF} = C_{SOF} + (I_{STD} + I_{SO_3}) \quad (4.2)$$

Nas quais:

C_{ST} é a concentração de matéria oxidável total (mgDQO.L⁻¹).

C_{SF} é a concentração de matéria oxidável filtrada (mgDQO.L⁻¹).

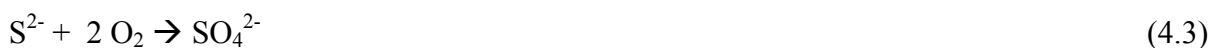
C_{SOT} é a concentração de matéria orgânica total (mgDQO.L⁻¹).

C_{SOF} é a concentração de matéria orgânica filtrada (mgDQO.L⁻¹).

I_{STD} é a concentração do sulfeto total dissolvido (mgDQO.L⁻¹).

I_{SO_3} é a concentração do sulfito (mgDQO.L⁻¹).

Pela definição da DQO, toda a matéria oxidável é levada ao estado mais oxidado, tal que se relacione a oxidação pela solução sulfocrômica com a oxidação pelo oxigênio. Desta maneira, para determinar as influências do STD e do sulfito, recorre-se as reações químicas destes ânions com o oxigênio até o sulfato (por ser a forma mais oxidada de enxofre), apresentadas na Equação 4.3 para o STD e na Equação 4.4 para o sulfito:



Entretanto, como as determinações são realizadas utilizando uma base mássica, tanto de matéria orgânica como de STD e sulfito, e as Equações 4.3 e 4.4 apresentam uma base

molar, é necessário estabelecer uma relação estequiométrica para se obter I_{STD} e I_{SO_3} , descritas pelas Equações 4.5 e 4.6, respectivamente.

$$I_{STD} = 2 \cdot STD \quad (4.5)$$

$$I_{SO_3} = 1/5 \cdot C_{SO_3} \quad (4.6)$$

Nas quais:

STD é a concentração de sulfeto total dissolvido ($mg_{STD} \cdot L^{-1}$).

C_{SO_3} é a concentração de sulfito ($mg_{SO_3^{2-}} \cdot L^{-1}$).

Substituindo a Equação 4.5 e a Equação 4.6 na Equação 4.1 e na Equação 4.2, pode-se determinar as concentrações de matéria orgânica bruta e filtrada, conforme mostrado pelas Equações 4.7 e 4.8, respectivamente:

$$C_{SOT} = C_{ST} - (2 \cdot STD + 1/5 \cdot C_{SO_3}) \quad (4.7)$$

$$C_{SOF} = C_{SF} - (2 \cdot STD + 1/5 \cdot C_{SO_3}) \quad (4.8)$$

4.1.2. Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) e Sulfeto na Forma HS^- Dissolvidos

A concentração de sulfeto determinada nas amostras corresponde à soma das formas de sulfeto presentes (HS^- , H_2S e S^{2-} dissolvidos), e é chamada de sulfeto total dissolvido (STD). O cálculo da concentração das formas dissociadas e não dissociada na amostra é realizado de acordo com o equilíbrio químico destes íons em uma relação de dependência

com o pH, entretanto, conforme demonstrado por Lens *et al.* (1998b) a presença do íon S^{2-} não ocorre na faixa de pH onde a digestão anaeróbia ocorre.

Desta forma, o trabalho de Muthumbi *et al.* (2001) apresentou uma relação entre o sulfeto total dissolvido (STD) e o sulfeto de hidrogênio livre (H_2S), dependente do pH, mostrada pela Equação 4.9:

$$C_{H_2S} = \frac{STD}{1 + 10^{pH - pKa}} \quad (4.9)$$

Na qual:

C_{H_2S} é a concentração de sulfeto de hidrogênio (H_2S) dissolvido ($mgH_2S.L^{-1}$).

STD é a concentração de sulfeto total dissolvido ($mg.L^{-1}$).

pKa é a constante de equilíbrio do par HS^-/H_2S (7,02).

Desta maneira, o cálculo da concentração de sulfeto na forma HS^- pode ser realizado conforme a Equação 4.10:

$$C_{HS} = STD - C_{H_2S} \quad (4.10)$$

Na qual:

C_{HS} é a concentração de sulfeto na forma HS^- dissolvido ($mgHS^-.L^{-1}$).

4.1.3. Cargas Volumétricas

A carga orgânica volumétrica representa a quantidade de matéria orgânica, em termos de DQO, aplicada (COA) ou removida (COR) por unidade de tempo e de volume do reator.

O cálculo da carga orgânica aplicada está relacionado com a concentração afluyente de matéria orgânica, e é definido pela Equação 4.11:

$$COA = \frac{C_{ST}^{af} \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.11)$$

Na qual:

COA é a carga orgânica volumétrica aplicada (gDQO. L⁻¹.d⁻¹).

C_{ST}^{af} é a concentração de matéria orgânica no afluyente (gDQO.L⁻¹).

V_A é a Volume alimentado por ciclo (L.ciclo⁻¹).

N é a Número de ciclos por dia (ciclo.d⁻¹).

V_R é a Volume útil do reator (L).

A matéria removida pode ser calculada tanto para a matéria oxidável como para a matéria orgânica, visto que no afluyente esta distinção não existe, pois toda a matéria oxidável é matéria orgânica (água residuária sintética). O cálculo da remoção de matéria oxidável e orgânica, para amostras brutas e filtradas, pode ser realizado pelas Equações 4.12 a 4.15:

$$COR_{ST} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{ST}) \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.12)$$

$$COR_{SF} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{SF}) \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.13)$$

$$COR_{SOT} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{SOT}) \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.14)$$

$$COR_{SOF} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{SOF}) \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.15)$$

Nas quais:

COR_{ST} é a carga de matéria oxidável total volumétrica removida (gDQO. L⁻¹.d⁻¹).

C_{ST} é a concentração de matéria oxidável total no efluente (gDQO.L⁻¹).

COR_{SF} é a carga de matéria oxidável filtrada volumétrica removida (gDQO. L⁻¹.d⁻¹).

C_{SF} é a concentração de matéria oxidável filtrada no efluente (gDQO.L⁻¹).

COR_{SOT} é a carga orgânica total volumétrica removida (gDQO. L⁻¹.d⁻¹).

C_{SOT} é a concentração de matéria orgânica total no efluente (gDQO.L⁻¹).

COR_{SOF} é a carga orgânica filtrada volumétrica removida (gDQO. L⁻¹.d⁻¹).

C_{SOF} é a concentração de matéria orgânica filtrada no efluente (gDQO.L⁻¹).

O mesmo princípio pode ser aplicado para o sulfato como substrato, definida como sendo uma carga de sulfato volumétrica, que é a quantidade de sulfato, aplicada (CSA) ou removida (CSR), por unidade de tempo e volume do reator.

A Equação 4.16 define a carga de sulfato aplicada, enquanto a Equação 4.17 define a carga de sulfato removida do reator:

$$CSA = \frac{C_{SO4}^{af} \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.16)$$

$$CSR = \frac{(C_{SO4}^{af} - C_{SO4}) \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.17)$$

Nas quais:

CSA é a carga de sulfato volumétrica aplicada (gSO₄²⁻.L⁻¹.d⁻¹).

$C_{SO_4}^{af}$ é a concentração de sulfato no afluente ($gSO_4^{2-} \cdot L^{-1}$).

CSR é a carga de sulfato volumétrica removida ($gSO_4^{2-} \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$).

C_{SO_4} é a concentração de sulfato no efluente ($gSO_4^{2-} \cdot L^{-1}$).

4.1.4. Cargas Específicas

A carga orgânica específica representa a quantidade de matéria orgânica, em termos de DQO, aplicada (COAE) ou removida (CORE) por tempo e por grama de biomassa, em termos de SVT.

O cálculo da carga orgânica específica aplicada está relacionado com a concentração afluente de matéria orgânica, e é definido pela Equação 4.18:

$$COAE = \frac{C_{ST}^{af} \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot Cx_{SVT}} \quad (4.18)$$

Na qual:

COAE é a carga orgânica específica aplicada ($mgDQO \cdot gSVT^{-1} \cdot d^{-1}$).

C_{ST}^{af} é a concentração de matéria orgânica no afluente ($mgDQO \cdot L^{-1}$).

Cx_{SVT} é a Concentração de biomassa no reator ($gSVT \cdot L^{-1}$).

A matéria removida específica pode ser calculada tanto para a matéria oxidável como para a matéria orgânica, visto que no afluente esta distinção não existe, pois toda a matéria oxidável é matéria orgânica (água residuária sintética). O cálculo da remoção específica de

matéria oxidável e orgânica, para amostras brutas e filtradas, pode ser efetuado pelas Equações 4.19 à 4.22:

$$CORE_{ST} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{ST}) \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot Cx_{SVT}} \quad (4.19)$$

$$CORE_{SF} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{SF}) \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot Cx_{SVT}} \quad (4.20)$$

$$CORE_{SOT} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{SOT}) \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot Cx_{SVT}} \quad (4.21)$$

$$CORE_{SOF} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{SOF}) \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot Cx_{SVT}} \quad (4.22)$$

Nas quais:

$CORE_{ST}$ é a carga de matéria oxidável total específica removida ($\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

C_{ST} é a concentração de matéria oxidável total no efluente ($\text{mgDQO} \cdot \text{L}^{-1}$).

$CORE_{SF}$ é a carga de matéria oxidável filtrada específica removida ($\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

C_{SF} é a concentração de matéria oxidável filtrada no efluente ($\text{mgDQO} \cdot \text{L}^{-1}$).

$CORE_{SOT}$ é a carga orgânica total específica removida ($\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

C_{SOT} é a concentração de matéria orgânica total no efluente ($\text{mgDQO} \cdot \text{L}^{-1}$).

$CORE_{SOF}$ é a carga orgânica filtrada específica removida ($\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

C_{SOF} é a concentração de matéria orgânica filtrada no efluente ($\text{mgDQO} \cdot \text{L}^{-1}$).

Novamente o mesmo princípio pode ser aplicado para o sulfato como substrato, definida como sendo uma carga de sulfato específica, que é a quantidade de sulfato, aplicada (CSAE) ou removida (CSRE), por unidade de tempo e de biomassa, em termos de SVT.

A Equação 4.23 define a carga de sulfato aplicada específica, enquanto a Equação 4.17 define a carga de sulfato removida específica do reator:

$$CSAE = \frac{C_{SO_4}^{af} \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot Cx_{SVT}} \quad (4.23)$$

$$CSRE = \frac{(C_{SO_4}^{af} - C_{SO_4}) \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot Cx_{SVT}} \quad (4.24)$$

Nas quais:

CSAE = carga de sulfato específica aplicada ($\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

$C_{SO_4}^{af}$ = concentração de sulfato no afluente ($\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$).

CSR = carga de sulfato específica removida ($\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

C_{SO_4} = concentração de sulfato no efluente ($\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$).

4.1.5. Eficiências de Conversão

A eficiência de remoção da matéria oxidável total no sistema (E_{ST}) relaciona o consumo da matéria oxidável durante a batelada e a batelada alimentada (relativo à concentração do afluente) sendo definida pela Equação (4.25):

$$E_{ST} = \frac{C_{ST}^{af} - C_{ST}}{C_{ST}^{af}} \cdot 100 \quad (4.25)$$

Na qual:

E_{ST} é a eficiência de remoção da matéria oxidável total (%).

Esta eficiência pode ser calculada também para amostras filtradas (E_{SF}), onde a concentração de sólidos suspensos não é considerada, conforme demonstrado pela Equação (4.26):

$$E_{SF} = \frac{C_{ST}^{af} - C_{SF}}{C_{ST}^{af}} \cdot 100 \quad (4.26)$$

Na qual:

E_{SF} é a eficiência da remoção da matéria oxidável filtrada (%).

Analogamente, também pode-se calcular as eficiências de remoção (total e filtrada) da matéria orgânica no reator (E_{SOT} e E_{SOF} , respectivamente), através das Equações (4.27) e (4.28):

$$E_{SOT} = \frac{C_{ST}^{af} - C_{SOT}}{C_{ST}^{af}} \cdot 100 \quad (4.27)$$

$$E_{SOF} = \frac{C_{ST}^{af} - C_{SOF}}{C_{ST}^{af}} \cdot 100 \quad (4.28)$$

Nas quais:

E_{SOT} é a eficiência da remoção da matéria orgânica total (%).

E_{SOF} é a eficiência da remoção da matéria orgânica filtrada (%).

Da mesma maneira, pode-se definir a eficiência da remoção total de sulfato (E_{SO_4}), de acordo com a Equação (4.29):

$$E_{SO_4} = \frac{C_{SO_4}^{af} - C_{SO_4}}{C_{SO_4}^{af}} \cdot 100 \quad (4.29)$$

Na qual:

E_{SO_4} é a eficiência da redução de sulfato (%).

4.2. Materiais

4.2.1. Configuração do ASBR com agitação mecânica e “draft-tube”

A Figura 4.1 apresenta o esquema do reator com agitação e operado em batelada e batelada alimentada seqüenciais contendo lodo granuloso e a Figura 4.2 ilustra o posicionamento do “draft-tube” e do impelidor tipo hélice no reator, de acordo com as recomendações de Shaw (1982).

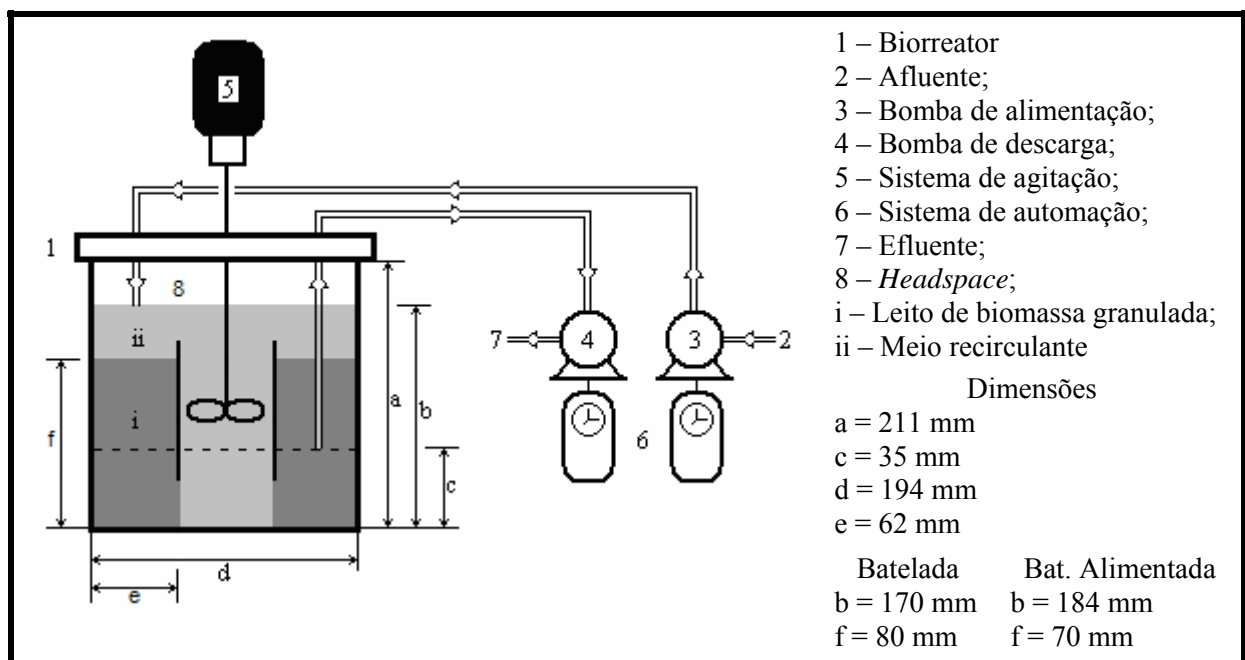


Figura 4.1 – ASBR com agitação mecânica com impelidor tipo hélice e “draft-tube”.

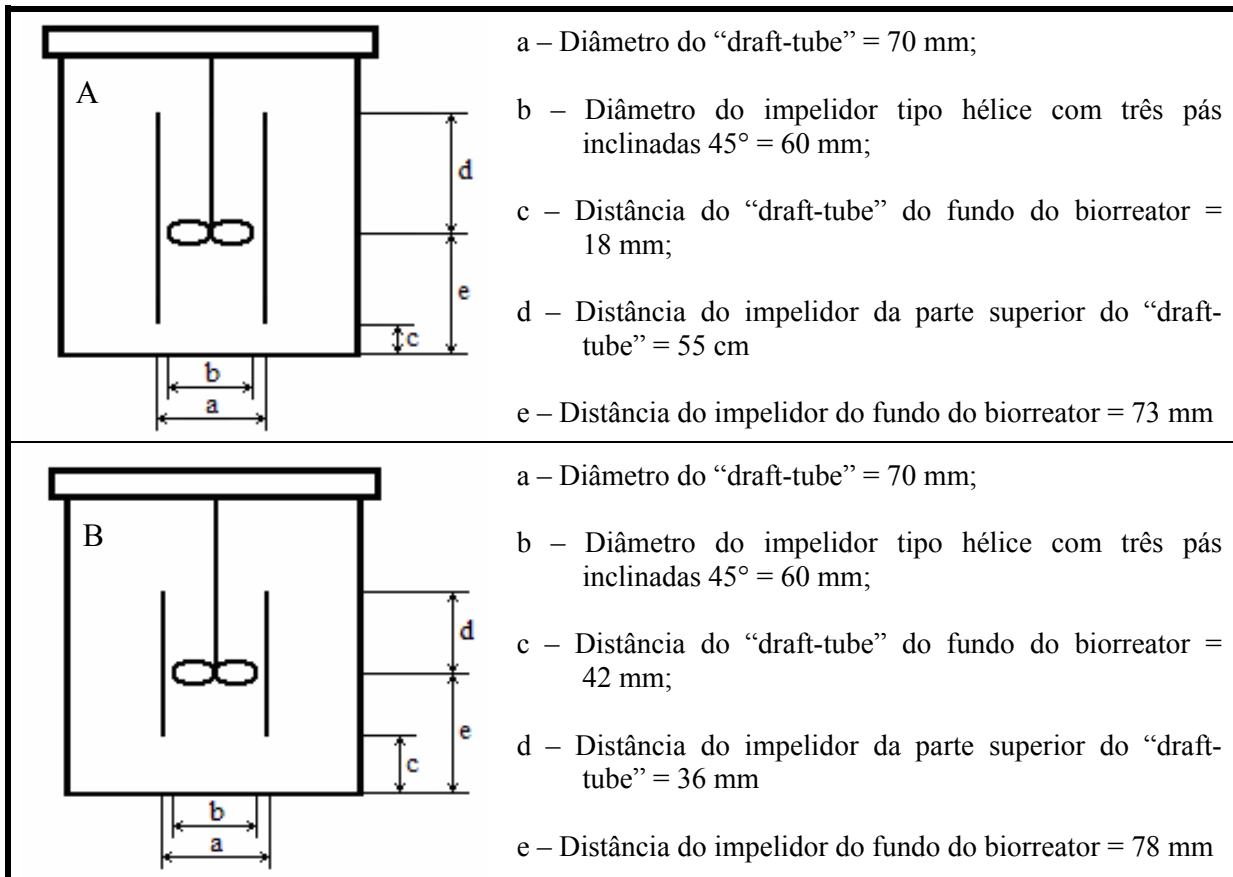


Figura 4.2 – Posicionamento e dimensionamento do “draft-tube” no biorreator. O esquema “A” foi utilizado nas operações de batelada enquanto o esquema “B” foi utilizado nas operações em batelada alimentada.

As dimensões do “draft-tube” bem como o volume útil do reator variaram conforme a estratégia de alimentação, de forma que desde o início do ciclo (início da alimentação) do reator nas operações em batelada e batelada alimentada o “draft-tube” pudesse estar completamente imerso no reator, tendo assim um funcionamento efetivo desde o princípio do ciclo. Assim, o volume ocupado pela biomassa foi de 2,0 L e o volume alimentado e descarregado por ciclo foi de 2,0 L em todas as operações, enquanto que o volume útil do reator na operação em batelada foi de 5,0 L enquanto na batelada alimentada este volume foi de 5,5 L, tal que a diferença de volume se deu no aumento do volume de diluição, pois o volume tratado por ciclo foi de 2,0 L em todas as condições.

A seguir, são apresentadas as fotografias de detalhes do sistema. A Figura 4.3 mostra o sistema de automação das bombas e as bombas, e também o reator em operação.

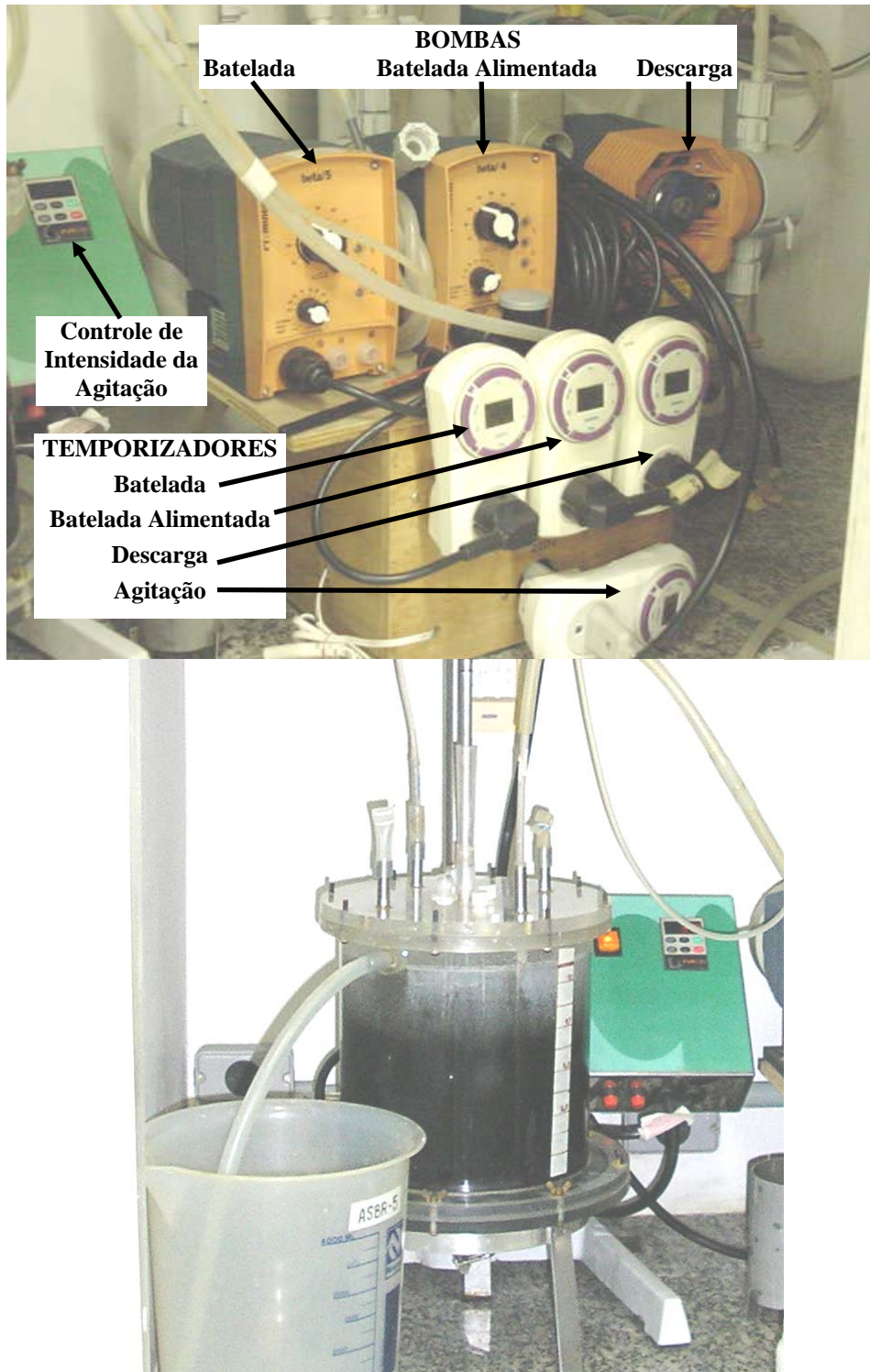


Figura 4.3 – Sistema de automação e bombas e reator anaeróbio.

A Figura 4.4 apresenta a montagem do “draft-tube” para as operações em batelada, mostrando o nível de água residuária no início do ciclo (após a alimentação de 10 minutos) e a Figura 4.5 mostra a montagem do “draft tube” para as operações em batelada alimentada e também o nível de água residuária no início do ciclo, mostrando que o “draft-tube” ficou imerso no meio desde o início de cada ciclo, e desta forma, efetivo durante toda a operação.



Figura 4.4 – Montagem do “draft-tube” para as operações em batelada.

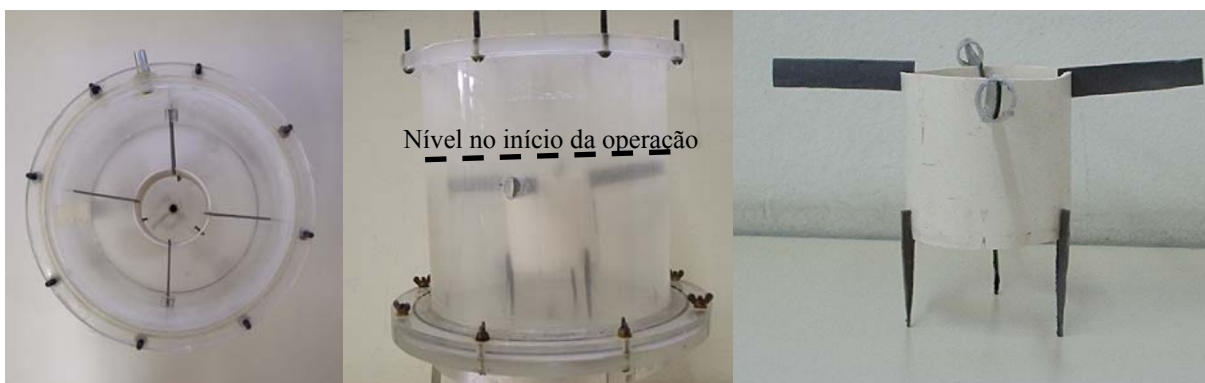


Figura 4.5 – Montagem do “draft tube” para as operações em batelada alimentada.

A Figura 4.6 ilustra o detalhe do impelidor tipo hélice de três pás utilizado em todas as operações.

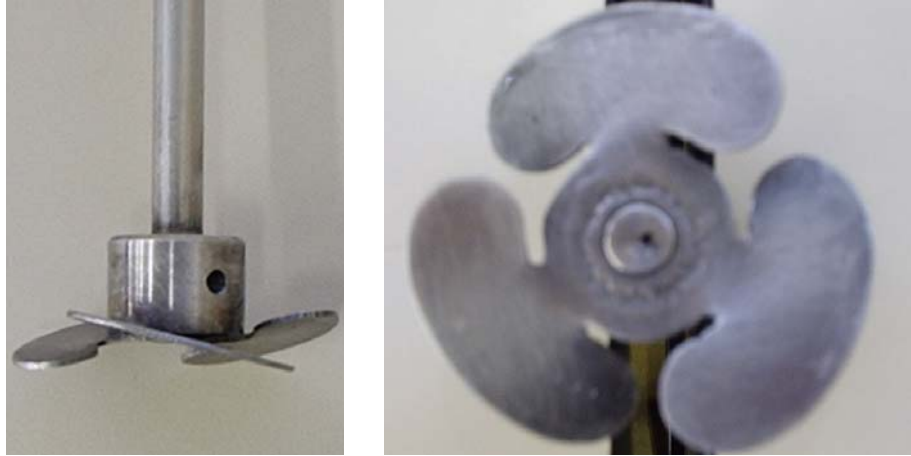


Figura 4.6 – Impelidor tipo hélice utilizado em todas as condições experimentais.

A uniformidade da temperatura do reator foi mantida sempre a 30 ± 1 °C, sendo que o reator estava contido em uma câmara com um sistema de aquecimento por resistência e um ventilador para a circulação de ar.

4.2.2. Inóculo

O inóculo utilizado em todos os experimentos foi proveniente de reator anaeróbio de manta de lodo e escoamento ascendente (UASB), tratando água residuária de abatedouro de aves (Dacar Industrial S.A.), sediada na cidade de Tietê (SP).

4.2.3. Água Residuária – Esgoto Sintético Enriquecido com Sulfato

A água residuária simulando esgoto sintético apresentou a DQO de aproximadamente 500 mg.L⁻¹, e teve a composição conforme descrita na Tabela 4.1 (TORRES, 1992). Neste substrato foram acrescentadas 3 gotas/L de detergente comercial, com a finalidade de emulsionar o óleo de soja. O sulfato foi suplementado na forma de sulfato de sódio (Na₂SO₄) e a Tabela 4.2 mostra a concentração de Na₂SO₄ e de SO₄²⁻ utilizada em cada relação DQO/[SO₄²⁻].

Tabela 4.1 – Composição da água residuária sintética.

Constituinte	Concentração (mg.L ⁻¹)
Sacarose	35
Amido	114
Celulose	34
Extrato de Carne	208
Óleo de Soja	51
Cloreto de Sódio (NaCl)	250
Cloreto de Magnésio (MgCl ₂ .6H ₂ O)	7
Cloreto de Cálcio (CaCl ₂ .2H ₂ O)	4,5
Bicarbonato de Sódio (NaHCO ₃)	200

Tabela 4.2 – Concentração de Na_2SO_4 e de SO_4^{2-} para cada relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$, mantendo-se a concentração de matéria orgânica em 500 mgDQO.L^{-1} .

$\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$	$[\text{Na}_2\text{SO}_4] \text{ (mg.L}^{-1}\text{)}$	$[\text{SO}_4^{2-}] \text{ (mg.L}^{-1}\text{)}$
1,34	552	370
0,67	1103	750
0,34	2207	1500

Os valores descritos na Tabela 4.2 foram obtidos através do cálculo estequiométrico, relacionando as massas moleculares do sulfato (SO_4^{2-} , 96 g.mol^{-1}) e do sulfato de sódio (Na_2SO_4 , 142 g.mol^{-1}). Desta maneira a concentração de sulfato a partir de uma concentração de sulfato de sódio é dado pela Equação (4.30):

$$[\text{SO}_4^{2-}] = \frac{96}{142} \cdot [\text{Na}_2\text{SO}_4] \quad (4.30)$$

Na qual:

$[\text{SO}_4^{2-}]$ = concentração do íon sulfato ($\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$).

$[\text{Na}_2\text{SO}_4]$ = concentração do sulfato de sódio ($\text{mgNa}_2\text{SO}_4 \cdot \text{L}^{-1}$).

4.3. Métodos

4.3.1. Análises Físico-Químicas

As variáveis operacionais relacionadas ao afluente e ao efluente, considerando matéria orgânica na forma de DQO, para amostras não-filtradas e filtradas, sulfato, sulfeto, sulfito, sólidos (totais e em suspensão, não voláteis e voláteis), de ácidos voláteis totais e intermediários, de alcalinidade (total, parcial, intermediária e a bicarbonato) foram realizadas segundo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1995), considerando também o método proposto por Dilallo e Albertson (1961) modificado por Ripley *et al.* (1986) na determinação da alcalinidade. A Tabela 4.3 relaciona os métodos analíticos utilizados com o código do método do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1995).

Tabela 4.3 – Métodos analíticos utilizados e o correspondente no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1995).

Método Utilizado na Determinação	Correspondente no <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i>
DQO	5220 Chemical Oxygen Demand
Sulfato	4500-SO ₄ ²⁻ E. Turbidimetric Method
Sulfeto	4500-S ²⁻ D. Methylene Blue Method
Sulfito	4500-SO ₃ ²⁻ B. Iodometric Method
Sólidos	2540 Solids (B, D e E)

As análises dos ácidos voláteis totais por cromatografia, foram feitas segundo Moraes *et al.* (2000), por cromatografia gasosa, utilizando cromatógrafo *Hewlett Packard*[®] 6890 Series equipado com detector de ionização de chama (FID), coluna *Hewlett Packard*[®] *Innowax* 30 m × 0,25 mm × 0,25 μm de espessura do filme. O gás de arraste utilizado foi o hidrogênio (H₂), na vazão de 2,0 mL.min⁻¹; a temperatura do injetor foi de 250 °C, razão de “*split*” de 20 e o volume de injeção de 1,0 μL. A temperatura do forno foi de 100 °C durante 3 minutos, seguido por uma rampa de aquecimento de 5 °C.min⁻¹ até 180 °C permanecendo nesta temperatura por 5 minutos. Na fase de “*Postrun*” a temperatura do forno foi mantida em 200 °C por 3 minutos. A temperatura do detector foi de 300 °C, com vazão de ar sintético de 300 mL.min⁻¹ e hidrogênio (H₂) de 30 mL.min⁻¹, e a vazão de “*make-up*” de nitrogênio de 2,5 mL.min⁻¹. Os ácidos analisados por cromatografia foram o acético, propiônico, isobutírico, butírico, iso-valérico, valérico e caprótico.

A determinação da composição do biogás gerado pela digestão anaeróbia foi realizada por cromatografia gasosa, utilizando cromatógrafo *Hewlett Packard*[®] 6890 Series equipado com detector de condutividade térmica (TCD) e coluna Porapak Q[®] (2 × 1/4” – 80 a 100 mesh). O gás de arraste empregado foi o hidrogênio (H₂), na vazão de 50 mL.min⁻¹, a temperatura do injetor foi igual a 150 °C e o volume de amostra injetado foi de 1,0 mL. A temperatura do forno foi mantida em 50 °C. O detector operou a 200 °C, com vazão de hidrogênio (H₂) de 50 mL.min⁻¹ e vazão de “*make-up*” de nitrogênio (N₂) de 2,5 mL.min⁻¹.

4.3.2. Procedimento Experimental

A operação do biorreator foi realizada a temperatura constante de 30 ± 1 °C, utilizando-se um ciclo de operação de 8 horas (ou 480 minutos), ou seja, três ciclos por dia. A capacidade do reator foi de 5,0 litros para as condições experimentais em batelada e de 5,5 litros para as condições experimentais em batelada alimentada, sendo que o volume tratado por ciclo foi de 2,0 litros, e o volume ocupado pela biomassa foi de 2,0 litros.

A frequência de agitação foi fixada em 180 rpm durante as operações em batelada e de 140 rpm durante as operações em batelada alimentada, tal que não houvesse circulação de biomassa por dentro do “draft-tube”. Este valor foi definido a partir do trabalho de (MICHELAN, 2006) e também a partir da observação do comportamento dos grânulos de biomassa no reator, para que não houvesse trituração dos grânulos pela rotação da hélice e que o leito de biomassa apresentasse uma expansão de cerca de 30%.

Nas operações em batelada, o enchimento ocorreu em 10 min e nas operações em batelada alimentada I e II o enchimento ocorreu em 3 e 6 horas, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 4.4. Além disso, houve a fase de sedimentação da biomassa de 30 minutos, durante a qual a agitação foi desligada. Ao término do ciclo, o efluente foi descarregado durante 10 min.

Tabela 4.4 – Tempos de enchimento e reação para as estratégias de alimentação.

Estratégias de Alimentação	Tempos de Operação			
	Enchimento	Reação	Sedimentação	Descarga
Batelada	10 min	7 horas e 10 minutos		
Batelada Alimentada I	3 horas	4 horas e 20 minutos	30 min	10 min
Batelada Alimentada II	6 horas	1 hora e 20 minutos		

A investigação da influência da relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ sobre a eficiência e estabilidade do processo foi realizada com uma concentração fixa de matéria orgânica da água residuária sintética afluyente de 500 mgDQO.L^{-1} , conforme os trabalhos de Orra *et al.* (2004), considerando um ciclo de 8 horas, compatível com a carga orgânica aplicada.

O trabalho compreendeu 10 ensaios, com diferentes estratégias de alimentação propostas para cada uma das relações de $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34, 0,67 e 0,34, conforme demonstrado na Tabela 4.5. Estes valores foram estipulados a partir da relação teórica para a qual o reator opere em condições estritamente sulfetogênicas ($DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67$). Salienta-se que a biomassa em todos os ensaios foi mantida a mesma, tal que o ensaio subsequente herdasse a biomassa adaptada do ensaio anterior.

O primeiro ensaio consistiu de um ensaio preliminar onde foram observados os seguintes objetivos: partida do reator, adaptação prévia da biomassa e adaptação dos métodos analíticos a serem realizados. Nesta condição o reator operou por 66 dias, alimentado com um meio contendo sulfato na relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34 e em batelada, de maneira similar a descrita na condição Ia.

Nos três primeiros ensaios (Ia, Ib e Ic) o reator operou uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34 nas três estratégias de alimentação propostas. Os três ensaios subsequentes, se destinaram a estudar a influência da relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,67 (IIa, IIb e IIc). Enquanto os

três últimos ensaios avaliaram a DQO/[SO₄²⁻] de 0,34 nas três estratégias de alimentação estudadas (IIIa, IIIb e IIIc).

A finalidade destes ensaios foi a verificação de uma relação DQO/[SO₄²⁻] otimizada para a operação de um biorreator em batelada e batelada alimentada, além de avaliar a estratégia de alimentação mais eficiente e estável, para cada relação estudada. A Tabela 4.5 resume as condições experimentais realizadas e também a duração em dias de cada ensaio.

Tabela 4.5 – Condições experimentais da influência da relação DQO/[SO₄²⁻] e da estratégia de alimentação e a duração em dias.

Condições Experimentais		Estratégia de Alimentação		
		Batelada	Batelada Alimentada I	Batelada Alimentada II
Relação DQO/[SO ₄ ²⁻]	1,34	Ia (26 dias)	Ib (33 dias)	Ic (34 dias)
	0,67	IIa (34 dias)	IIb (29 dias)	IIc (27 dias)
	0,34	IIIa (25 dias)	IIIb (25 dias)	IIIc (22 dias)

Depois de atingida a estabilidade operacional, foram realizados os perfis temporais ao longo do ciclo de operação de algumas das variáveis monitoradas. As variáveis de interesse foram as concentrações de substrato orgânico na forma filtrada (em termos de DQO), de sulfato, de sulfeto total dissolvido (STD), de sulfeto, de alcalinidade a bicarbonato e de ácidos voláteis totais e intermediários, além da concentração/produção de metano e sulfeto, assim como pH, potencial de oxi-redução e oxigênio dissolvido. Estes perfis possibilitaram a compreensão das rotas de degradação ao longo de um ciclo, tanto da remoção de matéria orgânica como da redução do sulfato e verificarem a condição de anaerobiose dentro do reator durante todo o ciclo.

As amostras retiradas para obtenção do perfil anteriormente citado foram coletadas em

intervalos de tempos de 30 a 60 min, conforme o tipo de variável a ser medida, sendo que o volume total retirado foi de no máximo de 500 mL para as operações em batelada e de 550 mL para as operações em batelada alimentada I e II (10% da capacidade do reator).

Após obtenção dos perfis, a condição de operação foi mudada, ou seja, a relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ do afluente ou a estratégia de alimentação (batelada alimentada), iniciando-se uma nova fase de operação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos Resultados e Discussões serão mostrados e analisados os resultados das condições experimentais realizadas. Primeiramente serão apresentados os resultados da condição preliminar, que foi fundamental para o ajuste dos métodos analíticos a serem utilizados durante todo o ensaio, bem como serviu para uma prévia adaptação do inoculo às condições de operação do reator.

Em seguida, foram apresentados e discutidos os resultados das condições I, II e III, de forma a comparar as diferentes estratégias de alimentação adotadas para cada condição; e finalmente, serão demonstrados de forma conjunta os principais resultados dos monitoramentos das variáveis mais importantes, tal que se comparem todas as condições. Os perfis de operação durante os ciclos para cada condição estarão na parte final do item no qual a condição se refere. Dessa forma, é possível interpretar a relação entre as condições I, II e III, ou seja, as relações $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34, 0,67 e 0,34, respectivamente, e as estratégias de alimentação B, FB I e FB II, ou seja, tempos de alimentação de 10 min, 3 h e 6 h, respectivamente.

Ao término da operação foi estimada a concentração e quantidade de biomassa no reator, em termos de SVT (sólidos voláteis totais) dos grânulos. Como não houveram perdas e nem suplementações durante todas as condições e o volume ocupado pela biomassa manteve-se constante, considerou-se que durante toda a operação do reator a quantidade de biomassa manteve-se, entretanto como o volume útil do reator variou conforme a estratégia de alimentação, a concentração de biomassa durante os ensaios em batelada foi diferente da

concentração de biomassa nos ensaios em batelada alimentada de 3 e 6 horas, conforme mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Quantidade de biomassa no reator (X_{SVT}) e concentração de biomassa no reator ($C_{X_{SVT}}$) durante os ensaios em batelada e batelada alimentada.

Biomassa	Ensaio	
	Batelada	Batelada Alimentada
X_{SVT} (gSVT)	61,7	
$C_{X_{SVT}}$ (gSVT.L ⁻¹)	12,3 *	11,2 **

*: Volume total de meio líquido na operação em batelada igual a 5 L;

** : Volume total de meio líquido na operação em batelada alimentada igual a 5,5 L.

As quantidades de biomassa no reator são fatores fundamentais para se determinar as cargas específicas aplicadas e removidas no reator durante as operações, que constituem em um importante parâmetro de comparação de eficiência.

5.1 Ensaio Preliminar

A operação do reator durante a etapa de ensaio preliminar durou 66 dias, nos quais o reator operou com ciclos de 8 horas em batelada, tratando água residuária sintética com uma concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 373 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (relação DQO/[SO₄²⁻] = 1,34).

Durante esta condição a biomassa se manteve com boas características de sedimentação, tal que não houve perdas de lodo durante a fase de descarga do reator. Além disso, como manutenção, a bomba de descarga foi limpa com uma frequência de uma vez por semana e a bomba de alimentação foi limpa com uma frequência de uma vez a cada 15 dias.

Deve-se ressaltar que os resultados obtidos durante estes ensaios preliminares não devem ser considerados na avaliação de desempenho do reator, visto que se trata apenas de uma condição de partida; além disso, os métodos analíticos utilizados também foram adequados neste período.

Os resultados obtidos nessa etapa estão apresentados na Tabela 5.2 e na Figuras 5.1 a 5.6. Os valores das variáveis monitoradas, das médias, desvios padrões, quantidades de amostras e valores máximos e mínimos, do afluente e do efluente, encontram-se no Apêndice A.

Tabela 5.2 – Resultados médios das variáveis monitoradas na operação do reator no ensaio preliminar em batelada e com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34^*$.

Variável	Afluente	Efluente
C_{ST} (mgDQO.L ⁻¹)	579 ± 73 (34)	124 ± 31 (34)
E_{ST} (%)	-	79 ± 5 (34)
C_{SF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	71 ± 16 (34)
E_{SF} (%)	-	88 ± 5 (34)
C_{SOT} (mgDQO.L ⁻¹)	-	106 ± 31 (34)
E_{SOT} (%)	-	81 ± 5 (34)
C_{SOF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	53 ± 16 (34)
E_{SOF} (%)	-	91 ± 3 (34)
C_{SO4} (mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)	-	28 ± 12 (27)
E_{SO4} (%)	349 ± 42 (26)	250 ± 42 (27)
DQO/[SO ₄ ²⁻]**	1,66	0,42
C_{SO3} (mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹)	-	7 ± 3 (9)
STD (mgSTD.L ⁻¹)	-	8 ± 4 (20)
C_{HS} (mgHS ⁻ .L ⁻¹)	-	6 ± 3 (20)
C_{H2S} (mgH ₂ S.L ⁻¹)	-	2 ± 1 (20)
pH	8,9 ± 0,4 (18)	7,7 ± 0,4 (22)
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	190 ± 29 (17)	354 ± 77 (17)
AI/AP	0,29 (17)	0,22 (17)
AVT (mgHAc.L ⁻¹)	61 ± 33 (17)	49 ± 27 (17)
ST (mg.L ⁻¹)	1801 ± 269 (6)	1486 ± 196 (5)
SVT (mg.L ⁻¹)	692 ± 160 (6)	356 ± 107 (5)
SST (mg.L ⁻¹)	133 ± 34 (6)	120 ± 48 (5)
SSV (mg.L ⁻¹)	68 ± 61 (6)	64 ± 5 (5)

* Os valores entre parênteses referem-se ao número de amostras analisadas

** Afluente: C_{SF}/C_{SO4} ; Efluente: C_{SOT}/C_{SO4}

Analisando as Figuras 5.1 e 5.2, pode-se verificar que os valores de concentração de matéria orgânica assumiram valores estáveis durante toda a operação, e uma eficiência de remoção de matéria orgânica sempre superior a 70% para amostras não filtradas e superior a 85% para amostras filtradas, caracterizando assim uma operação eficiente e estável, relativa a matéria orgânica.

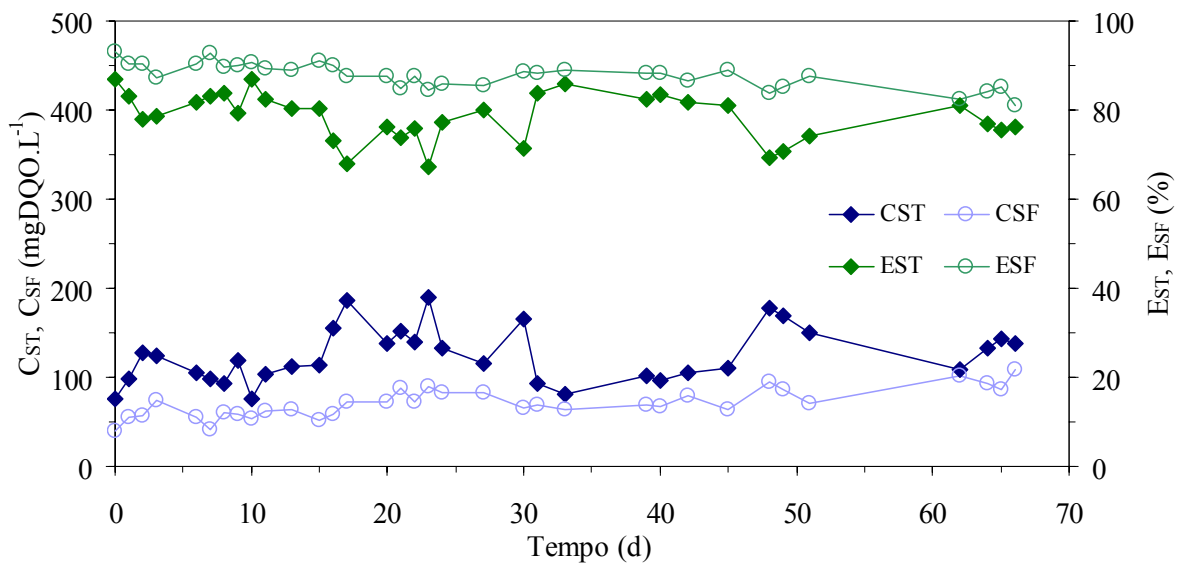


Figura 5.1 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF}) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF}) no reator operado durante o ensaio preliminar.

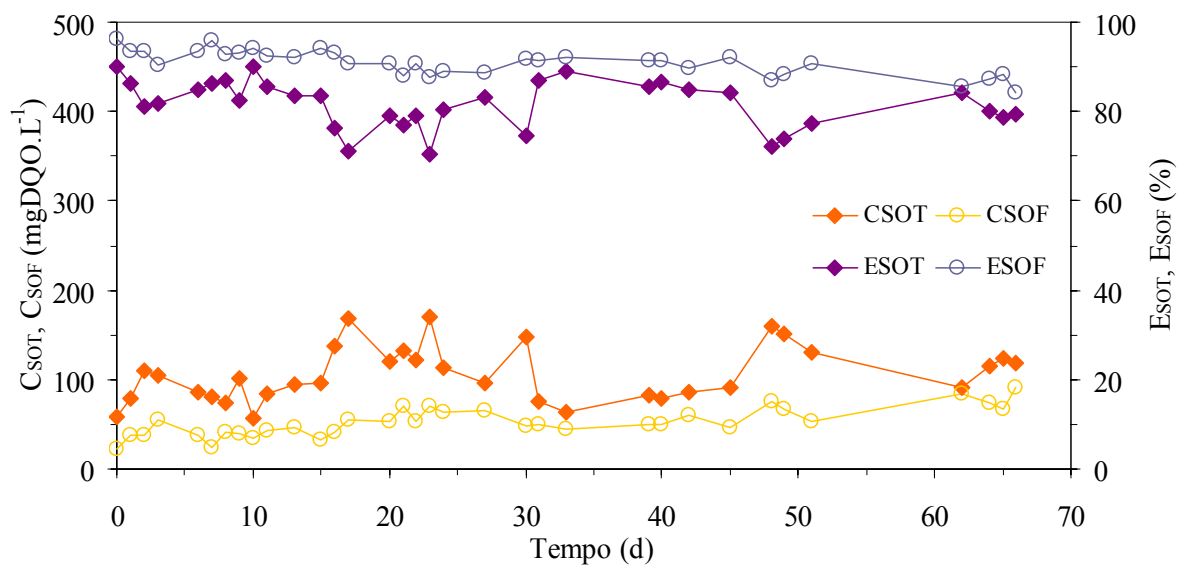


Figura 5.2 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado durante o ensaio preliminar.

O comportamento da concentração de sulfato, mostrada na Figura 5.3, se mostrou instável nos primeiros trinta dias de operação do reator, apresentando valores entre 311 e 140 $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$. Após este período, o reator passou a apresentar concentrações de sulfato entre 230 e 308 $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$, mostrando uma maior estabilidade que no período precedente, onde pode se inferir que a adaptação da biomassa ocorreu de maneira mais efetiva.

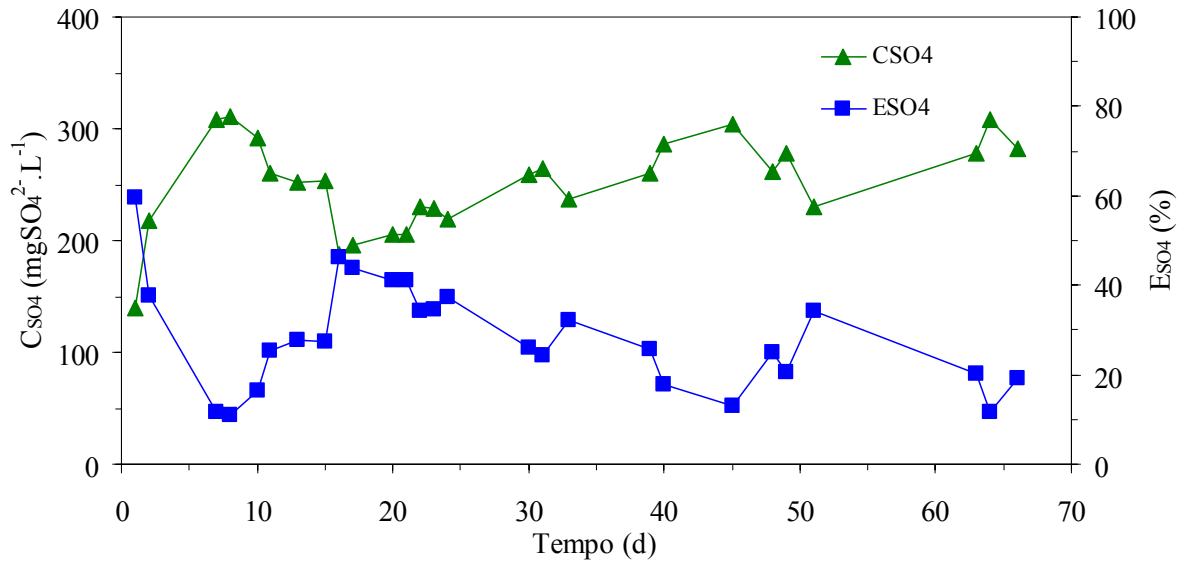


Figura 5.3 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}) no reator operado durante o ensaio preliminar.

A estabilização nos valores da concentração de sulfato a partir do 30º dia de operação, mostrada na Figura 5.3, pode ser verificada também a partir da Figura 5.4, que ilustra o comportamento da concentração de sulfeto total dissolvido, de sulfeto de hidrogênio e de sulfeto na forma HS^- , mostrando um leve aumento na produção de sulfetos após o 30º dia de operação.

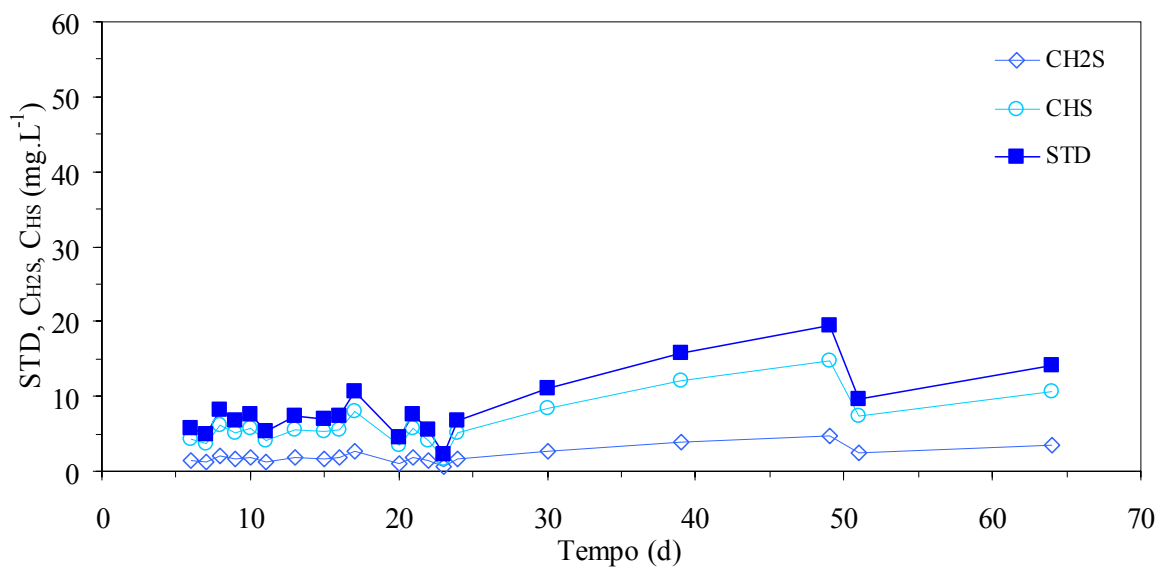


Figura 5.4 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- (C_{HS}) no reator operado durante o ensaio preliminar.

O valor do pH, mostrado na Figura 5.5, também se mostrou relativamente estável durante o ensaio preliminar, onde foi observado que o reator operou sempre na faixa da neutralidade considerada como ótima para a digestão anaeróbia.

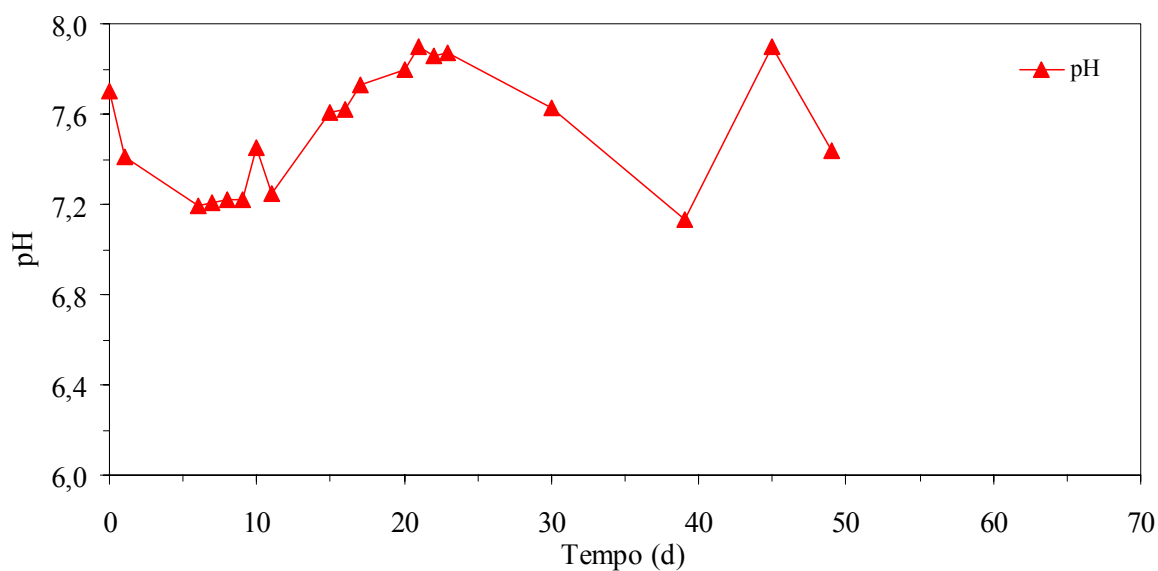


Figura 5.5 – Comportamento do pH no reator operado durante o ensaio preliminar.

Na Figura 5.6 são mostrados os comportamentos da concentração de ácidos voláteis totais (AVT) e da alcalinidade a bicarbonato (AB). Embora ambas variáveis apresentem uma variação mais pronunciada nos primeiros dez dias de operação, pode-se verificar que após este período o reator atinge valores que indicam estabilidade, sempre produzindo alcalinidade e mantendo os ácidos voláteis em níveis adequados.

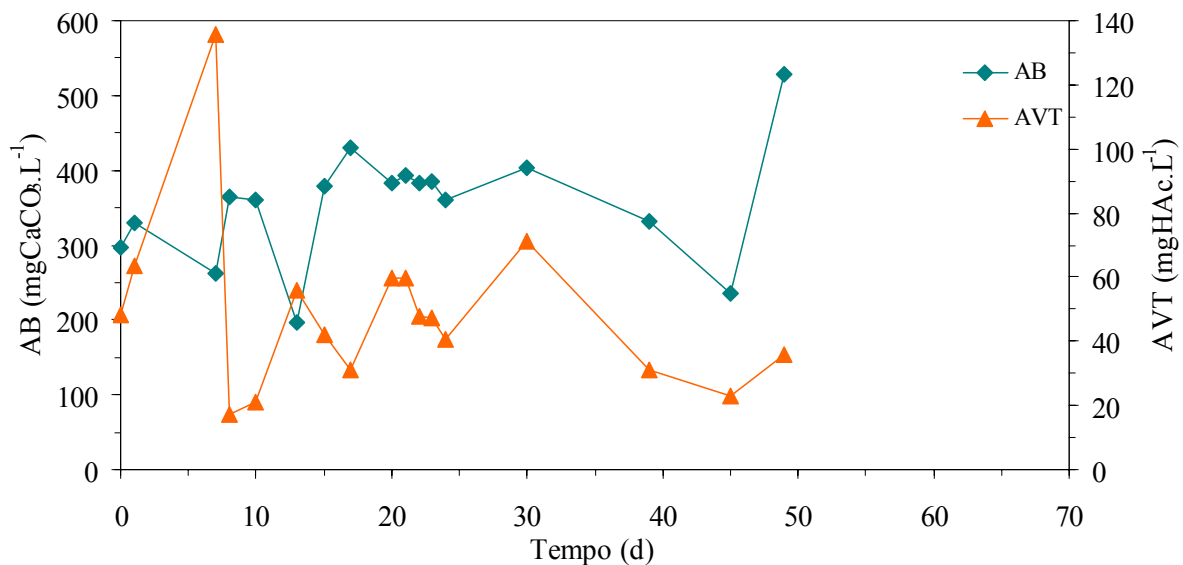


Figura 5.6 – Concentração de ácidos voláteis totais (AVT) e alcalinidade a bicarbonato (AB) no reator operado durante o ensaio preliminar.

Como mencionado anteriormente, a operação do reator neste período teve como objetivo verificar e adequar os métodos analíticos a serem utilizados durante os demais ensaios e adaptar previamente o inóculo a água residuária sintética, objetivando principalmente uma partida adequada do reator. Após a verificação da estabilidade dos valores, prosseguiu-se para os ensaios nos quais o reator operou com a relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34, mantendo-se a concentração de matéria orgânica em 500 mgDQO.L^{-1} e variando a estratégia de alimentação, conforme mostrado a seguir.

5.2 Condição I – Reator Tratando Água Residuária na Relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$

Em seguida ao ensaio preliminar, o reator operou na condição I por 93 dias, tal que se variou a estratégia de alimentação, divididos nas condições Ia (batelada, 26 dias), Ib (batelada alimentada 3h, 33 dias) e Ic (batelada alimentada 6 h, 34 dias), nos quais o reator operou sempre com ciclos de 8 horas, tratando água residuária sintética com uma concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L^{-1} e concentração de sulfato de $373 \text{ mgSO}_4^{2-}.\text{L}^{-1}$ (relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$).

Importante salientar que a biomassa presente no reator é a mesma da etapa anterior, a qual se manteve durante toda a condição I, herdando sempre da condição precedente uma biomassa mais adaptada ao afluente.

Na operação do reator nas condições Ib e Ic, relativas aos ensaios em batelada alimentada, foi necessário aumentar o volume total de meio líquido do reator de 1,0 L para 1,5 L, tal que o *draft-tube* ficasse totalmente imerso, e conseqüentemente efetivo, desde o início do ciclo de operação. As dimensões do *draft-tube* também foram modificadas objetivando um melhor desempenho na agitação do reator, assim como a frequência de agitação foi reduzida para 140 rpm para que não houvesse transpasse do lodo para dentro do *draft-tube*, o que provocaria uma maceração do grânulo pelo impelidor.

Embora o reator tenha se mantido anaeróbio, pode-se observar durante os ensaios uma pequena incrustação de enxofre molecular na interface do meio reacional com o ar no *headspace* do reator, indicando que houve uma oxidação do sulfeto.

Assim como na operação do ensaio preliminar, nesta condição a biomassa se manteve com boas características de sedimentação, não havendo perdas de lodo durante a fase de descarga do reator. Durante a condição Ia (operação em batelada) se manteve o procedimento de manutenção do reator, conservando a periodicidade de limpeza da bomba de descarga (semanalmente) e da bomba de alimentação (1 vez a cada 15 dias). No entanto, nos ensaios relativos às condições Ib e Ic (operações em batelada alimentada) a frequência de limpeza da bomba de alimentação foi maior, sendo realizada semanalmente, já que foi observado maior acúmulo de material viscoso na bomba e na tubulação de alimentação.

Os resultados de monitoramento obtidos nessa etapa estão apresentados na Tabela 5.3 a 5.5 e na Figuras 5.7 a 5.13. Uma análise comparativa entre as condições Ia, Ib e Ic está ilustrada nos histogramas representados pelas Figuras 5.14 a 5.17, enquanto os resultados dos perfis estão demonstrados nas Figuras 5.18 a 5.24. Os valores das variáveis monitoradas, dos resultados dos perfis realizados e das médias, desvios padrões, quantidades de amostras e valores máximos e mínimos, do afluente e do efluente, para as condições Ia, Ib e Ic encontram-se nos Apêndices B, C e D, respectivamente.

Tabela 5.3 – Resultados médios das variáveis monitoradas na operação do reator na condição I com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34^*$.

Variável	Afluente	Efluente		
		Condição Ia	Condição Ib	Condição Ic
C_{ST} (mgDQO.L ⁻¹)	518 ± 43 (33)	123 ± 18 (13)	279 ± 42 (16)	247 ± 19 (14)
E_{ST} (%)	-	76 ± 3 (13)	46 ± 8 (16)	52 ± 4 (14)
C_{SF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	93 ± 14 (13)	208 ± 36 (17)	176 ± 32 (13)
E_{SF} (%)	-	82 ± 3 (13)	60 ± 7 (17)	66 ± 6 (13)
C_{SOT} (mgDQO.L ⁻¹)	-	100 ± 18 (13)	239 ± 42 (16)	176 ± 19 (14)
E_{SOT} (%)	-	81 ± 3 (13)	54 ± 8 (16)	66 ± 4 (14)
C_{SOF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	70 ± 14 (13)	168 ± 36 (17)	106 ± 32 (13)
E_{SOF} (%)	-	87 ± 3 (13)	68 ± 7 (17)	80 ± 6 (13)
C_{SO_4} (mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)	389 ± 31 (32)	273 ± 19 (10)	109 ± 41 (17)	109 ± 80 (13)
E_{SO_4} (%)	-	30 ± 5 (10)	72 ± 11 (17)	72 ± 21 (13)
$DQO/[SO_4^{2-}]^{**}$	1,3 ± 0,1 (31)	0,37 ± 0,08 (10)	2,59 ± 1,36 (16)	2,66 ± 1,87 (13)
C_{SO_3} (mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹)	-	32 ± 11 (8)	4 ± 2 (7)	8 ± 4 (5)
STD (mgSTD.L ⁻¹)	-	8 ± 4 (7)	20 ± 9 (7)	35 ± 14 (6)
C_{HS} (mgHS ⁻ .L ⁻¹)	-	5 ± 3 (7)	15 ± 6 (7)	25 ± 10 (6)
C_{H_2S} (mgH ₂ S.L ⁻¹)	-	2 ± 1 (7)	5 ± 2 (7)	9 ± 4 (6)
pH	8,6 ± 0,2 (16)	7,4 ± 0,2 (6)	7,5 ± 0,1 (7)	7,5 ± 0,2 (8)
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	215 ± 71 (14)	338 ± 48 (5)	587 ± 93 (7)	481 ± 76 (8)
AI/AP	0,3 ± 0,0 (14)	0,3 ± 0,1 (6)	0,3 ± 0,0 (7)	0,3 ± 0,0 (8)
AVT (mgHAc.L ⁻¹)	43 ± 18 (14)	55 ± 30 (6)	27 ± 6 (7)	23 ± 7 (8)
ST (mg.L ⁻¹)	1626 ± 111 (9)	1443 ± 15 (3)	1228 ± 94 (5)	1255 ± 96 (5)
SVT (mg.L ⁻¹)	527 ± 101 (9)	453 ± 87 (3)	270 ± 55 (5)	328 ± 96 (5)
SST (mg.L ⁻¹)	86 ± 48 (9)	95 ± 30 (3)	89 ± 44 (5)	121 ± 34 (5)
SSV (mg.L ⁻¹)	42 ± 24 (9)	59 ± 13 (3)	64 ± 31 (5)	78 ± 17 (5)

* Os valores entre parênteses referem-se ao número de amostras analisadas

** Afluente: C_{SF}/C_{SO_4} ; Efluente: C_{SOT}/C_{SO_4}

Tabela 5.4 – Cargas volumétricas e específicas aplicadas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato na operação do reator na condição I com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34^*$.

Carga	Condição Ia	Condição Ib	Condição Ic
COA (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,59 ± 0,03 (10)	0,57 ± 0,03 (14)	0,60 ± 0,07 (9)
COAE (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	48 ± 2 (10)	50 ± 3 (14)	53 ± 6 (13)
CSA (gSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,46 ± 0,02 (11)	0,43 ± 0,05 (13)	0,42 ± 0,03 (8)
CSAE (mgSO ₄ ²⁻ .gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	38 ± 2 (11)	35 ± 4 (13)	34 ± 2 (8)

* Os valores entre parênteses referem-se ao número de amostras analisadas

Tabela 5.5 – Cargas volumétricas e específicas removidas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato na operação do reator na condição I com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34^*$.

Carga	Condição Ia	Condição Ib	Condição Ic
COR _{ST} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,47 ± 0,03 (13)	0,26 ± 0,05 (16)	0,30 ± 0,02 (14)
COR _{SF} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,51 ± 0,02 (13)	0,34 ± 0,04 (17)	0,37 ± 0,04 (13)
COR _{SOT} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,50 ± 0,02 (13)	0,30 ± 0,05 (16)	0,37 ± 0,02 (14)
COR _{SOF} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,54 ± 0,02 (13)	0,38 ± 0,04 (17)	0,45 ± 0,04 (13)
CORE _{ST} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	38 ± 2 (13)	23 ± 4 (16)	26 ± 3 (14)
CORE _{SF} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	41 ± 1 (13)	30 ± 3 (17)	33 ± 3 (13)
CORE _{SOT} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	41 ± 2 (13)	27 ± 4 (16)	33 ± 2 (14)
CORE _{SOF} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	44 ± 1 (13)	34 ± 3 (17)	40 ± 3 (13)
CSR (gSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,14 ± 0,02 (10)	0,31 ± 0,04 (17)	0,31 ± 0,09 (13)
CSRE (mgSO ₄ ²⁻ .gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	11 ± 2 (10)	27 ± 4 (17)	27 ± 8 (13)

* Os valores entre parênteses referem-se ao número de amostras analisadas

A Figura 5.7 mostra o comportamento da concentração de matéria oxidável, total e filtrada, e mostra que a operação Ib (na qual o reator foi operado em batelada alimentada de 3 horas) foi a menos eficiente em termos de redução de matéria oxidável, ao passo que a condição Ia (reator operado em batelada) mostrou maior eficiência; e salienta-se que a matéria oxidável inclui as formas oxidáveis de enxofre (sulfeto e sulfito), além da matéria orgânica.

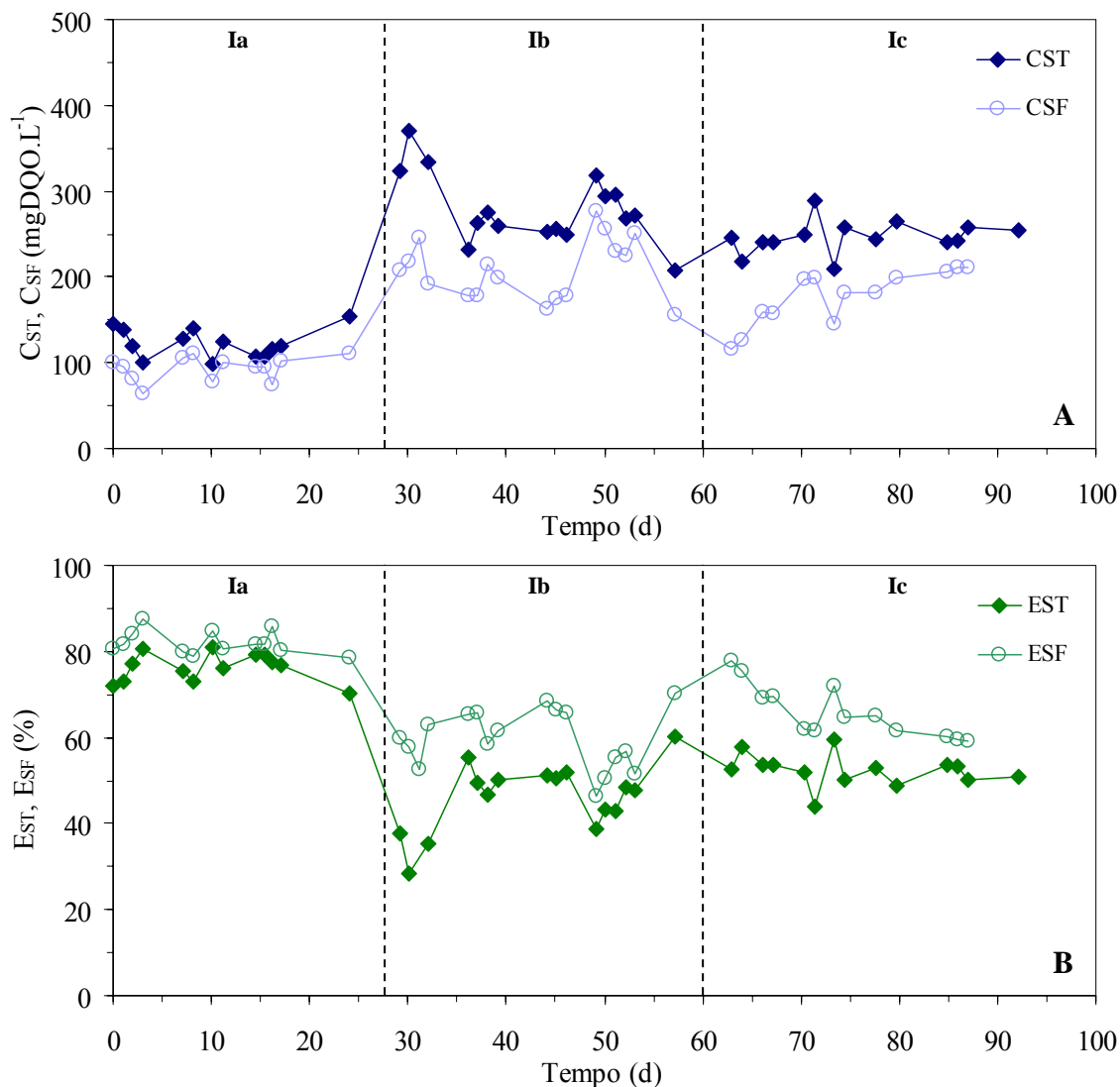


Figura 5.7 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST}, C_{SF}; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST}, E_{SF}; Gráfico B) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

A Figura 5.8 ilustra a concentração de matéria orgânica, total e filtrada, durante a operação do sistema na condição I. Pode-se verificar que a operação nas condições Ib e Ic (bateladas alimentadas de 3 e 6 horas, respectivamente) foram a menos eficientes em termos de remoção de matéria orgânica, tal que se observa um decréscimo mais acentuado na eficiência durante a condição Ib.

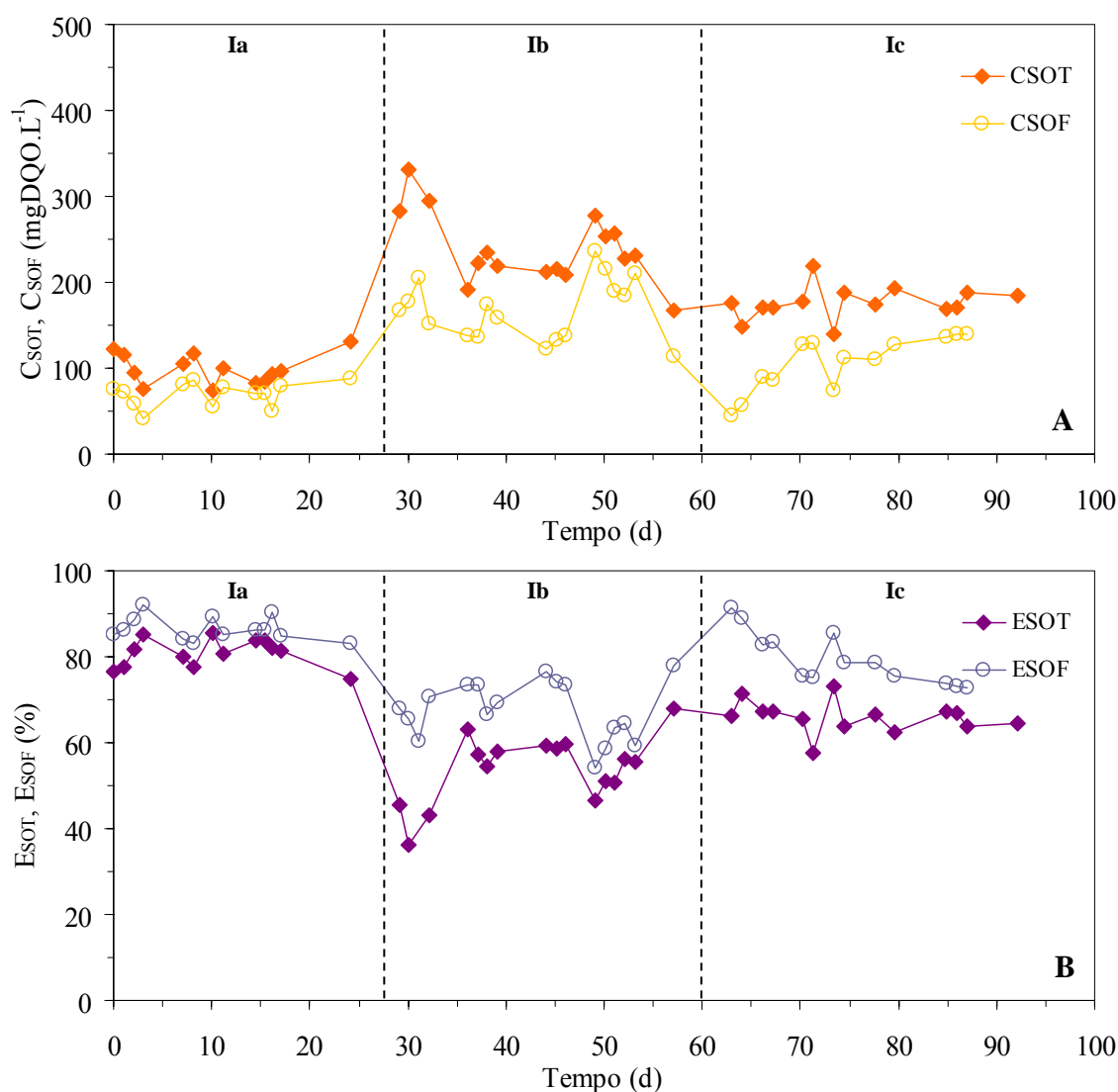


Figura 5.8 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT}, C_{SOF}; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT}, E_{SOF}; Gráfico B) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Entretanto, observou-se uma tendência inversa em termos de eficiência, quando se analisa a concentração de sulfato, demonstrada pela Figura 5.9, onde está analisado o comportamento da concentração de sulfato no reator, mostrando que as operações Ib e Ic (operações em batelada alimentada de 3 e 6 horas) foram as mais eficientes na redução de sulfato, tal que uma análise das médias de concentração de sulfato nestas condições (109 ± 41 para a condição Ib e 109 ± 80 para a condição Ic) mostra que as eficiências foram estatisticamente iguais, considerando uma significância de 95% (o teste F realizado apresentou um P-valor de 0,985, considerando os valores das médias das concentrações de sulfato iguais como hipótese nula) nas operações em batelada alimentada, sendo que a queda na eficiência nos primeiros dias da condição Ic (na qual o reator operou em batelada alimentada de 6 horas) pode ser atribuída a uma ligeira instabilidade na mudança de condições.

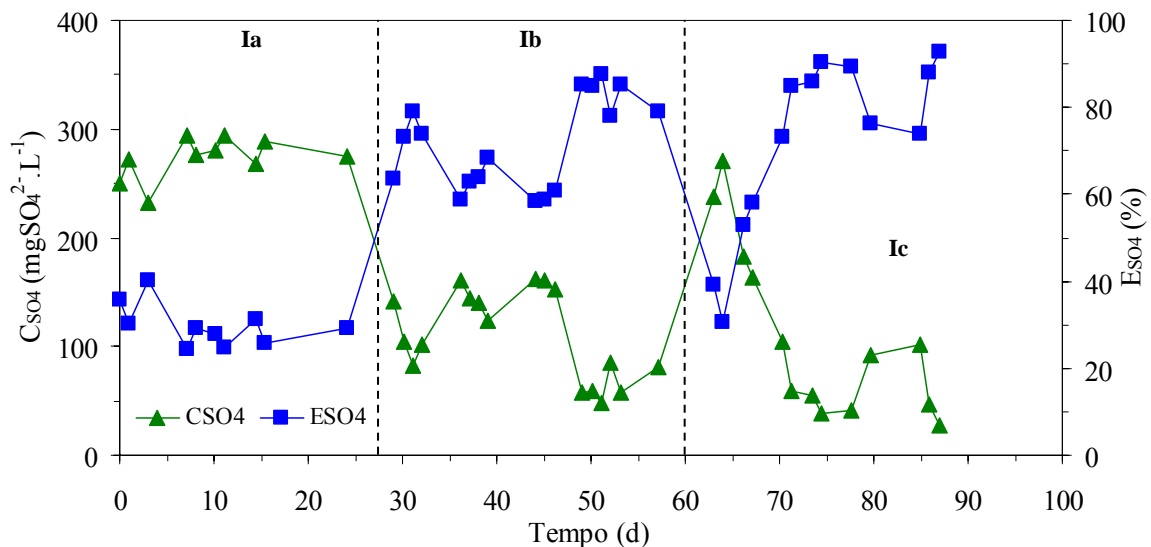


Figura 5.9 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

A Figura 5.10 ilustra a relação entre a carga de sulfato removida e a carga orgânica removida (para amostras filtradas), sendo que as linhas pretas apresentadas no gráfico correspondem à média dos valores durante a condição. A relação entre cargas removidas de sulfato e matéria orgânica fornece um indicativo do consumo da matéria orgânica utilizado em processos sulfetogênicos. É possível, nesta relação, estabelecer um patamar estequiométrico teórico no qual toda a matéria orgânica foi consumida para reduzir o sulfato, sendo este valor correspondente a 1,49, considerando que a razão estequiométrica teórica para que o reator se torne sulfetogênico é $DQO/[SO_4^{2-}]$ igual a 0,67, uma relação entre uma carga de sulfato e uma carga de matéria orgânica, em uma mesma operação, define que esta razão se torna estequiométrica no inverso de 0,67. Assim, na Figura 5.10, pode-se verificar que na condição Ib, o reator melhor utilizou a matéria orgânica no consumo de sulfato. Entretanto, esta análise foi realizada em conjunto com uma análise do comportamento da concentração de matéria orgânica para amostras filtradas (C_{SOT} , Figura 5.8, Gráfico A) e também com uma análise do comportamento da concentração de sulfato (C_{SO_4} , Figura 5.9), pois um aumento no valor da relação CSR/COR_{SOF} poderia indicar apenas um maior consumo de matéria orgânica, sem haver aumento na eficiência de redução de sulfato, tornando a análise da relação CSR/COR_{SOF} inconclusiva no tocante a forma de utilização do substrato orgânico pelas comunidades microbianas.

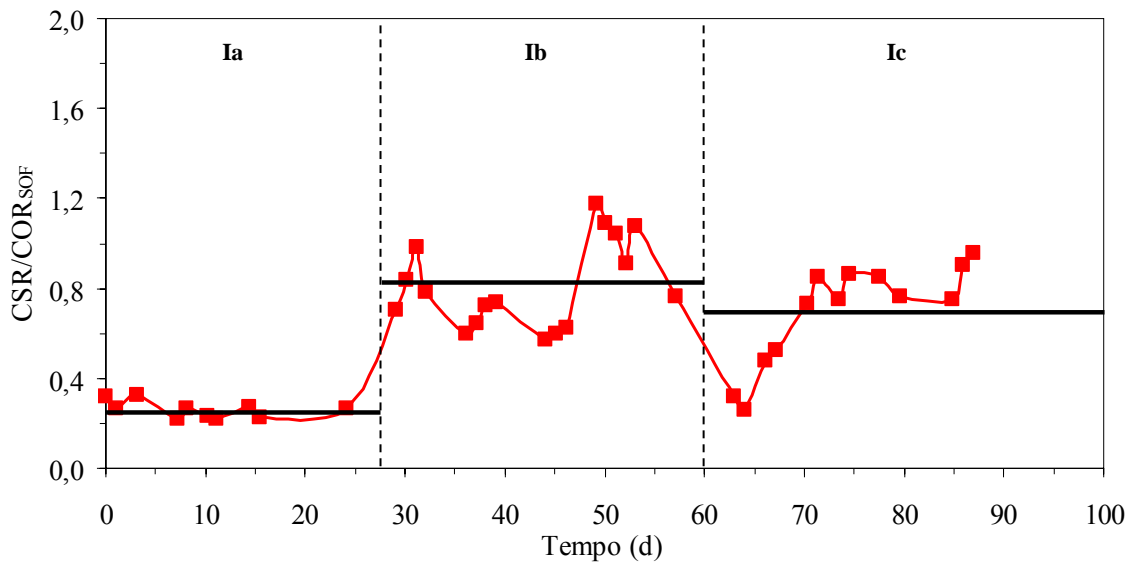


Figura 5.10 – Relação entre carga de sulfato removida (CSR) e carga orgânica removida para amostras filtradas (COR_{SOF}), no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

A produção de sulfeto (STD , C_{H_2S} e C_{HS}) pelo reator durante a operação na condição I está mostrada na Figura 5.11. As concentrações de sulfeto no reator aumentaram conforme aumentava o tempo de enchimento do reator, fato este corroborado pelo aumento na eficiência na redução de sulfato nos ensaios em batelada alimentada. As concentrações de sulfeto e o pH durante o monitoramento da condição I estão mostrados no gráfico representado pela Figura 5.12.

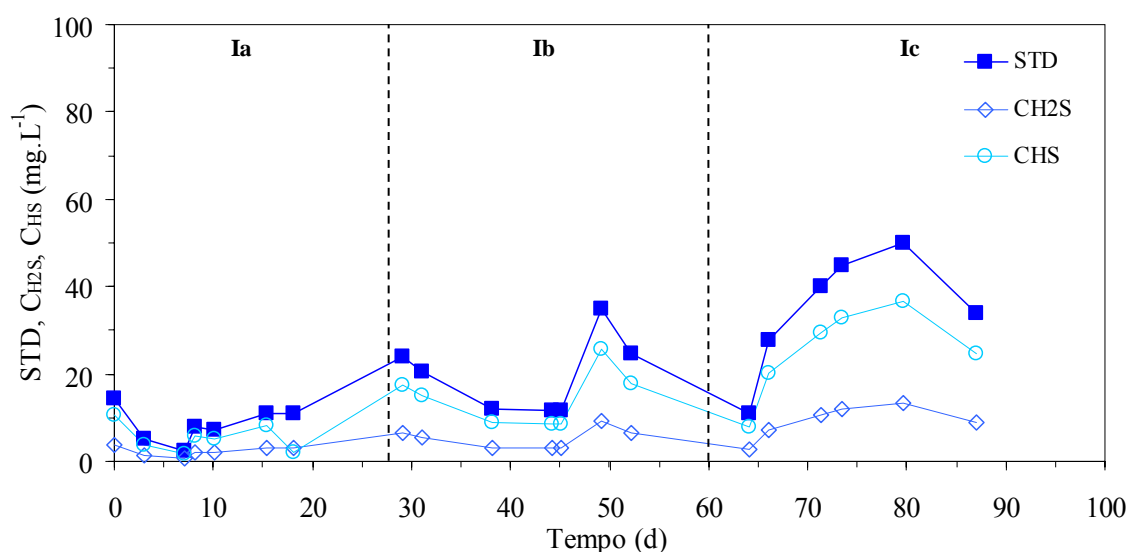


Figura 5.11 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- (C_{HS}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Pode-se verificar que os valores de sulfeto, mostrados na Figura 5.12, durante a condição Ia (reator operado em batelada) se mantiveram maiores que nas demais condições, corroborando a baixa eficiência em redução de sulfato na operação desta condição, visto que o sulfeto se oxida rapidamente a sulfato na presença do ar atmosférico e, embora o reator tenha sido operado anaerobiamente, durante a descarga o efluente teve contato com o ar atmosférico.

Os valores de pH ilustrados na Figura 5.12 mostram-se na mesma faixa de valores verificada nos ensaios preliminares, embora com menos variabilidade, tal que o pH se manteve próximo de 7,5 em todas as condições, indicando uma estabilidade do sistema durante todas as operações das condições Ia (reator operado em batelada), Ib (reator operado em batelada alimentada de 3 horas) e Ic (reator operado em batelada alimentada de 6 horas).

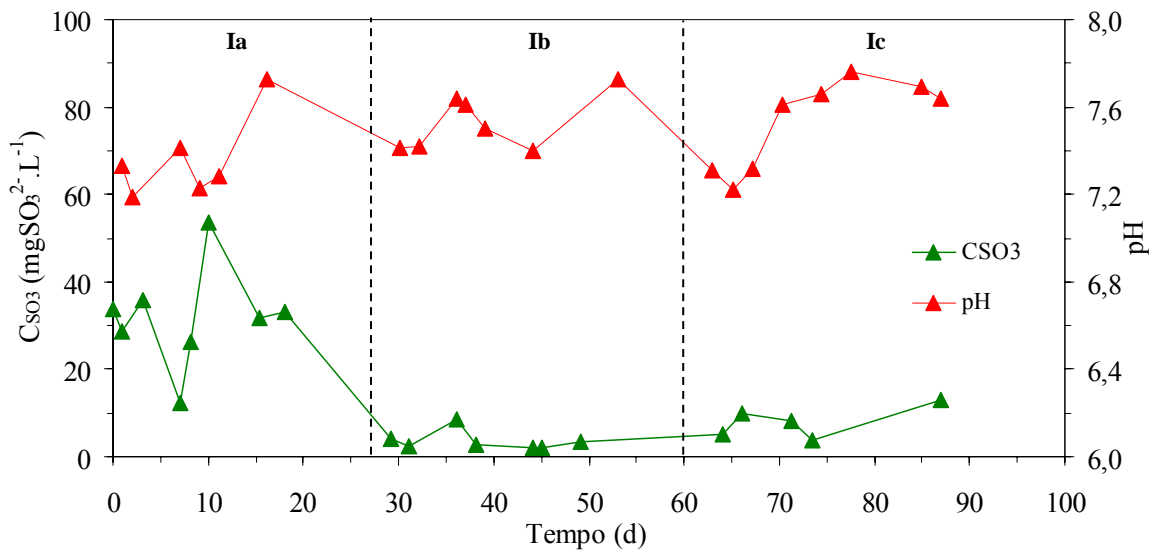


Figura 5.12 – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) e pH no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

A estabilidade pode ser finalmente verificada pelo acompanhamento dos resultados das concentrações de ácidos voláteis totais (AVT) e de alcalinidade a bicarbonato (AB), representados na Figura 5.13. Os ácidos voláteis totais se mostraram estáveis e em níveis adequados para uma operação estável em um reator anaeróbio, exceto no início da operação da condição Ia (reator operado em batelada) onde foi averiguado um pico de ácidos, talvez pelo início da condição. Entretanto, os ácidos produzidos inicialmente foram consumidos após 10 dias de operação tal que os valores a partir de então se apresentaram satisfatórios, no que tange a estabilidade.

Os valores de concentração de ácidos voláteis se mantiveram próximos em todas as condições (desprezando os dados iniciais da condição Ia), mostrando que embora houvesse um aumento na eficiência do consumo de sulfato, não foi possível inferir se a estratégia de alimentação interferiu na forma como o sulfato é metabolizado, consumindo mais ácidos voláteis (oxidação completa) ou produzindo estes ácidos (oxidação incompleta).

Houve pouca produção de alcalinidade na condição Ia quando comparada com as condições Ib e Ic (nas quais o reator operou em batelada alimentada de 3 e 6 horas, respectivamente), onde apesar da ocorrência de alguma variabilidade, a alcalinidade a bicarbonato sempre foi produzida com relação ao afluente ($215 \pm 71 \text{ mgCaCO}_3\text{.L}^{-1}$), sendo este mais um indicativo de estabilidade do sistema.

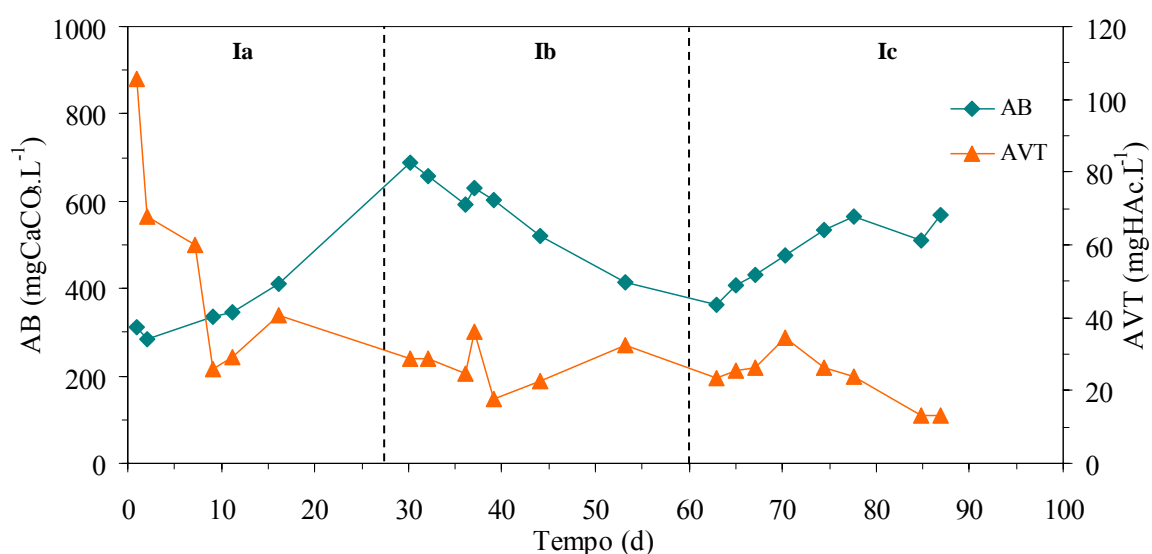


Figura 5.13 – Concentração de ácidos voláteis totais (AVT) e alcalinidade a bicarbonato (AB) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

A seguir serão apresentados os histogramas comparando as operações em batelada (B) com as operações em batelada alimentada de 3 horas (FB I – condição Ia) e de 6 horas (FB II), correspondentes as condições Ia, Ib e Ic, respectivamente.

A Figura 5.14 compara as médias de concentração de matéria orgânica, total e filtrada, e suas respectivas eficiências. A operação em batelada alimentada de 3 horas (FB I) foi a operação que apresentou as menores eficiências, enquanto a operação em batelada (B) mostrou um melhor desempenho na remoção de matéria orgânica.

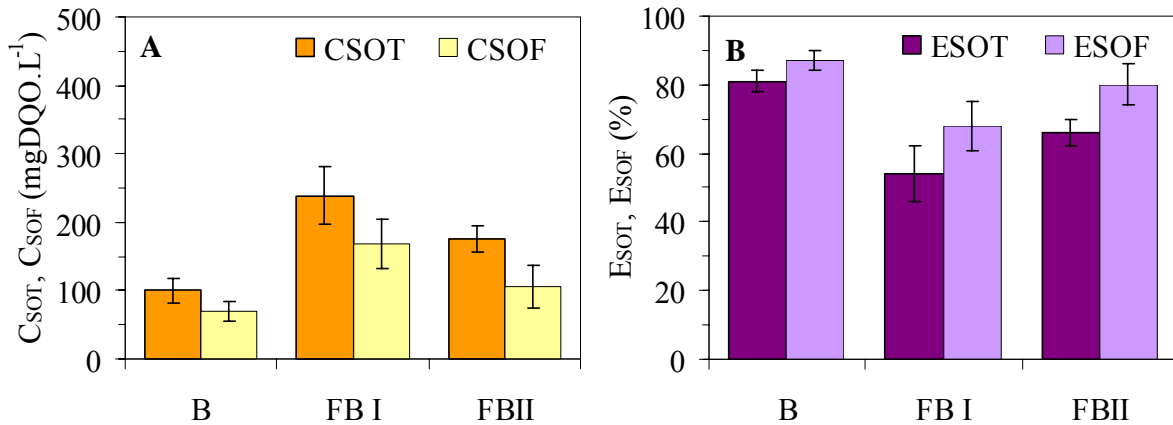


Figura 5.14 – Comparação entre as médias de concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição I.

Pode-se observar, na Figura 5.15, a comparação entre as cargas orgânicas aplicadas e removidas, em termos de volume (COV) e especificamente em relação à concentração de biomassa (COE). Novamente, podemos verificar que o desempenho do sistema foi superior na operação em batelada (B) quando comparado com as bateladas alimentadas (FB I e FB II).

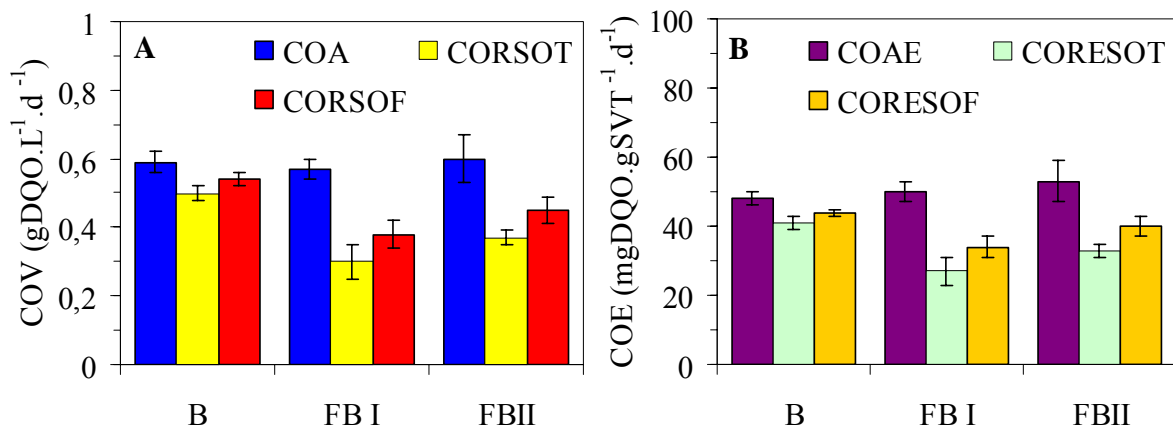


Figura 5.15 – Comparação entre as médias das cargas orgânicas volumétricas (COA, COR_{SOT} , COR_{SOF} ; Gráfico A) e cargas orgânicas específicas (COAE, $CORE_{SOT}$, $CORE_{SOF}$; Gráfico B) no reator operado na condição I.

A Figura 5.16 mostra a comparação entre as concentrações de sulfato no afluente do reator e suas respectivas eficiências, onde mostra que as operações em batelada alimentada (FB I e FB II) são mais favorecidas na redução de sulfato que a operação em batelada (B), nesta relação DQO/[SO₄²⁻] de 1,34 (condição I).

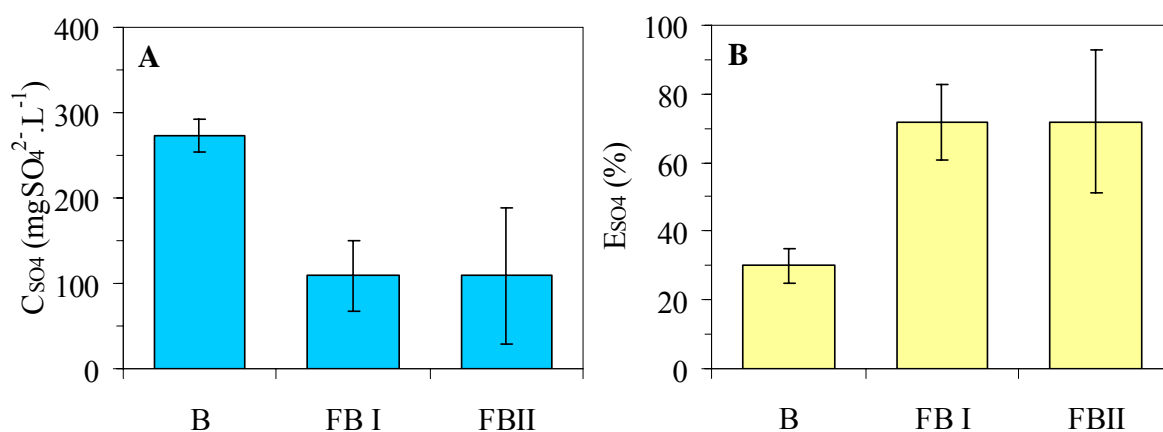


Figura 5.16 – Comparação entre as médias de concentração de sulfato (C_{SO4}; Gráfico A) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}; Gráfico B) no reator operado na condição I.

Na Figura 5.17 pode-se observar a comparação entre as cargas de sulfato aplicadas e removidas, em termos de volume (CSV) e especificamente em relação à concentração de biomassa (CSE). Verifica-se que as operações em batelada alimentada (FB I e FB II) mostraram melhor desempenho na remoção da carga de sulfato que a operação em batelada (B), corroborando que as operações em batelada alimentada tornam o sistema mais eficiente na redução de sulfato.

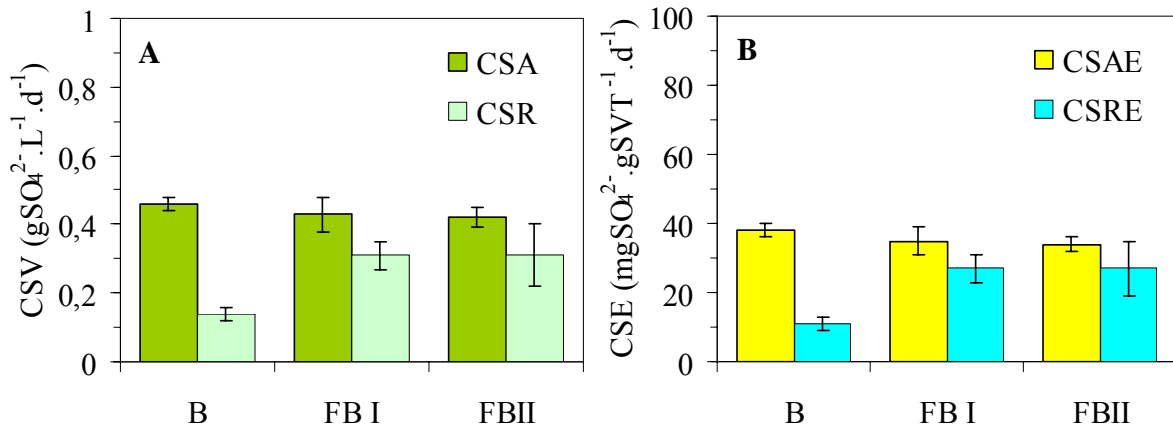


Figura 5.17 – Comparação entre as médias das cargas volumétricas de sulfato (CSA, CSR; Gráfico A) e cargas específicas de sulfato (CSAE, CSRE; Gráfico B) no reator operado na condição I.

A seguir estão apresentados os resultados dos perfis realizados durante o ciclo de operação do reator, para as condições Ia (reator operado em batelada), Ib (reator operado em batelada alimentada de 3 horas) e Ic (reator operado em batelada alimentada de 6 horas), comparativamente.

Durante os perfis de concentração de matéria oxidável e concentração de matéria orgânica filtradas, mostrados pela Figura 5.18 em termos de DQO, pode-se observar que na operação em batelada (Ia), houve um rápido consumo inicial da matéria oxidável e orgânica seguido por um período de estabilidade nestes valores, até o fim do ciclo. Na operação em batelada alimentada de 3 horas (Ib), foi verificado um aumento da concentração de matéria oxidável e orgânica até o término do enchimento do reator (3 horas), seguido por um consumo desta matéria no resto do ciclo. Já na operação na batelada alimentada de 6 horas (Ic), nota-se um aumento das concentrações de matéria oxidável e orgânica até a 2^a hora de operação, e depois as concentrações se mantiveram praticamente constantes. É importante ressaltar que os primeiros pontos dos perfis apresentam valores inferiores ao do afluente devido ao efeito de diluição no reator.

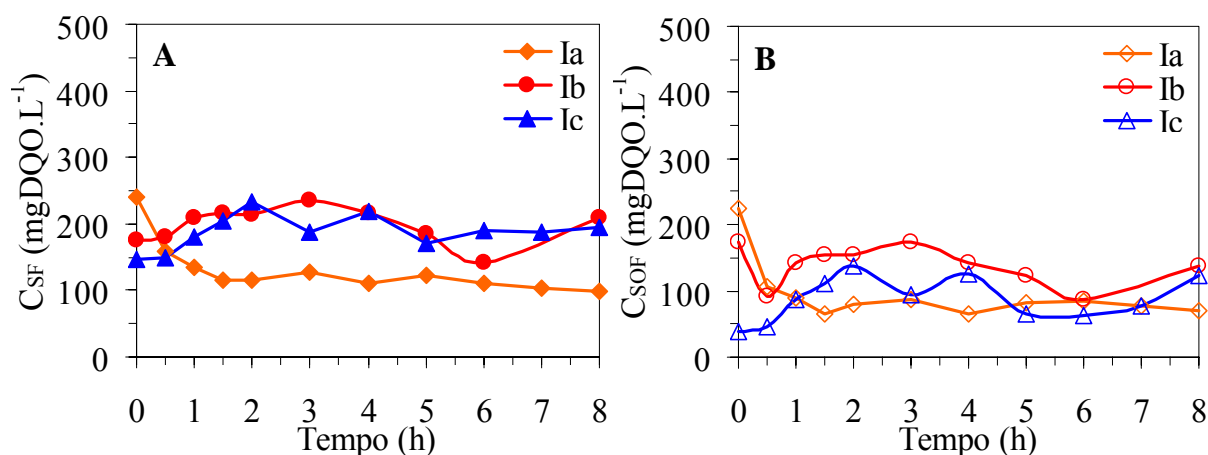


Figura 5.18 – Perfis de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF} ; Gráfico A) e de concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Os perfis de concentração de sulfato (Figura 5.19) no reator mostraram um comportamento análogo aos perfis de concentração de matéria orgânica, sendo que na operação durante a condição Ia, o perfil apresentou uma queda dos valores seguida por uma constância relativa, como é comum em sistemas operados em batelada. Já durante o perfil correspondente a operação na condição Ib (batelada alimentada de 3 horas), verifica-se o aumento da concentração de sulfato até o término da alimentação do reator, a partir da qual se observa a redução de sulfato de forma mais pronunciada. Por fim, durante a batelada alimentada de 6 horas (correspondendo à operação na condição Ic), os valores de concentração se mantiveram praticamente constantes até o término do carregamento do reator, sendo que logo após este período foi observado novamente um consumo mais pronunciado de sulfato. Assim como nos perfis de concentrações de matéria oxidável e matéria orgânica, vale salientar que os primeiros pontos dos perfis apresentam valores inferiores ao do afluente devido ao efeito de diluição no reator.

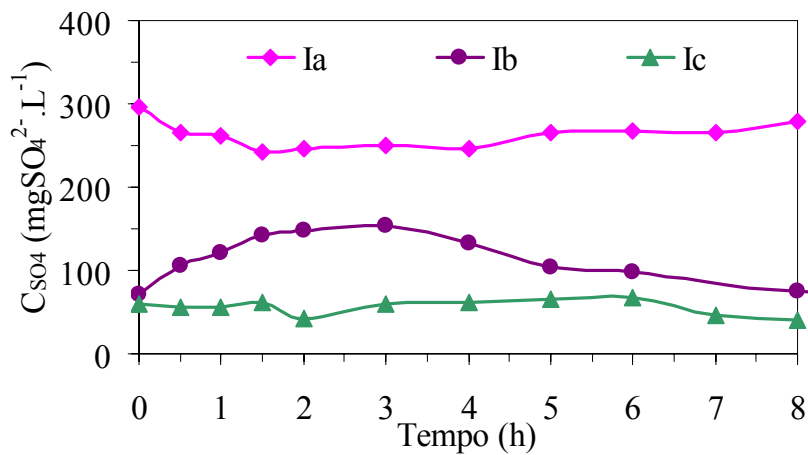


Figura 5.19 – Perfis de concentração de sulfato (C_{SO_4}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Na Figura 5.20 estão apresentados os perfis das condições Ia, Ib e Ic de sulfetos totais dissolvidos (STD), de sulfeto na forma HS^- e de sulfeto de hidrogênio (H_2S). A produção de sulfetos se apresentou relativamente constante durante todas as operações, sendo que os níveis de sulfeto produzidos condiziam com a eficiência na redução de sulfato no reator.

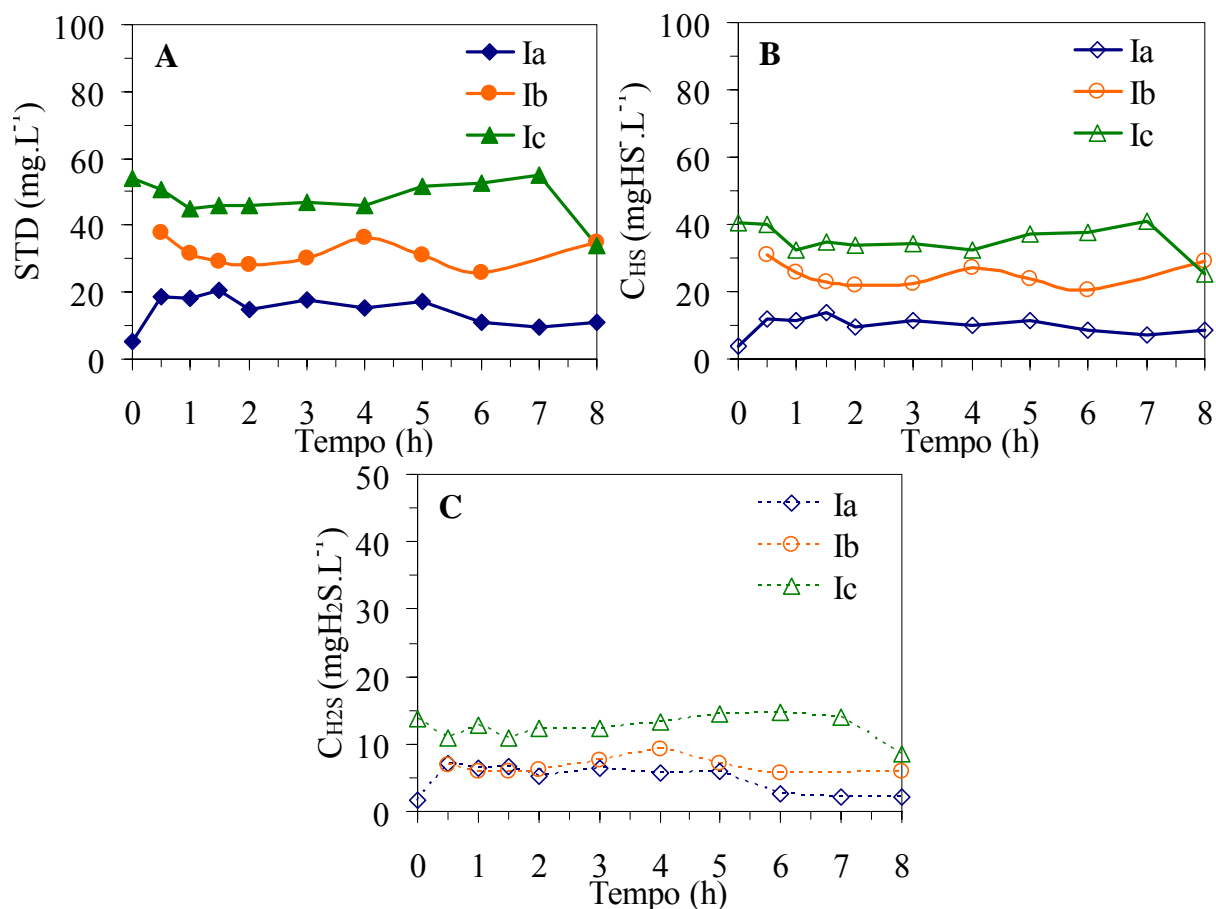


Figura 5.20 – Perfis de sulfetos totais dissolvidos (STD; Gráfico A), de sulfeto na forma HS⁻ (C_{HS}; Gráfico B) e de sulfeto de hidrogênio (C_{H₂S}; Gráfico C) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Os perfis de concentração de sulfito, apresentados na Figura 5.21, mostram que na condição Ia o comportamento da concentração de sulfito apresentou picos de produção deste íon nos primeiros 30 minutos e depois de 4 horas iniciado o ciclo. Já o perfil realizado para a condição Ib mostra um pico somente nos primeiros 30 minutos, enquanto no perfil realizado para a condição Ic mostra uma operação quase constante durante todo o ciclo.

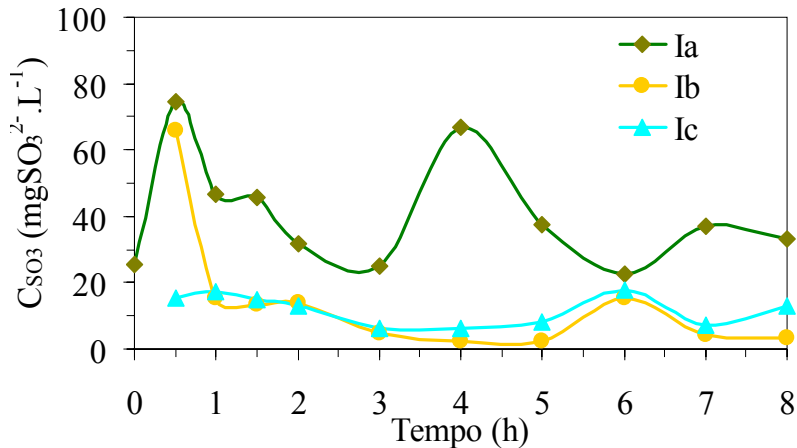


Figura 5.21 – Perfis de concentração de sulfito (C_{SO_3}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Os perfis de ácidos voláteis totais (AVT) e de alcalinidade a bicarbonato (AB) estão ilustrados na Figura 5.22. Analisando os perfis de ácidos voláteis, pode-se inferir que o pico de ácidos voláteis foi bem característico após a 1ª hora e até a 3ª hora de ciclo para a condição Ia, representando neste período uma fase de acidogênese mais pronunciada, comum em reatores operados em batelada. Nas operações em batelada alimentada (condições Ib e Ic), os perfis se mostraram mais constantes durante o ciclo, mostrando que o impacto da acidogênese é incorporado durante todo o ciclo, evitando que os ácidos acabem se acumulando. Também foi realizado o perfil de ácidos voláteis totais por cromatografia, entretanto foi detectado somente o ácido acético, na concentração de $32,8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, após 0,5 hora de perfil, na condição Ia; durante a condição Ib foi detectado somente ácido propiônico na concentração de $2,6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, depois de 2,0 horas de perfil e na análise de ácidos voláteis intermediários para a condição Ic não foi detectado nenhum dos ácidos analisados.

Os perfis de alcalinidade a bicarbonato (AB) indicam sempre uma geração de alcalinidade e também mostram que a variação na concentração da alcalinidade é reduzida. A partir dos perfis de alcalinidade e de ácidos voláteis, pode-se inferir que o sistema apresentou

boa capacidade de tamponamento, e conseqüentemente, uma operação estável. Assim, o perfil de pH que permite uma análise complementar à informação dos perfis de AVT e AB, está mostrado na Figura 5.23, juntamente com o perfil de potencial redox (POR).

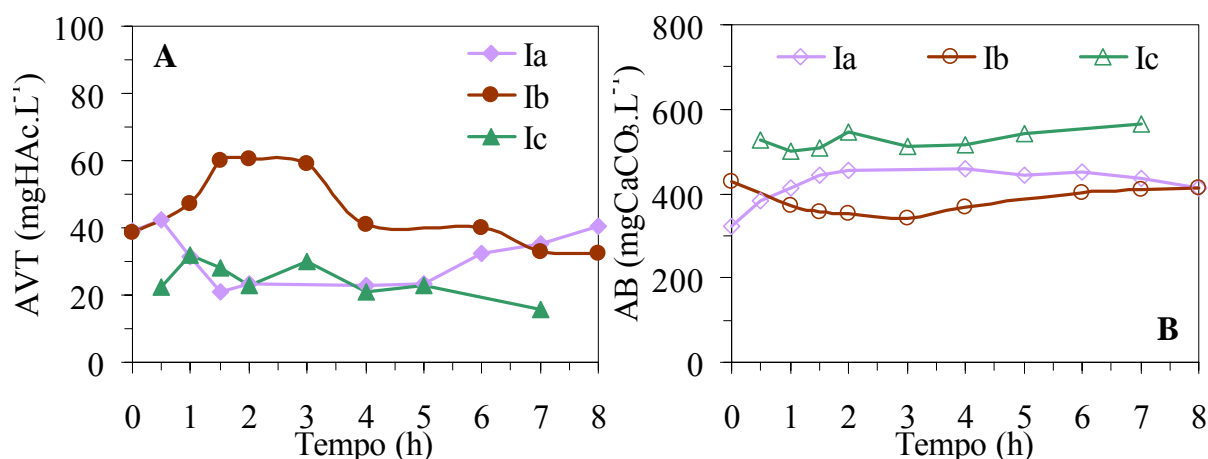


Figura 5.22 – Perfis de ácidos voláteis totais (AVT; Gráfico A) e de alcalinidade a bicarbonato (AB; Gráfico B) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

O comportamento do pH durante o ciclo nas operações Ia, Ib e Ic corrobora a estabilidade do reator, pois na condição Ia onde o pH se manteve nos valores mais baixos em relação às condições Ib e Ic, o menor valor de pH foi maior que 7,2 indicando que o reator operou dentro de uma faixa ótima para os processos anaeróbios. Já o perfil de potencial redox indicou o mesmo mantendo-se praticamente constante durante todo ciclo para todas as condições, sempre indicando valores menores que -300 mV. Vale ressaltar que nas condições Ia, Ib e Ic foram realizados os perfis de oxigênio dissolvido (OD), e em todas as condições o valor de concentração foi sempre 0,0 mg.L⁻¹, mais uma vez confirmando que o meio reacional se mostrava anaeróbio.

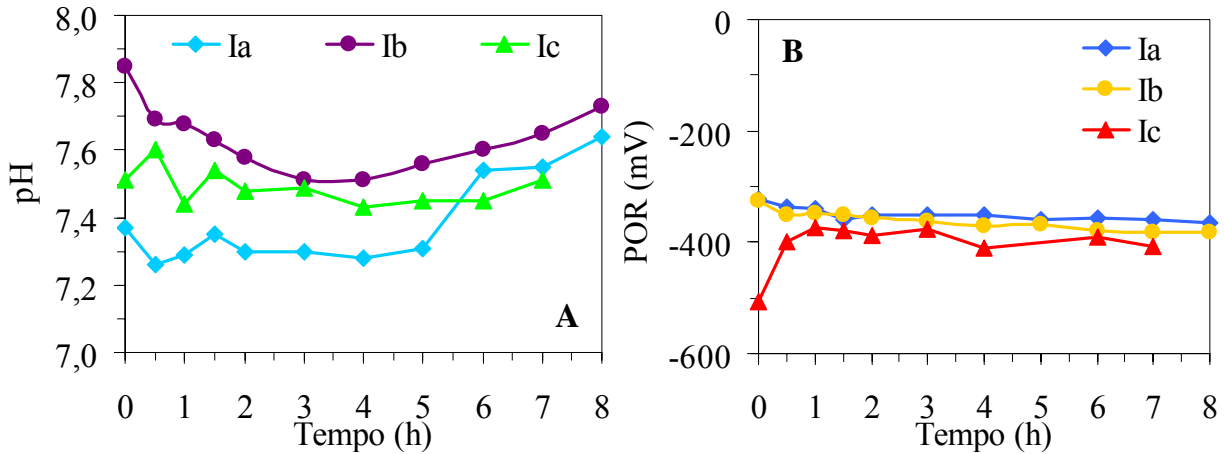


Figura 5.23 – Perfis de pH (pH; Gráfico A) e de potencial de oxi-redução (POR; Gráfico B) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

A Figura 5.24 mostra os perfis de concentração de gás carbônico (CO_2) e de metano (CH_4) no biogás. Pode-se notar que a concentração de metano no biogás não se alterou significativamente, conforme aumentava o tempo de enchimento do reator, e que a concentração de gás carbônico no biogás foi maior na condição Ia (batelada) e menor na condição Ib (batelada alimentada de 3 horas). Estes perfis condizem com o comportamento do reator nos perfis de remoção de matéria orgânica e de redução de sulfato, onde pode-se observar que na condição Ia houve maior produção de gás carbônico visto que foi a condição que apresentou maior eficiência na remoção de matéria orgânica.

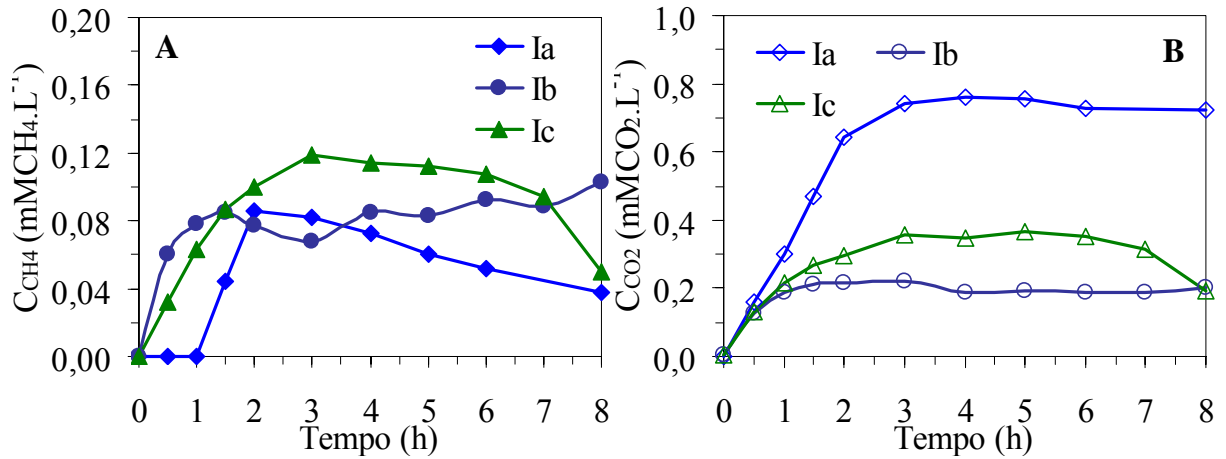


Figura 5.24 – Perfis de concentração de metano (C_{CH_4} ; Gráfico A) e de concentração de gás carbônico (C_{CO_2} ; Gráfico B) no biogás produzido pelo reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

5.3 Condição II – Reator Tratando Água Residuária na Relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67$

Após a condição I, o reator operou na condição II por 90 dias, tal que se variou a estratégia de alimentação, divididos nas condições IIa (batelada, 34 dias), IIb (batelada alimentada 3h, 29 dias) e IIc (batelada alimentada 6h, 27 dias), nos quais o reator operou sempre com ciclos de 8 horas, tratando água residuária sintética com uma concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L^{-1} e concentração de sulfato de $746 \text{ mgSO}_4^{2-}.\text{L}^{-1}$ (relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67$).

Novamente é importante salientar que a biomassa presente no reator foi a mesma da etapa anterior (Condição I), e que também se manteve durante toda a condição II, tal sorte que a biomassa estava sempre mais adaptada ao afluente.

Como citado anteriormente, nas operações em batelada alimentada (condições IIb e IIc), foi necessário aumentar o volume de diluição do reator de 1,0 L para 1,5 L, tal que o *draft-tube* ficasse totalmente imerso, e conseqüentemente efetivo, desde o início do ciclo de operação. As dimensões do *draft-tube* também foram modificadas objetivando um melhor desempenho na agitação do reator, assim como a velocidade de agitação foi reduzida para 140 rpm para que não houvesse transpasse do lodo para dentro do *draft-tube*, o que provocaria uma maceração do grânulo pelo impelidor.

O acúmulo de enxofre molecular na interface do meio reacional com o ar no *headspace* do reator tornou-se maior e mais evidente em relação à etapa anterior (Etapa I), indicando que houve uma oxidação do sulfeto, a despeito do reator ter operado anaerobiamente.

Assim como nas operações precedentes, nesta condição a biomassa se manteve com boas características de sedimentação, não havendo perdas de lodo durante a fase de descarga do reator. Durante a condição IIa (operação em batelada) se manteve o procedimento de manutenção do reator, conservando a periodicidade de limpeza da bomba de descarga (semanalmente) e da bomba de alimentação (1 vez a cada 15 dias). No entanto, nos ensaios relativos às condições IIb e IIc (operações em batelada alimentada) a frequência de limpeza da bomba de alimentação foi maior (semanalmente), já que foi observado maior acúmulo de material viscoso na bomba e na tubulação de alimentação.

Os resultados de monitoramento obtidos nessa etapa estão apresentados na Tabela 5.6 a 5.8 e na Figuras 5.25 a 5.31. Uma análise comparativa entre as condições IIa, IIb e IIc está ilustrada nos histogramas representados pelas Figuras 5.32 a 5.35, enquanto os resultados dos perfis estão demonstrados nas Figuras 5.36 a 5.42. Os valores das variáveis monitoradas, dos resultados dos perfis realizados e das médias, desvios padrões, quantidades de amostras e valores máximos e mínimos, do afluente e do efluente, para as condições IIa, IIb e IIc encontram-se nos Apêndices E, F e G, respectivamente.

Tabela 5.6 – Resultados médios das variáveis monitoradas na operação do reator na condição II com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67^*$.

Variável	Afluente	Efluente		
		Condição IIa	Condição IIb	Condição IIc
C_{ST} (mgDQO.L ⁻¹)	517 ± 41 (45)	190 ± 63 (14)	315 ± 23 (13)	331 ± 60 (13)
E_{ST} (%)	-	63 ± 12 (14)	39 ± 4 (13)	36 ± 12 (13)
C_{SF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	150 ± 57 (13)	264 ± 20 (13)	252 ± 22 (13)
E_{SF} (%)	-	71 ± 11 (13)	49 ± 4 (13)	51 ± 4 (13)
C_{SOT} (mgDQO.L ⁻¹)	-	152 ± 63 (14)	178 ± 23 (13)	239 ± 60 (13)
E_{SOT} (%)	-	70 ± 12 (14)	65 ± 4 (13)	54 ± 12 (13)
C_{SOF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	111 ± 57 (13)	128 ± 20 (13)	160 ± 22 (13)
E_{SOF} (%)	-	78 ± 11 (13)	75 ± 4 (13)	69 ± 4 (13)
C_{SO_4} (mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)	768 ± 107 (35)	572 ± 86 (15)	325 ± 60 (11)	346 ± 59 (10)
E_{SO_4} (%)	-	25 ± 11 (15)	58 ± 8 (11)	55 ± 8 (10)
$DQO/[SO_4^{2-}]^{**}$	0,69 ± 0,09 (34)	0,30 ± 0,16 (13)	0,56 ± 0,15 (11)	0,75 ± 0,22 (10)
C_{SO_3} (mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹)	-	5 ± 3 (5)	4 ± 2 (6)	5 ± 0 (5)
STD (mgSTD.L ⁻¹)	-	18 ± 9 (6)	68 ± 14 (6)	69 ± 16 (3)
C_{HS} (mgHS ⁻ .L ⁻¹)	-	15 ± 8 (6)	54 ± 11 (6)	55 ± 12 (3)
C_{H_2S} (mgH ₂ S.L ⁻¹)	-	4 ± 2 (6)	13 ± 3 (6)	13 ± 3 (3)
pH	8,6 ± 0,5 (17)	7,4 ± 0,1 (7)	7,7 ± 0,1 (8)	7,8 ± 0,1 (7)
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	194 ± 13 (16)	434 ± 42 (8)	677 ± 173 (9)	616 ± 54 (8)
AI/AP	0,3 ± 0,1 (17)	0,3 ± 0,0 (8)	0,3 ± 0,0 (9)	0,2 ± 0,0 (8)
AVT (mgHAc.L ⁻¹)	35 ± 6 (16)	24 ± 7 (8)	34 ± 21 (9)	28 ± 6 (8)
ST (mg.L ⁻¹)	1972 ± 455 (10)	1806 ± 32 (3)	1779 ± 194 (3)	1922 ± 206 (4)
SVT (mg.L ⁻¹)	557 ± 103 (10)	369 ± 127 (3)	323 ± 20 (3)	489 ± 126 (4)
SST (mg.L ⁻¹)	84 ± 39 (10)	89 ± 21 (3)	82 ± 22 (3)	127 ± 31 (4)
SSV (mg.L ⁻¹)	47 ± 26 (10)	62 ± 35 (3)	59 ± 7 (3)	91 ± 19 (4)

* Os valores entre parênteses referem-se ao número de amostras analisadas

** Afluente: C_{SF}/C_{SO_4} ; Efluente: C_{SOT}/C_{SO_4}

Tabela 5.7 – Cargas volumétricas e específicas aplicadas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato na operação do reator na condição II operando com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67^*$.

Carga	Condição IIa	Condição IIb	Condição IIc
COA (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,61 ± 0,04 (15)	0,59 ± 0,04 (15)	0,55 ± 0,05 (15)
COAE (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	49 ± 4 (15)	52 ± 4 (15)	49 ± 4 (15)
CSA (gSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,87 ± 0,06 (12)	0,88 ± 0,14 (12)	0,85 ± 0,12 (11)
CSAE (mgSO ₄ ²⁻ .gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	70 ± 5 (12)	78 ± 13 (12)	75 ± 11 (11)

* Os valores entre parênteses referem-se ao número de amostras analisadas

Tabela 5.8 – Cargas volumétricas e específicas removidas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato na operação do reator na condição II operando com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67^*$.

Carga	Condição IIa	Condição IIb	Condição IIc
COR _{ST} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,39 ± 0,08 (14)	0,22 ± 0,02 (13)	0,20 ± 0,07 (13)
COR _{SF} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,44 ± 0,07 (13)	0,28 ± 0,02 (13)	0,29 ± 0,02 (13)
COR _{SOT} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,44 ± 0,08 (14)	0,37 ± 0,02 (13)	0,35 ± 0,07 (13)
COR _{SOF} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,48 ± 0,07 (13)	0,42 ± 0,02 (13)	0,44 ± 0,02 (13)
CORE _{ST} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	32 ± 6 (14)	20 ± 2 (13)	18 ± 6 (13)
CORE _{SF} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	36 ± 6 (13)	25 ± 2 (13)	26 ± 2 (13)
CORE _{SOT} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	35 ± 6 (14)	33 ± 2 (13)	32 ± 6 (13)
CORE _{SOF} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	35 ± 6 (13)	38 ± 2 (13)	35 ± 2 (13)
CSR (gSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,23 ± 0,10 (15)	0,48 ± 0,07 (11)	0,46 ± 0,06 (10)
CSRE (mgSO ₄ ²⁻ .gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	19 ± 8 (15)	43 ± 6 (11)	41 ± 6 (10)

* Os valores entre parênteses referem-se ao número de amostras analisadas

A Figura 5.25 mostra o comportamento da concentração de matéria oxidável, total e filtrada, e mostra que a operação IIb e IIc, foram as menos eficientes em termos de redução de matéria oxidável, mostrando eficiências similares. A concentração da matéria orgânica, total e filtrada, e a eficiência de remoção de matéria orgânica estão mostradas na Figura 5.26.

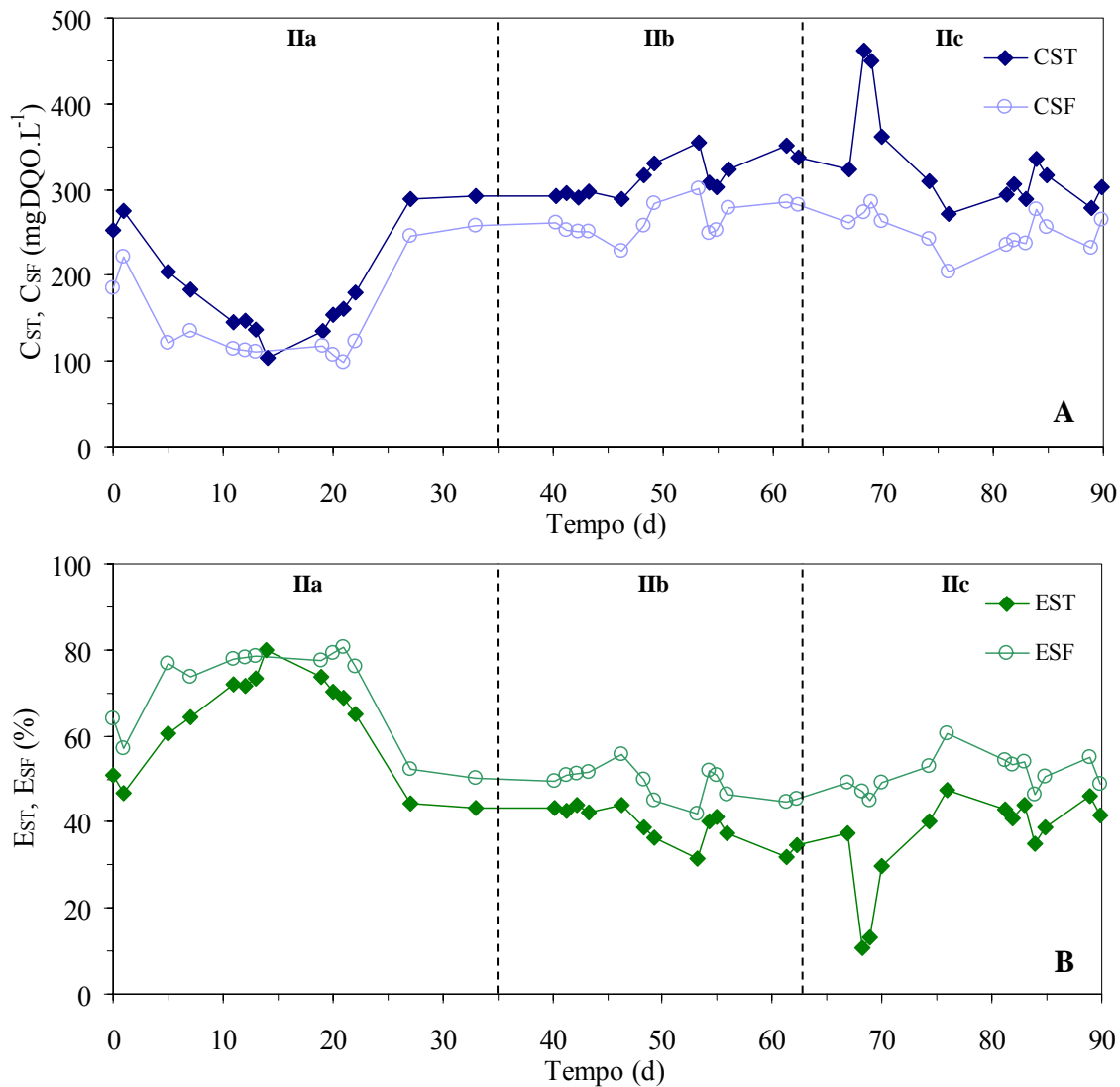


Figura 5.25 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF} ; Gráfico B) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A Figura 5.26 ilustra a concentração de matéria orgânica, total e filtrada, durante a operação do sistema na condição II. Pode-se verificar que a operação nas condições IIb e IIc (bateladas alimentadas) foram menos eficientes em termos de remoção de matéria orgânica, todavia, esta queda na eficiência se apresentou levemente menos acentuada como quando comparada com a condição anterior (condição I), que apresentou a mesma tendência. Analisando conjuntamente os gráficos de remoção de matéria oxidável e de remoção de matéria orgânica para esta condição II, representados pelas Figuras 5.25 e 5.26, respectivamente, pode-se verificar que as variações dos resultados de uma etapa para outra (IIa, IIb e IIc) ocorreram de forma levemente mais acentuada em relação à condição anterior (condição I – etapas Ia, Ib e Ic – Figuras 5.7 e 5.8) quando analisado o gráfico de comportamento da concentração de matéria oxidável, o que indica um ligeiro aumento na formação de produtos da sulfetogênese.

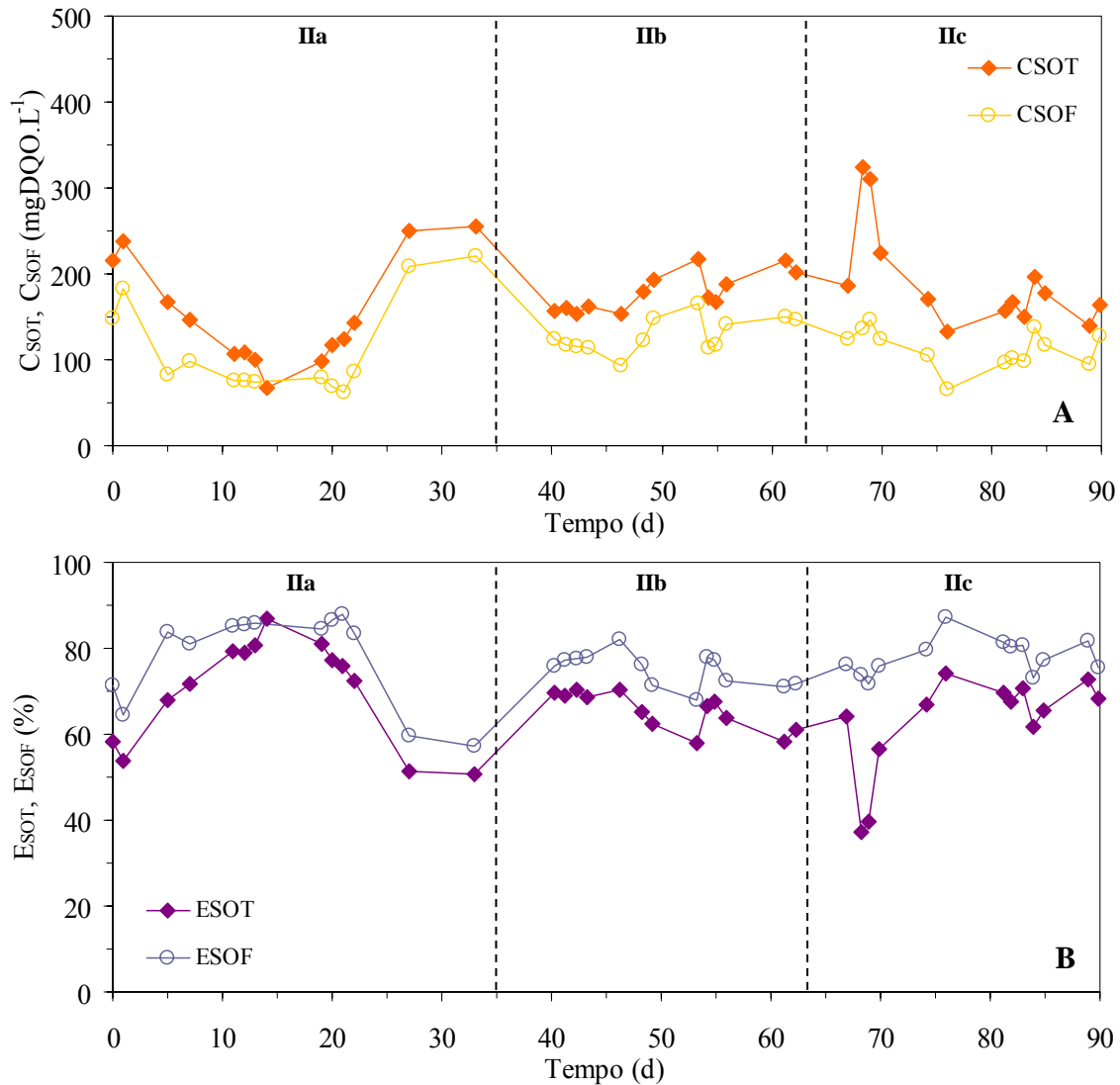


Figura 5.26 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT}, C_{SOF}; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT}, E_{SOF}; Gráfico B) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A Figura 5.27 mostra o comportamento da concentração de sulfato, ao longo da operação do reator na condição II. Analisando o comportamento da concentração de sulfato no reator, pode-se verificar que as operações IIb e IIc novamente foram as mais eficientes na redução de sulfato, e que as médias de concentração de sulfato nestas condições ($325 \pm$

60 $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$ para a condição IIb e $346 \pm 59 \text{ mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$ para a condição IIc) indicam que as eficiências foram semelhantes nas operações em batelada alimentada.

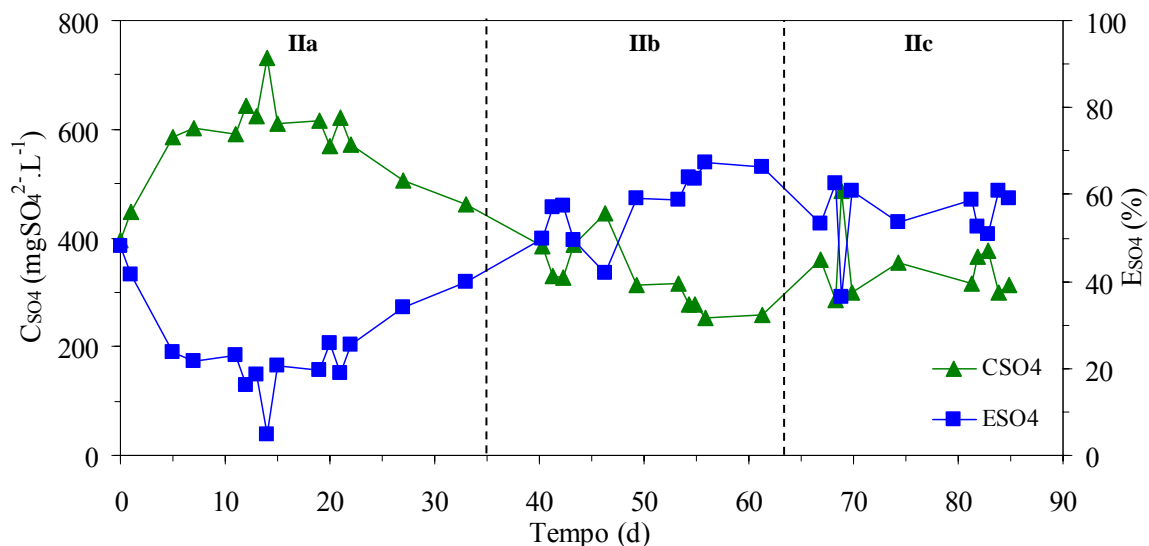


Figura 5.27 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A Figura 5.28 ilustra a relação entre a carga de sulfato removida e a carga orgânica removida (para amostras filtradas), sendo que as linhas pretas apresentadas no gráfico correspondem à média dos valores durante a condição. A relação entre cargas removidas de sulfato e matéria orgânica fornece um indicativo do consumo da matéria orgânica utilizado em processos sulfetogênicos. Vale ressaltar que para que toda a matéria orgânica seja consumida para reduzir o sulfato, o valor dessa relação corresponde a 1,49 (inverso da relação estequiométrica $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 0,67 teórica). Na Figura 5.28, pode-se verificar que, do mesmo modo que verificado na condição I, durante a condição IIb o reator melhor utilizou a matéria orgânica no consumo de sulfato. Assim como na condição I, a análise deste gráfico foi realizada conjuntamente com os comportamentos das concentrações de matéria orgânica filtrada (C_{SOT} , Figura 5.26, Gráfico A) e de sulfato (C_{SO_4} , Figura 5.27).

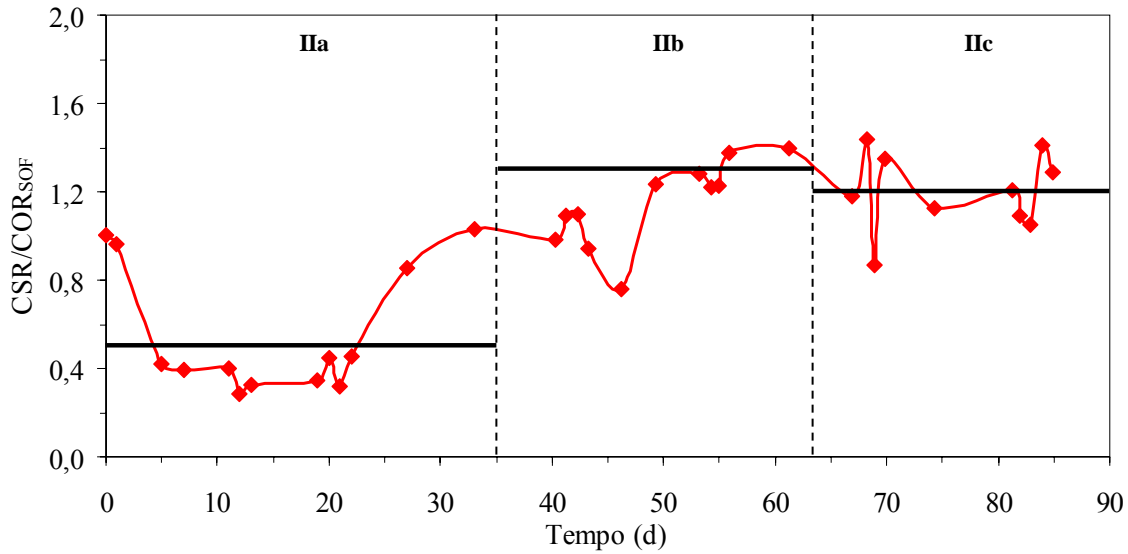


Figura 5.28 – Relação entre carga de sulfato removida (CSR) e carga orgânica removida para amostras filtradas (COR_{SOF}), no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A produção de sulfeto (STD, C_{H2S} e C_{HS}) pelo reator durante a operação na condição II está mostrada na Figura 5.29, onde observa-se que as concentrações de sulfeto no reator aumentaram quando o reator operou na condição IIb e IIc, sendo que nesta última condição houve uma ligeira queda na produção. O comportamento da concentração de sulfato (Figura 5.27) durante o monitoramento da condição II reforça a análise da Figura 5.29, através da verificação do aumento na eficiência na redução de sulfato nos ensaios em batelada alimentada.

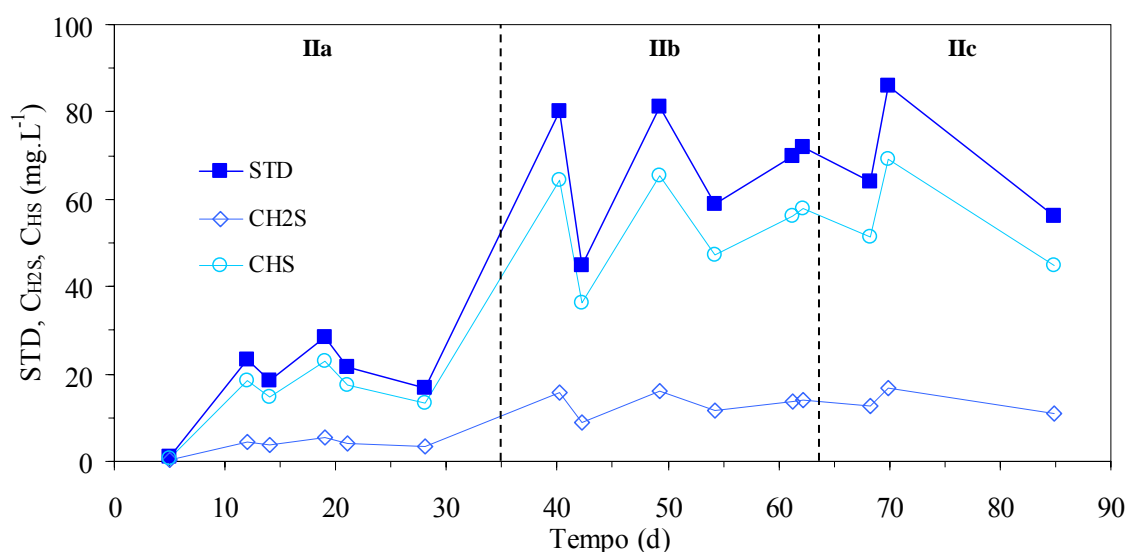


Figura 5.29 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- (C_{HS}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Na Figura 5.30, observou-se que os valores de sulfeto durante toda a condição II se mantiveram constantes e em níveis sempre abaixo de $10 \text{ mgSO}_3^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$. Nos valores de pH, verificou-se um leve aumento na medida em que a estratégia de alimentação variava no sentido de aumentar o tempo de enchimento do reator, observando que o pH se manteve entre 7,3 e 7,5 na condição IIa e sempre entre 7,5 e 8,0 nas condições IIb e IIc, indicando uma estabilidade do sistema durante todas as operações na condição II. A estabilidade pode ser finalmente verificada pelo acompanhamento dos resultados das concentrações de ácidos voláteis totais (AVT) e de alcalinidade a bicarbonato (AB), representados na Figura 5.31.

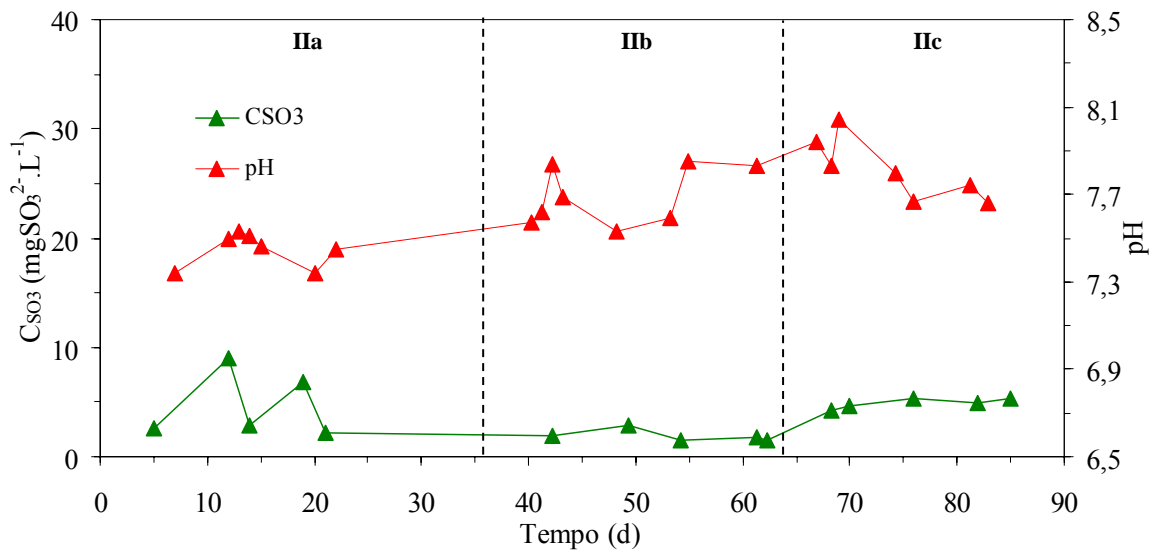


Figura 5.30 – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) e pH no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A exemplo da condição I, durante a operação do reator na condição II, os ácidos voláteis totais novamente se mostraram estáveis e em níveis adequados para uma operação estável em um reator anaeróbia, exceto no início da operação da condição IIb onde notou-se um pico de ácidos, provavelmente pela transição entre a operação em batelada e a operação em batelada alimentada. Entretanto, os ácidos produzidos inicialmente foram consumidos após 7 dias de operação na condição IIb tal que os valores a partir de então se apresentaram aceitáveis.

Os valores de concentração de ácidos voláteis se mantiveram próximos em todas as condições, indicando mais uma vez que embora houvesse um aumento na eficiência do consumo de sulfato, não é possível inferir se a estratégia de alimentação interferiu na forma como o sulfato é metabolizado.

Conforme averiguado na durante a condição I, observou-se pouca produção de alcalinidade na condição IIa quando comparada com as condições IIb e IIc, onde a alcalinidade a bicarbonato sempre foi produzida com relação ao afluente, sendo este mais um indicativo de estabilidade do sistema.

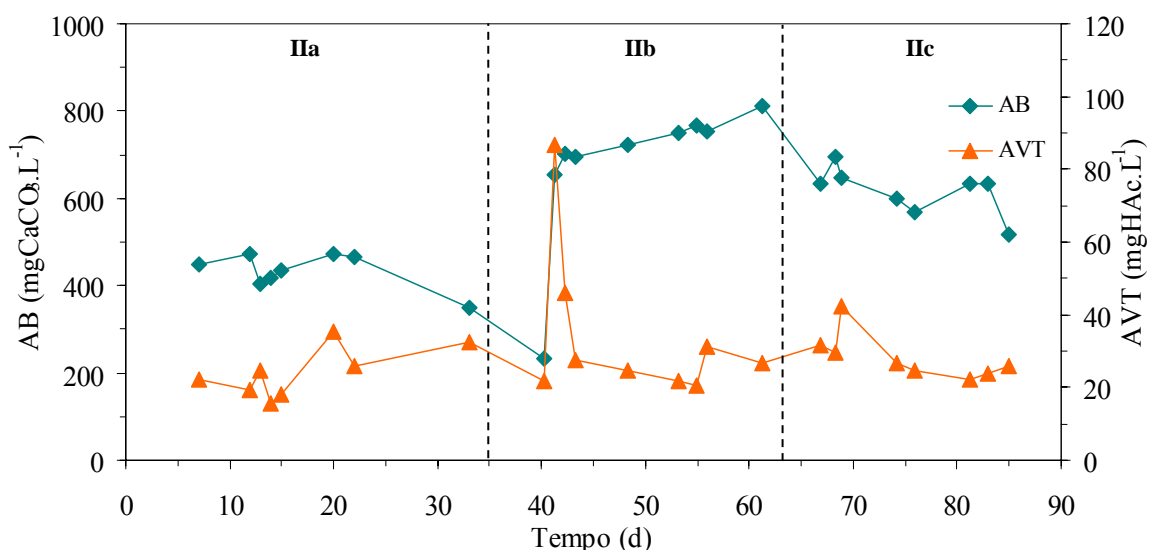


Figura 5.31 – Concentração de ácidos voláteis totais (AVT) e alcalinidade a bicarbonato (AB) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A seguir serão apresentados os histogramas comparando as operações em batelada (B) com as operações em batelada alimentada de 3 horas (FB I) e de 6 horas (FB II), correspondentes as condições IIa, IIb e IIc, respectivamente.

A Figura 5.32 compara as médias de concentração de matéria orgânica, total e filtrada, e suas respectivas eficiências. Nesta condição, a operação em batelada alimentada de 6 horas (FB II) foi a operação que apresentou as menores eficiências, enquanto a operação em batelada (B) mostrou um melhor desempenho na remoção de matéria orgânica.

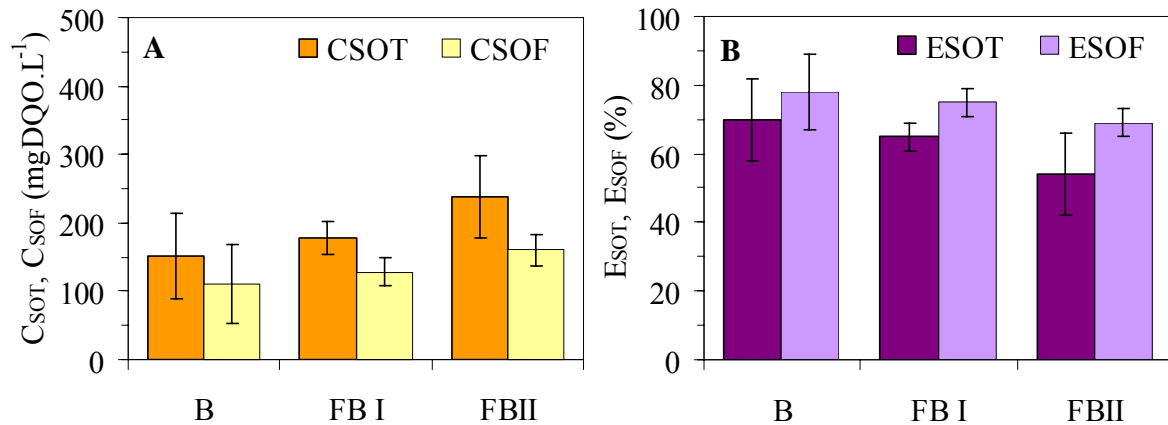


Figura 5.32 – Comparação entre as médias de concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição II.

Pode-se observar, na Figura 5.33, a comparação entre as cargas orgânicas aplicadas e removidas, em termos de volume (COV) e especificamente em relação à concentração de biomassa (COE). Novamente, podemos verificar que o desempenho do sistema apresentou melhores resultados de remoção de carga orgânica, tanto volumétrica como específica na operação em batelada (B) comparadamente com as operações em batelada alimentada (FB I e FB II).

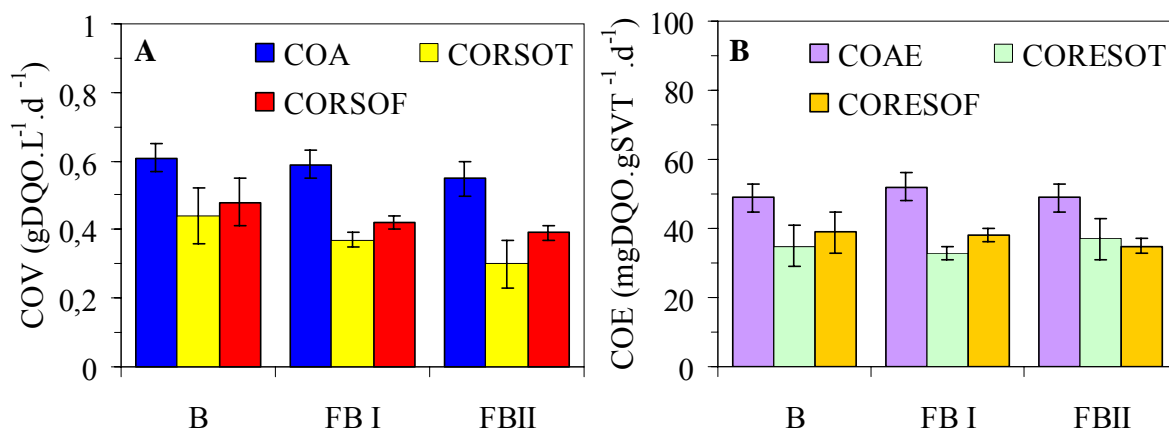


Figura 5.33 – Comparação entre as médias das cargas orgânicas volumétricas (COA, COR_{SOT} , COR_{SOF} ; Gráfico A) e cargas orgânicas específicas (COAE, $CORE_{SOT}$, $CORE_{SOF}$; Gráfico B) no reator operado na condição II.

A Figura 5.34 mostra a comparação entre as concentrações de sulfato no afluente do reator e suas respectivas eficiências, ilustrando que nas operações em batelada alimentada (FB I e FB II) existe um favorecimento na redução de sulfato em relação à operação em batelada (B), para a condição II. Importante notar que as eficiências de redução de sulfato nas condições em batelada alimentada apresentam resultados muito próximos.

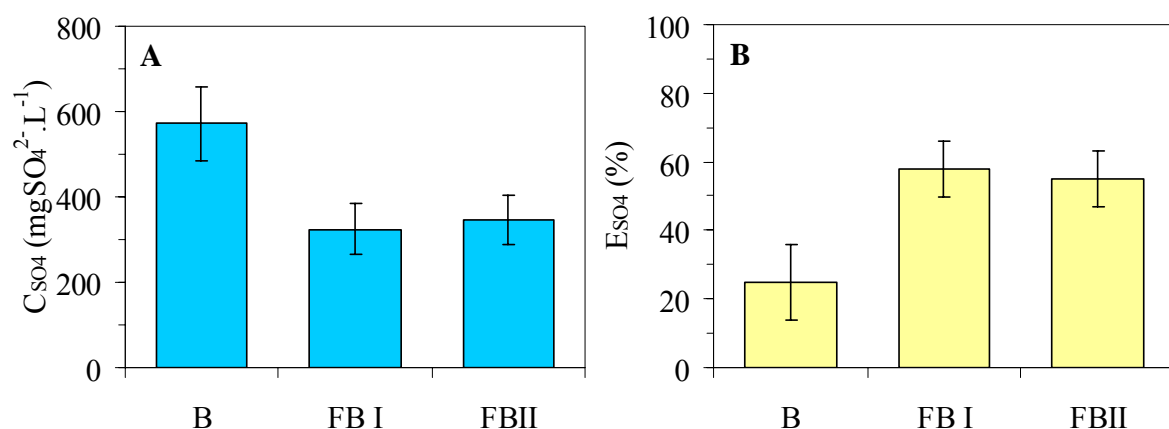


Figura 5.34 – Comparação entre as médias de concentração de sulfato (C_{S04} ; Gráfico A) e eficiência de redução de sulfato (E_{S04} ; Gráfico B) no reator operado na condição II.

Na Figura 5.35 foi analisada uma comparação entre as cargas de sulfato aplicadas e removidas, em termos de volume (CSV) e especificamente em relação à concentração de biomassa (CSE). Verificou-se que as operações em batelada alimentada (FB I e FB II) mostraram melhor desempenho na remoção da carga de sulfato que a operação em batelada (B), corroborando que as operações em batelada alimentada tornam o sistema mais eficiente na redução de sulfato.

Vale observar que durante a condição IIb e IIc, as eficiências de redução de sulfato apresentaram valores similares, onde pode-se concluir que o aumento no tempo de enchimento do reator de 3 para 6 horas não influenciou significativamente no desempenho do reator no tocante a redução de sulfato.

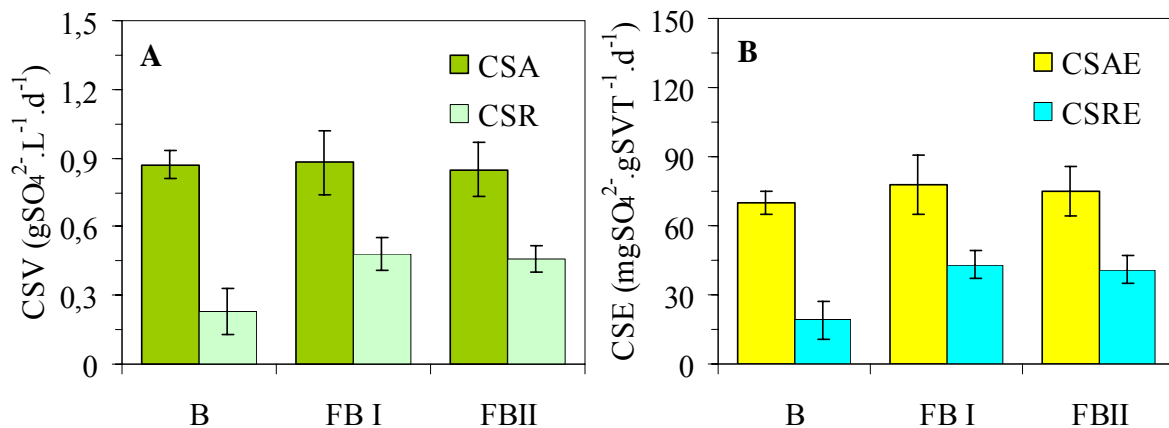


Figura 5.35 – Comparação entre as médias das cargas volumétricas de sulfato (CSA, CSR; Gráfico A) e cargas específicas de sulfato (CSAE, CSRE; Gráfico B) no reator operado na condição II.

A seguir serão apresentados os resultados dos perfis realizados durante o ciclo de operação do reator, para as condições IIa, IIb e IIc, comparativamente.

Assim como se observou na condição anterior, durante os perfis de concentração de matéria oxidável e concentração de matéria orgânica filtradas, mostrados pela Figura 5.36 em termos de DQO, pode-se notar que na operação em batelada (IIa), houve um rápido consumo inicial da matéria oxidável e orgânica seguido por um período de decaimento nestes valores, até o fim do ciclo. Na operação em batelada alimentada de 3 horas (IIb), foi verificado um aumento da concentração de matéria oxidável e orgânica até a 1ª hora, e então foi observado o consumo dessa matéria orgânica. Já na operação na batelada alimentada de 6 horas (IIc), nota-se um aumento das concentrações de matéria oxidável e orgânica até a 2ª hora de operação, e após este período as concentrações se mantiveram praticamente constantes. Vale salientar que os primeiros pontos dos perfis apresentam valores inferiores ao do afluente devido ao efeito de diluição no reator.

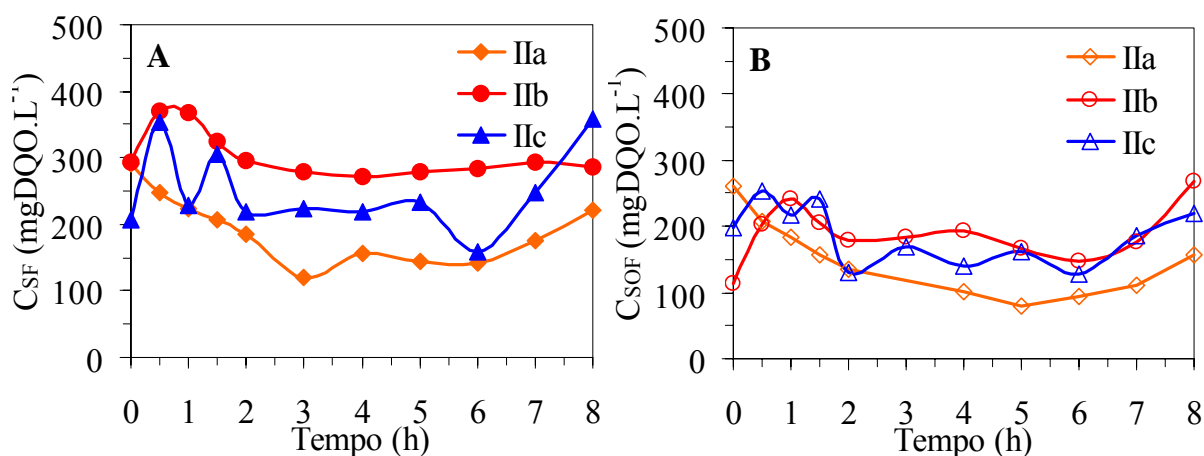


Figura 5.36 – Perfis de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF} ; Gráfico A) e de concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Os perfis de concentração de sulfato (Figura 5.37) no reator mostraram um comportamento constante durante a operação, principalmente nas condições IIb e IIc, sendo que apenas na operação durante a condição IIa, o perfil apresentou uma queda dos valores mas somente durante as duas primeiras horas de operação, tal que a partir destes pontos a concentração de sulfato foi praticamente constante no restante do ciclo. Assim como nos perfis de concentrações de matéria oxidável e matéria orgânica, vale salientar que os primeiros pontos dos perfis apresentam valores inferiores ao do afluente devido ao efeito de diluição no reator.

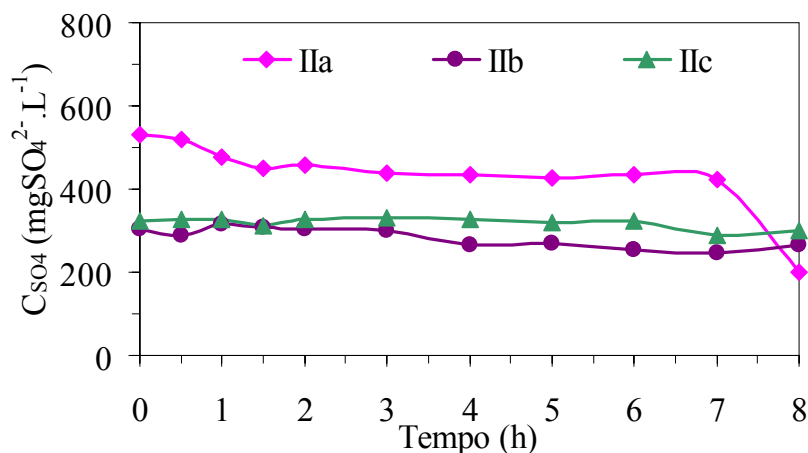


Figura 5.37 – Perfis de concentração de sulfato (C_{SO_4}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Na Figura 5.38 estão apresentados os perfis de sulfetos totais dissolvidos (STD), de sulfeto na forma HS^- e de sulfeto de hidrogênio (H_2S). Verificou-se que a produção de STD apresentou um crescimento nas primeiras 3 horas de ciclo, na condição IIa e que a partir de então se manteve em valores relativamente constantes. Durante a condição IIb, houve uma queda nas concentrações de sulfato quando comparadas com a concentração inicial, até o

término da alimentação (após 3 horas de ciclo) e a partir de então observou-se um aumento da concentração de STD. Durante a condição IIc notou-se um aumento da concentração de STD até as duas primeiras horas de ciclo, seguido por valores constantes.

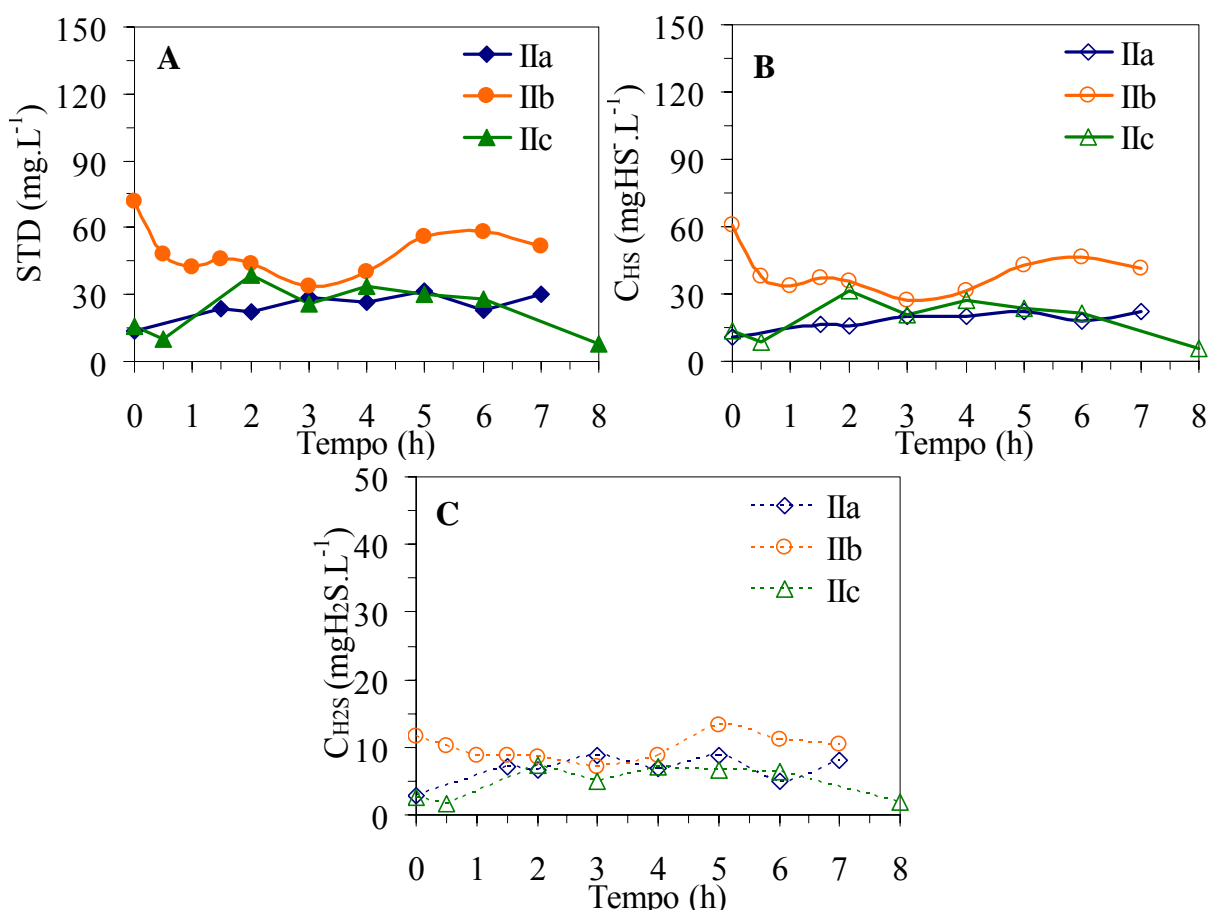


Figura 5.38 – Perfis de sulfetos totais dissolvidos (STD; Gráfico A), de sulfeto na forma HS⁻ (C_{HS⁻}; Gráfico B) e de sulfeto de hidrogênio (C_{H₂S}; Gráfico C) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Os comportamentos das concentrações de sulfeto durante os perfis da condição II, apresentados na Figura 5.39, indicam sempre valores de concentração de sulfeto abaixo de 20 mgSO₃²⁻.L⁻¹, exceto pelo primeiro ponto na condição IIa. Os valores mostram que em todas as condições os valores de concentração de sulfeto foram praticamente constantes.

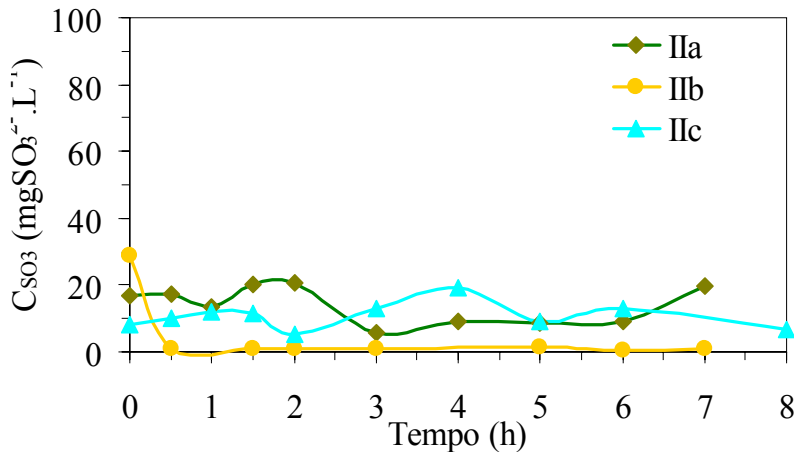


Figura 5.39 – Perfis de concentração de sulfito (C_{SO_3}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Os perfis de ácidos voláteis totais (AVT) e de alcalinidade a bicarbonato (AB) estão ilustrados na Figura 5.40. Nos perfis de ácidos voláteis, verificou-se que a produção de ácidos voláteis foi expressiva desde o princípio do ciclo até a 3^a hora de ciclo para a condição IIa (apresentando um comportamento similar à condição Ia). Na operação em batelada alimentada de 3 horas condição IIb, pode-se verificar uma produção de ácidos na 1^a hora do ciclo, a qual se seguiu um rápido consumo, e na condição IIc, na qual o reator foi alimentado durante 6 horas, os perfis se mostraram mais constantes durante o ciclo.

Durante o perfil de ácidos voláteis totais por cromatografia, na condição IIa foram detectadas a presença de ácido propiônico após 0,5 hora até 1,0 hora de perfil, nas concentrações de 4,7 e 3,2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectivamente. Não foram detectadas as presenças dos ácidos voláteis analisados nas condições IIb e IIc, por todo o ciclo.

Durante os perfis de alcalinidade a bicarbonato (AB) observou-se sempre uma geração de alcalinidade em relação ao afluente, sendo que a variação na concentração da alcalinidade ao longo do perfil é bem pequena. A concentração de alcalinidade foi menor na condição IIa,

e nas condições IIb e IIc apresentaram valores muito próximos. Concluiu-se que o sistema apresentou consumo dos ácidos voláteis produzidos, e conseqüentemente, uma operação estável. O perfil de pH permite uma melhor análise no tocante a estabilidade operacional do reator nas condições IIa, IIb e IIc, e está mostrado na Figura 5.41, juntamente com o perfil de potencial redox (POR).

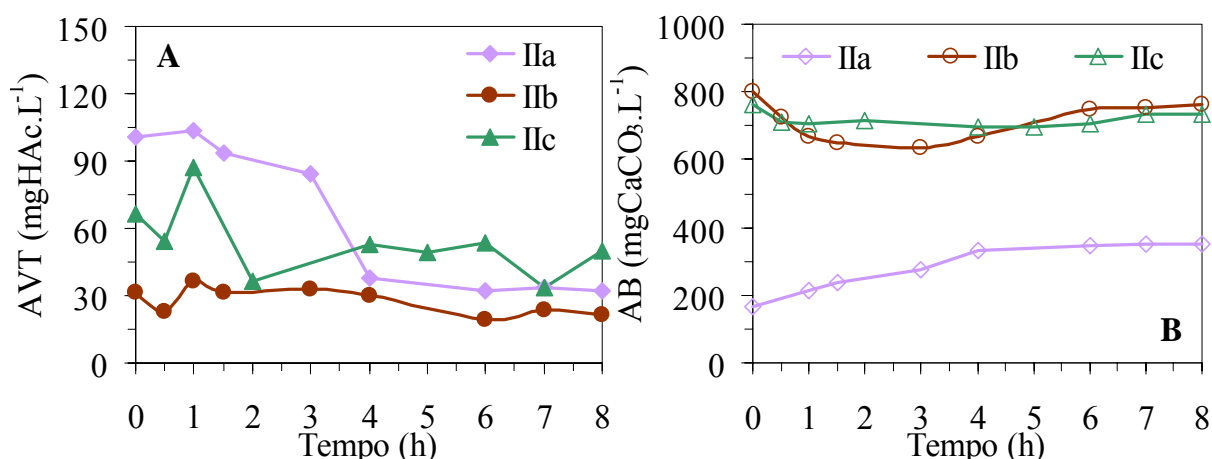


Figura 5.40 – Perfis de ácidos voláteis totais (AVT; Gráfico A) e de alcalinidade a bicarbonato (AB; Gráfico B) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

O pH, em todas as condições e em toda a extensão do ciclo de operação, apresentou valores estáveis e correspondentes à faixa de valores considerada ótima para a digestão anaeróbia. Salienta-se que o aumento dos valores de pH durante os perfis das condições IIb e IIc, nas quais o reator foi operado em batelada alimentada, foi corroborado pela análise do comportamento dos perfis de concentração alcalinidade a bicarbonato (AB), onde verificou-se uma produção mais expressiva de alcalinidade nas condições IIb e IIc.

Durante os perfis de potencial redox, avaliou-se que este se manteve praticamente constante durante todo ciclo para todas as condições, novamente indicando valores menores que -300 mV. Importante salientar que nas condições IIa, IIb e IIc foram realizados os perfis

de oxigênio dissolvido (OD), e em todas as condições o valor de concentração foi sempre $0,0 \text{ mg.L}^{-1}$, confirmando a operação do reator em anaerobiose.

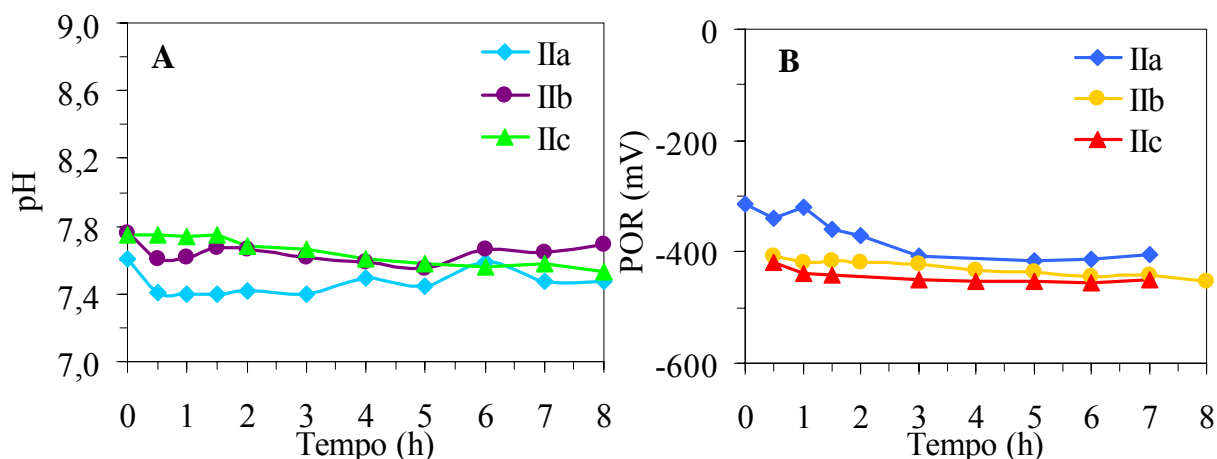


Figura 5.41 – Perfis de pH (pH; Gráfico A) e de potencial de oxi-redução (POR; Gráfico B) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A Figura 5.42 mostra os perfis de concentração de gás carbônico (CO_2) e de metano (CH_4) no biogás. Verificou-se que a concentração de metano no biogás foi maior na operação em batelada (IIa), e que conforme foi aumentado o tempo de enchimento do reator, a concentração de CH_4 no biogás diminuía. Durante o perfil de CO_2 , pode-se verificar que a concentração de gás carbônico no biogás foi levemente maior na condição IIb (batelada alimentada de 3 horas) e que nas operações em batelada e batelada alimentada de 6 horas (IIa e IIc, respectivamente), os valores de concentração de CO_2 mantiveram-se muito similares.

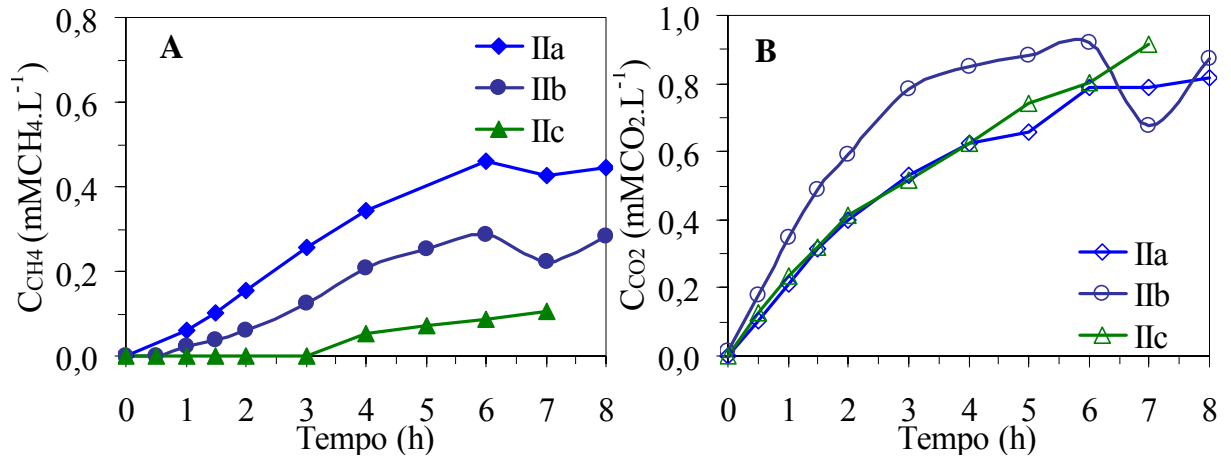


Figura 5.42 – Perfis de concentração de metano (C_{CH_4} ; Gráfico A) e de concentração de gás carbônico (C_{CO_2} ; Gráfico B) no biogás produzido pelo reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

5.4 Condição III – Reator Tratando Água Residuária na Relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$

Durante a condição III, na qual o reator operou por 72 dias, tal que se variou a estratégia de alimentação, divididos nas condições IIIa (batelada, 25 dias), IIIb (batelada alimentada 3h, 25 dias) e IIIc (batelada alimentada 6h, 22 dias), nos quais o reator operou sempre com ciclos de 8 horas, tratando água residuária sintética com uma concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L^{-1} e concentração de sulfato de $1492 \text{ mgSO}_4^{2-}.\text{L}^{-1}$ (relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$).

A adaptação da biomassa foi garantida, pois foi utilizada a mesma biomassa da etapa anterior (Condição II), e que também se manteve durante toda a condição III.

Como citado anteriormente, nas operações em batelada alimentada (condições IIIb e IIIc), foi necessário aumentar o volume de diluição do reator de 1,0 L para 1,5 L, tal que o *draft-tube* ficasse totalmente imerso, e conseqüentemente efetivo, desde o início do ciclo de operação. As dimensões do *draft-tube* também foram modificadas objetivando um melhor desempenho na agitação do reator, assim como a velocidade de agitação foi reduzida para 140 rpm para que não houvesse transpasse do lodo para dentro do *draft-tube*, o que provocaria uma maceração do grânulo pelo impelidor.

Outra vez foi observado um acúmulo de enxofre molecular na interface do meio reacional com o ar no *headspace* do reator maior ainda que na condição II, indicando que houve uma oxidação do sulfeto, a despeito do reator ter operado anaerobiamente.

Assim como nas operações precedentes, nesta condição a biomassa se manteve com boas características de sedimentação, não havendo perdas de lodo durante a fase de descarga

do reator. Durante a condição IIIa (operação em batelada) a limpeza da bomba de descarga foi realizada semanalmente e a limpeza da bomba de alimentação foi feita 1 vez a cada 15 dias. Nos ensaios relativos às condições IIIb e IIIc (operações em batelada alimentada) a frequência de limpeza da bomba de alimentação foi maior, sendo realizadas semanalmente, já que foi observado maior acúmulo de material viscoso na bomba e na tubulação de alimentação, a exemplo das condições IIb e IIc.

Os resultados de monitoramento obtidos nessa etapa estão apresentados na Tabela 5.9 a 5.11 e na Figuras 5.43 a 5.49. Uma análise comparativa entre as condições IIIa, IIIb e IIIc está ilustrada nos histogramas representados pelas Figuras 5.50 a 5.53, enquanto os resultados dos perfis estão demonstrados nas Figuras 5.54 a 5.60. Os valores das variáveis monitoradas, dos resultados dos perfis realizados e das médias, desvios padrões, quantidades de amostras e valores máximos e mínimos, do afluente e do efluente, para as condições IIIa, IIIb e IIIc encontram-se nos Apêndices H, I e J, respectivamente.

Tabela 5.9 – Resultados médios das variáveis monitoradas na operação do reator na condição III com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34^*$.

Variável	Afluente	Efluente		
		Condição IIIa	Condição IIIb	Condição IIIc
C_{ST} (mgDQO.L ⁻¹)	523 ± 41 (26)	207 ± 50 (12)	328 ± 24 (10)	316 ± 26 (10)
E_{ST} (%)	-	60 ± 10 (12)	37 ± 4 (10)	40 ± 5 (10)
C_{SF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	171 ± 46 (12)	276 ± 21 (11)	257 ± 21 (11)
E_{SF} (%)	-	67 ± 9 (12)	47 ± 4 (11)	51 ± 4 (11)
C_{SOT} (mgDQO.L ⁻¹)	-	116 ± 50 (12)	135 ± 24 (10)	148 ± 26 (10)
E_{SOT} (%)	-	78 ± 10 (12)	74 ± 4 (10)	72 ± 5 (10)
C_{SOF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	79 ± 46 (12)	83 ± 21 (11)	89 ± 21 (11)
E_{SOF} (%)	-	85 ± 9 (12)	84 ± 4 (11)	83 ± 4 (11)
C_{SO_4} (mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)	1514 ± 123 (24)	1166 ± 107 (12)	952 ± 92 (10)	1110 ± 49 (11)
E_{SO_4} (%)	-	23 ± 7 (12)	37 ± 6 (10)	27 ± 3 (11)
$DQO/[SO_4^{2-}]^{**}$	0,35 ± 0,04 (24)	0,10 ± 0,05 (12)	0,15 ± 0,03 (9)	0,13 ± 0,03 (10)
C_{SO_3} (mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹)	-	1,0 ± 0,4 (4)	1,1 ± 0,5 (6)	1,6 ± 0,8 (5)
STD (mgSTD.L ⁻¹)	-	46 ± 15 (4)	96 ± 9 (6)	84 ± 8 (5)
C_{HS} (mgHS ⁻ .L ⁻¹)	-	38 ± 13 (4)	80 ± 8 (6)	70 ± 7 (5)
C_{H_2S} (mgH ₂ S.L ⁻¹)	-	8 ± 3 (4)	16 ± 2 (6)	14 ± 1 (5)
pH	8,7 ± 0,1 (15)	7,5 ± 0,1 (4)	7,7 ± 0,1 (10)	7,9 ± 0,1 (6)
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	190 ± 15 (15)	588 ± 88 (5)	677 ± 26 (10)	713 ± 48 (6)
AI/AP	0,3 ± 0,0 (15)	0,3 ± 0,1 (5)	0,3 ± 0,0 (10)	0,2 ± 0,0 (6)
AVT (mgHAc.L ⁻¹)	41 ± 9 (15)	27 ± 4 (5)	37 ± 26 (10)	37 ± 9 (6)
ST (mg.L ⁻¹)	3096 ± 311 (7)	2875 ± 7 (2)	3132 ± 170 (3)	2890 ± 76 (2)
SVT (mg.L ⁻¹)	535 ± 134 (7)	530 ± 291 (2)	553 ± 23 (3)	490 ± 31 (2)
SST (mg.L ⁻¹)	84 ± 26 (7)	109 ± 1 (2)	122 ± 18 (3)	104 ± 6 (2)
SSV (mg.L ⁻¹)	40 ± 30 (7)	61 ± 13 (2)	59 ± 12 (3)	86 ± 11 (2)

* Os valores entre parênteses referem-se ao número de amostras analisadas

** Afluente: C_{SF}/C_{SO_4} ; Efluente: C_{SOT}/C_{SO_4}

Tabela 5.10 – Cargas volumétricas e específicas aplicadas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato na operação do reator na condição III operando com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34^*$.

Carga	Condição IIIa	Condição IIIb	Condição IIIc
COA (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,61 ± 0,03 (8)	0,57 ± 0,07 (9)	0,58 ± 0,03 (9)
COAE (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	50 ± 2 (8)	51 ± 6 (9)	52 ± 3 (9)
CSA (gSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹ .d ⁻¹)	1,71 ± 0,08 (8)	1,62 ± 0,14 (8)	1,78 ± 0,05 (8)
CSAE (mgSO ₄ ²⁻ .gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	139 ± 6 (8)	144 ± 13 (8)	159 ± 5 (8)

* Os valores entre parênteses referem-se ao número de amostras analisadas

Tabela 5.11 – Cargas volumétricas e específicas removidas de matéria oxidável, matéria orgânica e sulfato na operação do reator na condição III operando com água residuária na relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34^*$.

Carga	Condição IIIa	Condição IIIb	Condição IIIc
COR _{ST} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,38 ± 0,06 (12)	0,21 ± 0,03 (10)	0,23 ± 0,03 (10)
COR _{SF} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,42 ± 0,06 (12)	0,27 ± 0,02 (11)	0,29 ± 0,02 (11)
COR _{SOT} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,49 ± 0,06 (12)	0,42 ± 0,03 (10)	0,41 ± 0,03 (10)
COR _{SOF} (gDQO.L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,53 ± 0,06 (12)	0,48 ± 0,02 (11)	0,47 ± 0,02 (11)
CORE _{ST} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	31 ± 5 (12)	19 ± 2 (10)	20 ± 3 (10)
CORE _{SF} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	34 ± 4 (12)	24 ± 2 (11)	26 ± 2 (11)
CORE _{SOT} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	40 ± 5 (12)	38 ± 2 (10)	37 ± 3 (10)
CORE _{SOF} (mgDQO.gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	43 ± 4 (12)	43 ± 2 (11)	42 ± 2 (11)
CSR (gSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹ .d ⁻¹)	0,42 ± 0,13 (12)	0,61 ± 0,10 (10)	0,44 ± 0,05 (11)
CSRE (mgSO ₄ ²⁻ .gSVT ⁻¹ .d ⁻¹)	34 ± 10 (12)	55 ± 9 (10)	39 ± 5 (11)

* Os valores entre parênteses referem-se ao número de amostras analisadas

A Figura 5.43 mostra o comportamento da concentração de matéria oxidável, total e filtrada, e mostra que, assim como nos ensaios da condição II, a operação IIIb e IIIc, foram as menos eficientes em termos de redução de matéria oxidável, mostrando eficiências similares. A concentração da matéria orgânica, total e filtrada, e a eficiência de remoção de matéria orgânica estão mostradas na Figura 5.44.

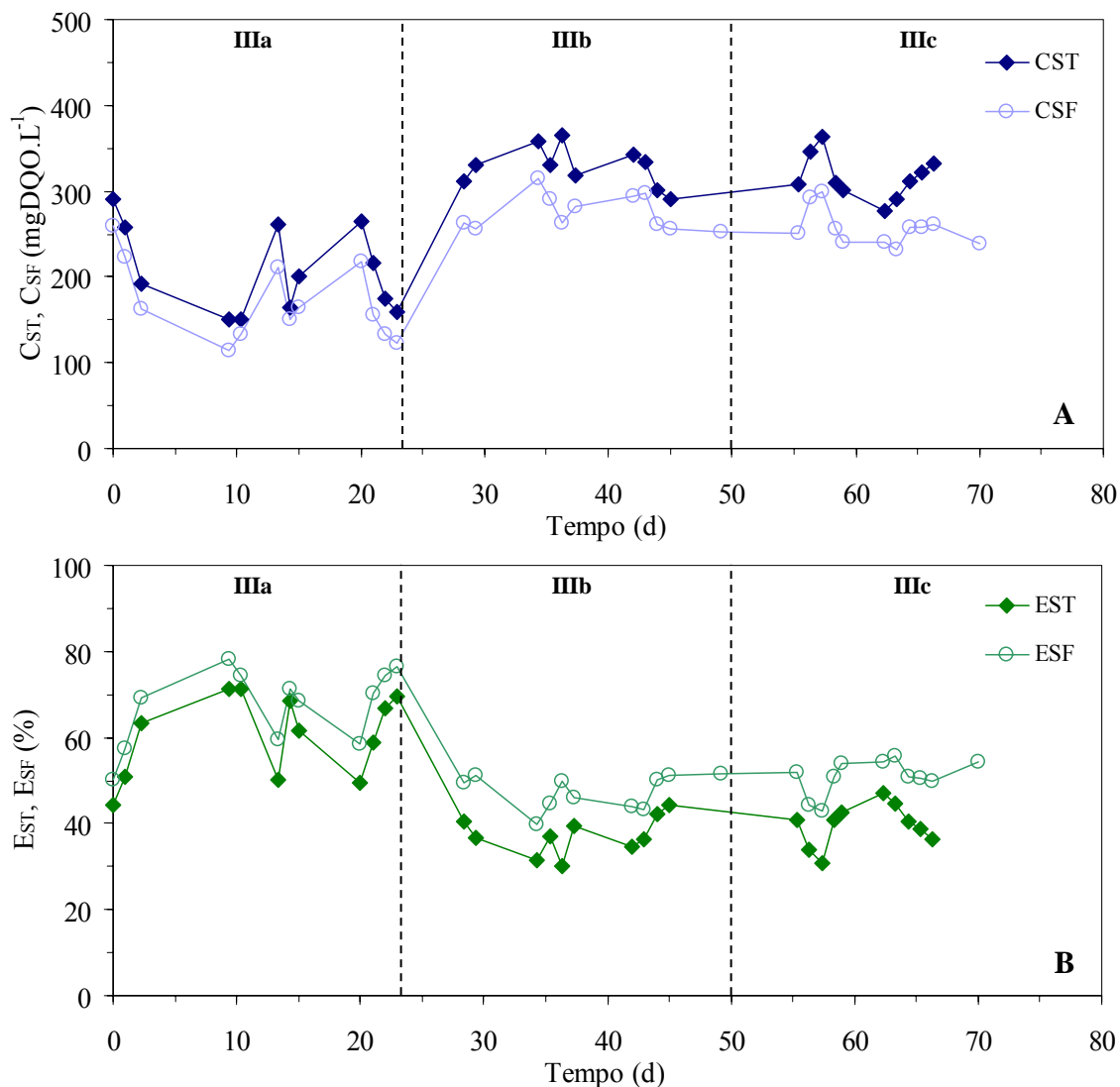


Figura 5.43 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST}, C_{SF}; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST}, E_{SF}; Gráfico B) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Na Figura 5.44 está ilustrado o comportamento da concentração de matéria orgânica, total e filtrada, durante a operação do sistema nas condições IIIa, IIIb e IIIc. Pode-se verificar que em toda a operação do reator durante a condição III, a eficiência de remoção de matéria orgânica apresentou resultados constantes e análogos. Analisando os gráficos de concentração e eficiência de remoção de matéria oxidável, pode-se concluir que a baixa eficiência na remoção de matéria oxidável durante a condição IIIa se deveu a menor concentração das formas oxidáveis de enxofre (STD e SO_3^{2-}), o que indica que a produção de produtos da sulfetogênese na condição na qual o reator operou em batelada foi menor que nas duas condições seguintes, nas quais o reator operou em batelada alimentada (IIIb e IIIc), a despeito do consumo de matéria orgânica ter se mantido constante em todas as operações da condição III.

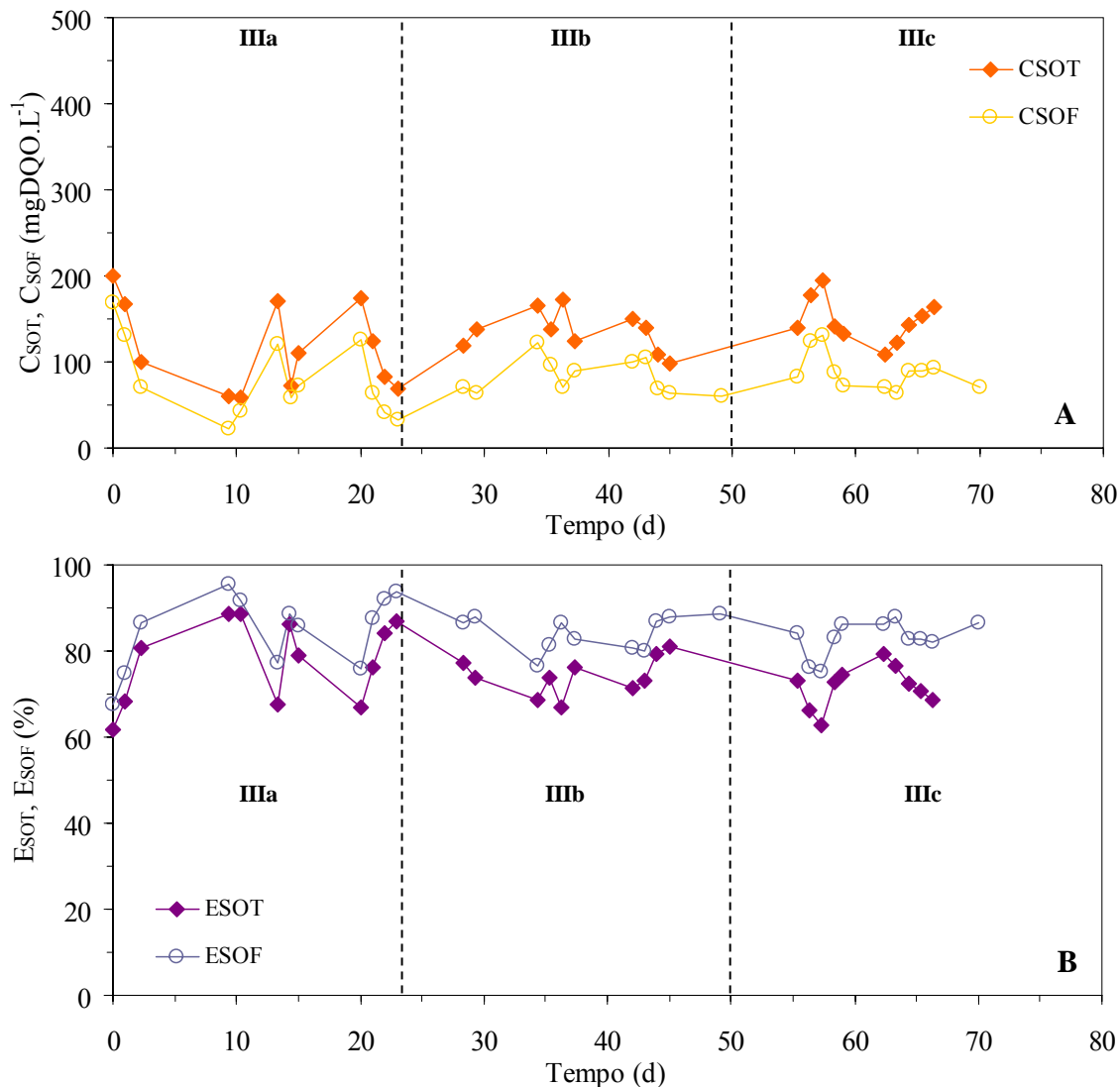


Figura 5.44 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Através do gráfico apresentado pela Figura 5.45, que apresenta o comportamento da concentração de sulfato no reator, observou-se que a maior eficiência de redução de sulfato foi atingida na condição IIIb, mostrando que as operações em batelada alimentada (IIIb e IIIc) novamente foram as mais eficientes na redução de sulfato, novamente observando que as

maiores eficiências foram atingidas com o reator operando em batelada alimentada de 3 horas (condição IIIb).

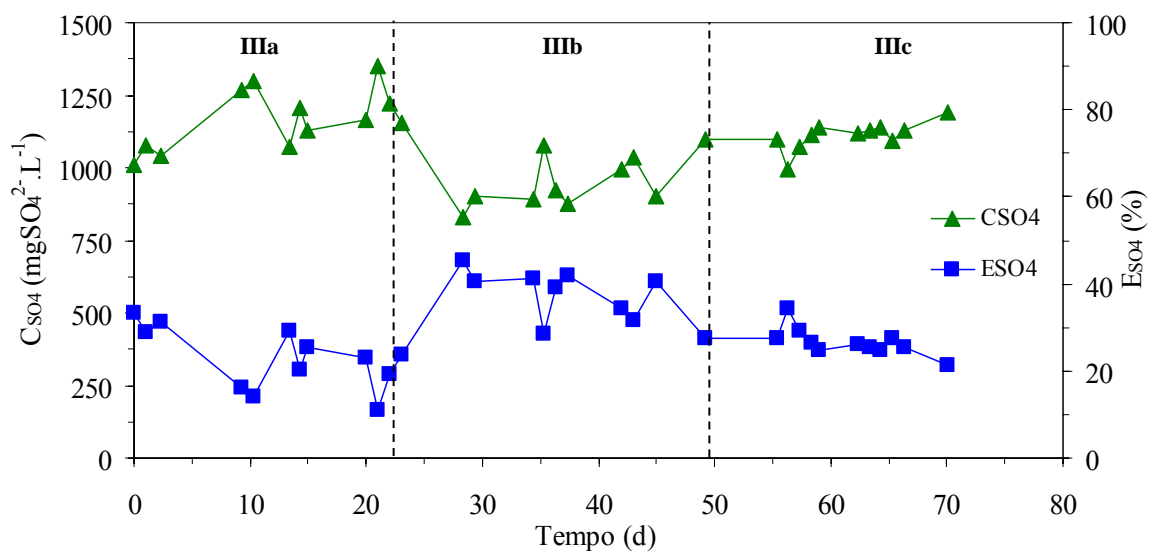


Figura 5.45 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

A Figura 5.46 apresenta a relação entre a carga de sulfato removida e a carga orgânica removida (para amostras filtradas), sendo que as linhas pretas apresentadas no gráfico correspondem à média dos valores durante a condição. A análise da relação entre cargas removidas de sulfato e matéria orgânica fornece um indicativo do consumo da matéria orgânica utilizado em processos sulfetogênicos. Teoricamente, quando esta relação assume o valor de 1,49 (inverso da relação estequiométrica $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,67 teórica), toda a matéria orgânica foi consumida para reduzir o sulfato. Na Figura 5.46, pode-se verificar que novamente, durante a condição na qual o reator operou em batelada alimentada de 3 horas (IIIb), o reator melhor utilizou a matéria orgânica no consumo de sulfato. Salienta-se esta análise foi realizada em conjunto com uma análise do comportamento da concentração de matéria orgânica para amostras filtradas (C_{SOT} , Figura 5.44, Gráfico A) e também com uma

análise do comportamento da concentração de sulfato (CSO_4 , Figura 5.45), observando que um aumento no valor da relação $\text{CSR}/\text{COR}_{\text{SOF}}$ poderia indicar apenas um maior consumo de matéria orgânica, sem haver aumento na eficiência de redução de sulfato, tornando a análise da relação $\text{CSR}/\text{COR}_{\text{SOF}}$ refutável, quanto alguma conclusão de qual forma ocorreu a utilização do substrato orgânico pelas comunidades microbianas.

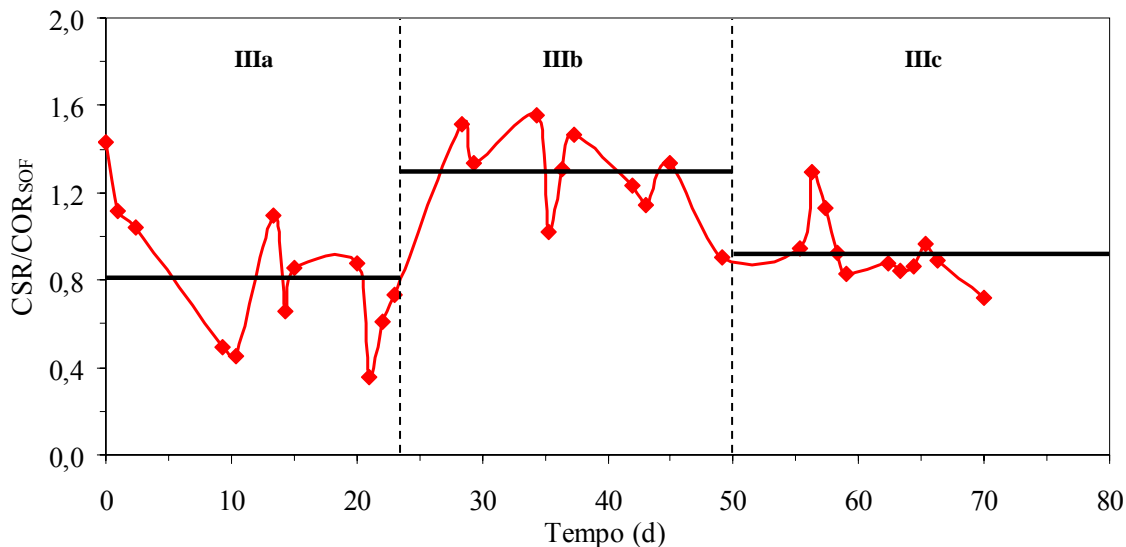


Figura 5.46 – Relação entre carga de sulfato removida (CSR) e carga orgânica removida para amostras filtradas (COR_{SOF}), no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

A produção de sulfeto (STD , $\text{C}_{\text{H}_2\text{S}}$ e C_{HS}) pelo reator durante a operação na condição III está mostrada na Figura 5.47. Observa-se que, conforme se verificou durante a análise da remoção de matéria oxidável, que as concentrações de sulfeto no reator aumentaram nas condições em batelada alimentada (IIIb e IIIc), tal que o comportamento de aumento da concentração de sulfeto foi análogo ao aumento na eficiência de redução de sulfato em cada condição.

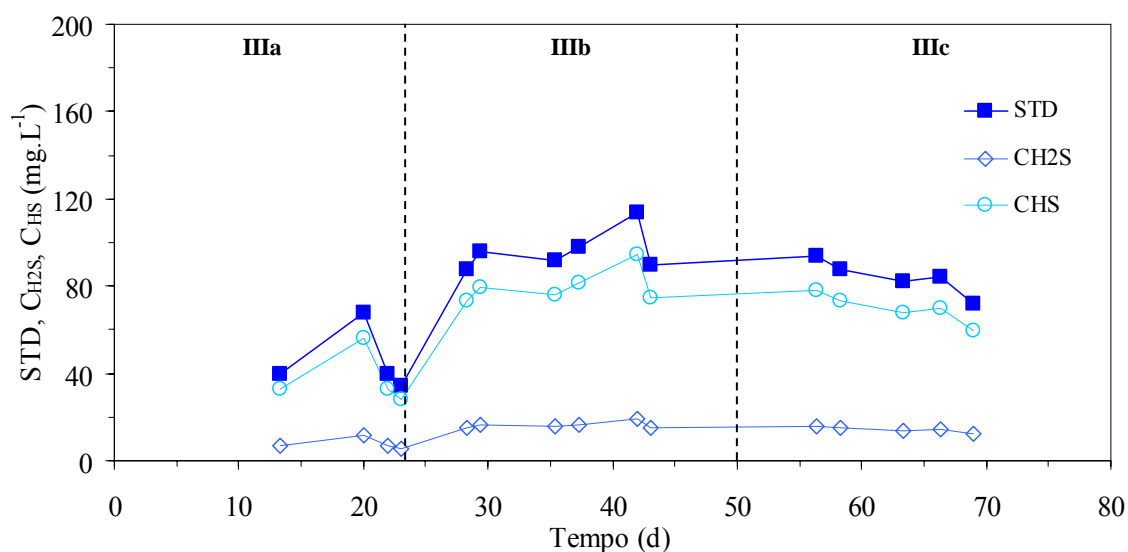


Figura 5.47 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- (C_{HS}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Os comportamentos das concentrações de sulfeto e o pH durante o monitoramento da condição III estão mostrados no gráfico representado pela Figura 5.48, onde verificou-se que o comportamento da concentração de sulfeto no reator foi análogo ao da condição II, se mostrando constante ao longo das condições IIIa, IIIb e IIIc, e sempre em valores menores que 10 mg.L^{-1} . Analisando os valores de pH, novamente foi verificada a tendência ao aumento dos valores de pH conforme o tempo de enchimento do reator aumentava, sempre mantendo o sistema em valores adequados para a digestão anaeróbia, em todas as condições.

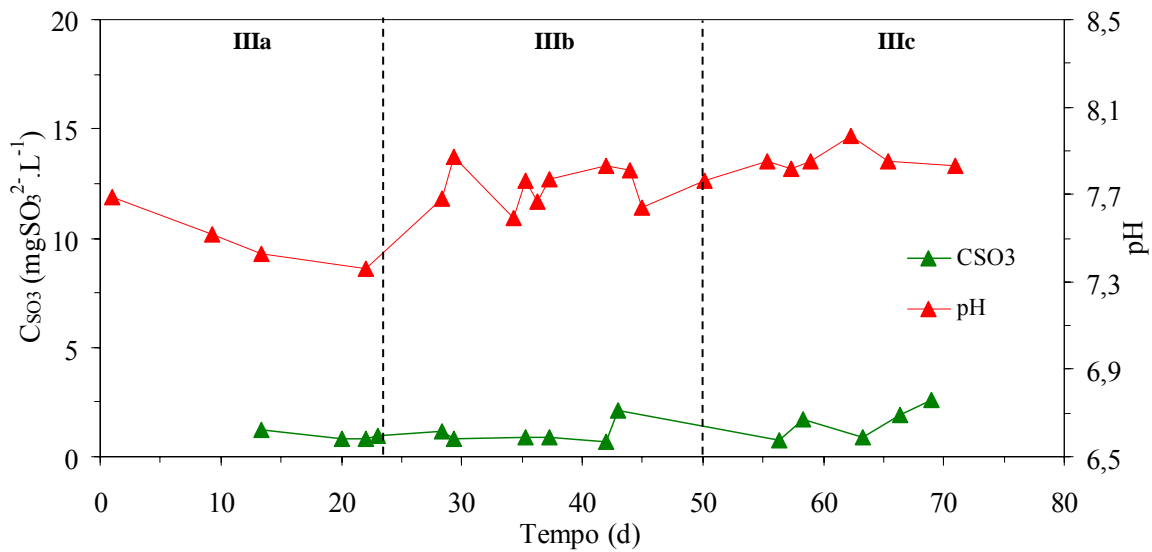


Figura 5.48 – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) e pH no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Os resultados das concentrações de ácidos voláteis totais (AVT) e de alcalinidade a bicarbonato (AB), representados na Figura 5.49. Novamente, o comportamento da concentração dos ácidos voláteis durante o monitoramento do reator mostrou que estes se mantiveram em níveis adequados, à exceção do princípio da condição IIIb, que demonstrou um pico na concentração dos ácidos voláteis totais na mudança de condição, mas esta perturbação na concentração voltou aos níveis normais após aproximadamente 6 dias de operação na condição IIIb.

Foi observado apenas um pequeno acréscimo na concentração média de ácidos voláteis na condição IIIc, quando comparada com as condições IIIa e IIIb, mas ainda sim não é possível inferir sobre a ocorrência de processos sulfetogênicos que utilizam completamente o substrato orgânico (realizados pelas BRS oxidadoras completas) processos sulfetogênicos que não levam a matéria orgânica até o CO_2 (realizados pelas BRS oxidadoras incompletas).

Durante toda a operação do reator na condição III, observou-se sempre a produção de alcalinidade, fato este corroborado pelo comportamento do pH no sistema, visto que a alcalinidade a bicarbonato do afluente correspondeu ao valor de $190 \pm 15 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$. esta produção de alcalinidade indicou, conseqüentemente uma operação estável do sistema.

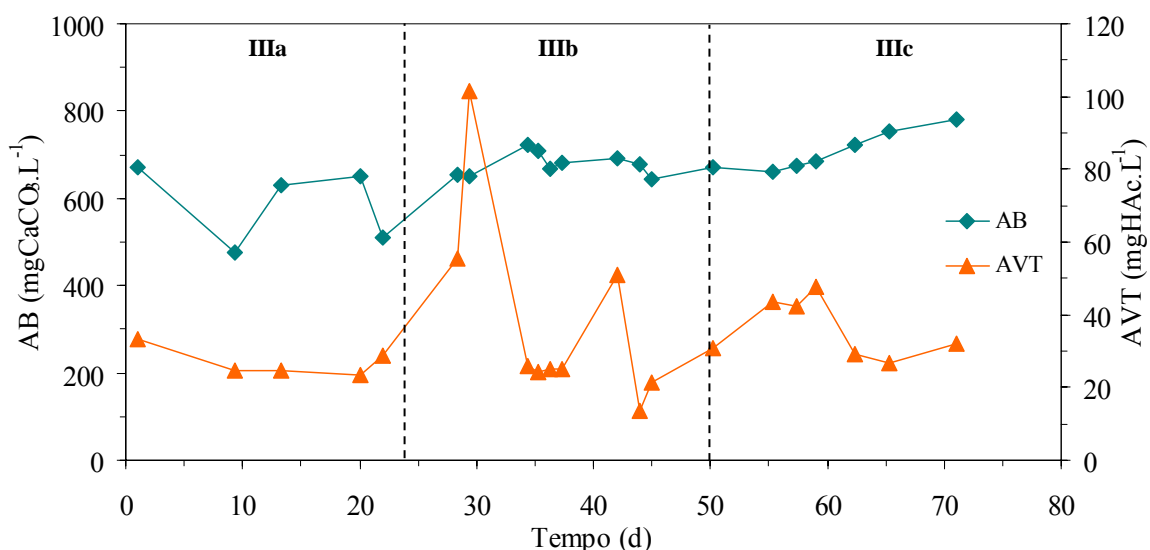


Figura 5.49 – Concentração de ácidos voláteis totais (AVT) e alcalinidade a bicarbonato (AB) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Os histogramas comparando as operações em batelada (B) com as operações em batelada alimentada de 3 horas (FB I) e de 6 horas (FB II), na operação do reator na condição III, estão apresentados a seguir, e correspondem as condições IIIa, IIIb e IIIc, respectivamente.

A Figura 5.50 compara as médias de concentração de matéria orgânica, total e filtrada, e suas respectivas eficiências. Uma análise das médias dos resultados indica que, para esta condição, a estratégia de alimentação não influenciou significativamente a remoção de matéria orgânica.

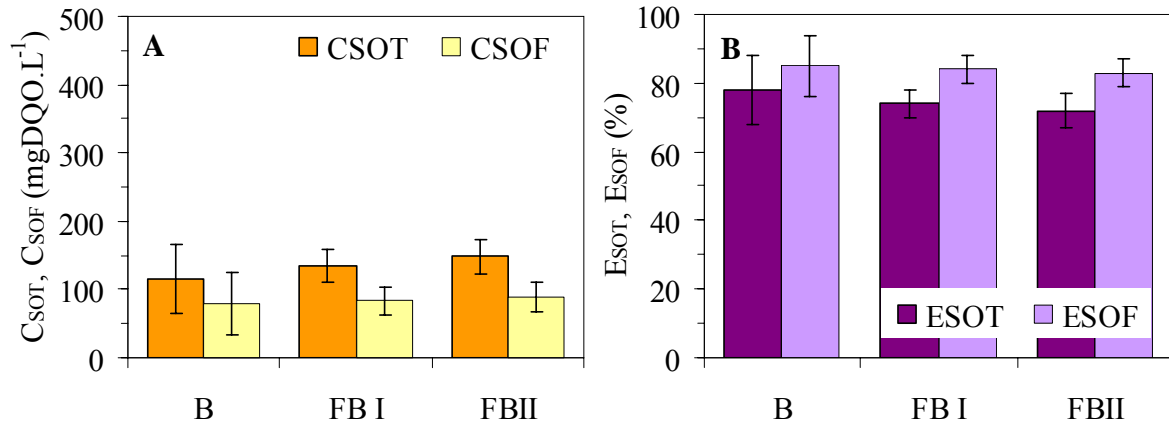


Figura 5.50 – Comparação entre as médias de concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF} ; Gráfico A) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição III.

Observou-se, nos gráficos representados pela Figura 5.51, que na comparação entre as cargas orgânicas aplicadas e removidas, em termos de volume (COV) e especificamente em relação à concentração de biomassa (COE), o desempenho do sistema foi similar em todas as condições, a despeito da estratégia de alimentação.

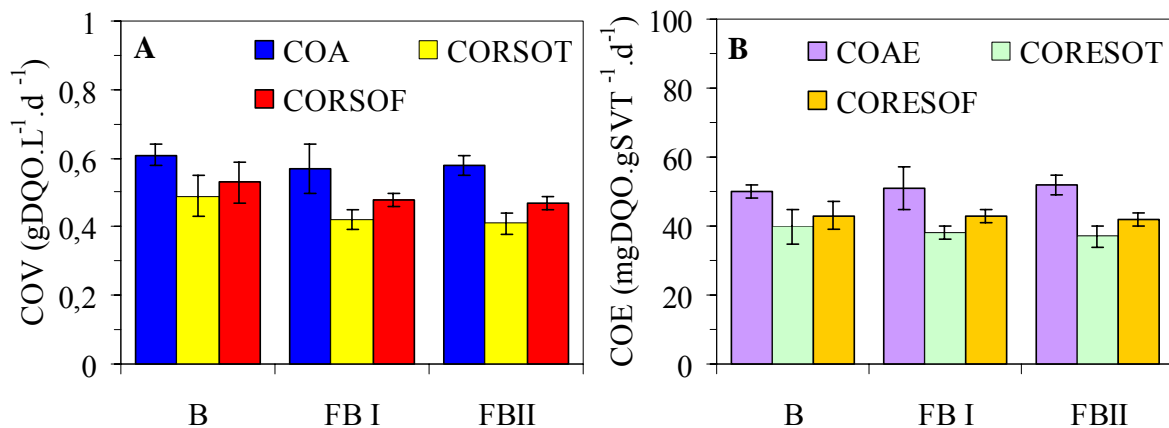


Figura 5.51 – Comparação entre as médias das cargas orgânicas volumétricas (COA, COA_{SOT}, COA_{SOF}; Gráfico A) e cargas orgânicas específicas (COAE, COE_{SOT}, COE_{SOF}; Gráfico B) no reator operado na condição III.

A Figura 5.52 mostra a comparação entre as concentrações de sulfato no afluente do reator e suas respectivas eficiências, onde mostra que a operação em batelada (B) atingiu, novamente, as menores eficiências quando comparada com as operações em batelada alimentada (FB I e FB II), tal que, a exemplo das condições anteriores, a operação em batelada alimentada de 3 horas mostrou-se mais eficiente na redução de sulfato.

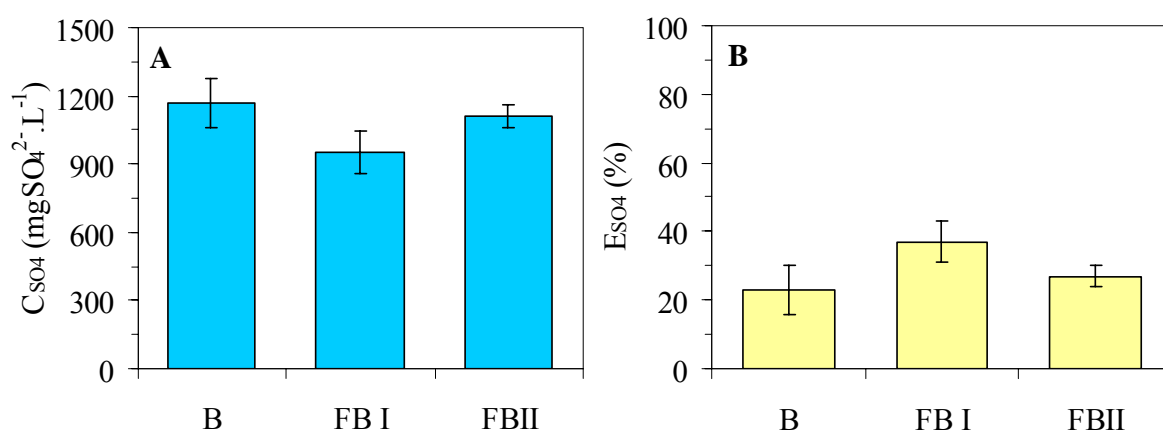


Figura 5.52 – Comparação entre as médias de concentração de sulfato (C_{SO_4} ; Gráfico A) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4} ; Gráfico B) no reator operado na condição III.

Através da Figura 5.53 pode-se observar a comparação entre as cargas de sulfato aplicadas e removidas, em termos de volume (CSV) e especificamente em relação à concentração de biomassa (CSE). Conforme a análise realizada no gráfico de eficiência de redução de sulfato, pode-se averiguar que, novamente, a operação do reator em batelada alimentada de 3 horas (FB I) apresentou maior remoção volumétrica e específica de sulfato.

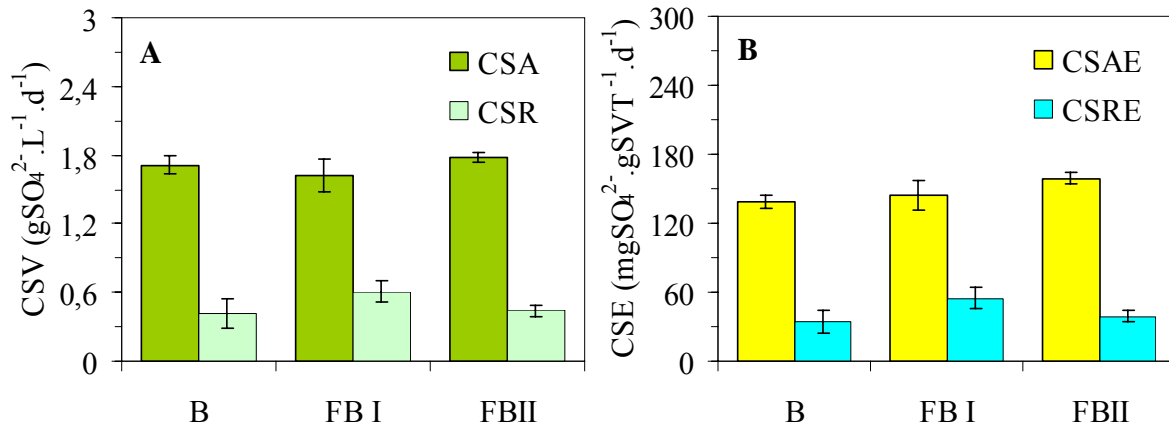


Figura 5.53 – Comparação entre as médias das cargas volumétricas de sulfato (CSA, CSR; Gráfico A) e cargas específicas de sulfato (CSAE, CSRE; Gráfico B) no reator operado na condição III.

A seguir serão apresentados os resultados dos perfis realizados durante o ciclo de operação do reator, para as condições IIIa, IIIb e IIIc, comparativamente.

Durante os perfis de concentração de matéria oxidável e concentração de matéria orgânica filtradas, mostrados pela Figura 5.54 em termos de DQO, pode-se observar que durante a operação em batelada (IIIa), houve um rápido consumo inicial da matéria oxidável e orgânica seguido por um período no qual estes valores se mantiveram constantes até o fim do ciclo, conforme observado em todas as operações em batelada das condições anteriores (condições Ia e IIa). Na operação em batelada alimentada de 3 horas (IIIb) assim como na operação em batelada alimentada de 6 horas (IIIc), foram observado resultados que indicam uma relativa constância. Novamente, é importante ressaltar que os primeiros pontos dos perfis apresentam valores inferiores ao do afluente devido ao efeito de diluição no reator.

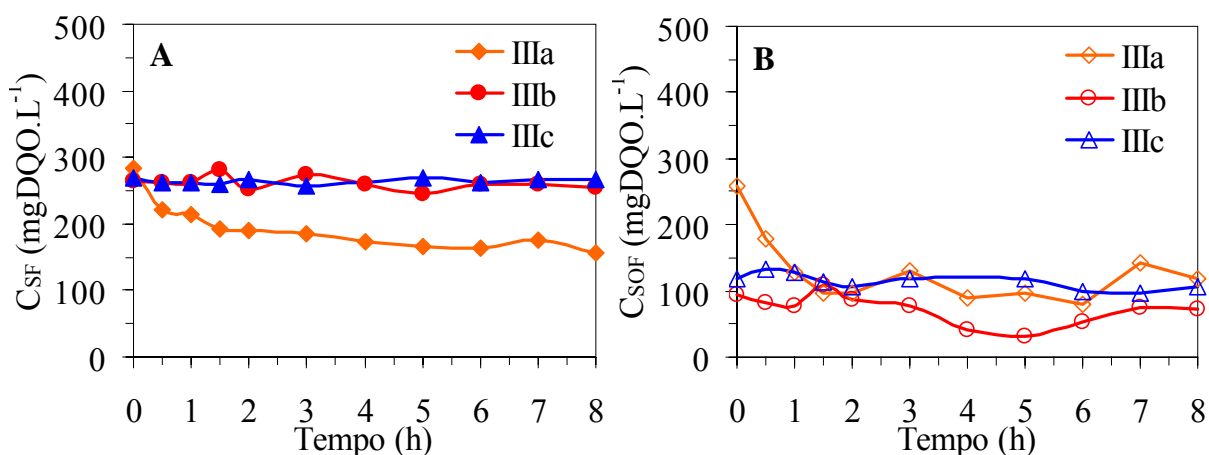


Figura 5.54 – Perfis de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF} ; Gráfico A) e de concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF} ; Gráfico B) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Os gráficos que ilustram os perfis de concentração de sulfato (Figura 5.55) no reator mostraram que a concentração de sulfato na operação do reator em batelada (IIIa) mostrou um declínio típico nas primeiras duas horas de perfil, se mantendo relativamente constante durante o restante da operação, analogamente ao comportamento verificado nas operações em batelada das operações anteriores (Ia e IIa), entretanto com uma eficiência no consumo de sulfato menos expressiva. As condições de operação nas quais o reator operou em batelada alimentada (IIIb e IIIc) apresentaram resultados constantes e similares durante o perfil.

Observa-se que, assim como nos perfis de concentrações de matéria oxidável e matéria orgânica, os primeiros pontos dos perfis apresentam valores inferiores ao do afluente devido ao efeito de diluição no reator.

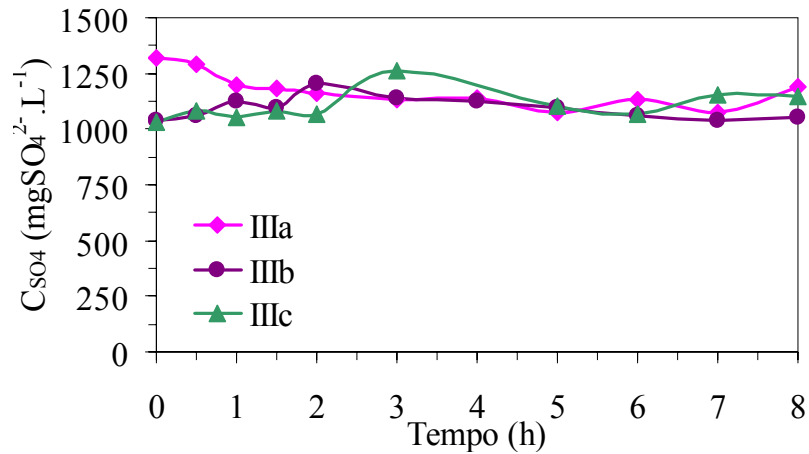


Figura 5.55 – Perfis de concentração de sulfato (C_{SO_4}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Na Figura 5.56 estão apresentados os perfis das condições IIIa, IIIb e IIIc de sulfetos totais dissolvidos (STD), de sulfeto na forma HS^- e de sulfeto de hidrogênio (H_2S). Assim como nas condições anteriores, as operações nas quais houve maior redução de sulfato apresentaram conseqüentemente maiores concentrações de STD como produtos da sulfetogênese. Na condição IIIb, pode-se verificar, desta maneira, a produção mais expressiva de STD. Analisando o comportamento do perfil, pode-se concluir que a produção de sulfetos se apresentou relativamente constante durante todas as operações.

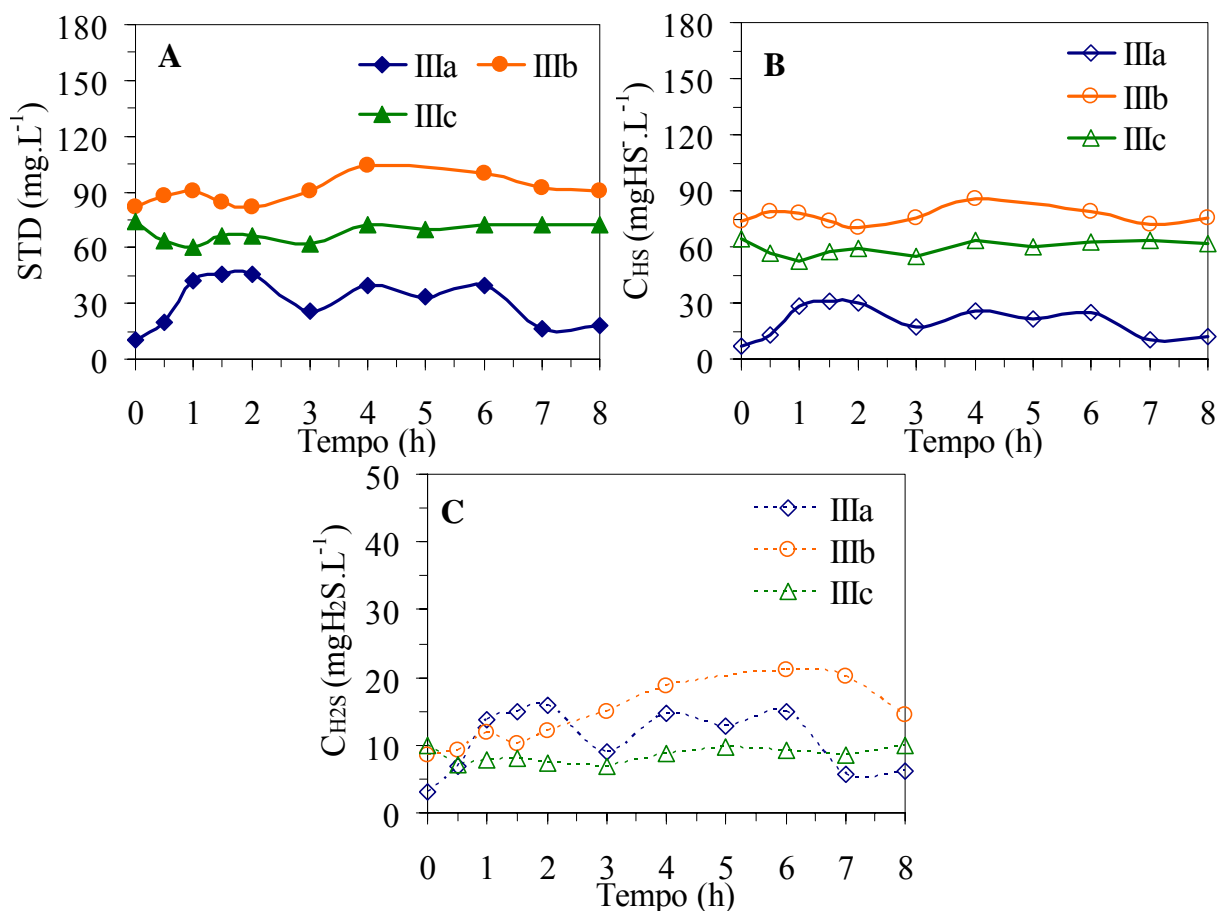


Figura 5.56 – Perfis de sulfetos totais dissolvidos (STD; Gráfico A), de sulfeto na forma HS⁻ (C_{HS}; Gráfico B) e de sulfeto de hidrogênio (C_{H₂S}; Gráfico C) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

A Figura 5.57 mostra os perfis de concentração de sulfito, mostrando que durante a condição IIIa o comportamento da concentração de sulfito apresentou um pico de produção nesta espécie após a 3^a hora de perfil, tal que este sulfito foi consumido até valores mais baixos (menores que 20 mgSO₃²⁻.L⁻¹) antes do término do ciclo de operação. Os perfis das condições IIIb e IIIc, nas quais o reator operou em batelada alimentada de 3 e 6 horas, respectivamente, mostram uma operação quase constante durante todo o ciclo.

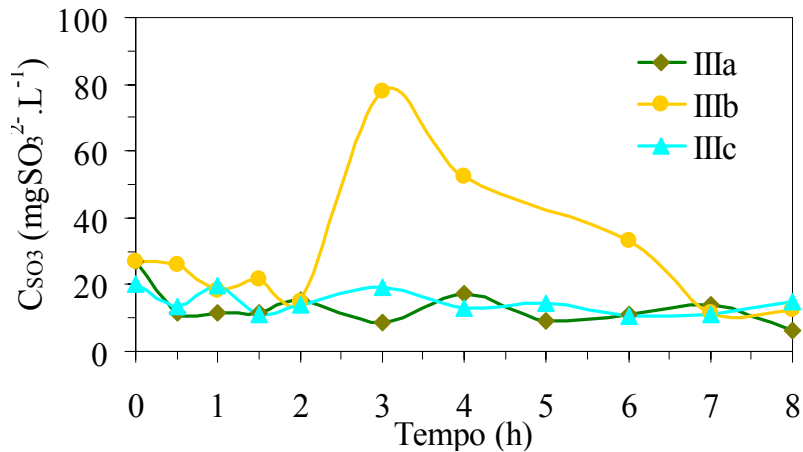


Figura 5.57 – Perfis de concentração de sulfito (C_{SO_3}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Conforme os perfis de ácidos voláteis totais (AVT) e de alcalinidade a bicarbonato (AB), ilustrados na Figura 5.58, uma análise dos perfis de ácidos voláteis, pode-se inferir que apenas foi verificado um pico de ácidos voláteis no início da operação em batelada (IIIa) e na operação em batelada alimentada de 3 horas (IIIb), sendo este rapidamente consumido em atingindo valores que indicam estabilidade do sistema. A partir deste pico de concentração, pode-se averiguar que toda a operação se manteve com os ácidos voláteis em níveis constantes. A operação em batelada alimentada de 6 horas (IIIc) mostrou um comportamento constante, no tocante a concentração de ácidos voláteis, durante todo o ciclo.

Durante o perfil de ácidos voláteis totais por cromatografia não foram detectadas nenhuma das substâncias analisadas em nenhuma condição.

Nos perfis de alcalinidade a bicarbonato (AB), notou-se sempre uma geração de alcalinidade mostrando também que a variação na concentração da alcalinidade é bem pequena, tendendo a um valor constante, a exemplo dos perfis realizados nas condições I e II. A partir dos perfis de alcalinidade e de ácidos voláteis, pode-se inferir que o sistema

novamente apresentou boa capacidade de tamponamento e consumo dos ácidos voláteis, e conseqüentemente, uma operação estável.

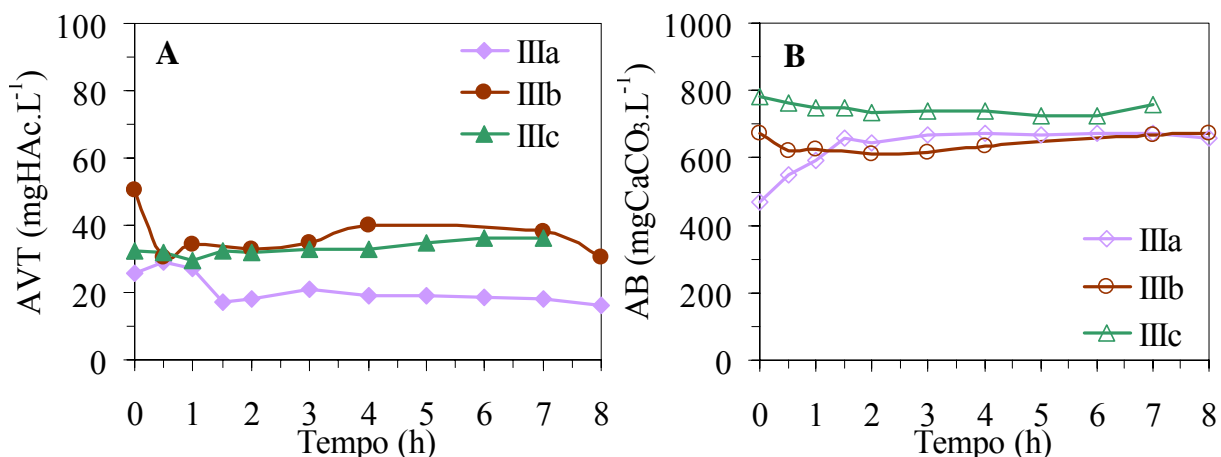


Figura 5.58 – Perfis de ácidos voláteis totais (AVT; Gráfico A) e de alcalinidade a bicarbonato (AB; Gráfico B) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

O perfil de pH também permite uma averiguação da estabilidade operacional do reator e está mostrado na Figura 5.59, juntamente com o perfil de potencial redox (POR). Durante o ciclo de operação, o comportamento pH confirma a estabilidade do reator, pois em todas as condições o pH sempre se apresentou em valores ótimos para a digestão anaeróbia. Além disso, verificou-se que o pH médio durante os perfis sofreu um aumento nas operações do reator em batelada alimentada quando comparado com o comportamento do pH no reator quando operado em batelada.

Conforme se observou no perfil de potencial redox, o mesmo manteve-se praticamente constante durante todo ciclo para todas as condições, exceto no princípio da condição IIIc, de onde o reator partiu de valores entre -600 e -400, porém retornando a um valor constante, após 1,5 horas de ciclo. Os valores analisados das condições IIIa, IIIb e IIIc após 1,5 horas de

ciclo se mostram constantes e sempre indicando valores menores que -300 mV, a exemplo das condições I e II. Adicionalmente, nas condições IIIa, IIIb e IIIc foram realizados os perfis de oxigênio dissolvido (OD), e em todas as condições o valor de concentração foi sempre $0,0 \text{ mg.L}^{-1}$, mais uma vez confirmando que o meio reacional se mostrava anaeróbio.

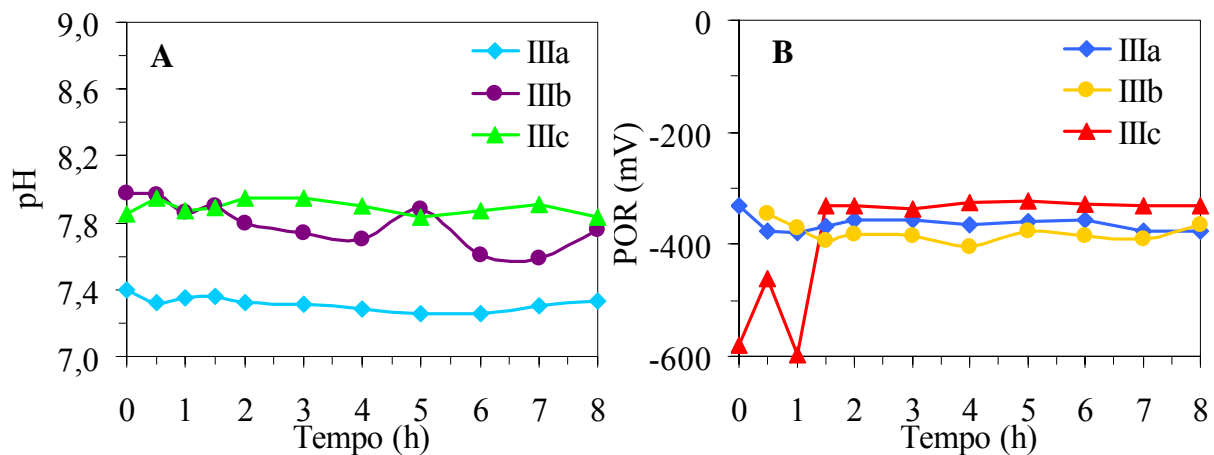


Figura 5.59 – Perfis de pH (pH; Gráfico A) e de potencial de oxi-redução (POR; Gráfico B) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

A Figura 5.60 mostra os perfis de concentração de gás carbônico (CO_2) e de metano (CH_4) no biogás, onde se averiguou que o metano não foi detectado no biogás nas operações em batelada alimentada da condição III (IIIb e IIIc), e mesmo na operação em batelada (IIIa) o metano foi detectado após a 3ª hora de ciclo. Verificou-se que a concentração de gás carbônico no biogás foi levemente maior na condição IIIa (batelada) e levemente menor na condição IIIc (batelada alimentada de 6 horas), tal que o aumento do tempo de enchimento do reator teve um suave desfavorecimento ao aumento da concentração do CO_2 no biogás.

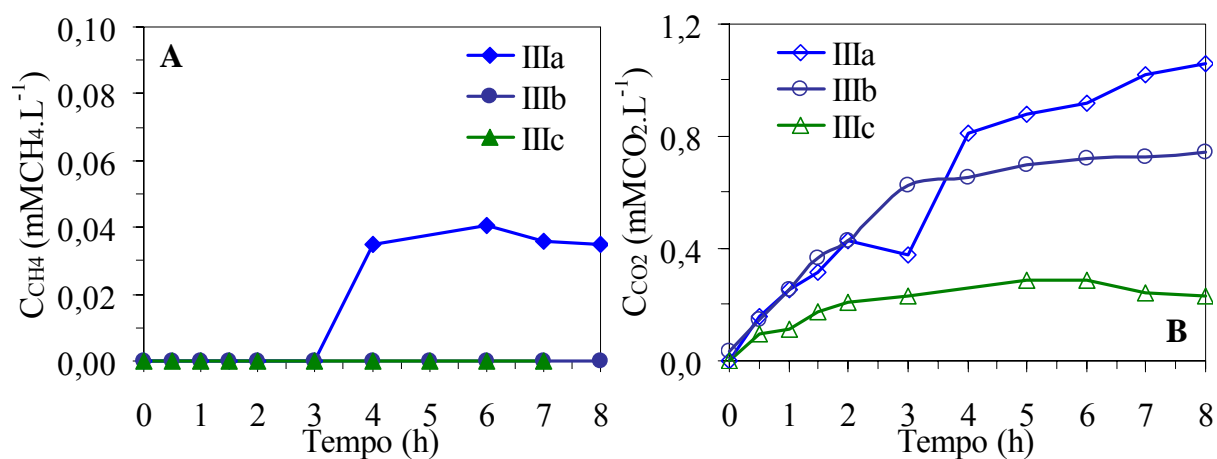


Figura 5.60 – Perfis de concentração de metano (C_{CH_4} ; Gráfico A) e de concentração de gás carbônico (C_{CO_2} ; Gráfico B) no biogás produzido pelo reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

5.5 Análise Comparativa dos Resultados das Condições Experimentais

Esta análise comparativa dos resultados das condições experimentais objetiva verificar a influência da concentração de sulfato e conseqüentemente da relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ na eficiência do reator. Assim, será possível interpretar melhor a relação entre as condições I, II e III, ou seja, as relações $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34, 0,67 e 0,34, respectivamente, e as estratégias de alimentação B, FB I e FBII, ou seja, tempos de alimentação de 10 min, 3 h e 6 h, respectivamente.

A Figura 5.61 compara as concentrações de matéria orgânica bruta (C_{SOT}) e as eficiências de remoção de matéria orgânica bruta (E_{SOT}) obtidas nas condições I, II e III, para os ensaios em batelada (B – condições a), batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições b) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições c).

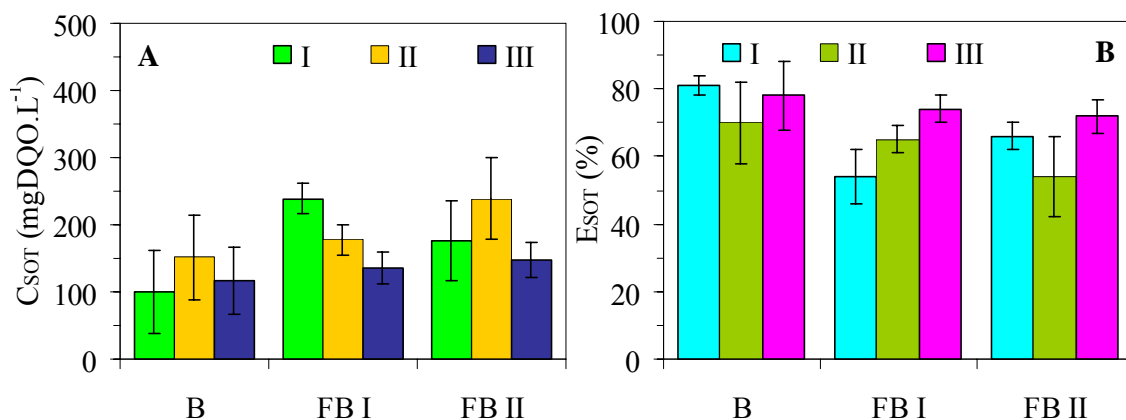


Figura 5.61 – Comparação das concentrações de matéria orgânica total do efluente (Gráfico A) e as eficiências de remoção de matéria orgânica total (Gráfico B) obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III.

Através da comparação fornecida pelos gráficos representados na Figura 5.61, pode-se verificar que nos ensaios em batelada (B – condições a) para todas as condições I, II e III (condições Ia, IIa e IIIa), as eficiências de remoção de matéria orgânica bruta foram sempre maiores que nos ensaios em batelada alimentada (FB I e FB II – condições b e c). Averiguou-se que nas operações cuja relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ foi igual a 0,34 (condição III), nos ensaios nos quais o reator operou em batelada alimentada (FB I e FB II – condições b e c), a remoção de matéria orgânica bruta foi a maior, o que pode ser explicado provavelmente pela alta concentração de sulfato, fazendo com que as comunidades microbianas consumissem mais matéria orgânica.

A Figura 5.62 apresenta a comparação das concentrações de matéria orgânica filtrada (C_{SOF}) e a eficiência de remoção da matéria orgânica filtrada (E_{SOF}), para as condições I, II e III, nas operações em batelada (B – condições a), batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições b) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições c).

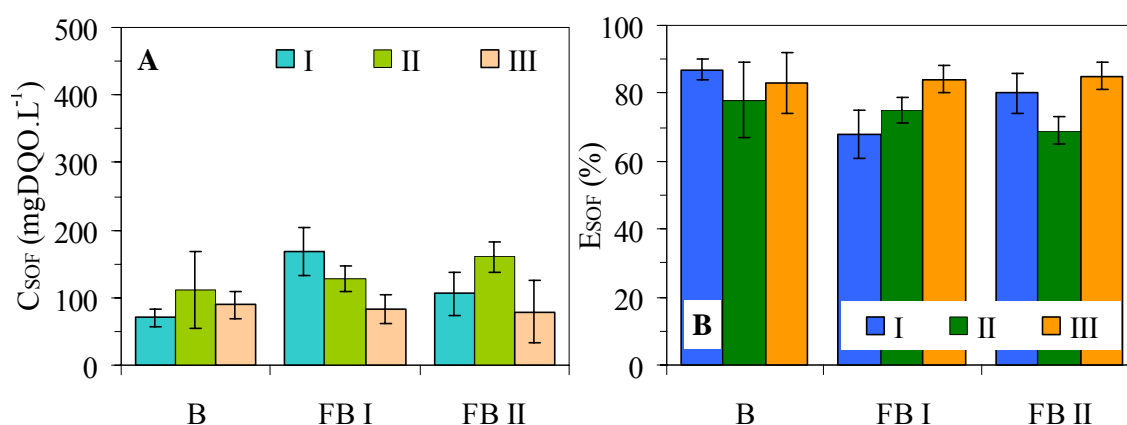


Figura 5.62 – Comparação das concentrações de matéria orgânica filtrada do efluente (Gráfico A) e as eficiências de remoção de matéria orgânica filtrada (Gráfico B) obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III.

Assim como verificada na análise das médias das concentrações de matéria orgânica bruta (Figura 5.61), o aumento da concentração de sulfato (pela diminuição da razão $DQO/[SO_4^{2-}]$), fez com que o reator apresentasse maiores eficiências de remoção de matéria orgânica nas operações em batelada alimentada (FB I e FB II – condições b e c). As eficiências de remoção mostram que durante a condição I ($DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$), a operação em batelada (condição Ia) mostrou maior remoção de matéria orgânica filtrada, assim como a mesma operação durante a condição III (condição IIIa), tal que foi realizado um teste estatístico F para comparar a média de dois valores, indicando que os valores são estatisticamente iguais com 99% de significância (P-valor = 1,000, considerando uma hipótese nula dos valores de concentração de matéria orgânica filtrada serem iguais).

Desta maneira, pode-se concluir que durante toda a condição III as operações em batelada (B – condições a), batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições b) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições c) o reator apresentou as maiores eficiências na remoção da matéria orgânica filtrada.

Analisando a condição I comparativamente com a condição II, pode-se verificar que a condição I apresentou maiores valores de eficiência no ensaio em batelada (condição Ia) do que o mesmo ensaio na condição II (condição IIa). Entretanto, durante a batelada alimentada de 3 horas (condições b), foi observado que a eficiência do ensaio realizado durante a condição II (condição IIb) atingiu melhores eficiências do que durante a condição I (condição Ib). Finalmente, nos ensaios em batelada alimentada de 6 horas (condições c), verificou-se que as eficiências de remoção de matéria orgânica foram próximas.

Da mesma maneira, pode-se verificar que a operação em batelada (condições a), favoreceu a remoção de matéria orgânica filtrada (Figura 5.62) nas condições I e II (condições Ia e IIa) e também que a remoção de matéria orgânica filtrada apresentou menores valores de

eficiência conforme o tempo de enchimento do reator aumentava. Entretanto, durante a condição III as eficiências de remoção de matéria orgânica filtrada não mostraram diferenças significativas (condições a, b e c), considerando 95% de significância nos testes estatísticos realizados entre as médias (teste F), mostrando que nesta condição, a estratégia de alimentação do reator não influenciava a eficiência de remoção de matéria orgânica (Comparação entre as condições IIIa e IIIb apresentaram um P-valor de 0,981, entre IIIa e IIIc apresentaram um P-valor igual a 0,979, e não demonstraram significância suficiente quando comparadas as operações nas condições IIIb e IIIc, tal que, estatisticamente, não podem ser considerados valores iguais).

A Figura 5.63 mostra a comparação entre as cargas orgânicas removidas, para amostras brutas (Gráfico A) e filtradas (Gráfico B), nas operações em batelada (B – condição a), batelada alimentada de 3 horas (FB I – condição b) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condição c), nas condições I, II e III, ou seja, nas relações $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34, 0,67 e 0,34, respectivamente.

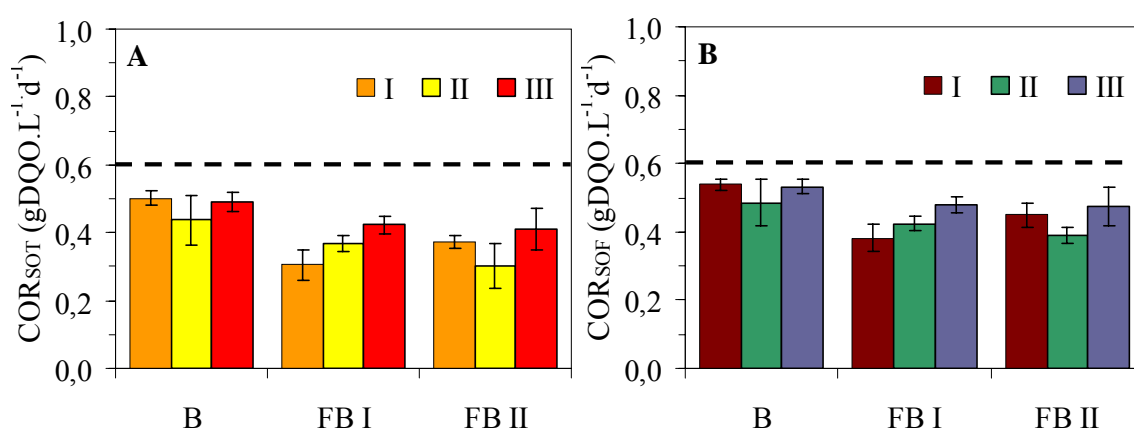


Figura 5.63 – Comparação das cargas orgânicas volumétricas brutas removidas (COR_{SOT} , Gráfico A) e cargas orgânicas volumétricas filtradas removidas (COR_{SOF} , Gráfico B), obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III. As linhas tracejadas indicam as médias dos valores de cargas orgânicas volumétricas aplicadas.

A comparação entre as cargas orgânicas volumétricas brutas (COR_{SOT}) e filtradas (COR_{SOF}), ilustrada na Figura 5.63, corrobora a conclusão de que a condição III (na qual o reator operou em uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$) foi a mais eficiente em remover a matéria orgânica do sistema, embora as operações em batelada tenham atingido os valores mais altos de conversão da matéria orgânica (Figura 5.62).

Na Figura 5.64 estão mostradas as comparações entre a remoção da carga de matéria orgânica específica, para amostras brutas ($CORE_{SOT}$) e filtradas ($CORE_{SOF}$).

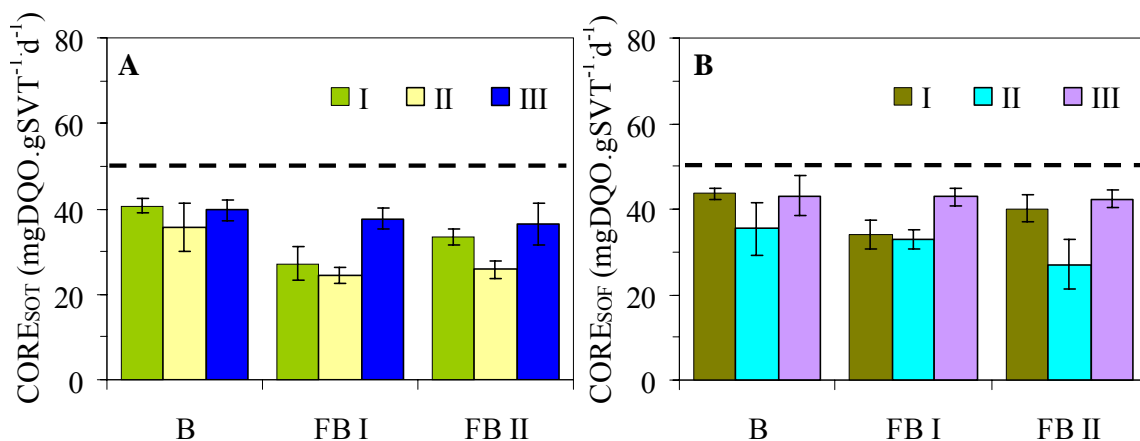


Figura 5.64 – Comparação das cargas orgânicas específicas totais (Gráfico A) e cargas orgânicas específicas filtradas (Gráfico B), aplicadas e removidas, obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III.

Através de uma análise dos gráficos representados pela Figura 5.64, novamente pode-se averiguar que a condição III (correspondente a uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,34 no afluente) foi a mais eficiente na remoção específica de matéria orgânica e que as operações em batelada (condições a) apresentaram maiores conversões específicas de matéria orgânica, tanto para amostras filtradas como para amostras brutas (Figura 5.62). Entretanto, foi observado que nas operações em batelada alimentada de 3 horas (condições b) as cargas

específicas removidas de matéria orgânica, tanto para amostras brutas como para amostras filtradas nas condições I (relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$) e II (relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67$) são iguais, admitindo-se uma significância de 95% (P-valor igual a 0,959 na comparação entre remoção específica de matéria orgânica bruta, e P-valor correspondente a 0,951 na comparação entre remoção específica de matéria orgânica filtrada). Isso indica que, nos ensaios nos quais o reator foi operado em batelada alimentada de 3 horas (condições b), as relações $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34 e 0,67 não influenciaram a carga removida de matéria orgânica em termos específicos, ou seja, pela quantidade de microorganismos que consumiram o substrato orgânico.

Na Figura 5.65 estão ilustradas as comparações entre as médias dos valores das concentrações de sulfato (C_{SO_4}) e dos valores das eficiências de redução de sulfato (E_{SO_4}) obtidas nas condições I, II e III, para os ensaios em batelada (B – condição a), batelada alimentada de 3 horas (FB I – condição b) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condição c).

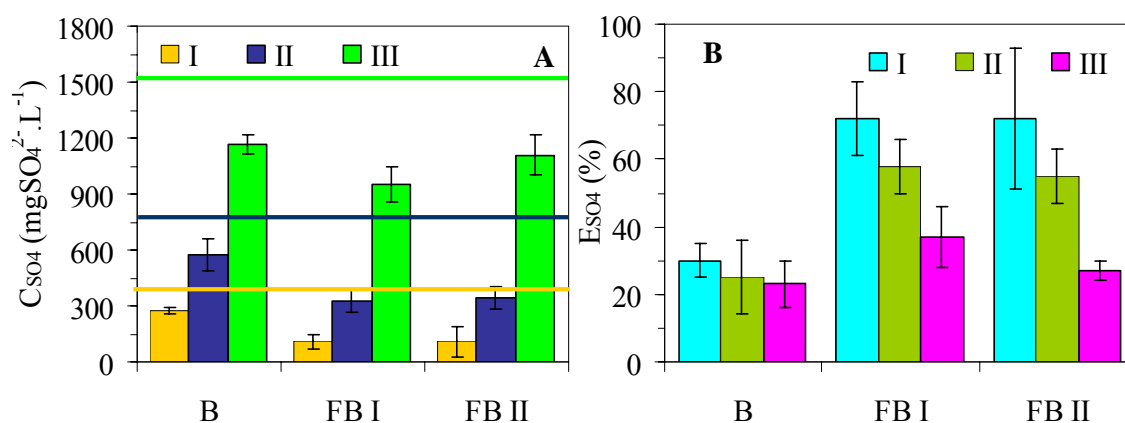


Figura 5.65 – Comparação das concentrações de sulfato do afluente e do efluente (C_{SO_4} , Gráfico A), assim como as eficiências de redução de sulfato (E_{SO_4} , Gráfico B) obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III. As linhas correspondem às médias dos valores de concentração de sulfato no afluente, associadas aos histogramas pelas respectivas cores.

A comparação da eficiência de redução de sulfato, ilustrada pela Figura 5.65, no Gráfico B, mostra que em todas as estratégias de alimentação avaliadas, a condição I (na qual o reator foi operado em uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34) mostrou melhores eficiências de remoção, seguida da condição II (operando com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,67), tal que a operação na condição III (operando com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ correspondente a 0,34) foram obtidas as menores eficiências de redução de sulfato. Desta forma, pode-se concluir que o aumento da concentração de sulfato afluente sem a proporcional mudança na concentração de matéria orgânica afluente (e conseqüente diminuição nas relações $DQO/[SO_4^{2-}]$), nas condições estudadas, prejudicou a eficiência de redução de sulfato do reator, em todas as estratégias de alimentação.

Outra conclusão importante, que pode ser verificada é que as operações em batelada alimentada tiveram efeito positivo no sentido de melhorar a remoção de sulfato em todas as condições I, II e III avaliadas, embora este efeito se apresentasse mais evidente nas operações do reator nas condições I (operando com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34) e II (na qual o reator operou com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,67). Nas operações em batelada (B – condições a) pode-se considerar os valores das médias das eficiências de redução de sulfato entre as condições Ia e IIa como sendo iguais com 95% de significância (P-valor igual a 0,979) e também os valores das médias das eficiências entre as condições IIa e IIIa como sendo iguais, com 85% de significância (P-valor correspondente a 0,868). Todavia, na comparação entre os valores das médias das eficiências nas condições Ia e IIIa devem ser considerados distintos, pois não apresentaram nível de significância suficiente (P-valor igual a 0,685), o que indica que realmente existe uma tendência na redução da eficiência de remoção de sulfato conforme se aumenta a concentração de sulfato afluente.

Assim, pode-se inferir que nas operações em batelada (B – condições a), conforme houve a variação da relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ no sentido de aumentar a concentração de sulfato afluente sem alteração a concentração da matéria orgânica, foi observado um menor impacto nos valores de eficiência de redução de sulfato, quando comparadas com as operações nas quais o reator operou em batelada alimentada (FB I e FB II – condições b e c).

Os histogramas apresentados pela Figura 5.66 mostram as cargas de sulfato removidas, volumétricas (CSR) e específicas (CSRE), durante a operação do sistema em batelada (B – condições a), batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições b) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições c), nas condições I, II e III, ou seja, nas relações $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34, 0,67 e 0,34, respectivamente.

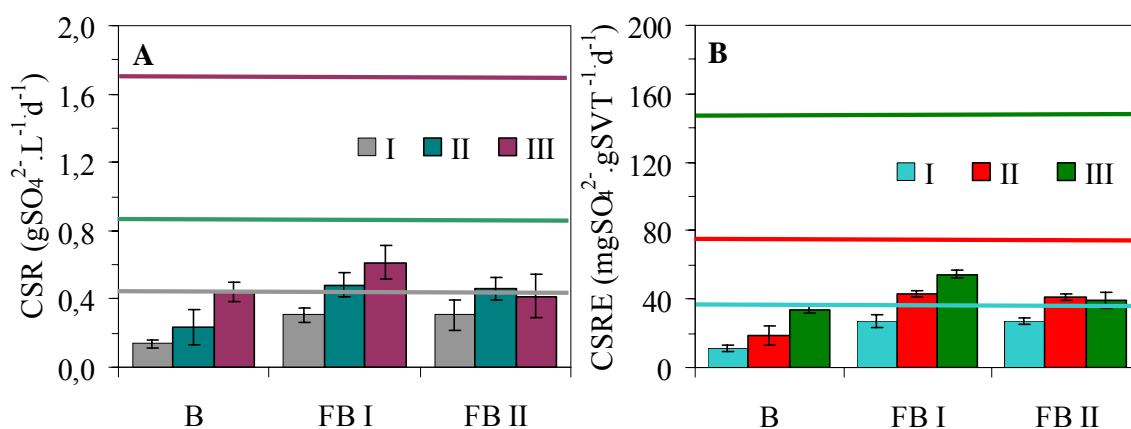


Figura 5.66 – Comparação das cargas de sulfato removidas, volumétricas (CSR, Gráfico A) e específicas (CSRE, Gráfico B), obtidas durante o monitoramento das condições I, II e III. As linhas correspondem às médias dos valores das cargas de sulfato volumétricas aplicadas, associadas aos histogramas pelas respectivas cores.

Comparando as remoções de carga de sulfato volumétrica no reator nas condições I, II e III, apresentadas na Figura 5.66, podemos verificar novamente que as operações em batelada alimentada favoreceram uma maior remoção de sulfato do sistema. Contudo,

comparando-se os valores obtidos de cargas de sulfato removidas entre as operações em batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições b) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições c), durante a condição I (na qual o reator operou em uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34) é possível afirmar, através do teste F, que o aumento do tempo de enchimento de 3 horas (FB I – condições b) para 6 horas (FB II – condições c) não influenciou a carga volumétrica removida de sulfato, considerando uma significância de 95% (P-valor correspondente a 0,985). Vale ressaltar que uma análise no gráfico entre as operações em batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições b) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições c) na condição II (condições IIb e IIc, respectivamente), que aparentemente apresentariam valores similares, quando realizado um teste F destas médias concluiu-se que o mesmo apresentou significância suficiente para que estes valores correspondam (P-valor igual a 0,055), ou seja, deve-se considerar estes valores como sendo distintos entre si (apresentando como médias de carga de sulfato volumétricas removida para a condição IIb igual a $0,48 \pm 0,07$ e a condição IIc apresentando uma média de $0,46 \pm 0,06$).

A seguir, a Figura 5.67 relaciona as cargas de sulfato volumétricas e específicas aplicadas (CSA e CSAE, respectivamente) com as cargas de sulfato volumétricas e específicas removidas (CSR e CSRE, respectivamente) nas operações em batelada (B – condições a), batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições), nas condições I, II e III, ou seja, nas relações $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34, 0,67 e 0,34, respectivamente.

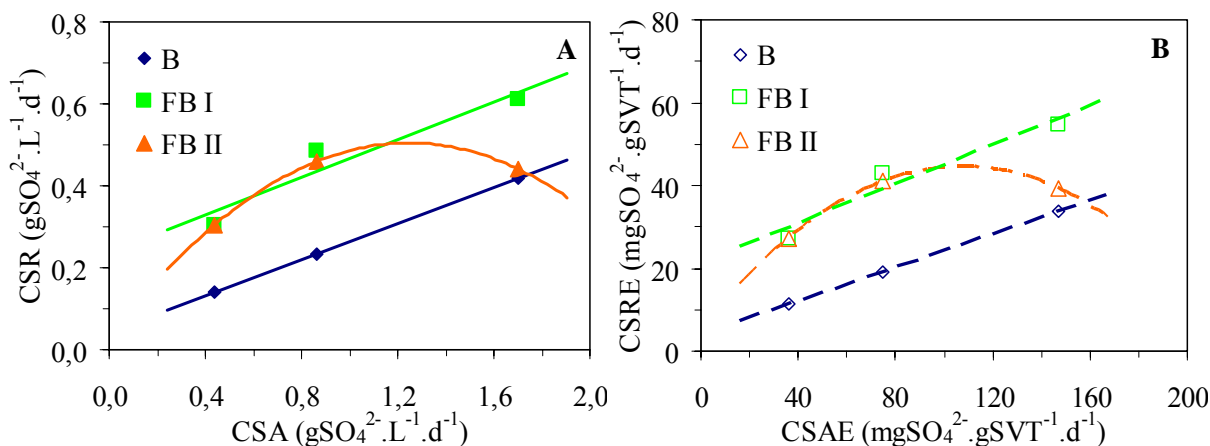


Figura 5.67 – Relação entre cargas de sulfato removidas, volumétricas (CSR, Gráfico A) e específicas (CSRE, Gráfico B), com as cargas removidas de sulfato correspondentes, para os ensaios em batelada (B), batelada alimentada de 3 horas (FB I) e batelada alimentada de 6 horas (FB II).

A relação estabelecida pela Figura 5.67 entre as cargas de sulfato removida com as cargas de sulfato aplicadas, nas operações do reator nas estratégias de alimentação em batelada (B – condições a), batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições b) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições c) é importante na investigação do efeito da crescente carga de sulfato aplicada relativas aos ensaios nas condições I, II e III, ou seja, nas relações $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34, 0,67 e 0,34, respectivamente, no desempenho do sistema em remover a carga de sulfato.

Foram realizados ajustes de funções aos pontos, pelo método dos mínimos quadrados, para cada estratégia de alimentação realizada. A Tabela 5.12 mostra os resultados dos ajustes das funções aos pontos, utilizando uma função linear. Entretanto, a dispersão dos resultados obtidos na operação do reator na estratégia de alimentação de batelada alimentada de 6 horas (FB II, relativa as condições Ic, IIC e IIIC) não possibilitou o ajuste a uma função linear, apresentando um coeficiente de correlação (R^2) inferior a 0,80; desta forma estes dados desta operação foi ajustada a um polinômio de segundo grau.

Tabela 5.12 – Funções ajustadas às médias experimentais, relacionando as cargas aplicadas de sulfato às cargas removidas de sulfato, em base volumétrica e específica.

Cargas	Estratégia de Alimentação *	Função Ajustada	Coefficiente de Correlação (R ²)
Volumétricas	Batelada (B)	$CSR = 0,22.CSA + 0,04$	1,000
	Batelada Alimentada - 3 Horas (FB I)	$CSR = 0,23.CSA + 0,24$	0,924
	Batelada Alimentada - 6 Horas (FB II)	$CSR = -0,30.CSA^2 + 0,76.CSA + 0,029$	1,000
Específicas	Batelada (B)	$CSRE = 0,20.CSAE + 3,97$	1,000
	Batelada Alimentada - 3 Horas (FB I)	$CSRE = 0,24.CSAE + 21,43$	0,931
	Batelada Alimentada - 6 Horas (FB II)	$CSRE = -0,003.CSAE^2 + 0,73.CSAE + 5,24$	1,000

*: B – condições a; FB I – condições b; FB II – condições c.

O ajuste linear bem sucedido das médias dos resultados de carga de sulfato removida, nas operações em batelada (B – condições a) e batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições b), fornece um indicativo que a operação provavelmente ocorreu, no intervalo das cargas de sulfato aplicadas, sem que houvesse inibição por excesso de substrato ou limitação do processo pelo tempo de enchimento do reator. O ajuste polinomial de segundo grau realizado nas médias dos resultados referentes aos ensaios em batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições c) indica que pode ter ocorrido algum tipo de limitação nesta operação, visto que a concentração do substrato *in situ* se manteve sempre em valores baixos devido ao tempo de enchimento, e se houvesse alguma inibição, esta se apresentaria nas condições anteriores de maneira mais acentuada; além disso, o estudo da primeira derivada da função

informa o ponto de máximo obtido, para este ajuste e para este intervalo de cargas de sulfato aplicadas, corresponde a uma carga volumétrica de sulfato aplicado de $1,27 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ e, conseqüentemente uma carga removida de sulfato de $0,51 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; e a mesma análise de ponto máximo realizada para a função ajustada para os valores de carga específica de sulfato informa uma carga específica de sulfato aplicada de $121,7 \text{ mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, que retorna um valor de carga específica de sulfato removida de $49,6 \text{ mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Estes pontos máximos correspondem à carga máxima de sulfato, volumétrica e específica, a ser aplicada sem prejuízo da eficiência da remoção de sulfato.

Está ilustrada na Figura 5.68 a relação entre as cargas de sulfato volumétricas e específicas aplicadas (CSA e CSAE, respectivamente) com as cargas orgânicas volumétricas e específicas removidas para amostras filtradas (COR_{SOF} e CORE_{SOF} , respectivamente) nas operações em batelada (B – condições a), batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições b) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições c), nas condições I, II e III, ou seja, nas relações $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34, 0,67 e 0,34, respectivamente.

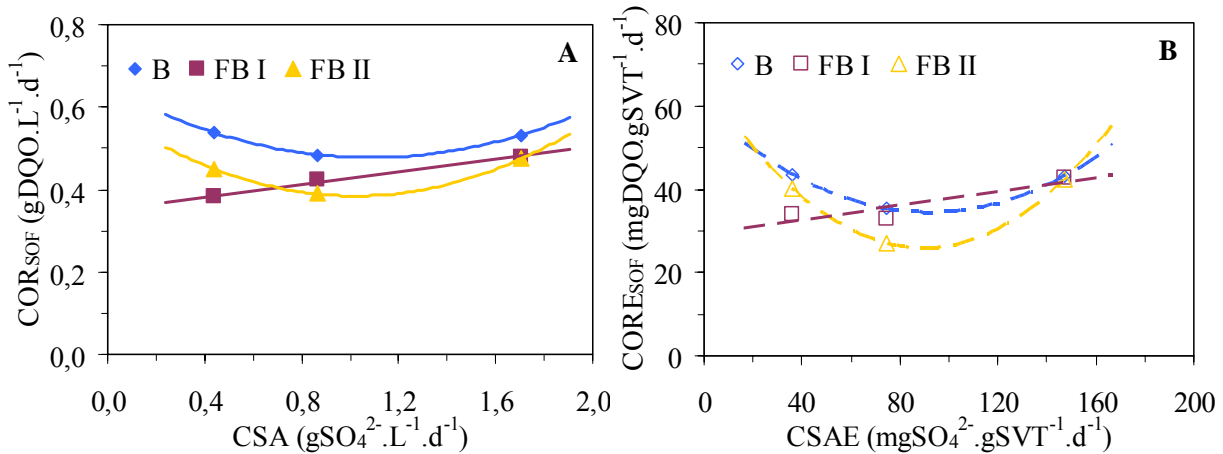


Figura 5.68 – Relação entre cargas de matéria orgânica filtrada removidas, volumétricas (COR_{SOF}, Gráfico A) e específicas (CORE_{SOF}, Gráfico B), com as cargas removidas de sulfato correspondentes, para os ensaios em batelada (B), batelada alimentada de 3 horas (FB I) e batelada alimentada de 6 horas (FB II).

Através da análise dos gráficos representados pela Figura 5.68, pode-se inferir nas operações do reator em batelada (B – condições a) e batelada alimentada de 6 horas (FB II – condições c) as relações DQO/[SO₄²⁻] intermediárias entre 1,34 e 0,34 exerceram um efeito inibitório na remoção da carga de matéria orgânica do reator. A operação do reator em batelada alimentada de 3 horas (FB I – condições b), aparentou não inibir a remoção de matéria orgânica nas condições I (reator operado com uma relação DQO/[SO₄²⁻] de 1,34), II (reator operado com uma relação DQO/[SO₄²⁻] de 0,67) e III (reator operado com uma relação DQO/[SO₄²⁻] de 0,34).

A Tabela 5.13 mostra os ajustes realizados nas funções as médias dos valores de cargas de matéria orgânica removidas, volumétricas e específicas relacionados com os valores de cargas de sulfato aplicadas, em base volumétrica e específica, respectivamente.

Tabela 5.13 – Funções ajustadas às médias experimentais, relacionando as cargas aplicadas de sulfato às cargas removidas de matéria orgânica, em base volumétrica e específica.

Cargas	Estratégia de Alimentação *	Função Ajustada	Coefficiente de Correlação (R ²)
Volumétricas	Batelada (B)	$COR_{SOF} = 0,14.CSA^2 - 0,31.CSA + 0,65$	1,000
	Batelada Alimentada - 3 Horas (FB I)	$COR_{SOF} = 0,08.CSA + 0,35$	0,991
	Batelada Alimentada - 6 Horas (FB II)	$COR_{SOF} = 0,19.CSA^2 - 0,4.CSA + 0,59$	1,000
Específicas	Batelada (B)	$CORE_{SOF} = 0,003.CSAE^2 - 0,53.CSAE + 59$	1,000
	Batelada Alimentada - 3 Horas (FB I)	$CORE_{SOF} = 0,086.CSAE + 29$	0,803
	Batelada Alimentada - 6 Horas (FB II)	$CORE_{SOF} = 0,005.CSAE^2 - 0,88.CSAE + 66$	1,000

*: B – condições a; FB I – condições b; FB II – condições c.

É importante salientar que os ajustes realizados, nos gráficos representados pelas Figuras 5.67 e 5.68 não representam modelos racionais, mas sim ajustes empíricos que podem apenas indicar o comportamento das cargas de sulfato removidas, volumétricas e específicas (Figura 5.67, Gráficos A e B, respectivamente) e o comportamento das cargas orgânicas filtradas removidas, volumétricas e específicas (Figura 5.58, Gráficos A e B, respectivamente) no intervalo compreendido entre as cargas de sulfato aplicadas.

5.6 Exames Microbiológicos

As amostras de lodo no qual operou o reator foram analisadas antes da operação do reator e após o término da condição III (relação DQO/[SO₄²⁻] de 0,34) para possibilitar a verificação e comparação das morfologias presentes. A Figura 5.69 mostra as fotografias referentes a microscopia realizada no inóculo antes do início das operações, enquanto a Figura 5.70 ilustra a microscopia realizada no inóculo após a operação na condição III. Vale ressaltar que foram realizadas somente microscopias de contraste de fase.

Através da análise da Figura 5.69, observou-se que antes do início da operação, os bacilos de extremidades arredondas se mostraram predominantes, provavelmente bactérias acidogênicas. Pode-se verificar também a presença de uma estrutura semelhante a *Methanosaeta*, visto que o lodo apresentou atividade metanogênica nas primeiras operações.

Na Figura 5.70, verificou-se que após o término da condição III a quantidade de bacilos curvos semelhantes às bactérias redutoras de sulfato nas microscopias aumentou, e pode-se verificar a presença de cocos. Os bacilos de extremidades arredondadas foram também encontrados, entretanto não foram encontradas as morfologias semelhantes a *Methanosaeta* que foram verificadas no início das operações.

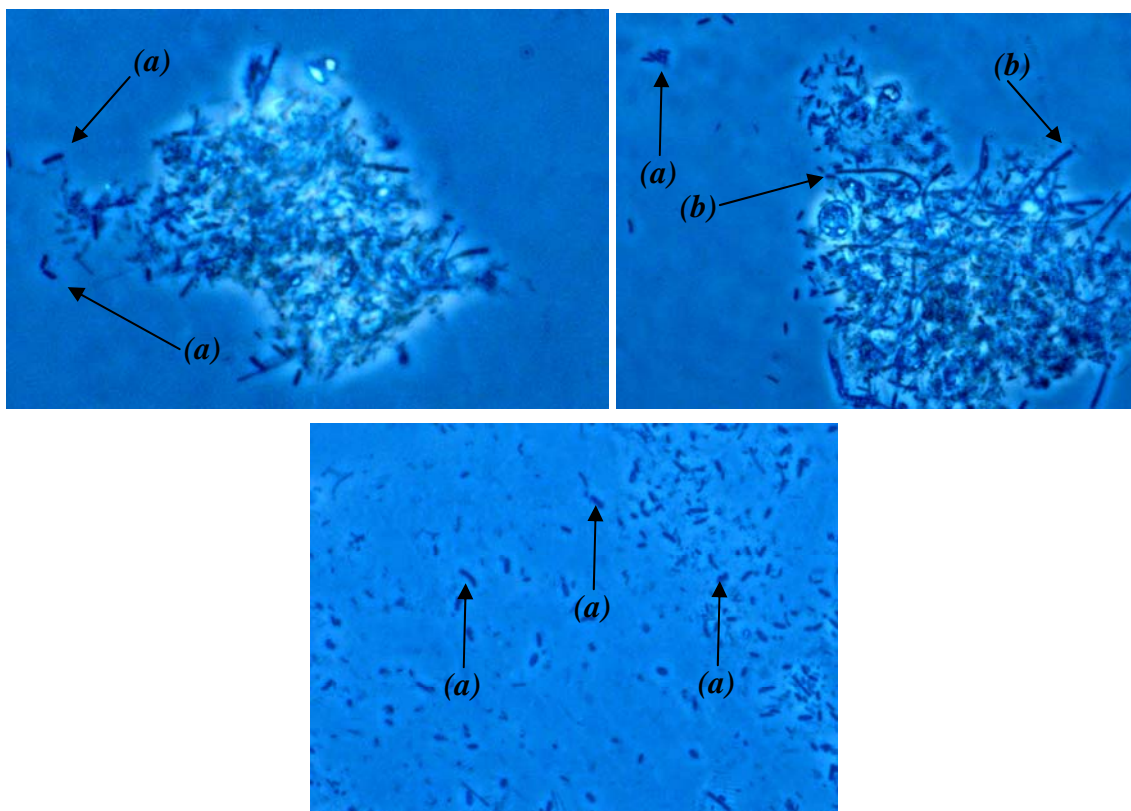


Figura 5.69 – Microscopia de contraste de fase realizada no inoculo antes do início das operações. [Notação: (a) bacilos de extremidades arredondadas; (b) morfologia filamentosa semelhante à *Methanosaeta*].

Pode-se inferir, com base nas microscopias de contraste de fase observadas, que o aumento da relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ pode ter favorecido o desenvolvimento de bacilos curvos semelhantes a bactérias redutoras de sulfato e de cocos, e que provavelmente não apresentou condições para o desenvolvimento das morfologias semelhantes a *Methanosaeta*, observadas no início da operação, sendo que este fato pode ser corroborado pelo comportamento do perfil de concentração de metano (CH_4) relativo a condição IIIc (última condição de operação, na qual o reator operou com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,34 e em batelada alimentada de 6 horas), que não apresentou metano no biogás.

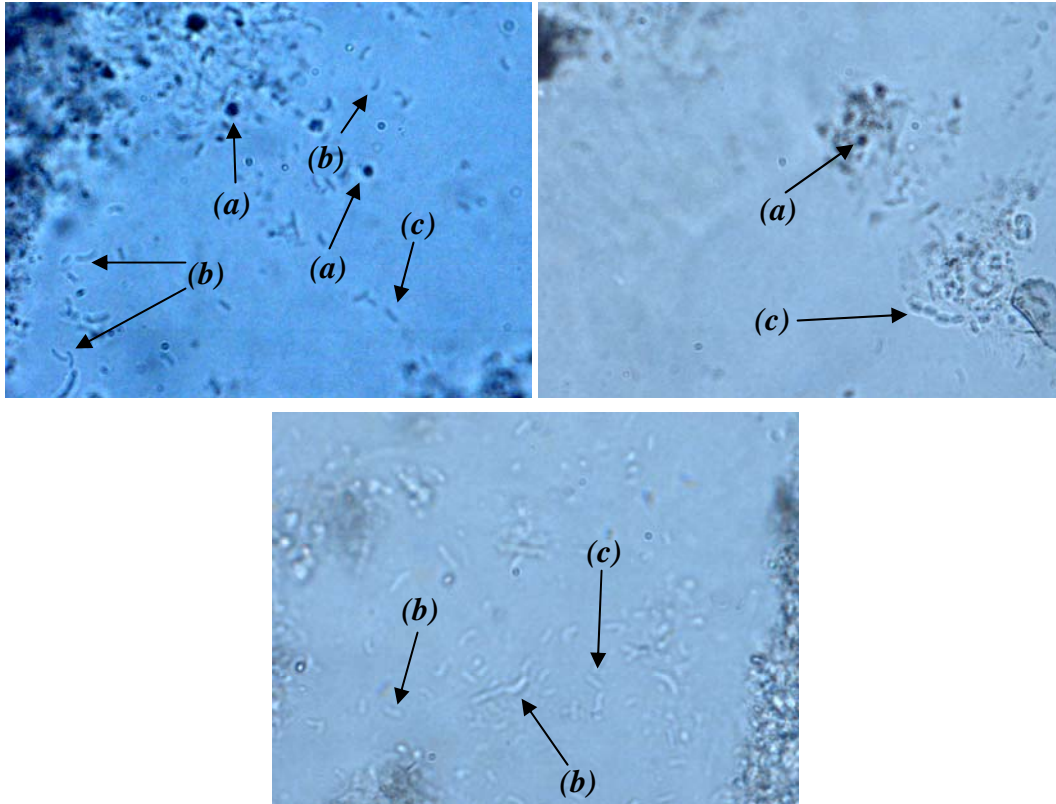


Figura 5.70 – Microscopia de contraste de fase realizada no inóculo após o término das operações (após a condição III). [Notação: (a) cocos; (b) bacilos curvos; (c) bacilos de extremidades arredondadas]

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Pela avaliação do desempenho do biorreator anaeróbio operado em batelada e batelada alimentada seqüenciais, contendo biomassa granulada com agitação mecânica em um “draft-tube”, aplicado ao tratamento de uma água residuária sintética contendo sulfato, investigando-se a interação entre a relação DQO/[SO₄²⁻] e a estratégia de alimentação, é possível concluir, de maneira geral, que:

- O reator operou de maneira estável em todos os ensaios, sempre produzindo alcalinidade a bicarbonato (AB), consumindo os ácidos voláteis (AVT) e mantendo-os em níveis adequados de operação com valores de pH próximos ao ótimo para a digestão anaeróbia e a redução de sulfato. Vale ressaltar que tais resultados ocorreram durante o monitoramento do efluente do reator e durante o ciclo operacional ao longo da batelada ou batelada alimentada;
- Os exames microbiológicos por microscopia em contraste de fase revelaram que houve mudanças nas comunidades microbianas comparando o exame realizado antes da inoculação do reator (nas quais foram encontradas morfologias semelhantes à *Methanosaeta*) e após a última condição experimental (onde foram encontrados bacilos curvos, geralmente associados à redução de sulfato), mostrando que o reator foi se adaptando ao substrato durante toda a condição experimental;

- Os perfis de oxigênio dissolvido (OD) e de potencial redox (POR) mostraram que durante todos os ensaios, durante os ciclos, o reator operou em anaerobiose. Entretanto, na interface do meio reacional e do ar contido no *headspace* do reator pode-se verificar a formação de enxofre molecular, produzido pela oxidação dos produtos da sulfetogênese;
- O grânulo não perdeu as boas características de sedimentabilidade e se manteve com as características tal como no período de inoculação inicial do reator, a despeito das comunidades microbianas terem sofrido mudanças durante as condições.

Ligados aos objetivos específicos, pode-se concluir que:

- (a) A diminuição da relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ no intervalo onde foram realizados os ensaios, pelo aumento da concentração de sulfato, prejudicou a eficiência de redução de sulfato do reator, em todas as estratégias de alimentação. No entanto, durante os ensaios em batelada alimentada de 3 e 6 horas o aumento da concentração de sulfato no afluente aumentou a carga de matéria orgânica removida no reator;
- (b) As operações em batelada favoreciam uma melhor eficiência na remoção de matéria orgânica em detrimento das operações em batelada alimentada de 3 horas (que apresentaram as menores eficiências) e 6 horas. Todavia, pode-se verificar que as operações em batelada alimentada de 3 horas aumentavam a redução de sulfato em relação à operação em batelada. Salienta-se que a

operação em batelada alimentada de 6 horas apresentou resultados de redução de sulfato similares aos ensaios em batelada alimentada de 3 horas quando alimentado nas relações $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34 e 0,67, e que na relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,34 a eficiência de redução de sulfato foi similar a mesma eficiência dos ensaios em batelada, mostrando haver um limite na carga de sulfato afluyente antes da eficiência diminuir;

- (c) Para as operações em batelada e batelada alimentada de 3 horas, a remoção da carga de sulfato ocorreu linearmente crescente, no intervalo de cargas aplicadas de sulfato estudado.

Além das conclusões, podem ser dadas sugestões de forma a inspirar futuros trabalhos de pesquisa neste contexto:

- Aplicar uma aeração de forma intermitente no reator, tal que se verifiquem os efeitos inibitórios nas comunidades microbianas presentes ligados à possibilidade da maior conversão dos produtos da sulfetogênese em enxofre molecular;
- Aplicar metais pesados em diferentes concentrações ao afluyente do reator, objetivando a remoção dos mesmos pela precipitação com os produtos da sulfetogênese, sempre observando os efeitos deletérios deste tipo de efluente na estabilidade e eficiência do reator;

- Mensurar a produção de biogás em termos volumétricos, tal que possibilite realizar um balanço do enxofre e, desta forma, contribuir na compreensão dos ciclos biogeoquímicos do enxofre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALOWS, A.; TRÜPER, H.G.; DWORKIN, M.; HARDER, W.; SCHLEIFER, K.H. **The Prokaryotes: A Handbook on the Biology of Bacteria: Ecophysiology, Isolation, Identification, Application.** 2nd Edition. Springer-Verlag, 1991.

CIVEROLO, K.; BRANKOV, E.; RAO, S.T.; ROY, K.; LEWIS, P.; GAVIN, P. Analysis of ambient, precipitation-weighted, and lake sulfate concentrations in the Adirondack region of New York. **Environmental Pollution**, v. 123, p. 337-345, 2003.

CHOFQI, A.; YOUNSI, A.; LHADI, E.K. Environmental impact of an urban landfill on a coastal aquifer (El Jadida, Morocco). **Journal of African Earth Sciences**, v. 39, n. 3-5, p. 509-516, 2004.

CSERHÁTI, T.; FORGÁCS, E.; OROS, G. Biological activity and environmental impact of anionic surfactants. **Environmental International**, v. 28, p. 337-348, 2002.

DAGUE, R.R.; HABBEN, C.E.; PIDAPARTI, S.R. Initial studies on the anaerobic sequencing batch reactor. **Water Science and Technology**, v. 26, n. 9-11, p. 2429-2432, 1992.

DILLALO, R.; ALBERTSON, O.E. Volatile acids by direct titration. **Journal of Water Pollution Control Federation**, v. 33, n. 4, p. 356-365, 1961.

DOLLA, A.; FOURNIER, M.; DERMOUN, Z. Oxygen defense in sulfate-reducing bacteria. **Journal of Biotechnology**, v. 126, p. 87-100, 2006.

FERNANDES, H.M.; FRANKLIN, M.R.; VEIGA, L.H. Acid rock drainage and radiological impacts. A study case of the Uranium mining and milling facilities at Poços de Caldas. **Waste Management**, v. 18, p. 169-181, 1998.

GHIGLIAZZA, R.; LODI, A.; ROVATTI, M. Kinetic and process consideration on biological reduction of soluble and scarcely soluble sulfates. **Resources Conservation & Recycling**, v. 29, p. 181-194, 2000.

HOLT, J.G.; KRIEG, N.R.; SNEATH, P.H.A.; STALEY, J.T.; WILLIAMS, S.T. **Bergey's Manual of Determinative Bacteriology**, Williams & Wilkins, 9th Edition, 1994.

ISA, Z.; GRUSENMEYER S.; VERSTRAETE, W. Sulfate relative to methane production in high-rate anaerobic digestion: microbiological aspects. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 51, p. 580-587, 1986a.

ISA, Z.; GRUSENMEYER S.; VERSTRAETE, W. Sulfate relative to methane production in high-rate anaerobic digestion: technical aspects. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 51, p. 572-579, 1986b.

JOUKAINEN, S.; YLI-HALLA, M. Environmental impacts and acid loads from deep sulfidic layers of two well-drained acid sulfate soils in western Finland. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 95, p. 297-309, 2003.

KATO, M.T.; Field, J.A.; VERSTEEG, P.; LETTINGA, G. The feasibility of expanded bed granular sludge bed reactors for the anaerobic treatment of low strength soluble wastewaters. **Biotechnology & Bioengineering**, v. 44, p. 469-479, 1994.

LENS, P.N.; DE POORTER, M.-P.; CRONENBERG, C.C.; VERSTRAETE, W.H. Sulfate reducing and methane producing bacteria in aerobic wastewater treatment systems. **Water Research**, v. 29, n. 3, p. 871-880, 1995.

LENS, P.N.L.; VAN DEN BOCH, M.C.; HULSHOFF POL, L.W.; LETTINGA, G. Effect of staging on volatile fatty acid degradation in a sulfidogenic granular sludge reactor. **Water Research**, v. 32, p. 572-579, 1998a.

LENS, P.N.L.; VISSER, A.; JANSEN, A.J.H.; HULSHOFF, P.L.W.; LETTINGA, G. Biotechnological treatment of sulfate-rich wastewaters. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v.28, n.1, p. 41-88, 1998b.

LETTINGA, G.; HOBMA, S.W.; KLAPWIJK, A.; VAN VELSEN, A.F.M.; DE IEEUW, W.J. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment. **Biotechnology & Bioengineering**, v. 22, p. 699-734, 1980.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. Edgard Blücher Ltda. 3.ed. São Paulo, 1999.

MADIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M.; PARKER, J. **Brock Biology of Microorganisms**, Prentice Hall, 10th Edition, 2002.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering – Treatment, Disposal and Reuse**. McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, 3rd Edition, 1991.

MIZUNO, O.; Li, Y.Y.; NOIKE, T. Effects of sulfate concentrations and sludge retention time on the interactions between methane production and sulfate reduction for butyrate. **Water Science and Technology**, v. 30, n. 8, p. 45-54, 1994.

MOHAN, S.V.; RAO, N.C.; PRASAD, K.K.; SARMA, P.N. Bioaugmentation on an anaerobic sequencing batch biofilm reactor (AnSBBR) with immobilized sulphate reducing bacteria (SRB) for the treatment of sulphate bearing chemical wastewater. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 8, p. 2849-2857, 2005.

MOOSA, S.; NEMAT, M.; HARRISON, S.T.L. A kinetic study on anaerobic reduction of sulphate, Part I: Effect of sulphate concentration. **Chemical Engineering Science**, v. 57, p. 2773-2780, 2002.

MOOSA, S.; NEMAT, M.; HARRISON, S.T.L. A kinetic study on anaerobic reduction of sulphate, Part II: Incorporation of temperature effects in the kinetic model. **Chemical Engineering Science**, v. 60, p. 3517-3524, 2005.

MORAES, D.; MORAES, M.S.; FERNANDES, F.A.N. Aplicações Industriais de Reatores Químicos I. Editora dos autores, Santos, 2004.

MORAES, E.M.; ADORNO, M.A.T.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Determinação de ácidos voláteis totais por cromatografia gasosa em efluentes de reatores anaeróbios tratando resíduos líquidos e sólidos. In: LATIN-AMERICAN WORKSHOP AND SEMINAR ON ANAEROBIC DIGESTION, 6., 2000, Recife. *Proceedings...* Recife, UFPE. v.2. p. 235-238.

MUTHUMBI, W.; BOON, N.; BOTERDAELE, R.; DE VREESE, I.; TOP, E.M.; VERSTRAETE, W. Microbial sulphate reduction with acetate: process performance and composition of bacterial communities in the reactor at different salinity levels. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 55, p. 787-793, 2001.

NDON, U.J.; DAGUE R.R. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic sequencing batch reactor treatment of low-strength wastewater. **Water Research**, v. 31, n. 10, p. 2455-2466, 1997.

O'FLAHERTY, V.; COLOHAN, S.; MULKERRINS D.; COLLERAN, E. Effect of sulphate addition on volatile fatty acid and ethanol degradation in an anaerobic hybrid reactor. II: microbial interactions and toxic effects. **Bioresource Technology**, v. 68, p. 109-120, 1999.

OMIL, F.; LENS, P.; HULSHOFF, P.L.W.; LETTINGA, G. Effect of upward velocity and sulphide concentration on volatile fatty acid degradation in a sulphidogenic granular sludge reactor. **Process Biochemistry**, v. 31, p. 699-710, 1996.

OMIL, F.; VISSER, A.; HULLSHOFF, P.L.W.; LETTINGA, G. Simulación dinàmica de la competición entre bacterias productoras de metano y bacterias sulfato reductoras em reactores anaerobios de lodos granulares. **Afinidad**, v. LIV, n. 472, p. 446-452, 1997.

ORRA, A.A.; RATUSZNEI, S.M.; RODRIGUES, J.A.D.; FORESTI, E.; ZAIAT, M. Effects of feeding strategies on the performance of an anaerobic discontinuous reactor containing immobilized biomass with circulation system for liquid-phase mixing. **Water Science and Technology**, v. 49, p. 303-310, 2004.

PSENNER, R. Environmental impacts on fresh-waters – Acidification as a global problem. **Science of the Total Environment**, v.143, n.1, p. 53-61, 1994.

RATUSZNEI, S.M.; RODRIGUES, J.A.D.; CAMARGO, E.F.M.; ZAIAT, M.; BORZANI, W. Feasibility of a stirred anaerobic sequencing batch reactor containing immobilized biomass for wastewater treatment. **Bioresource Technology**, v. 75, p. 127-132, 2000.

RIPLEY, L.E.; BOYLE, W.C.; CONVERSE, J.C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digester of high-strength wastes. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 58, p. 406-411, 1986.

RODRIGUES, J.A.D.; RATUSZNEI, S.M.; ZAIAT, M. Fed-batch and batch operating mode analysis of a stirred anaerobic sequencing batch reactor with self-immobilized biomass treating low-strength wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 69, p. 193-200, 2003.

SARTI, A.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Tratamento de Esgoto Sanitário Utilizando Reatores Anaeróbios Operados em Bateladas Seqüenciais. **Anais do IV Seminário do Projeto Temático “Desenvolvimento, Análise, Aprimoramento e Otimização de Reatores Anaeróbios para Tratamento de Águas Residuárias”**, EESC-USP, São Carlos, p. 97-106, 2005.

SARTI, A.; SAKAMOTO, I.K.; VARESCHE, M.B.A.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Domestic sewage treatment in pilot-scale sequencing batch reactors. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 73-82, 2006.

SHAW, J.A. The design of draft tube circulators. *Proc. Australas. Inst. Metall.*, v. 283, September, p. 47-58, 1982.

SHIZAS, I.; BAGLEY, D.M. Improving anaerobic sequencing batch reactor performance by modifying operational parameters. **Water Research**, v. 36, p. 363-367, 2002.

SILVA, A.J.; VARESCHE, M.B.; FORESTI, E.; ZAIAT, M. Sulphate removal from industrial wastewater using a packed-bed anaerobic reactor. **Process Biochemistry**, v. 37, n. 9, p. 927-935, 2002.

SILVA, A.J. **Biodessulfatação com Posterior Oxidação Parcial do Sulfeto em Reatores Operados em Bateladas Seqüenciais**. Tese de Doutorado – SHS-EESC-USP, São Carlos, SP, 2005.

SMUL, A.; GROOTAERD, D.L.G.H.; VERSTRAETE, W. High rates of microbial sulphate reduction in a mesophilic ethanol-fed expanded granular sludge blanket reactor. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 48, p. 297-303, 1997.

STANDARD METHODS **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, APHA, AWWA, WPCF., 19th edition, American Public Health Association, Washington, 1985.

TORRES, P. **Desempenho de um Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB) de Bancada no Tratamento de Substrato Sintético Simulando Esgoto Sanitário sob Diferentes Condições de Operação**. Dissertação de Mestrado – SHS-EESC-USP, São Carlos, SP, 1992.

TOWNSEND, T.; JANG, J.C. Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines. **Advances in Environmental Research**, v.5, n.3, p. 203-217, 2001.

TRÄNKLER, J.O.V.; WALKER, I.; DOHMANN, M. Environmental Impact of demolition waste – an overview on 10 years of research and experience. **Waste Management**, v. 16, p. 21-26, 1996.

WEIJMA, J.; CHI, T.M.; HULSHOFF POL, L.W.; STAMS, A.J.M.; LETTINGA, G. The effect of sulphate on methanol conversion in mesophilic upflow anaerobic sludge bed reactors. **Process Biochemistry**, v. 38, p. 1259-1266, 2003.

ZAIAT, M.; RODRIGUES J.A.D.; RATUSZNEI, S.M.; CAMARGO E.F.M.; BORZANI, W. Anaerobic sequencing batch reactors for wastewater treatment: A developing technology. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 55, n. 1, p. 29-35, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NOS ENSAIOS PRELIMINARES

A.1. Ensaio Preliminares – Adaptação da Biomassa

Tabela A.1. – Concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao afluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
0,0	442,0	-	-	-	-	-	-	-	-
1,0	790,0	-	9,3	115,11	35,94	151,05	0,31	108,36	60,12
2,0	509,5	-	8,9	165,09	60,42	225,50	0,37	201,22	34,20
4,0	545,9	380,0	-	-	-	-	-	-	-
4,0	562,4	350,0	-	-	-	-	-	-	-
6,0	660,5	356,8	-	-	-	-	-	-	-
7,0	-	350,0	-	-	-	-	-	-	-
8,0	615,4	350,0	8,9	175,38	59,16	234,53	0,34	213,27	29,95
9,0	533,1	389,5	8,7	177,70	51,50	229,20	0,29	202,59	37,48
10,0	530,7	273,7	8,8	178,16	49,88	228,04	0,28	200,72	38,47
11,0	556,7	332,6	8,6	169,58	59,62	229,20	0,35	202,27	37,92
13,0	516,4	263,9	8,8	193,01	46,63	239,64	0,24	203,35	51,11
15,0	568,0	369,1	8,8	194,87	44,54	239,41	0,23	207,86	44,43
16,0	537,8	343,0	8,8	-	-	-	-	-	-
17,0	631,3	337,0	9,0	189,76	45,93	235,69	0,24	198,49	52,40
20,0	631,1	314,3	9,2	205,77	44,54	250,31	0,22	203,23	66,31
21,0	646,3	346,9	9,1	209,71	45,24	254,95	0,22	201,17	75,74
22,0	653,1	361,3	9,2	203,68	45,00	248,69	0,22	199,01	69,97
23,0	659,7	333,0	9,2	201,83	43,38	245,21	0,21	196,65	68,39
24,0	551,5	353,2	9,1	198,58	43,84	242,42	0,22	188,94	75,33
27,0	637,8	-	-	-	-	-	-	-	-
30,0	609,0	366,3	9,2	206,46	51,04	257,50	0,25	193,24	90,51

Continua

Continuação

T.O.	C _{ST}	C _{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
31,0	539,0	354,6	-	-	-	-	-	-	-
33,0	543,8	346,7	-	-	-	-	-	-	-
39,0	583,9	373,0	8,7	162,16	44,31	206,46	0,27	179,17	38,45
40,0	476,2	345,5	-	-	-	-	-	-	-
42,0	475,5	-	-	-	-	-	-	-	-
45,0	482,3	483,4	-	-	-	-	-	-	-
48,0	628,8	383,4	-	-	-	-	-	-	-
49,0	627,7	339,5	7,8	145,01	100,89	245,90	0,70	124,02	171,66
51,0	692,1	275,1	-	-	-	-	-	-	-
62,0	613,8	-	-	-	-	-	-	-	-
64,0	601,0	-	-	-	-	-	-	-	-
65,0	525,8	-	-	-	-	-	-	-	-
66,0	499,0	-	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹AP – mgCaCO₃.L⁻¹AI – mgCaCO₃.L⁻¹AT – mgCaCO₃.L⁻¹AB – mgCaCO₃.L⁻¹AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela A.2. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao afluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
2,0	1348	484	146	16
7,0	1734	684	126	48
8,0	2044	776	168	60
13,0	1794	590	78	16
21,0	1780	670	116	90
23,0	2106	950	164	180

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela A.3. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO_4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) monitoradas no afluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	579	73	34	790	442
C_{SO_4}	349	42	26	483	264
pH	8,9	0,4	18,0	9,3	7,8
AP	184	24	16	210	115
AI	48	7	16	60	36
AT	232	25	16	258	151
AI/AP	0,3	0,1	16,0	0,4	0,2
AB	194	24	16	213	108
AVT	54	18	16	91	30
ST	1801	269	6	2106	1348
SVT	692	160	6	950	484
SST	133	34	6	168	78
SSV	68	61	6	180	16

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L ⁻¹	AVT – mgHAc.L ⁻¹
C_{SO_4} – mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹	ST – mg.L ⁻¹
AP – mgCaCO ₃ .L ⁻¹	SVT – mg.L ⁻¹
AI – mgCaCO ₃ .L ⁻¹	SST – mg.L ⁻¹
AT – mgCaCO ₃ .L ⁻¹	SSV – mg.L ⁻¹
AB – mgCaCO ₃ .L ⁻¹	

Tabela A.4. – Concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}) e concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), referentes ao efluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{HS}	C_{H2S}
0,0	76,5	40,0	58,2	21,7	-	-	-	-	-
1,0	98,0	55,3	79,7	37,0	140,40	-	-	-	-
2,0	128	56,3	109,7	38,0	217,57	12,4	-	-	-
3,0	123,5	73,8	105,2	55,5	-	-	-	-	-
6,0	104,9	56,0	86,6	37,7	-	10,9	5,80	1,13	4,67
7,0	98,7	41,9	80,4	23,6	308,68	5,2	4,90	0,95	3,95
8,0	93,0	60,0	74,7	41,7	311,00	5,7	8,20	1,60	6,60
9,0	119,6	58,2	101,3	39,9	-	5,1	6,80	1,32	5,48
10,0	75,5	52,9	57,2	34,6	292,00	4,9	7,60	1,48	6,12
11,0	102,7	62,0	84,4	43,7	260,37	7,6	5,40	1,05	4,35
13,0	112,8	64,4	94,5	46,1	252,29	5,5	7,40	1,44	5,96
15,0	113,7	51,1	95,4	32,8	253,65	8,3	6,98	1,36	5,62
16,0	155,0	58,7	136,7	40,4	187,63	-	7,37	1,43	5,94
17,0	186,0	72,6	167,7	54,3	196,01	-	10,63	2,07	8,56
20,0	138,6	72,1	120,3	53,8	205,14	-	4,50	0,88	3,62
21,0	151,1	88,2	132,8	69,9	205,75	-	7,63	1,48	6,15
22,0	139,5	72,1	121,2	53,8	229,85	-	5,54	1,08	4,46
23,0	188,8	89,1	170,5	70,8	228,49	-	2,28	0,44	1,84
24,0	131,9	81,9	113,6	63,6	219,23	-	6,72	1,31	5,41
27,0	115,0	83,1	96,7	64,8	-	-	-	-	-
30,0	166,1	66,2	147,8	47,9	258,31	-	11,15	2,17	8,98
31,0	93,9	68,6	75,6	50,3	264,19	-	-	-	-
33,0	81,0	63,4	62,7	45,1	236,53	-	-	-	-
39,0	101,2	68,3	82,9	50,0	259,70	-	15,85	3,08	12,77
40,0	96,7	68,1	78,4	49,8	286,95	-	-	-	-
42,0	105,0	78,7	86,7	60,4	-	-	-	-	-
45,0	110,0	64,0	91,7	45,7	303,90	-	-	-	-
48,0	178,4	94,3	160,1	76,0	262,01	-	-	-	-
49,0	169,0	86,0	150,7	67,7	277,49	-	19,37	3,77	15,60

Continua

Continuação

T.O.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	C _{SO4}	C _{SO3}	STD	C _{HS}	C _{H2S}
51,0	149,3	71,5	131,0	53,2	229,66	-	9,72	1,89	7,83
62,0	109,3	101,9	91,0	83,6	-	-	-	-	-
63,0	-	-	-	-	278,70	-	-	-	-
64,0	132,8	92,7	114,5	74,4	308,30	-	14,20	2,76	11,44
65,0	142,3	86,0	124,0	67,7	-	-	-	-	-
66,0	137,2	109,2	118,9	90,9	282,48	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹C_{SF} – mgDQO.L⁻¹C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹STD – mgSTD.L⁻¹C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

Tabela A.5. – pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao efluente.

T.O.	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
1,0	9,3	115,11	35,94	151,05	0,31	108,36	60,12
2,0	8,9	165,09	60,42	225,50	0,37	201,22	34,20
8,0	8,9	175,38	59,16	234,53	0,34	213,27	29,95
9,0	8,7	177,70	51,50	229,20	0,29	202,59	37,48
10,0	8,8	178,16	49,88	228,04	0,28	200,72	38,47
11,0	8,6	169,58	59,62	229,20	0,35	202,27	37,92
13,0	8,8	193,01	46,63	239,64	0,24	203,35	51,11
15,0	8,8	194,87	44,54	239,41	0,23	207,86	44,43
16,0	8,8	-	-	-	-	-	-
17,0	9,0	189,76	45,93	235,69	0,24	198,49	52,40
20,0	9,2	205,77	44,54	250,31	0,22	203,23	66,31
21,0	9,1	209,71	45,24	254,95	0,22	201,17	75,74
22,0	9,2	203,68	45,00	248,69	0,22	199,01	69,97
23,0	9,2	201,83	43,38	245,21	0,21	196,65	68,39
24,0	9,1	198,58	43,84	242,42	0,22	188,94	75,33
30,0	9,2	206,46	51,04	257,50	0,25	193,24	90,51
39,0	8,7	162,16	44,31	206,46	0,27	179,17	38,45
49,0	7,8	145,01	100,89	245,90	0,70	124,02	171,66

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

AP – $\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$

AI – $\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$

AT – $\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$

AB – $\text{mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$

AVT – $\text{mgHAc} \cdot \text{L}^{-1}$

Tabela A.6. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao efluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
7,0	1268	224	164	58
9,0	1292	316	174	66
13,0	1704	314	106	64
21,0	1550	432	96	72
23,0	1616	496	60	60

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela A.7. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), monitoradas no efluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	124	31	34	189	76
C_{SF}	71	16	34	109	40
C_{SOT}	106	31	34	171	57
C_{SOF}	53	16	34	91	22
C_{SO4}	250	42	27	311	140
C_{SO3}	7	3	9	12	5
STD	8	4	20	19	2
C_{HS}	2	1	20	4	0
C_{H2S}	7	3	20	16	2
pH	7,7	0,4	22,0	8,8	7,1
AP	323	75	17	463	190
AI	66	19	17	96	45
AT	389	75	17	553	236
AI/AP	0,2	0,1	17,0	0,4	0,1
AB	354	77	17	528	196
AVT	49	27	17	136	17
ST	1486	196	5	1704	1268
SVT	356	107	5	496	224
SST	120	48	5	174	60
SSV	64	5	5	72	58

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela A.8. – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), eficiência de remoção de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}).

T.O.	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
0,0	86,78	93,09	89,94	96,24	-
1,0	83,07	90,44	86,22	93,60	59,76
2,0	77,88	90,27	81,04	93,43	37,64
3,0	78,66	87,25	81,82	90,40	-
6,0	81,87	90,32	85,03	93,48	-
7,0	82,95	92,76	86,10	95,92	11,53
8,0	83,93	89,63	87,09	92,79	10,86
9,0	79,33	89,94	82,49	93,10	-
10,0	86,95	90,86	90,11	94,01	16,31
11,0	82,25	89,29	85,41	92,44	25,38
13,0	80,51	88,87	83,66	92,03	27,69
15,0	80,35	91,17	83,51	94,33	27,30
16,0	73,22	89,86	76,37	93,01	46,22
17,0	67,86	87,46	71,02	90,61	43,82
20,0	76,05	87,54	79,21	90,70	41,21
21,0	73,89	84,76	77,05	87,92	41,03
22,0	75,90	87,54	79,05	90,70	34,12
23,0	67,38	84,60	70,53	87,76	34,51
24,0	77,21	85,85	80,36	89,00	37,17
27,0	80,13	85,64	83,28	88,80	-
30,0	71,30	88,56	74,46	91,72	25,97
31,0	83,78	88,15	86,93	91,30	24,28
33,0	86,00	89,05	89,16	92,20	32,21
39,0	82,51	88,20	85,67	91,35	25,57
40,0	83,29	88,23	86,45	91,39	17,76
42,0	81,86	86,40	85,01	89,56	-
45,0	80,99	88,94	84,15	92,10	12,90
48,0	69,17	83,71	72,33	86,86	24,91
49,0	70,80	85,14	73,95	88,30	20,47
51,0	74,20	87,65	77,36	90,80	34,18
62,0	81,11	82,39	84,27	85,55	-
63,0	-	-	-	-	20,12

Continua

Continuação

T.O.	E _{ST}	E _{SF}	E _{SOT}	E _{SOF}	E _{SO4}
64,0	77,05	83,98	80,21	87,14	11,64
65,0	75,41	85,14	78,57	88,30	-
66,0	76,29	81,13	79,45	84,29	19,04

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

E_{ST} – %E_{SF} – %E_{SOT} – %E_{SOF} – %E_{SO4} – %

APÊNDICE B

VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO Ia

B.1. Condição Ia – Operação em batelada com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 373 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (DQO/[SO₄²⁻] = 1,34)

Tabela B.1. – Concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao afluente.

T.O.	C _{ST}	C _{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
0,0	457,6	370,4	-	-	-	-	-	-	-
2,0	477,0	412,5	8,5	160,1	58,3	218,4	0,36	193,5	35,0
4,1	-	411,6	8,3	321,2	162,9	484,0	0,51	420,6	89,4
5,1	534,8	388,5	8,8	271,6	71,6	343,2	0,26	287,4	78,6
6,1	494,0	377,0	-	-	-	-	-	-	-
9,1	477,3	356,7	8,6	164,9	57,1	222,0	0,35	190,9	43,8
12,1	497,5	388,1	-	-	-	-	-	-	-
13,1	478,4	372,1	-	-	-	-	-	-	-
22,1	502,1	376,1	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela B.2. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao afluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
14,5	1738	636	40	42
22,1	1738	580	106	92

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela B.3. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) monitoradas no afluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	492,0	21,1	10	534,8	457,6
C_{SO4}	385,8	19,9	11	417,3	356,7
pH	8,53	0,20	4	8,80	8,33
AP	229,5	79,9	4	321,2	160,1
AI	87,4	50,7	4	162,9	57,1
AT	316,9	125,6	4	484,0	218,4
AI/AP	0,37	0,10	4	0,51	0,26
AB	273,1	108,1	4	420,6	190,9
AVT	61,7	26,4	4	89,4	35,0
ST	1738	0	2	1738	1738
SVT	608	40	2	636	580
SST	73	47	2	106	40
SSV	67	35	2	92	42

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela B.4. – Concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}) e concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), referentes ao efluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{HS}	C_{H2S}
0,0	145,3	99,8	122,0	76,5	249,6	33,8	14,4	10,6	3,8
1,0	139,0	95,0	115,7	71,7	271,9	28,8	-	-	-
2,0	118,8	82,0	95,5	58,7	-	-	-	-	-
3,1	99,7	64,5	76,4	41,2	232,5	36,0	5,2	3,8	1,4
7,1	127,7	104,8	104,4	81,5	294,0	12,3	2,4	1,8	0,6
8,1	140,3	110,0	117,0	86,7	275,7	26,3	8,0	5,9	2,1
10,1	98,3	78,5	75,0	55,2	280,5	53,5	7,2	5,3	1,9
11,1	124,1	100,5	100,8	77,2	293,5	-	-	-	-
14,5	106,8	94,8	83,5	71,5	267,4	-	-	-	-
15,5	107,0	94,7	83,7	71,4	289,2	31,8	11,0	8,1	2,9
16,1	116,6	73,7	93,3	50,4	-	-	-	-	-
17,1	119,9	102,5	96,6	79,2	-	-	-	-	-
18,1	-	-	-	-	-	33,3	11,0	2,2	2,9
24,1	154,1	110,9	130,8	87,6	275,0	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

Tabela B.5. – pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao efluente.

T.O.	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
1,0	7,33	295,9	92,2	388,1	0,31	313,1	105,7
2,0	7,19	240,9	89,9	330,8	0,37	282,7	67,8
7,1	7,41	736,4	159,7	896,0	0,22	-	60,1
9,1	7,23	264,1	89,8	353,9	0,34	335,6	25,7
11,1	7,28	263,0	102,5	365,5	0,39	344,6	29,4
16,1	7,73	373,8	66,9	440,7	0,18	411,9	40,6

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

AP – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AI – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AT – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AB – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AVT – $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela B.6. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao efluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
3,1	1452	406	120	60
8,1	1452	400	104	46
16,1	1426	554	62	72

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SVT – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SSV – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela B.7. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), monitoradas no efluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	122,9	17,8	13	154,1	98,3
C_{SF}	93,2	14,3	13	110,9	64,5
C_{SOT}	99,6	17,8	13	130,8	75,0
C_{SOF}	69,9	14,3	13	87,6	41,2
C_{SO4}	272,9	19,5	10	294,0	232,5
C_{SO3}	31,9	11,4	8	53,5	12,3
STD	8,5	4,0	7	14,4	2,4
C_{HS}	5,4	3,2	7	10,6	1,8
C_{H2S}	2,3	1,1	7	3,8	0,6
pH	7,36	0,20	6	7,73	7,19
AP	362,3	189,1	6	736,4	240,9
AI	100,2	31,4	6	159,7	66,9
AT	462,5	215,6	6	896,0	330,8
AI/AP	0,30	0,09	6	0,39	0,18
AB	337,6	47,9	5	411,9	282,7
AVT	54,9	30,0	6	105,7	25,7
ST	1443	15	3	1452	1426
SVT	453	87	3	554	400
SST	95	30	3	120	62
SSV	59	13	3	72	46

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela B.8. – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), eficiência de remoção de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}).

T.O.	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
0,0	72,0	80,7	76,5	85,2	35,9
1,0	73,2	81,7	77,7	86,2	30,1
2,0	77,1	84,2	81,6	88,7	-
3,1	80,8	87,6	85,3	92,0	40,3
7,1	75,4	79,8	79,9	84,3	24,5
8,1	72,9	78,8	77,4	83,3	29,2
10,1	81,0	84,8	85,5	89,3	27,9
11,1	76,0	80,6	80,5	85,1	24,6
14,5	79,4	81,7	83,9	86,2	31,3
15,5	79,3	81,7	83,8	86,2	25,7
16,1	77,5	85,8	82,0	90,3	-
17,1	76,9	80,2	81,4	84,7	-
24,1	70,3	78,6	74,8	83,1	29,3

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

E_{ST} – %

E_{SF} – %

E_{SOT} – %

E_{SOF} – %

E_{SO4} – %

Tabela B.9. – Carregamentos volumétricos de matéria oxidável aplicada (COA) e removida para amostras brutas (COR_{ST}) e filtradas (COR_{SF}); carregamentos volumétricos de matéria orgânica removida para amostras brutas (COR_{SOT}) e filtradas (COR_{SOF}); e carregamentos volumétricos de sulfato aplicado (CSA) e removido (CSR).

T.O.	COA	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
0,0	0,55	0,45	0,50	0,48	0,53	0,44	0,17
1,0	-	0,45	0,51	0,48	0,54	-	0,14
2,0	0,57	0,48	0,52	0,51	0,55	0,50	-
3,1	-	0,50	0,54	0,53	0,57	-	0,19
4,1	-	-	-	-	-	0,49	-
5,1	0,64	-	-	-	-	0,47	-
6,1	0,59	-	-	-	-	0,45	-
7,1	-	0,47	0,50	0,50	0,52	-	0,11
8,1	-	0,45	0,49	0,48	0,52	-	0,14
9,1	0,57	-	-	-	-	0,43	-
10,1	-	0,50	0,53	0,53	0,56	-	0,13
11,1	-	0,47	0,50	0,50	0,53	-	0,11
12,1	0,60	-	-	-	-	0,47	-
13,1	0,57	-	-	-	-	0,45	-
14,5	-	0,49	0,51	0,52	0,54	-	0,15
15,5	-	0,49	0,51	0,52	0,54	-	0,12
16,1	-	0,48	0,53	0,51	0,56	-	-
17,1	-	0,48	0,50	0,51	0,53	-	-
22,1	0,60	-	-	-	-	0,45	-
23,1	0,61	-	-	-	-	0,50	-
24,1	0,59	0,44	0,49	0,46	0,52	0,45	0,14

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COA – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{ST} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SF} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SOT} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SOF} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

CSA – $gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$

CSR – $gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$

Tabela B.10. – Carregamentos específicos de matéria oxidável aplicada (COAE) e removida para amostras brutas ($CORE_{ST}$) e filtradas ($CORE_{SF}$); carregamentos específicos de matéria orgânica removida para amostras brutas ($CORE_{SOT}$) e filtradas ($CORE_{SOF}$); e carregamentos específicos de sulfato aplicado (CSAE) e removido (CSRE).

T.O.	COAE	$CORE_{ST}$	$CORE_{SF}$	$CORE_{SOT}$	$CORE_{SOF}$	CSAE	CSRE
0,0	45	36	41	39	43	36	14
1,0	-	37	41	39	43	-	11
2,0	46	39	42	41	45	40	-
3,1	-	41	44	43	46	-	15
4,1	-	-	-	-	-	40	-
5,1	52	-	-	-	-	38	-
6,1	48	-	-	-	-	37	-
7,1	-	38	40	40	42	-	9
8,1	-	37	40	39	42	-	11
9,1	46	-	-	-	-	35	-
10,1	-	41	43	43	45	-	11
11,1	-	38	41	41	43	-	9
12,1	48	-	-	-	-	38	-
13,1	47	-	-	-	-	36	-
14,5	-	40	41	42	43	-	12
15,5	-	40	41	42	43	-	10
16,1	-	39	43	41	45	-	-
17,1	-	39	40	41	43	-	-
22,1	49	-	-	-	-	37	-
23,1	49	-	-	-	-	41	-
24,1	48	35	40	38	42	36	11

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COAE – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{ST}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOT}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSAE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSRE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

Tabela B.11. – Valores dos perfis temporais de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}) e matéria orgânica filtrada (C_{SOF}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição Ia.

Tempo	Ensaio 1		Ensaio 2		Valores Médios	
	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}
0,0	225,6	209,6	255,6	239,6	240,6	224,6
0,5	151,9	99,5	167,4	115,0	159,7	107,3
1,0	116,8	71,5	154,8	109,5	135,8	90,5
1,5	113,4	63,3	117,4	67,3	115,4	65,3
2,0	104,9	68,6	126,0	89,7	115,5	79,1
3,0	94,5	54,0	160,0	119,5	127,3	86,8
4,0	86,4	42,0	132,8	88,4	109,6	65,2
5,0	83,8	41,8	163,6	121,6	123,7	81,7
6,0	92,4	65,9	129,6	103,1	111,0	84,5
7,0	80,3	53,9	126,8	100,4	103,6	77,1
8,0	94,8	66,2	102,5	73,9	98,7	70,0

Unidades:

Tempo – h

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

Tabela B.12. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfato (C_{SO_4}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição Ia.

Tempo	Ensaio 1	Ensaio 2	Valores Médios
0,0	287,0	306,4	296,7
0,5	271,6	260,4	266,0
1,0	262,8	259,6	261,2
1,5	244,8	238,5	241,6
2,0	243,2	249,5	246,3
3,0	253,5	245,8	249,6
4,0	240,1	251,4	245,7
5,0	267,5	261,4	264,4
6,0	258,0	278,3	268,1
7,0	268,7	260,2	264,5
8,0	267,4	290,6	279,0

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_4} – $mgSO_4^{2-}.L^{-1}$

Tabela B.13. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfito (C_{SO_3}), sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto na forma HS^- (C_{HS}), de sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}), pH, alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), para o reator operado na condição Ia.

Tempo	C_{SO_3}	STD	C_{HS}	C_{H_2S}	pH	AB	AVT
0,0	25,3	5,5	3,7	1,8	7,37	322,0	39,2
0,5	74,5	18,8	11,7	7,0	7,26	382,1	42,5
1,0	46,5	18,0	11,5	6,5	7,29	414,5	31,3
1,5	45,5	20,5	13,8	6,7	7,35	443,0	21,1
2,0	31,8	15,0	9,7	5,3	7,30	454,1	23,4
3,0	25,0	17,8	11,5	6,3	7,30	-	-
4,0	67,0	15,5	9,8	5,7	7,28	458,9	23,0
5,0	37,5	17,3	11,2	6,0	7,31	445,3	23,3
6,0	22,5	11,0	8,4	2,6	7,54	451,6	32,5
7,0	37,3	9,5	7,3	2,2	7,55	434,7	35,1
8,0	33,3	11,0	8,8	2,2	7,64	411,9	40,6

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_3} – mgDQO.L⁻¹

STD – mgDQO.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H_2S} – mgH₂S.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela B.14. – Valores dos perfis temporais de concentração de oxigênio dissolvido (OD), do potencial de oxi-redução (POR), de concentração de dióxido de carbono no biogás (C_{CO_2}) e concentração de metano no biogás (C_{CH_4}), para o reator operado na condição Ia.

Tempo	OD	POR	C_{CO_2}	C_{CH_4}
0,0	0	-322,1	0,00	0,000
0,5	0	-336,8	0,00	0,000
1,0	0	-340,6	0,00	0,000
1,5	0	-360,7	0,04	0,044
2,0	0	-352,2	0,09	0,086
3,0	0	-351,5	0,08	0,082
4,0	0	-350,3	0,07	0,072
5,0	0	-360	0,06	0,060
6,0	0	-357,7	0,05	0,052
7,0	0	-358,9	-	-
8,0	0	-363,9	0,04	0,038

Unidades:

Tempo – h
 OD – mgOD.L⁻¹
 POR – mV
 C_{CO_2} – mM.L⁻¹
 C_{CH_4} – mM.L⁻¹

APÊNDICE C

VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO Ib

C.1. Condição Ib – Operação em batelada alimentada de 3 horas com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 373 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (DQO/[SO₄²⁻] = 1,34)

Tabela C.1. – Concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao afluente.

T.O.	C _{ST}	C _{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
29,1	536,2	493,6	8,2	186,8	72,5	259,3	0,39	237,4	30,7
30,1	486,5	364,5	-	-	-	-	-	-	-
31,1	511,6	392,1	8,3	200,7	72,5	273,2	0,36	249,3	33,7
35,1	525,9	382,5	8,9	207,7	59,9	267,6	0,29	236,7	43,5
37,1	552,4	396,5	8,9	-	-	-	-	-	-
38,1	484,9	-	8,6	168,1	58,1	226,2	0,35	198,3	39,3
39,1	462,6	399,9	-	-	-	-	-	-	-
44,1	560,0	358,1	-	-	-	-	-	-	-
45,1	520,0	312,9	-	-	-	-	-	-	-
49,1	553,3	390,6	-	-	-	-	-	-	-
51,1	492,9	418,3	-	-	-	-	-	-	-
52,1	538,9	442,4	-	-	-	-	-	-	-
56,1	532,2	382,7	8,7	-	-	-	-	-	-
57,1	505,5	388,4	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)
 C_{ST} – mgDQO.L⁻¹
 C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹
 AT – mgCaCO₃.L⁻¹
 AB – mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela C.2. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao afluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
35,1	1722	602	48	52
39,1	1602	562	166	40
45,1	1506	580	52	46
52,1	1590	488	24	4
57,1	1642	410	136	18

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela C.3. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) monitoradas no afluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	518,8	29,4	14	560,0	462,6
C_{SO4}	394,0	42,8	13	493,6	312,9
pH	8,59	0,32	6	8,91	8,17
AP	190,8	17,5	4	207,7	168,1
AI	65,7	7,8	4	72,5	58,1
AT	256,6	21,0	4	273,2	226,2
AI/AP	0,35	0,04	4	0,39	0,29
AB	230,4	22,2	4	249,3	198,3
AVT	36,8	5,7	4	43,5	30,7
ST	1612	79	5	1722	1506
SVT	528	79	5	602	410
SST	85	62	5	166	24
SSV	32	20	5	52	4

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹
 C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP – mgCaCO₃.L⁻¹
 AI – mgCaCO₃.L⁻¹
 AT – mgCaCO₃.L⁻¹
 AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹
 ST – mg.L⁻¹
 SVT – mg.L⁻¹
 SST – mg.L⁻¹
 SSV – mg.L⁻¹

Tabela C.4. – Concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}) e concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), referentes ao efluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{HS}	C_{H2S}
29,1	322,9	207,2	282,5	166,8	141,4	4,1	24,0	17,6	6,4
30,1	371,1	218,5	330,7	178,1	103,9	-	-	-	-
31,1	-	245,7	-	205,3	81,9	2,3	20,5	15,0	5,5
32,1	334,6	192,2	294,2	151,8	101,5	-	-	-	-
36,1	231,9	178,5	191,5	138,1	161,0	8,7	-	-	-
37,1	262,6	177,4	222,2	137,0	144,1	-	-	-	-
38,1	275,5	214,6	235,1	174,2	140,1	2,8	12,0	8,8	3,2
39,1	258,9	199,1	218,5	158,7	123,3	-	-	-	-
44,1	251,9	162,3	211,5	121,9	161,7	1,9	11,5	8,4	3,1
45,1	255,7	173,9	215,3	133,5	160,2	1,9	11,5	8,4	3,1
46,1	248,7	177,7	208,3	137,3	152,0	-	-	-	-
49,1	317,6	277,2	277,2	236,8	58,2	3,5	35,0	25,7	9,3
50,1	294,0	255,6	253,6	215,2	58,7	-	-	-	-
51,1	296,5	230,6	256,1	190,2	48,1	-	-	-	-
52,1	267,4	224,4	227,0	184,0	85,8	-	24,5	18,0	6,5
53,1	271,0	250,5	230,6	210,1	57,5	-	-	-	-
57,1	207,0	154,9	166,6	114,5	81,8	-	-	-	-
29,1	322,9	207,2	282,5	166,8	141,4	4,1	24,0	17,6	6,4

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS'.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

Tabela C.5. – pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao efluente.

T.O.	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
30,1	7,41	591,3	117,6	708,9	0,20	688,4	28,9
32,1	7,42	529,7	149,1	678,8	0,28	658,3	28,9
36,1	7,64	476,7	133,8	610,5	0,28	593,1	24,5
37,1	7,61	526,9	128,2	655,1	0,24	629,6	36,0
39,1	7,50	481,2	133,5	614,7	0,28	602,2	17,6
44,1	7,40	427,2	110,0	537,3	0,26	521,2	22,6
53,1	7,73	343,8	94,2	437,9	0,27	414,8	32,6

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

AP – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AI – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AT – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AB – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AVT – $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela C.6. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao efluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
37,1	1306	308	100	96
45,1	1248	298	156	82
50,1	1120	310	80	78
52,1	1326	252	36	20
57,1	1142	180	72	42

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SVT – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SSV – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela C.7. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), monitoradas no efluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	279,2	41,6	16	371,1	207,0
C_{SF}	208,3	35,7	17	277,2	154,9
C_{SOT}	238,8	41,6	16	330,7	166,6
C_{SOF}	167,8	35,7	17	236,8	114,5
C_{SO4}	109,5	41,1	17	161,7	48,1
C_{SO3}	3,6	2,4	7	8,7	1,9
STD	19,9	8,8	7	35,0	11,5
C_{HS}	14,6	6,5	7	25,7	8,4
C_{H2S}	5,3	2,4	7	9,3	3,1
pH	7,53	0,13	7	7,73	7,40
AP	482,4	80,0	7	591,3	343,8
AI	123,8	18,1	7	149,1	94,2
AT	606,2	92,5	7	708,9	437,9
AI/AP	0,26	0,03	7	0,28	0,20
AB	586,8	92,6	7	688,4	414,8
AVT	27,3	6,2	7	36,0	17,6
ST	1228	94	5	1326	1120
SVT	270	55	5	310	180
SST	89	44	5	156	36
SSV	64	31	5	96	20

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela C.8. – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), eficiência de remoção de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}).

T.O.	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
29,1	37,7	60,0	45,5	67,8	63,7
30,1	28,4	57,8	36,2	65,6	73,3
31,1	-	52,6	-	60,4	79,0
32,1	35,4	62,9	43,2	70,7	73,9
36,1	55,2	65,5	63,0	73,4	58,6
37,1	49,3	65,8	57,1	73,6	63,0
38,1	46,8	58,6	54,6	66,4	64,0
39,1	50,0	61,6	57,8	69,4	68,3
44,1	51,4	68,7	59,2	76,5	58,5
45,1	50,6	66,4	58,5	74,2	58,8
46,1	52,0	65,7	59,8	73,5	60,9
49,1	38,7	46,5	46,5	54,3	85,1
50,1	43,3	50,7	51,1	58,5	84,9
51,1	42,8	55,5	50,6	63,3	87,6
52,1	48,4	56,7	56,2	64,5	78,0
53,1	47,7	51,7	55,5	59,5	85,2
57,1	60,0	70,1	67,9	77,9	79,0

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

E_{ST} – %

E_{SF} – %

E_{SOT} – %

E_{SOF} – %

E_{SO4} – %

Tabela C.9. – Carregamentos volumétricos de matéria oxidável aplicada (COA) e removida para amostras brutas (COR_{ST}) e filtradas (COR_{SF}); carregamentos volumétricos de matéria orgânica removida para amostras brutas (COR_{SOT}) e filtradas (COR_{SOF}); e carregamentos volumétricos de sulfato aplicado (CSA) e removido (CSR).

T.O.	COA	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
29,1	0,58	0,21	0,34	0,26	0,38	0,54	0,27
30,1	0,53	0,16	0,33	0,20	0,37	0,40	0,31
31,1	0,56	-	0,30	-	0,34	0,43	0,34
32,1	-	0,20	0,36	0,24	0,40	-	0,31
35,1	0,57	-	-	-	-	0,42	-
36,1	-	0,31	0,37	0,36	0,41	-	0,25
37,1	0,60	0,28	0,37	0,32	0,42	0,43	0,27
38,1	0,53	0,26	0,33	0,31	0,38	-	0,27
39,1	0,50	0,28	0,35	0,33	0,39	0,44	0,29
44,1	0,61	0,29	0,39	0,33	0,43	0,39	0,25
45,1	0,57	0,29	0,38	0,33	0,42	0,34	0,25
46,1	-	0,29	0,37	0,34	0,42	-	0,26
49,1	0,60	0,22	0,26	0,26	0,31	0,43	0,36
50,1	-	0,24	0,29	0,29	0,33	-	0,36
51,1	0,54	0,24	0,31	0,29	0,36	0,46	0,37
52,1	0,59	0,27	0,32	0,32	0,36	0,48	0,33
53,1	-	0,27	0,29	0,31	0,34	-	0,36
56,1	0,58	-	-	-	-	0,42	-
57,1	0,55	0,34	0,40	0,38	0,44	0,42	0,34

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COA – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{ST} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SF} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SOT} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SOF} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

CSA – $gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$

CSR – $gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$

Tabela C.10. – Carregamentos específicos de matéria oxidável aplicada (COAE) e removida para amostras brutas ($CORE_{ST}$) e filtradas ($CORE_{SF}$); carregamentos específicos de matéria orgânica removida para amostras brutas ($CORE_{SOT}$) e filtradas ($CORE_{SOF}$); e carregamentos específicos de sulfato aplicado (CSAE) e removido (CSRE).

T.O.	COAE	$CORE_{ST}$	$CORE_{SF}$	$CORE_{SOT}$	$CORE_{SOF}$	CSAE	CSRE
29,1	52	19	30	23	34	44	24
30,1	47	14	29	18	33	32	28
31,1	50	-	26	-	30	35	30
32,1	-	18	32	22	36	-	28
35,1	51	-	-	-	-	34	-
36,1	-	28	33	32	37	-	22
37,1	54	25	33	29	37	35	24
38,1	47	24	30	28	33	-	24
39,1	45	25	31	29	35	35	26
44,1	54	26	35	30	39	32	22
45,1	51	26	33	29	37	28	22
46,1	-	26	33	30	37	-	23
49,1	54	20	23	23	27	35	32
50,1	-	22	26	26	29	-	32
51,1	48	22	28	25	32	37	33
52,1	52	24	29	28	33	39	30
53,1	-	24	26	28	30	-	32
56,1	52	-	-	-	-	34	-
57,1	49	30	35	34	39	34	30

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COAE – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{ST}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOT}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSAE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSRE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

Tabela C.11. – Valores dos perfis temporais de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}) e matéria orgânica filtrada (C_{SOF}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição Ib.

Tempo	Ensaio 1		Ensaio 2		Valores Médios	
	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}
0,0	139,9	139,9	209,7	209,7	174,8	174,8
0,5	135,7	46,5	223,9	134,7	179,8	90,6
1,0	168,4	102,3	250,4	184,3	209,4	143,3
1,5	180,7	120,0	251,2	190,5	216,0	155,3
2,0	166,8	108,0	258,7	199,9	212,8	154,0
3,0	201,8	140,9	267,6	206,7	234,7	173,8
4,0	173,6	100,1	256,8	183,3	215,2	141,7
5,0	139,0	76,6	231,6	169,2	185,3	122,9
6,0	141,7	86,6	-	-	141,7	86,6
7,0	176,7	175,8	247,6	-	212,2	-
8,0	181,5	110,8	237,1	166,4	209,3	138,6

Unidades:

Tempo – h

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

Tabela C.12. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfato (C_{SO_4}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição Ib.

Tempo	Ensaio 1	Ensaio 2	Valores Médios
0,0	69,2	71,6	70,4
0,5	95,0	114,7	104,8
1,0	104,8	136,7	120,7
1,5	122,2	164,0	143,1
2,0	128,6	167,0	147,8
3,0	133,8	175,2	154,5
4,0	113,9	151,5	132,7
5,0	90,8	118,1	104,4
6,0	85,2	110,4	97,8
7,0	54,2	96,1	75,2
8,0	52,2	98,6	75,4

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_4} – $mgSO_4^{2-}.L^{-1}$

Tabela C.13. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfito (C_{SO_3}), sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto na forma HS^- (C_{HS}), de sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}), pH, alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), para o reator operado na condição Ib.

Tempo	C_{SO_3}	STD	C_{HS}	C_{H_2S}	pH	AB	AVT
0,0	-	-	-	-	7,85	427,1	38,7
0,5	66,0	38,0	31,0	7,0	7,69	-	-
1,0	15,5	31,5	25,6	5,9	7,68	371,0	47,2
1,5	13,5	29,0	23,1	5,9	7,63	357,5	59,8
2,0	14,0	28,0	21,7	6,3	7,58	351,6	60,3
3,0	4,8	30,0	22,4	7,6	7,51	340,9	58,9
4,0	2,4	36,5	27,3	9,2	7,51	366,5	41,0
5,0	2,3	31,0	23,8	7,2	7,56	-	-
6,0	15,5	26,0	20,4	5,6	7,60	400,6	40,1
7,0	4,5	-	-	-	7,65	409,7	32,7
8,0	3,5	35,0	29,1	5,9	7,73	414,8	32,6

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_3} – mgDQO.L⁻¹

STD – mgDQO.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H_2S} – mgH₂S.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela C.14. – Valores dos perfis temporais de concentração de oxigênio dissolvido (OD), do potencial de oxi-redução (POR), de concentração de dióxido de carbono no biogás (C_{CO_2}) e concentração de metano no biogás (C_{CH_4}), para o reator operado na condição Ib.

Tempo	OD	POR	C_{CO_2}	C_{CH_4}
0,0	0	-324,1	0,01	0,000
0,5	0	-350,4	0,13	0,061
1,0	0	-347,9	0,19	0,079
1,5	0	-351,4	0,21	0,085
2,0	0	-357,8	0,21	0,077
3,0	0	-361,4	0,22	0,068
4,0	0	-369,5	0,19	0,085
5,0	0	-366,60	0,19	0,083
6,0	0	-378,00	0,19	0,092
7,0	0	-383,00	0,19	0,089
8,0	0	-381,40	0,20	0,103

Unidades:

Tempo – h
 OD – mgOD.L⁻¹
 POR – mV
 C_{CO_2} – mM.L⁻¹
 C_{CH_4} – mM.L⁻¹

APÊNDICE D

VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO Ic

D.1. Condição Ic – Operação em batelada alimentada de 6 horas com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 373 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (DQO/[SO₄²⁻] = 1,34)

Tabela D.1. – Concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao afluente.

T.O.	C _{ST}	C _{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
63,0	601,8	440,6	8,8	138,3	50,2	188,5	0,36	157,3	44,0
65,1	645,0	384,1	8,8	146,7	48,8	195,5	0,33	165,0	42,9
66,1	493,6	377,5	-	-	-	-	-	-	-
70,3	479,1	379,7	8,2	150,4	40,7	191,1	0,27	170,7	28,8
72,4	541,6	377,0	-	-	-	-	-	-	-
73,4	513,4	381,8	8,8	149,9	46,2	196,1	0,31	171,0	35,3
74,5	623,2	388,2	8,7	144,4	46,8	191,1	0,32	165,4	36,2
75,5	509,6	360,4	8,7	144,7	47,9	192,6	0,33	173,5	26,9
85,9	507,9	-	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela D.2. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao afluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
66,1	1414	326	96	48
74,5	1678	562	104	36

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela D.3. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) monitoradas no afluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	546,1	61,2	9	645,0	479,1
C_{SO4}	386,2	23,5	8	440,6	360,4
pH	8,66	0,22	6	8,81	8,22
AP	145,7	4,4	6	150,4	138,3
AI	46,8	3,3	6	50,2	40,7
AT	192,5	2,9	6	196,1	188,5
AI/AP	0,32	0,03	6	0,36	0,27
AB	167,2	5,9	6	173,5	157,3
AVT	35,7	7,0	6	44,0	26,9
ST	1546	187	2	1678	1414
SVT	444	167	2	562	326
SST	100	6	2	104	96
SSV	42	8	2	48	36

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela D.4. – Concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}) e concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), referentes ao efluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{HS}	C_{H2S}
63,0	246,1	115,1	175,5	44,5	237,4	-	-	-	-
64,0	218,5	127,1	147,9	56,5	270,3	5,2	10,8	7,9	2,9
66,1	240,7	160,0	170,1	89,4	182,9	9,9	27,6	20,3	7,3
67,2	240,6	157,0	170,0	86,4	163,1	-	-	-	-
70,3	248,9	197,4	178,3	126,8	104,0	-	-	-	-
71,3	289,7	199,4	219,1	128,8	58,8	8,1	40,0	29,4	10,6
73,4	209,8	145,3	139,2	74,7	54,8	3,9	45,0	33,0	12,0
74,5	258,3	182,3	187,7	111,7	38,0	-	-	-	-
77,6	244,7	180,8	174,1	110,2	41,7	-	-	-	-
79,7	264,6	198,2	194,0	127,6	91,9	-	50,0	36,7	13,3
84,9	240,3	206,4	169,7	135,8	102,1	-	-	-	-
85,9	242,1	210,6	171,5	140,0	46,5	-	-	-	-
87,0	258,5	211,0	187,9	140,4	28,0	13,0	33,8	24,8	9,0
92,2	254,6	-	184,0	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

Tabela D.5. – pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao efluente.

T.O.	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
63,0	7,31	289,3	89,5	378,8	0,31	362,2	23,5
65,1	7,22	313,3	111,2	424,4	0,35	406,4	25,4
67,2	7,32	355,2	95,3	450,4	0,27	431,8	26,2
70,3	7,61	391,5	107,4	498,9	0,27	474,5	34,4
74,5	7,66	445,2	106,8	552,1	0,24	533,5	26,2
77,6	7,76	451,3	129,1	580,4	0,29	563,4	23,9
84,9	7,69	398,7	121,3	520,0	0,30	510,6	13,3
87,0	7,64	417,8	160,8	578,6	0,38	569,3	13,2

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

AP – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AI – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AT – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AB – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AVT – $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela D.6. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao efluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
64,0	1320	348	174	84
71,3	1122	166	112	58
73,4	1280	364	130	82
79,7	1358	420	104	102
85,9	1196	340	84	66

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SVT – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SSV – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela D.7. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), monitoradas no efluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	247,0	19,2	14	289,7	209,8
C_{SF}	176,2	32,4	13	211,0	115,1
C_{SOT}	176,3	19,2	14	219,1	139,2
C_{SOF}	105,6	32,4	13	140,4	44,5
C_{SO4}	109,2	80,0	13	270,3	28,0
C_{SO3}	8,0	3,7	5	13,0	3,9
STD	34,5	14,1	6	50,0	10,8
C_{HS}	25,3	10,3	6	36,7	7,9
C_{H2S}	9,2	3,7	6	13,3	2,9
pH	7,53	0,21	8	7,76	7,22
AP	382,8	59,1	8	451,3	289,3
AI	115,2	22,4	8	160,8	89,5
AT	498,0	74,2	8	580,4	378,8
AI/AP	0,30	0,05	8	0,38	0,24
AB	481,4	75,9	8	569,3	362,2
AVT	23,3	7,1	8	34,4	13,2
ST	1255	96	5	1358	1122
SVT	328	96	5	420	166
SST	121	34	5	174	84
SSV	78	17	5	102	58

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela D.8. – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), eficiência de remoção de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}).

T.O.	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
63,0	52,5	77,8	66,1	91,4	39,0
64,0	57,8	75,5	71,5	89,1	30,6
66,1	53,5	69,1	67,2	82,8	53,0
67,2	53,6	69,7	67,2	83,3	58,1
70,3	52,0	61,9	65,6	75,5	73,3
71,3	44,1	61,5	57,7	75,2	84,9
73,4	59,5	72,0	73,1	85,6	85,9
74,5	50,1	64,8	63,8	78,5	90,2
77,6	52,8	65,1	66,4	78,7	89,3
79,7	48,9	61,7	62,6	75,4	76,4
84,9	53,6	60,2	67,3	73,8	73,8
85,9	53,3	59,4	66,9	73,0	88,0
87,0	50,1	59,3	63,7	72,9	92,8
92,2	50,9	-	64,5	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

E_{ST} – %

E_{SF} – %

E_{SOT} – %

E_{SOF} – %

E_{SO4} – %

Tabela D.9. – Carregamentos volumétricos de matéria oxidável aplicada (COA) e removida para amostras brutas (COR_{ST}) e filtradas (COR_{SF}); carregamentos volumétricos de matéria orgânica removida para amostras brutas (COR_{SOT}) e filtradas (COR_{SOF}); e carregamentos volumétricos de sulfato aplicado (CSA) e removido (CSR).

T.O.	COA	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
63,0	0,66	0,30	0,44	0,37	0,52	0,48	0,17
64,0	-	0,33	0,43	0,40	0,50	-	0,13
65,1	0,70	-	-	-	-	0,42	-
66,1	0,54	0,30	0,39	0,38	0,47	0,41	0,23
67,2	-	0,30	0,39	0,38	0,47	-	0,25
70,3	0,52	0,29	0,35	0,37	0,43	0,41	0,31
71,3	-	0,25	0,35	0,33	0,42	-	0,36
72,4	0,59	-	-	-	-	0,41	-
73,4	0,56	0,34	0,41	0,41	0,48	0,42	0,36
74,5	0,68	0,28	0,37	0,36	0,44	0,42	0,38
75,5	0,56	-	-	-	-	0,39	-
77,6	-	0,30	0,37	0,38	0,45	-	0,38
79,7	-	0,28	0,35	0,35	0,43	-	0,32
84,9	-	0,30	0,34	0,38	0,42	-	0,31
85,9	0,55	0,30	0,34	0,38	0,41	-	0,37
87,0	-	0,28	0,34	0,36	0,41	-	0,39
92,2	-	0,29	-	0,36	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COA – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{ST} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SF} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SOT} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SOF} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

CSA – $gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$

CSR – $gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$

Tabela D.10. – Carregamentos específicos de matéria oxidável aplicada (COAE) e removida para amostras brutas ($CORE_{ST}$) e filtradas ($CORE_{SF}$); carregamentos específicos de matéria orgânica removida para amostras brutas ($CORE_{SOT}$) e filtradas ($CORE_{SOF}$); e carregamentos específicos de sulfato aplicado (CSAE) e removido (CSRE).

T.O.	COAE	$CORE_{ST}$	$CORE_{SF}$	$CORE_{SOT}$	$CORE_{SOF}$	CSAE	CSRE
63,0	59	26	39	33	46	39	15
64,0	-	29	38	36	45	-	12
65,1	63	-	-	-	-	34	-
66,1	48	27	35	34	42	33	20
67,2	-	27	35	34	42	-	22
70,3	47	26	31	33	38	34	28
71,3	-	22	31	29	38	-	32
72,4	53	-	-	-	-	33	-
73,4	50	30	36	37	43	34	33
74,5	61	25	33	32	40	34	34
75,5	50	-	-	-	-	32	-
77,6	-	27	33	33	40	-	34
79,7	-	25	31	32	38	-	29
84,9	-	27	30	34	37	-	28
85,9	49	27	30	34	37	-	33
87,0	-	25	30	32	37	-	35
92,2	-	26	-	33	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COAE – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{ST}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOT}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSAE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSRE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

Tabela D.11– Valores dos perfis temporais de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}) e matéria orgânica filtrada (C_{SOF}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição Ic.

Tempo	Ensaio 1		Ensaio 2		Valores Médios	
	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}
0,0	151,7	43,3	140,7	32,3	146,2	37,8
0,5	160,6	55,8	138,8	34,0	149,7	44,9
1,0	180,5	87,1	180,8	87,4	180,7	87,2
1,5	205,4	110,8	-	-	205,4	110,8
2,0	232,6	138,4	-	-	232,6	138,4
3,0	-	-	188,4	93,8	188,4	93,8
4,0	-	-	218,5	125,6	218,5	125,6
5,0	169,8	64,8	-	-	169,8	64,8
6,0	172,2	63,7	206,5	-	189,4	63,7
7,0	167,5	56,1	208,8	97,4	188,2	76,7
8,0	-	-	194,2	124,1	194,2	124,1

Unidades:

Tempo – h

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

Tabela D.12 – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfato (C_{SO_4}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição Ic.

Tempo	Ensaio 1	Ensaio 2	Valores Médios
0,0	79,6	41,0	60,3
0,5	47,8	64,8	56,3
1,0	35,5	74,6	55,0
1,5	41,6	81,2	61,4
2,0	42,3	-	42,3
3,0	40,8	79,0	59,9
4,0	39,9	84,4	62,1
5,0	42,6	86,5	64,6
6,0	46,5	87,5	67,0
7,0	27,8	64,3	46,0
8,0	21,1	59,6	40,3

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_4} – $mgSO_4^{2-}.L^{-1}$

Tabela D.13. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfito (C_{SO_3}), sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto na forma HS^- (C_{HS}), de sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}), pH, alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), para o reator operado na condição Ic.

Tempo	C_{SO_3}	STD	C_{HS}	C_{H_2S}	pH	AB	AVT
0,0	-	54,2	40,5	13,7	7,51	-	-
0,5	15,5	50,8	39,9	11,0	7,60	525,4	22,5
1,0	17,1	45,0	32,2	12,8	7,44	500,1	31,7
1,5	14,8	45,8	34,8	11,0	7,54	506,9	28,2
2,0	12,8	45,8	33,6	12,2	7,48	545,4	22,9
3,0	6,3	46,7	34,4	12,2	7,49	513,0	30,2
4,0	6,3	45,8	32,6	13,3	7,43	515,0	21,0
5,0	8,4	51,7	37,2	14,5	7,45	541,0	22,9
6,0	17,6	52,5	37,8	14,7	7,45	-	-
7,0	7,3	55,0	41,1	13,9	7,51	563,3	15,9
8,0	13,0	33,8	25,2	8,5	-	-	-

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_3} – mgDQO.L⁻¹

STD – mgDQO.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H_2S} – mgH₂S.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela D.14. – Valores dos perfis temporais de concentração de oxigênio dissolvido (OD), do potencial de oxi-redução (POR), de concentração de dióxido de carbono no biogás (C_{CO_2}) e concentração de metano no biogás (C_{CH_4}), para o reator operado na condição Ic.

Tempo	OD	POR	C_{CO_2}	C_{CH_4}
0,0	0	-506,0	0,00	0,000
0,5	0	-399,0	0,13	0,032
1,0	0	-374,0	0,22	0,063
1,5	0	-380,0	0,27	0,087
2,0	0	-386,6	0,30	0,100
3,0	0	-376,6	0,36	0,119
4,0	0	-409,2	0,35	0,114
5,0	0	-	0,36	0,112
6,0	0	-391,5	0,35	0,108
7,0	0	-407,9	0,31	0,094
8,0	0	-	0,19	0,050

Unidades:

Tempo – h
 OD – mgOD.L⁻¹
 POR – mV
 C_{CO_2} – mM.L⁻¹
 C_{CH_4} – mM.L⁻¹

APÊNDICE E

VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIa

E.1. Condição IIa – Operação em batelada com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 746 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (DQO/[SO₄²⁻] = 0,67)

Tabela E.1. – Concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao afluente.

T.O.	C _{ST}	C _{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
0,0	538,9	782,0	-	-	-	-	-	-	-
1,0	542,3	-	-	-	-	-	-	-	-
4,0	-	720,5	8,82	172,4	55,2	227,6	0,320	194,2	47,0
7,0	505,8	785,7	-	-	-	-	-	-	-
11,0	534,4	-	8,66	178,9	51,6	230,5	0,289	204,4	36,8
13,0	545,3	625,6	-	-	-	-	-	-	-
15,0	513,0	735,3	8,96	182,8	61,0	243,8	0,334	220,0	33,5
16,0	484,5	710,4	-	-	-	-	-	-	-
18,0	519,1	686,0	-	-	-	-	-	-	-
20,0	503,3	718,9	8,47	171,1	62,3	233,4	0,364	208,4	35,3
21,0	530,2	779,5	-	-	-	-	-	-	-
22,0	453,3	707,7	8,60	183,7	54,5	238,3	0,297	209,5	40,6
25,0	433,6	-	-	-	-	-	-	-	-
27,0	528,5	-	-	-	-	-	-	-	-
33,0	450,2	646,9	-	-	-	-	-	-	-
34,0	-	770,7	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela E.2. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao afluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
11,0	2170	664	50	30
18,0	2190	634	90	52
22,0	2230	638	68	46
34,0	2318	554	66	24

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela E.3. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) monitoradas no afluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	508,1	36,6	15	545,3	433,6
C_{SO4}	722,4	52,3	12	785,7	625,6
pH	8,70	0,19	5	8,96	8,47
AP	177,8	5,8	5	183,7	171,1
AI	56,9	4,6	5	62,3	51,6
AT	234,7	6,4	5	243,8	227,6
AI/AP	0,32	0,03	5	0,36	0,29
AB	207,3	9,3	5	220,0	194,2
AVT	38,6	5,3	5	47,0	33,5
ST	2227	66	4	2318	2170
SVT	622	48	4	664	554
SST	69	16	4	90	50
SSV	38	13	4	52	24

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela E.4. – Concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}) e concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), referentes ao efluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{HS}	C_{H2S}
0,0	253,1	185,3	215,7	147,9	397,2	-	-	-	-
1,0	275,9	220,8	238,5	183,4	448,1	-	-	-	-
5,0	203,8	120,5	166,4	83,1	585,9	2,6	1,0	0,8	0,2
7,0	183,3	135,5	145,9	98,1	602,0	-	-	-	-
11,0	144,5	114,0	107,1	76,6	591,1	-	-	-	-
12,0	146,7	112,9	109,3	75,5	643,4	9,0	23,2	18,6	4,6
13,0	137,5	110,7	100,1	73,3	624,8	-	-	-	-
14,0	104,3	-	66,9	-	730,0	2,8	18,4	14,8	3,6
15,0	-	-	-	-	610,6	-	-	-	-
19,0	135,1	117,0	97,7	79,6	616,9	6,8	28,4	22,8	5,6
20,0	154,3	106,6	116,9	69,2	568,8	-	-	-	-
21,0	161,2	99,3	123,8	61,9	622,2	2,2	21,6	17,4	4,2
22,0	180,4	123,5	143,0	86,1	572,8	-	-	-	-
27,0	288,1	246,3	250,7	208,9	505,8	-	-	-	-
28,0	-	-	-	-	-	-	16,8	13,5	3,3
33,0	292,8	258,0	255,4	220,6	462,2	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

Tabela E.5. – pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao efluente.

T.O.	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
7,0	7,34	350,9	113,6	464,6	0,32	448,9	22,0
12,0	7,50	361,3	126,6	487,9	0,35	474,2	19,3
13,0	7,53	335,0	88,3	423,3	0,26	405,7	24,8
14,0	7,51	330,8	98,0	428,8	0,30	417,6	15,8
15,0	7,46	349,0	97,4	446,4	0,28	433,7	17,9
20,0	7,34	358,7	139,6	498,3	0,39	473,2	35,3
22,0	7,45	381,5	103,6	485,0	0,27	466,6	25,9
33,0	-	290,9	81,8	372,7	0,28	349,7	32,4

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

AP – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AI – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AT – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AB – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AVT – $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela E.6. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao efluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
12,0	1816	254	68	22
21,0	1832	348	110	88
27,0	1770	506	90	76

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SVT – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SSV – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela E.7. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), monitoradas no efluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	190,1	62,7	14	292,8	104,3
C_{SF}	150,0	56,8	13	258,0	99,3
C_{SOT}	152,7	62,7	14	255,4	66,9
C_{SOF}	112,6	56,8	13	220,6	61,9
C_{SO4}	572,1	85,6	15	730,0	397,2
C_{SO3}	4,7	3,1	5	9,0	2,2
STD	18,2	9,4	6	28,4	1,0
C_{HS}	14,6	7,5	6	22,8	0,8
C_{H2S}	3,6	1,8	6	5,6	0,2
pH	7,45	0,08	7	7,53	7,34
AP	344,8	26,9	8	381,5	290,9
AI	106,1	19,5	8	139,6	81,8
AT	450,9	42,0	8	498,3	372,7
AI/AP	0,31	0,04	8	0,39	0,26
AB	433,7	42,5	8	474,2	349,7
AVT	24,2	6,9	8	35,3	15,8
ST	1806	32	3	1832	1770
SVT	369	127	3	506	254
SST	89	21	3	110	68
SSV	62	35	3	88	22

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela E.8. – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), eficiência de remoção de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}).

T.O.	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
0,0	51,0	64,1	58,2	71,4	48,3
1,0	46,6	57,3	53,8	64,5	41,6
5,0	60,5	76,7	67,8	83,9	23,7
7,0	64,5	73,8	71,8	81,0	21,6
11,0	72,0	77,9	79,3	85,2	23,0
12,0	71,6	78,1	78,8	85,4	16,2
13,0	73,4	78,6	80,6	85,8	18,6
14,0	79,8	-	87,0	-	4,9
15,0	-	-	-	-	20,5
19,0	73,8	77,3	81,1	84,6	19,7
20,0	70,1	79,4	77,4	86,6	25,9
21,0	68,8	80,8	76,0	88,0	19,0
22,0	65,1	76,1	72,3	83,3	25,4
22,0	65,1	76,1	72,3	83,3	25,4
27,0	44,2	52,3	51,5	59,6	34,1
33,0	43,3	50,0	50,6	57,3	39,8

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

E_{ST} – %

E_{SF} – %

E_{SOT} – %

E_{SOF} – %

E_{SO4} – %

Tabela E.9. – Carregamentos volumétricos de matéria oxidável aplicada (COA) e removida para amostras brutas (COR_{ST}) e filtradas (COR_{SF}); carregamentos volumétricos de matéria orgânica removida para amostras brutas (COR_{SOT}) e filtradas (COR_{SOF}); e carregamentos volumétricos de sulfato aplicado (CSA) e removido (CSR).

T.O.	COA	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
0,0	0,65	0,32	0,40	0,36	0,44	0,94	0,44
1,0	0,65	0,29	0,35	0,33	0,40	-	0,38
4,0	0,65	-	-	-	-	0,86	-
5,0	-	0,38	0,48	0,42	0,52	-	0,22
7,0	0,61	0,40	0,46	0,44	0,50	0,94	0,20
11,0	0,64	0,45	0,48	0,49	0,53	-	0,21
12,0	-	0,44	0,48	0,49	0,53	-	0,15
13,0	0,65	0,45	0,49	0,50	0,53	0,75	0,17
14,0	-	0,49	-	0,54	-	-	0,05
15,0	0,62	-	-	-	-	0,88	0,19
16,0	0,58	-	-	-	-	0,85	-
18,0	0,62	-	-	-	-	0,82	-
19,0	-	0,46	0,48	0,50	0,52	-	0,18
20,0	0,60	0,43	0,49	0,48	0,54	0,86	0,24
21,0	0,64	0,43	0,50	0,47	0,55	0,94	0,17
22,0	0,54	0,40	0,47	0,45	0,52	0,85	0,23
25,0	0,52	-	-	-	-	-	-
27,0	0,63	0,27	0,32	0,32	0,37	-	0,31
33,0	0,54	0,27	0,31	0,31	0,36	0,78	0,37
34,0	-	-	-	-	-	0,92	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COA – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{ST} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SF} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SOT} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SOF} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

CSA – $gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$

CSR – $gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$

Tabela E.10. – Carregamentos específicos de matéria oxidável aplicada (COAE) e removida para amostras brutas ($CORE_{ST}$) e filtradas ($CORE_{SF}$); carregamentos específicos de matéria orgânica removida para amostras brutas ($CORE_{SOT}$) e filtradas ($CORE_{SOF}$); e carregamentos específicos de sulfato aplicado (CSAE) e removido (CSRE).

T.O.	COAE	$CORE_{ST}$	$CORE_{SF}$	$CORE_{SOT}$	$CORE_{SOF}$	CSAE	CSRE
0,0	52	26	32	29	36	76	36
1,0	53	23	29	27	32	-	31
4,0	52	-	-	-	-	70	-
5,0	-	30	39	34	42	-	18
7,0	49	32	37	36	41	76	16
11,0	52	36	39	40	43	-	17
12,0	-	36	39	40	43	-	12
13,0	53	37	39	41	43	61	14
14,0	-	40	-	44	-	-	4
15,0	50	-	-	-	-	72	15
16,0	47	-	-	-	-	69	-
18,0	50	-	-	-	-	67	-
19,0	-	37	39	41	42		15
20,0	49	35	40	39	44	70	19
21,0	52	35	41	38	44	76	14
22,0	44	33	38	36	42	69	19
25,0	42	-	-	-	-	-	-
27,0	51	22	26	26	30	-	25
33,0	44	22	25	25	29	63	30
34,0	-	-	-	-	-	75	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COAE – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{ST}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOT}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSAE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSRE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

Tabela E.11. – Valores dos perfis temporais de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}) e matéria orgânica filtrada (C_{SOF}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIa.

Tempo	Ensaio 1		Ensaio 2		Valores Médios	
	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}
0,0	289,2	259,2	290,2	260,2	289,7	259,7
0,5	239,0	198,9	254,8	214,7	246,9	206,8
1,0	225,6	186,2	221,7	182,3	223,7	184,3
1,5	230,8	180,1	182,4	131,7	206,6	155,9
2,0	215,5	166,4	154,3	105,2	184,9	135,8
3,0	154,3	-	84,8	-	119,6	-
4,0	209,8	154,6	104,8	49,6	157,3	102,1
5,0	206,8	142,5	83,4	19,1	145,1	80,8
6,0	191,3	143,9	92,3	44,9	141,8	94,4
7,0	227,0	163,0	124,8	60,8	175,9	111,9
8,0	221,0	157,0	-	-	221,0	157,0

Unidades:

Tempo – h

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

Tabela E.12. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfato (C_{SO_4}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIa.

Tempo	Ensaio 1	Ensaio 2	Valores Médios
0,0	527,3	534,7	531,0
0,5	477,0	564,5	520,7
1,0	468,8	488,7	478,7
1,5	442,5	460,3	451,4
2,0	447,7	466,0	456,8
3,0	412,0	464,3	438,2
4,0	419,1	446,6	432,8
5,0	401,9	455,0	428,4
6,0	386,3	481,7	434,0
7,0	381,2	464,6	422,9
8,0	401,5	-	200,7

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_4} – $mgSO_4^{2-}.L^{-1}$

Tabela E.13. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfito (C_{SO_3}), sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto na forma HS^- (C_{HS}), de sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}), pH, alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), para o reator operado na condição IIa.

Tempo	C_{SO_3}	STD	C_{HS}	C_{H_2S}	pH	AB	AVT
0,0	16,6	13,3	10,5	2,8	7,61	165,2	100,9
0,5	17,4	-	-	-	7,41	-	-
1,0	13,6	-	-	-	7,40	215,6	103,6
1,5	20,1	23,3	16,2	7,1	7,40	239,2	93,8
2,0	20,6	22,5	15,9	6,6	7,42	-	-
3,0	5,6	28,8	20,0	8,7	7,40	274,5	84,6
4,0	9,4	26,7	19,7	7,0	7,49	330,1	37,7
5,0	8,9	31,3	22,5	8,8	7,45	-	-
6,0	9,4	22,8	17,8	5,0	7,59	346,5	32,4
7,0	19,9	30,0	21,9	8,1	7,47	351,3	33,3
8,0	-	-	-	-	7,47	349,7	32,4

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_3} – mgDQO.L⁻¹

STD – mgDQO.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H_2S} – mgH₂S.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela E.14. – Valores dos perfis temporais de concentração de oxigênio dissolvido (OD), do potencial de oxi-redução (POR), de concentração de dióxido de carbono no biogás (C_{CO_2}) e concentração de metano no biogás (C_{CH_4}), para o reator operado na condição IIa.

Tempo	OD	POR	C_{CO_2}	C_{CH_4}
0,0	0,0	-315,2	0,00	0,000
0,5	0,0	-340,6	0,10	-
1,0	0,0	-319,8	0,21	0,062
1,5	0,0	-360,4	0,31	0,102
2,0	0,0	-370,1	0,40	0,156
3,0	0,0	-407,2	0,53	0,257
4,0	0,0	-	0,62	0,343
5,0	0,0	-414,8	0,66	-
6,0	0,0	-413,5	0,79	0,462
7,0	0,0	-403,6	0,79	0,426
8,0	0,0	-	0,82	0,445

Unidades:

Tempo – h
 OD – mgOD.L⁻¹
 POR – mV
 C_{CO_2} – mM.L⁻¹
 C_{CH_4} – mM.L⁻¹

APÊNDICE F

VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO I**b**

F.1. Condição Ib** – Operação em batelada alimentada de 3 horas com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 746 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (DQO/[SO₄²⁻] = 0,67)**

Tabela F.1. – Concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao afluente.

T.O.	C _{ST}	C _{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
40,3	451,1	818,2	6,82	36,1	31,5	67,6	0,874	-	-
41,3	554,7	1054,8	8,61	141,1	52,8	193,8	0,374	175,0	26,6
42,3	606,9	774,9	8,62	130,6	55,6	186,2	0,426	165,0	29,9
43,3	544,3	729,0	-	-	-	-	-	-	-
46,3	550,8	903,2	8,47	163,2	53,9	217,1	0,330	185,6	44,3
48,3	497,4	-	-	-	-	-	-	-	-
49,3	585,3	921,6	-	-	-	-	-	-	-
50,3	530,0	684,4	8,66	162,6	55,3	218,0	0,340	195,3	32,0
53,3	562,9	683,7	8,59	163,8	56,8	220,5	0,347	196,4	34,0
54,9	503,4	708,3	-	-	-	-	-	-	-
55,9	546,5	984,6	-	-	-	-	-	-	-
57,9	541,7	721,8	8,71	178,0	55,1	233,0	0,309	202,2	43,4
57,9	534,8	683,9	-	-	-	-	-	-	-
61,3	538,3	-	-	-	-	-	-	-	-
63,3	509,0	-	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela F.2. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao afluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
46,3	2398	560	62	18
53,3	1998	580	40	40

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela F.3. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) monitoradas no afluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	537,1	37,3	15	606,9	451,1
C_{SO4}	805,7	129,7	12	1054,8	683,7
pH	8,35	0,68	7	8,71	6,82
AP	139,3	48,2	7	178,0	36,1
AI	51,6	8,9	7	56,8	31,5
AT	190,9	56,7	7	233,0	67,6
AI/AP	0,43	0,20	7	0,87	0,31
AB	186,6	14,3	6	202,2	165,0
AVT	35,0	7,3	6	44,3	26,6
ST	2238	283	2	2398	1998
SVT	565	14	2	580	560
SST	56	16	2	62	40
SSV	27	16	2	40	18

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹
 C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP – mgCaCO₃.L⁻¹
 AI – mgCaCO₃.L⁻¹
 AT – mgCaCO₃.L⁻¹
 AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹
 ST – mg.L⁻¹
 SVT – mg.L⁻¹
 SST – mg.L⁻¹
 SSV – mg.L⁻¹

Tabela F.4. – Concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}) e concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), referentes ao efluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{HS}	C_{H2S}
40,3	292,5	260,9	156,5	124,9	384,0	-	80,0	64,3	15,7
41,3	296,0	253,3	160,0	117,3	331,0	-	-	-	-
42,3	289,9	251,7	153,9	115,7	328,0	1,9	45,0	36,2	8,8
43,3	298,3	250,4	162,3	114,4	388,0	-	-	-	-
46,3	289,7	228,8	153,7	92,8	445,1	-	-	-	-
48,3	315,8	258,6	179,8	122,6	-	-	-	-	-
49,3	329,7	283,6	193,7	147,6	313,6	2,8	81,3	65,3	16,0
53,3	353,9	300,9	217,9	164,9	316,5				
54,3	308,4	249,3	172,4	113,3	276,7	1,5	58,8	47,2	11,5
54,9	303,0	253,3	167,0	117,3	278,7	-	-	-	-
55,9	323,3	277,7	187,3	141,7	251,7	-	-	-	-
61,3	351,3	286,3	215,3	150,3	257,5	1,8	70,0	56,2	13,8
62,3	337,1	281,9	201,1	145,9	-	1,5	72,0	57,8	14,2

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

Tabela F.5. – pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao efluente.

T.O.	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
40,3	7,57	194,9	52,0	246,9	0,27	231,3	22,0
41,3	7,62	540,7	176,5	717,2	0,33	655,6	86,8
42,3	7,84	595,4	137,9	733,4	0,23	700,6	46,2
43,3	7,69	568,8	147,6	716,3	0,26	696,7	27,7
48,3	7,53	559,1	180,8	739,9	0,32	722,3	24,7
53,3	7,59	624,7	141,9	766,6	0,23	751,2	21,7
54,9	7,85	625,5	155,0	780,5	0,25	766,0	20,4
55,9	-	588,9	188,0	776,9	0,32	754,8	31,2
61,3	7,83	687,1	142,5	829,6	0,21	810,6	26,7

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

AP – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AI – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AT – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AB – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AVT – $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela F.6. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao efluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
41,3	1820	324	102	52
48,3	1950	342	86	60
54,9	1568	302	58	66

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SVT – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SSV – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela F.7. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), monitoradas no efluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	314,5	22,7	13	353,9	289,7
C_{SF}	264,4	20,0	13	300,9	228,8
C_{SOT}	178,5	22,7	13	217,9	153,7
C_{SOF}	128,3	20,0	13	164,9	92,8
C_{SO4}	324,6	60,4	11	445,1	251,7
C_{SO3}	1,9	0,6	5	2,8	1,5
STD	67,8	13,8	6	81,3	45,0
C_{HS}	54,5	11,1	6	65,3	36,2
C_{H2S}	13,3	2,7	6	16,0	8,8
pH	7,69	0,13	8	7,85	7,53
AP	553,9	141,5	9	687,1	194,9
AI	146,9	40,2	9	188,0	52,0
AT	700,8	174,0	9	829,6	246,9
AI/AP	0,27	0,05	9	0,33	0,21
AB	676,6	173,0	9	810,6	231,3
AVT	34,2	21,2	9	86,8	20,4
ST	1779	194	3	1950	1568
SVT	323	20	3	342	302
SST	82	22	3	102	58
SSV	59	7	3	66	52

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela F.8. – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), eficiência de remoção de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}).

T.O.	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
40,3	43,4	49,5	69,7	75,8	50,0
41,3	42,7	51,0	69,0	77,3	56,9
42,3	43,9	51,3	70,2	77,6	57,3
43,3	42,2	51,5	68,6	77,9	49,5
46,3	43,9	55,7	70,3	82,0	42,0
48,3	38,9	49,9	65,2	76,3	-
49,3	36,2	45,1	62,5	71,4	59,2
53,3	31,5	41,7	57,8	68,1	58,8
54,3	40,3	51,7	66,6	78,1	64,0
54,9	41,3	51,0	67,7	77,3	63,7
55,9	37,4	46,2	63,7	72,6	67,2
61,3	32,0	44,6	58,3	70,9	66,5
62,3	34,7	45,4	61,1	71,8	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

E_{ST} – %

E_{SF} – %

E_{SOT} – %

E_{SOF} – %

E_{SO4} – %

Tabela F.9. – Carregamentos volumétricos de matéria oxidável aplicada (COA) e removida para amostras brutas (COR_{ST}) e filtradas (COR_{SF}); carregamentos volumétricos de matéria orgânica removida para amostras brutas (COR_{SOT}) e filtradas (COR_{SOF}); e carregamentos volumétricos de sulfato aplicado (CSA) e removido (CSR).

T.O.	COA	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
40,3	0,49	0,24	0,28	0,39	0,43	0,89	0,42
41,3	0,61	0,24	0,29	0,39	0,44	1,15	0,48
42,3	0,66	0,25	0,29	0,40	0,44	0,85	0,48
43,3	0,59	0,24	0,29	0,39	0,44	0,80	0,41
46,3	0,60	0,25	0,31	0,40	0,46	0,99	0,35
48,3	0,54	0,22	0,28	0,37	0,43	-	-
49,3	0,64	0,20	0,25	0,35	0,40	1,01	0,50
50,3	0,58	-	-	-	-	0,75	-
53,3	0,61	0,18	0,24	0,33	0,38	0,75	0,49
54,3	-	0,23	0,29	0,38	0,44	-	0,54
54,9	0,55	0,23	0,29	0,38	0,44	0,77	0,53
55,9	0,60	0,21	0,26	0,36	0,41	1,07	0,56
57,9	0,59	-	-	-	-	0,79	-
57,9	0,58	-	-	-	-	0,75	-
61,3	0,59	0,18	0,25	0,33	0,40	-	0,56
62,3	-	0,20	0,26	0,34	0,40	-	-
63,3	0,56	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COA – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{ST} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SF} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SOT} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

COR_{SOF} – $gDQO.L^{-1}.d^{-1}$

CSA – $gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$

CSR – $gSO_4^{2-}.L^{-1}.d^{-1}$

Tabela F.10. – Carregamentos específicos de matéria oxidável aplicada (COAE) e removida para amostras brutas ($CORE_{ST}$) e filtradas ($CORE_{SF}$); carregamentos específicos de matéria orgânica removida para amostras brutas ($CORE_{SOT}$) e filtradas ($CORE_{SOF}$); e carregamentos específicos de sulfato aplicado (CSAE) e removido (CSRE).

T.O.	COAE	$CORE_{ST}$	$CORE_{SF}$	$CORE_{SOT}$	$CORE_{SOF}$	CSAE	CSRE
40,3	44	22	25	35	38	80	37
41,3	54	21	26	35	39	103	42
42,3	59	22	26	35	39	75	43
43,3	53	21	26	34	39	71	37
46,3	54	22	28	35	41	88	31
48,3	48	20	25	33	38	-	-
49,3	57	18	23	31	36	90	44
50,3	52	-	-	-	-	67	-
53,3	55	16	21	29	34	67	44
54,3	-	20	26	33	39	-	48
54,9	49	21	26	34	39	69	48
55,9	53	19	23	32	36	96	50
57,9	53	-	-	-	-	70	-
57,9	52	-	-	-	-	67	-
61,3	52	16	22	29	36	-	50
62,3	-	17	23	31	36	-	-
63,3	50	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COAE – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{ST}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOT}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSAE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSRE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

Tabela F.11. – Valores dos perfis temporais de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}) e matéria orgânica filtrada (C_{SOF}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIb.

Tempo	Ensaio 1		Ensaio 2		Valores Médios	
	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}
0,0	292,1	142,4	236,4	86,7	292,1	114,5
0,5	370,3	274,1	228,7	132,5	370,3	203,3
1,0	368,0	284,0	285,2	201,2	368,0	242,6
1,5	323,5	231,3	271,7	179,5	323,5	205,4
2,0	296,5	208,3	236,9	148,7	296,5	178,5
3,0	279,2	211,0	226,7	158,5	279,2	184,7
4,0	270,8	190,8	276,3	196,3	270,8	193,6
5,0	278,9	166,6	-	-	278,9	166,6
6,0	284,2	168,1	241,4	125,3	284,2	146,7
7,0	293,4	189,2	265,7	161,5	293,4	175,3
8,0	286,3	286,3	249,3	249,3	286,3	267,8

Unidades:

Tempo – h

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

Tabela F.12. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfato (C_{SO_4}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIb.

Tempo	Ensaio 1	Ensaio 2	Valores Médios
0,0	372,2	233,6	302,9
0,5	329,4	247,3	288,3
1,0	362,9	268,6	315,8
1,5	334,1	279,1	306,6
2,0	320,9	287,1	304,0
3,0	301,2	-	301,2
4,0	280,3	251,5	265,9
5,0	283,1	256,5	269,8
6,0	266,1	243,4	254,7
7,0	263,7	225,4	244,5
8,0	276,7	257,5	267,1

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_4} – $mgSO_4^{2-}.L^{-1}$

Tabela F.13. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfito (C_{SO_3}), sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto na forma HS^- (C_{HS}), de sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}), pH, alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), para o reator operado na condição IIb.

Tempo	C_{SO_3}	STD	C_{HS}	C_{H_2S}	pH	AB	AVT
0,0	28,8	72,0	60,5	11,5	7,76	802,3	31,2
0,5	1,1	48,0	37,8	10,2	7,61	725,5	22,5
1,0	-	42,0	33,3	8,7	7,62	667,4	36,4
1,5	0,9	46,0	37,3	8,7	7,67	650,2	31,6
2,0	0,9	44,0	35,5	8,5	7,66	-	-
3,0	1,1	34,0	26,9	7,1	7,62	633,9	32,6
4,0	-	40,0	31,2	8,8	7,59	668,6	29,7
5,0	1,4	56,0	42,8	13,2	7,55	-	-
6,0	0,5	58,0	46,8	11,2	7,66	750,5	19,2
7,0	1,1	52,0	41,6	10,4	7,64	753,2	23,5
8,0	-	-	-	-	7,69	765,3	21,4

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_3} – mgDQO.L⁻¹

STD – mgDQO.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H_2S} – mgH₂S.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela F.14. – Valores dos perfis temporais de concentração de oxigênio dissolvido (OD), do potencial de oxi-redução (POR), de concentração de dióxido de carbono no biogás (C_{CO_2}) e concentração de metano no biogás (C_{CH_4}), para o reator operado na condição IIb.

Tempo	OD	POR	C_{CO_2}	C_{CH_4}
0,0	0,0	-	0,01	0,000
0,5	0,0	-407,5	0,18	0,000
1,0	0,0	-417,5	0,35	0,021
1,5	0,0	-415,6	0,49	0,039
2,0	0,0	-418,8	0,59	0,059
3,0	0,0	-422,9	0,78	0,125
4,0	0,0	-431,8	0,85	0,208
5,0	0,0	-434,7	0,88	0,253
6,0	0,0	-443,0	0,92	0,285
7,0	0,0	-440,2	0,68	0,222
8,0	0,0	-452,0	0,87	0,283

Unidades:

Tempo – h
 OD – mgOD.L⁻¹
 POR – mV
 C_{CO_2} – mM.L⁻¹
 C_{CH_4} – mM.L⁻¹

APÊNDICE G

VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIc

G.1. Condição IIc – Operação em batelada alimentada de 6 horas com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 746 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (DQO/[SO₄²⁻] = 0,67)

Tabela G.1. – Concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao afluente.

T.O.	C _{ST}	C _{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
64,9	505,8	670,2	-	-	-	-	-	-	-
68,3	527,3	763,7	8,56	166,3	49,2	215,5	0,296	186,7	40,6
68,9	530,3	960,7	-	-	-	-	-	-	-
69,9	518,4	787,9	8,94	163,1	50,8	213,8	0,311	190,0	33,5
72,3	504,7	689,0	-	-	-	-	-	-	-
73,3	451,5	631,4	8,55	161,5	44,6	206,1	0,276	186,7	27,2
75,9	482,0	-	8,66	160,7	51,0	211,7	0,318	188,6	32,6
78,9	483,7	1000,6	-	-	-	-	-	-	-
78,9	501,3	-	-	-	-	-	-	-	-
81,3	593,0	735,1	-	-	-	-	-	-	-
82,9	523,4	813,1	8,67	162,8	51,3	214,1	0,315	192,3	30,8
84,9	547,8	764,7	-	-	-	-	-	-	-
85,9	398,3	-	-	-	-	-	-	-	-
87,9	478,7	-	-	-	-	-	-	-	-
89,9	517,8	720,2	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela G.2. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao afluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
64,9	2168	646	164	110
73,3	902	334	102	44
78,9	1828	508	132	62
82,9	1522	456	66	44

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L^{-1}

SVT – mg.L^{-1}

SST – mg.L^{-1}

SSV – mg.L^{-1}

Tabela G.3. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO_4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) monitoradas no afluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	504,3	44,2	15	593,0	398,3
C_{SO_4}	776,0	114,4	11	1000,6	631,4
pH	8,68	0,16	5	8,94	8,55
AP	162,9	2,2	5	166,3	160,7
AI	49,4	2,8	5	51,3	44,6
AT	212,2	3,7	5	215,5	206,1
AI/AP	0,30	0,02	5	0,32	0,28
AB	188,9	2,4	5	192,3	186,7
AVT	32,9	4,9	5	40,6	27,2
ST	1605	538	4	2168	902
SVT	486	129	4	646	334
SST	116	42	4	164	66
SSV	65	31	4	110	44

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹
 C_{SO_4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP – mgCaCO₃.L⁻¹
 AI – mgCaCO₃.L⁻¹
 AT – mgCaCO₃.L⁻¹
 AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹
 ST – mg.L⁻¹
 SVT – mg.L⁻¹
 SST – mg.L⁻¹
 SSV – mg.L⁻¹

Tabela G.4. – Concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}) e concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), referentes ao efluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{HS}	C_{H2S}
66,9	324,2	261,9	185,9	123,6	359,4	-	-	-	-
68,3	461,9	274,1	323,6	135,8	286,5	4,2	64,0	51,4	12,6
68,9	449,2	285,0	310,9	146,7	487,6	-	-	-	-
69,9	362,2	263,1	223,9	124,8	300,5	4,6	86,0	69,1	16,9
74,3	309,6	243,0	171,3	104,7	355,4	-	-	-	-
75,9	271,5	203,4	133,2	65,1	-	5,4	-	-	-
81,3	294,9	235,2	156,6	96,9	317,0	-	-	-	-
81,9	306,4	240,6	168,1	102,3	365,0	4,9	-	-	-
82,9	289,0	237,2	150,7	98,9	376,3	-	-	-	-
83,9	335,7	276,9	197,4	138,6	300,6	-	-	-	-
84,9	316,1	256,4	177,8	118,1	313,7	5,4	56,0	45,0	11,0
88,9	278,2	232,5	139,9	94,2	-	-	-	-	-
89,9	302,7	265,2	164,4	126,9	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

Tabela G.5. – pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao efluente.

T.O.	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
66,9	7,94	530,6	124,9	655,5	0,24	633,1	31,6
68,3	7,83	590,0	126,3	716,2	0,21	695,3	29,5
68,9	8,04	585,7	91,3	677,0	0,16	646,8	42,5
74,3	7,80	485,7	133,0	618,7	0,27	599,8	26,7
75,9	7,67	472,0	114,4	586,5	0,24	569,1	24,5
81,3	7,74	515,8	131,9	647,7	0,26	631,9	22,2
82,9	7,66	514,2	135,1	649,3	0,26	632,4	23,9
84,9	-	407,1	127,4	534,5	0,31	516,2	25,8

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

AP – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AI – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AT – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AB – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AVT – $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela G.6. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao efluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
68,3	1814	456	166	116
75,9	2228	672	108	70
81,9	1790	396	136	94
83,9	1858	424	96	84

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SVT – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SSV – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela G.7. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), monitoradas no efluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	330,9	60,3	13	461,9	271,5
C_{SF}	251,9	22,5	13	285,0	203,4
C_{SOT}	238,7	60,3	13	369,7	179,3
C_{SOF}	159,7	22,5	13	192,8	111,2
C_{SO4}	346,2	58,8	10	487,6	286,5
C_{SO3}	4,9	0,5	5	5,4	4,2
STD	68,7	15,5	3	86,0	56,0
C_{HS}	55,2	12,5	3	69,1	45,0
C_{H2S}	13,5	3,1	3	16,9	11,0
pH	7,81	0,14	7	8,04	7,66
AP	512,6	60,0	8	590,0	407,1
AI	123,1	14,3	8	135,1	91,3
AT	635,7	55,9	8	716,2	534,5
AI/AP	0,24	0,05	8	0,31	0,16
AB	615,6	54,1	8	695,3	516,2
AVT	28,3	6,5	8	42,5	22,2
ST	1922	206	4	2228	1790
SVT	487	126	4	672	396
SST	127	31	4	166	96
SSV	91	19	4	116	70

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹
 C_{SF} – mgDQO.L⁻¹
 C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹
 C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹
 C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹
 C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹
STD – mgSTD.L⁻¹
 C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹
AP – mgCaCO₃.L⁻¹
AI – mgCaCO₃.L⁻¹
AT – mgCaCO₃.L⁻¹
AB – mgCaCO₃.L⁻¹
AVT – mgHAc.L⁻¹
ST – mg.L⁻¹
SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹
SSV – mg.L⁻¹

Tabela G.8. – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), eficiência de remoção de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}).

T.O.	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
66,9	37,2	49,3	55,1	67,1	53,2
68,3	10,6	46,9	28,4	64,8	62,7
68,9	13,0	44,8	30,9	62,7	36,5
69,9	29,9	49,1	47,7	66,9	60,9
74,3	40,1	53,0	57,9	70,8	53,7
75,9	47,4	60,6	65,3	78,5	-
81,3	42,9	54,5	60,8	72,3	58,7
81,9	40,7	53,4	58,5	71,3	52,5
82,9	44,0	54,1	61,9	71,9	51,0
83,9	35,0	46,4	52,9	64,2	60,9
84,9	38,8	50,4	56,6	68,2	59,1
88,9	46,1	55,0	64,0	72,8	-
89,9	41,4	48,7	59,2	66,5	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

E_{ST} – %

E_{SF} – %

E_{SOT} – %

E_{SOF} – %

E_{SO4} – %

Tabela G.9. – Carregamentos volumétricos de matéria oxidável aplicada (COA) e removida para amostras brutas (COR_{ST}) e filtradas (COR_{SF}); carregamentos volumétricos de matéria orgânica removida para amostras brutas (COR_{SOT}) e filtradas (COR_{SOF}); e carregamentos volumétricos de sulfato aplicado (CSA) e removido (CSR).

T.O.	COA	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
64,9	0,55	-	-	-	-	0,73	-
66,9	-	0,21	0,28	0,36	0,43	-	0,45
68,3	0,58	0,06	0,26	0,21	0,42	0,83	0,53
68,9	0,58	0,07	0,25	0,22	0,40	1,05	0,31
69,9	0,57	0,17	0,28	0,32	0,43	0,86	0,51
72,3	0,55	-	-	-	-	0,75	-
73,3	0,49	-	-	-	-	0,69	-
74,3	-	0,23	0,30	0,38	0,45	-	0,45
75,9	0,53	0,27	0,34	0,42	0,49	-	-
78,9	0,53	-	-	-	-	1,09	-
78,9	0,55	-	-	-	-	-	-
81,3	0,65	0,24	0,31	0,39	0,46	0,80	0,49
81,9	-	0,23	0,30	0,38	0,45	-	0,44
82,9	0,57	0,25	0,30	0,40	0,46	0,89	0,43
83,9	-	0,20	0,26	0,35	0,41	-	0,51
84,9	0,60	0,22	0,28	0,37	0,43	0,83	0,50
85,9	0,43	-	-	-	-	-	-
87,9	0,52	-	-	-	-	-	-
88,9	-	0,26	0,31	0,41	0,46	-	-
89,9	0,56	0,23	0,27	0,38	0,43	0,79	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COA – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{ST} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SF} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SOT} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SOF} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

CSA – gSO₄²⁻.L⁻¹.d⁻¹

CSR – gSO₄²⁻.L⁻¹.d⁻¹

Tabela G.10. – Carregamentos específicos de matéria oxidável aplicada (COAE) e removida para amostras brutas (CORE_{ST}) e filtradas (CORE_{SF}); carregamentos específicos de matéria orgânica removida para amostras brutas (CORE_{SOT}) e filtradas (CORE_{SOF}); e carregamentos específicos de sulfato aplicado (CSAE) e removido (CSRE).

T.O.	COAE	CORE _{ST}	CORE _{SF}	CORE _{SOT}	CORE _{SOF}	CSAE	CSRE
64,9	49	-	-	-	-	65	-
66,9	-	19	25	25	32	-	40
68,3	51	5	24	24	19	74	47
68,9	52	7	23	23	20	93	27
69,9	50	15	25	25	28	77	45
72,3	49	-	-	-	-	67	-
73,3	44	-	-	-	-	61	-
74,3	-	20	27	27	34	-	40
75,9	47	24	30	30	37	-	-
78,9	47	-	-	-	-	97	-
78,9	49	-	-	-	-	-	-
81,3	58	22	27	27	35	72	44
81,9	-	20	27	27	34	-	39
82,9	51	22	27	27	36	79	38
83,9	-	18	23	23	31	-	45
84,9	53	19	25	25	33	74	44
85,9	39	-	-	-	-	-	-
87,9	47	-	-	-	-	-	-
88,9	-	23	28	28	37	-	-
89,9	50	21	24	24	34	70	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COAE – mgDQO.gSVT⁻¹.d⁻¹

CORE_{ST} – mgDQO. gSVT⁻¹.d⁻¹

CORE_{SF} – mgDQO. gSVT⁻¹.d⁻¹

CORE_{SOT} – mgDQO. gSVT⁻¹.d⁻¹

CORE_{SOF} – mgDQO. gSVT⁻¹.d⁻¹

CSAE – mgSO₄²⁻. gSVT⁻¹.d⁻¹

CSRE – mgSO₄²⁻. gSVT⁻¹.d⁻¹

Tabela G.11 – Valores dos perfis temporais de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}) e matéria orgânica filtrada (C_{SOF}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIc.

Tempo	Ensaio 1		Ensaio 2		Valores Médios	
	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}
0,0	206,6	173,0	257,9	224,3	206,6	198,6
0,5	353,1	331,1	199,2	177,2	353,1	254,1
1,0	228,7	226,3	210,2	207,8	228,7	217,1
1,5	305,9	303,6	183,5	181,2	305,9	242,4
2,0	217,6	138,6	201,8	122,8	217,6	130,7
3,0	223,3	168,8	-	-	223,3	57,1
4,0	219,0	147,2	206,9	135,1	219,0	141,1
5,0	233,8	172,0	214,0	152,2	233,8	162,1
6,0	159,5	101,0	214,5	156,0	159,5	128,5
7,0	248,7	248,7	124,0	124,0	248,7	186,4
8,0	358,4	341,1	117,6	100,3	358,4	220,7

Unidades:

Tempo – h

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

Tabela G.12 – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfato (C_{SO_4}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIc.

Tempo	Ensaio 1	Ensaio 2	Valores Médios
0,0	299,6	347,7	323,7
0,5	320,1	333,5	326,8
1,0	310,2	344,7	327,5
1,5	318,2	307,8	313,0
2,0	330,8	324,7	327,8
3,0	331,6	-	331,6
4,0	327,2	323,6	325,4
5,0	302,7	338,2	320,5
6,0	315,9	330,3	323,1
7,0	281,4	296,5	289,0
8,0	301,6	296,3	299,0

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_4} – $mgSO_4^{2-}.L^{-1}$

Tabela G.13. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfito (C_{SO_3}), sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto na forma HS^- (C_{HS}), de sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}), pH, alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), para o reator operado na condição IIc.

Tempo	C_{SO_3}	STD	C_{HS}	C_{H_2S}	pH	AB	AVT
0,0	8,3	16,0	13,4	2,6	7,75	764,0	66,3
0,5	10,3	10,0	8,4	1,6	7,75	712,5	54,4
1,0	11,9	-	-	-	7,74	705,8	87,0
1,5	11,8	-	-	-	7,75	-	-
2,0	5,3	39,0	31,7	7,3	7,68	716,4	36,4
3,0	12,8	26,0	21,0	5,0	7,66	-	-
4,0	19,3	34,0	26,8	7,2	7,61	696,2	52,9
5,0	9,0	30,0	23,3	6,7	7,58	694,4	49,5
6,0	12,8	28,0	21,5	6,5	7,56	704,8	53,9
7,0	-	-	-	-	7,58	736,3	33,3
8,0	6,5	8,0	6,0	2,0	7,53	736,9	50,3

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_3} – mgDQO.L⁻¹

STD – mgDQO.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H_2S} – mgH₂S.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela G.14. – Valores dos perfis temporais de concentração de oxigênio dissolvido (OD), do potencial de oxi-redução (POR), de concentração de dióxido de carbono no biogás (C_{CO_2}) e concentração de metano no biogás (C_{CH_4}), para o reator operado na condição IIc.

Tempo	OD	POR	C_{CO_2}	C_{CH_4}
0,0	0,0	-	0,00	0,000
0,5	0,0	-419,6	0,13	0,000
1,0	0,0	-439,4	0,24	0,000
1,5	0,0	-440,6	0,32	0,000
2,0	0,0	-	0,41	0,000
3,0	0,0	-449,2	0,52	0,000
4,0	0,0	-452,3	0,62	0,054
5,0	0,0	-453,2	0,74	0,071
6,0	0,0	-455,0	0,80	0,086
7,0	0,0	-451,3	0,92	0,104
8,0	0,0	-	-	-

Unidades:

Tempo – h
 OD – mgOD.L⁻¹
 POR – mV
 C_{CO_2} – mM.L⁻¹
 C_{CH_4} – mM.L⁻¹

APÊNDICE H

VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIIa

H.1. Condição IIIa – Operação em batelada com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 1492 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (DQO/[SO₄²⁻] = 0,34)

Tabela H.1. – Concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao afluente.

T.O.	C _{ST}	C _{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
0,0	524,2	1477,4	-	-	-	-	-	-	-
2,3	460,1	1417,9	-	-	-	-	-	-	-
9,3	508,0	1276,5	8,77	178,6	53,9	232,5	0,30	201,4	43,8
13,3	531,8	1436,0	8,51	181,3	59,9	241,2	0,33	214,4	37,8
15,0	506,2	1460,5	-	-	-	-	-	-	-
17,0	501,6	1459,2	8,73	174,4	57,5	231,9	0,33	206,9	35,2
20,0	515,9	1460,5	-	-	-	-	-	-	-
22,0	-	-	8,37	176,5	70,1	246,6	0,40	216,9	41,8
23,0	535,2	1419,4	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela H.2. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao afluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
17,0	2962	496	78	22
23,0	3296	786	114	90

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela H.3. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) monitoradas no afluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	510,4	23,7	8	535,2	460,1
C_{SO4}	1425,9	64,0	8	1477,4	1276,5
pH	8,60	0,19	4	8,77	8,37
AP	177,7	2,9	4	181,3	174,4
AI	60,4	6,9	4	70,1	53,9
AT	238,1	7,1	4	246,6	231,9
AI/AP	0,34	0,04	4	0,40	0,30
AB	209,9	7,1	4	216,9	201,4
AVT	39,6	3,9	4	43,8	35,2
ST	3129	236	2	3296	2962
SVT	641	205	2	786	496
SST	96	25	2	114	78
SSV	56	48	2	90	22

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela H.4. – Concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}) e concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), referentes ao efluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{HS}	C_{H2S}
0,0	290,8	260,3	199,6	169,1	1008,2	-	-	-	-
1,0	257,6	222,6	166,4	131,4	1076,8	-	-	-	-
2,3	191,5	162,0	100,3	70,8	1041,8	-	-	-	-
9,3	151,0	113,9	59,8	22,7	1267,6	-	-	-	-
10,3	150,0	134,0	58,8	42,8	1298,4	-	-	-	-
13,3	261,5	211,1	170,3	119,9	1072,4	1,3	40,0	33,2	6,8
14,3	164,2	150,0	73,0	58,8	1207,7	-	-	-	-
15,0	201,4	164,4	110,2	73,2	1129,0	-	-	-	-
20,0	264,6	217,3	173,4	126,1	1167,2	0,8	68,0	56,4	11,6
21,0	216,0	155,8	124,8	64,6	1350,2	-	-	-	-
22,0	174,4	133,3	83,2	42,1	1220,3	0,9	40,0	33,2	6,8
23,0	159,3	123,4	68,1	32,2	1154,9	1,0	34,0	28,2	5,8

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

Tabela H.5. – pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao efluente.

T.O.	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
1,0	7,69	581,6	113,9	695,5	0,20	671,9	33,2
9,3	7,52	387,4	106,7	494,1	0,28	476,7	24,5
13,3	7,43	502,2	145,0	647,2	0,29	629,7	24,7
20,0	-	507,9	161,1	669,0	0,32	652,3	23,4
22,0	7,36	397,9	133,0	531,0	0,33	510,6	28,7

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

AP – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AI – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AT – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AB – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AVT – $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela H.6. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao efluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
21,0	2870	324	110	52
23,0	2880	736	108	70

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SVT – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SSV – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela H.7. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), monitoradas no efluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	206,9	50,3	12	290,8	150,0
C_{SF}	170,7	46,2	12	260,3	113,9
C_{SOT}	115,7	50,3	12	199,6	58,8
C_{SOF}	79,5	46,2	12	169,1	22,7
C_{SO4}	1166,2	106,6	12	1350,2	1008,2
C_{SO3}	1,0	0,2	4	1,3	0,8
STD	45,5	15,3	4	68,0	34,0
C_{HS}	37,7	12,7	4	56,4	28,2
C_{H2S}	7,8	2,6	4	11,6	5,8
pH	7,50	0,14	4	7,69	7,36
AP	475,4	81,8	5	581,6	387,4
AI	131,9	22,3	5	161,1	106,7
AT	607,3	89,2	5	695,5	494,1
AI/AP	0,28	0,05	5	0,33	0,20
AB	588,2	88,4	5	671,9	476,7
AVT	26,9	4,1	5	33,2	23,4
ST	2875	7	2	2880	2870
SVT	530	291	2	736	324
SST	109	1	2	110	108
SSV	61	13	2	70	52

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela H.8. – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), eficiência de remoção de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}).

T.O.	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
0,0	44,4	50,3	61,9	67,7	33,4
1,0	50,8	57,5	68,2	74,9	28,9
2,3	63,4	69,0	80,8	86,5	31,2
9,3	71,1	78,2	88,6	95,7	16,3
10,3	71,3	74,4	88,8	91,8	14,2
13,3	50,0	59,7	67,5	77,1	29,2
14,3	68,6	71,3	86,0	88,8	20,2
15,0	61,5	68,6	78,9	86,0	25,4
20,0	49,4	58,5	66,9	75,9	22,9
21,0	58,7	70,2	76,2	87,7	10,8
22,0	66,7	74,5	84,1	92,0	19,4
23,0	69,6	76,4	87,0	93,8	23,7

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

E_{ST} – %

E_{SF} – %

E_{SOT} – %

E_{SOF} – %

E_{SO4} – %

Tabela H.9. – Carregamentos volumétricos de matéria oxidável aplicada (COA) e removida para amostras brutas (COR_{ST}) e filtradas (COR_{SF}); carregamentos volumétricos de matéria orgânica removida para amostras brutas (COR_{SOT}) e filtradas (COR_{SOF}); e carregamentos volumétricos de sulfato aplicado (CSA) e removido (CSR).

T.O.	COA	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
0,0	0,63	0,28	0,32	0,39	0,43	1,77	0,61
1,0	-	0,32	0,36	0,43	0,47	-	0,52
2,3	0,55	0,40	0,43	0,51	0,54	1,70	0,57
9,3	0,61	0,45	0,49	0,56	0,60	1,53	0,30
10,3	-	0,45	0,47	0,56	0,58	-	0,26
13,3	0,64	0,31	0,37	0,42	0,48	1,72	0,53
14,3	-	0,43	0,45	0,54	0,56	-	0,37
15,0	0,61	0,39	0,43	0,50	0,54	1,75	0,46
17,0	0,60	-	-	-	-	1,75	-
20,0	0,62	0,31	0,37	0,42	0,48	1,75	0,42
21,0	-	0,37	0,44	0,48	0,55	-	0,20
22,0	-	0,42	0,47	0,53	0,58	-	0,35
23,0	0,64	0,44	0,48	0,55	0,59	1,70	0,43

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COA – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{ST} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SF} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SOT} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SOF} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

CSA – gSO₄²⁻.L⁻¹.d⁻¹

CSR – gSO₄²⁻.L⁻¹.d⁻¹

Tabela H.10. – Carregamentos específicos de matéria oxidável aplicada (COAE) e removida para amostras brutas (CORE_{ST}) e filtradas (CORE_{SF}); carregamentos específicos de matéria orgânica removida para amostras brutas (CORE_{SOT}) e filtradas (CORE_{SOF}); e carregamentos específicos de sulfato aplicado (CSAE) e removido (CSRE).

T.O.	COAE	CORE _{ST}	CORE _{SF}	CORE _{SOT}	CORE _{SOF}	CSAE	CSRE
0,0	51	23	26	31	34	144	49
1,0	-	26	29	35	38	-	43
2,3	45	32	35	41	44	138	46
9,3	49	36	40	45	49	124	24
10,3	-	36	38	45	47	-	21
13,3	52	25	30	34	39	140	43
14,3	-	35	36	44	45	-	30
15,0	49	31	35	40	44	142	37
17,0	49	-	-	-	-	142	-
20,0	50	25	30	34	39	142	34
21,0	-	30	36	39	45	-	16
22,0	-	34	38	43	47	-	29
23,0	52	35	39	44	48	138	35

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COAE – mgDQO.gSVT⁻¹.d⁻¹

CORE_{ST} – mgDQO. gSVT⁻¹.d⁻¹

CORE_{SF} – mgDQO. gSVT⁻¹.d⁻¹

CORE_{SOT} – mgDQO. gSVT⁻¹.d⁻¹

CORE_{SOF} – mgDQO. gSVT⁻¹.d⁻¹

CSAE – mgSO₄²⁻. gSVT⁻¹.d⁻¹

CSRE – mgSO₄²⁻. gSVT⁻¹.d⁻¹

Tabela H.11. – Valores dos perfis temporais de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}) e matéria orgânica filtrada (C_{SOF}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIa.

Tempo	Ensaio 1		Ensaio 2		Valores Médios	
	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}
0,0	301,8	276,4	264,1	238,7	283,0	257,5
0,5	222,9	180,6	217,6	175,3	220,3	177,9
1,0	239,2	152,9	189,2	102,9	214,2	127,9
1,5	196,6	102,3	185,9	91,6	191,3	97,0
2,0	211,9	116,8	170,2	75,1	191,1	96,0
3,0	192,7	138,9	175,9	122,1	184,3	130,5
4,0	184,5	101,0	162,2	78,7	173,4	89,9
5,0	183,3	113,4	147,4	77,5	165,4	95,5
6,0	178,4	96,2	147,6	65,4	163,0	80,8
7,0	176,6	141,8	-	-	176,6	141,8
8,0	166,5	129,3	144,7	107,5	155,6	118,4

Unidades:

Tempo – h

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

Tabela H.12. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfato (C_{SO_4}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIa.

Tempo	Ensaio 1	Ensaio 2	Valores Médios
0,0	1362,1	1280,0	1321,1
0,5	1332,1	1249,8	1291,0
1,0	1279,0	1118,3	1198,7
1,5	1215,3	1154,4	1184,9
2,0	1308,0	1010,5	1159,3
3,0	1149,0	1119,5	1134,3
4,0	1172,9	1112,1	1142,5
5,0	1139,5	1007,1	1073,3
6,0	1072,9	1187,7	1130,3
7,0	1077,2	-	1077,2
8,0	1220,3	1154,9	1187,6

Unidades:

Tempo – h
 C_{SO_4} – $mgSO_4^{2-} \cdot L^{-1}$

Tabela H.13. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfito (C_{SO_3}), sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto na forma HS^- (C_{HS}), de sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}), pH, alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), para o reator operado na condição IIa.

Tempo	C_{SO_3}	STD	C_{HS}	C_{H_2S}	pH	AB	AVT
0,0	27,1	10,0	7,0	3,0	7,40	471,5	25,9
0,5	11,6	20,0	13,1	6,9	7,32	551,7	29,0
1,0	11,4	42,0	28,2	13,8	7,35	592,1	27,0
1,5	11,4	46,0	31,1	14,9	7,36	657,7	16,9
2,0	15,4	46,0	30,2	15,8	7,32	646,4	18,0
3,0	8,9	26,0	16,9	9,1	7,31	666,7	21,2
4,0	17,4	40,0	25,4	14,6	7,28	671,0	19,3
5,0	9,4	34,0	21,2	12,8	7,26	668,0	19,3
6,0	11,1	40,0	25,0	15,0	7,26	670,9	18,3
7,0	13,9	16,0	10,3	5,7	7,3	674,8	18,2
8,0	6,1	18,0	11,9	6,1	7,33	657,3	16,4

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_3} – mgDQO.L⁻¹

STD – mgDQO.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H_2S} – mgH₂S.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela H.14. – Valores dos perfis temporais de concentração de oxigênio dissolvido (OD), do potencial de oxi-redução (POR), de concentração de dióxido de carbono no biogás (C_{CO_2}) e concentração de metano no biogás (C_{CH_4}), para o reator operado na condição IIa.

Tempo	OD	POR	C_{CO_2}	C_{CH_4}
0,0	0,0	-332,5	0,00	0,000
0,5	0,0	-375,3	0,16	0,000
1,0	0,0	-378,3	0,25	0,000
1,5	0,0	-367,0	0,31	0,000
2,0	0,0	-355,9	0,43	0,000
3,0	0,0	-357,2	0,38	0,000
4,0	0,0	-364,2	0,81	0,035
5,0	0,0	-360,5	0,88	0,000
6,0	0,0	-356,2	0,92	0,040
7,0	0,0	-375,4	1,02	0,036
8,0	0,0	-375,4	1,06	0,035

Unidades:

Tempo – h
 OD – mgOD.L⁻¹
 POR – mV
 C_{CO_2} – mM.L⁻¹
 C_{CH_4} – mM.L⁻¹

APÊNDICE I

VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIIb

I.1. Condição IIIb – Operação em batelada alimentada de 3 horas com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 1492 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (DQO/[SO₄²⁻] = 0,34)

Tabela I.1. – Concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao afluente.

T.O.	C _{ST}	C _{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
28,3	432,2	1381,8	-	-	-	-	-	-	-
30,3	526,1	1403,6	8,87	166,1	46,6	212,6	0,28	183,3	41,3
35,3	515,3	1426,9	8,56	157,0	51,4	208,4	0,33	181,7	37,6
37,3	653,1	1370,2	8,64	154,7	55,6	210,4	0,36	182,8	38,8
43,0	508,3	1474,9	8,60	159,8	50,2	210,1	0,31	177,2	46,4
44,0	469,6	-	8,51	156,4	50,0	206,4	0,32	194,1	17,3
45,0	558,4	1443,8	-	-	-	-	-	-	-
46,0	552,9	1747,3	8,64	150,2	52,8	203,0	0,35	170,8	45,4
48,1	514,2	1606,7	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela I.2. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao afluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
28,3	2440	348	82	48
35,3	3260	598	120	70
43,0	3286	538	46	10

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela I.3. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) monitoradas no afluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	525,6	61,7	9	653,1	432,2
C_{SO4}	1481,9	130,5	8	1747,3	1370,2
pH	8,64	0,12	8	8,87	8,51
AP	157,4	5,3	6	166,1	150,2
AI	51,1	3,0	6	55,6	46,6
AT	208,5	3,4	6	212,6	203,0
AI/AP	0,33	0,03	6	0,36	0,28
AB	181,6	7,7	6	194,1	170,8
AVT	37,8	10,6	6	46,4	17,3
ST	2995	481	6	3286	2440
SVT	495	131	3	598	348
SST	83	37	3	120	46
SSV	43	30	3	70	10

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹
 C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP – mgCaCO₃.L⁻¹
 AI – mgCaCO₃.L⁻¹
 AT – mgCaCO₃.L⁻¹
 AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹
 ST – mg.L⁻¹
 SVT – mg.L⁻¹
 SST – mg.L⁻¹
 SSV – mg.L⁻¹

Tabela I.4. – Concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}) e concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), referentes ao efluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{HS}	C_{H2S}
28,3	311,4	263,6	118,5	70,7	828,2	1,2	88,0	73,0	15,0
29,3	330,6	256,1	137,7	63,2	900,8	0,8	96,0	79,6	16,4
34,3	357,9	315,6	165,0	122,7	892,1	-	-	-	-
35,3	330,2	290,1	137,3	97,2	1079,7	0,9	92,0	76,3	15,7
36,3	365,6	263,4	172,7	70,5	921,8	-	-	-	-
37,3	317,6	282,4	124,7	89,5	877,9	0,9	98,0	81,3	16,7
42,0	342,6	293,6	149,7	100,7	993,6	0,7	114,0	94,6	19,4
43,0	333,2	297,7	140,3	104,8	1034,1	2,1	90,0	74,7	15,3
44,0	301,6	261,3	108,7	68,4	-	-	-	-	-
45,0	291,5	256,2	98,6	63,3	899,5	-	-	-	-
49,2	-	252,9	-	60,0	1096,2	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

Tabela I.5. – pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao efluente.

T.O.	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
28,3	7,68	575,3	117,8	693,1	0,20	653,6	55,6
29,3	7,87	607,0	115,3	722,2	0,19	650,1	101,6
34,3	7,59	585,1	157,0	742,1	0,27	723,7	25,9
35,3	7,76	584,8	141,9	726,8	0,24	709,5	24,4
36,3	7,67	529,5	154,7	684,2	0,29	666,4	25,1
37,3	7,77	532,3	167,8	700,1	0,32	682,2	25,1
42,0	7,83	594,5	134,8	729,3	0,23	693,3	50,8
44,0	7,81	551,6	137,7	689,3	0,25	679,6	13,7
45,0	7,64	516,7	142,5	659,2	0,28	644,1	21,2
50,2	7,76	560,7	132,7	693,4	0,24	671,7	30,6

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

AP – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AI – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AT – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AB – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AVT – $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela I.6. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao efluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
28,3	3306	536	102	70
34,3	2966	544	128	46
42,0	3124	580	136	62

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SVT – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SSV – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela I.7. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), monitoradas no efluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	328,2	23,5	10	365,6	291,5
C_{SF}	275,7	21,1	11	315,6	252,9
C_{SOT}	135,3	23,5	10	172,7	98,6
C_{SOF}	82,8	21,1	11	122,7	60,0
C_{SO4}	952,4	92,1	10	1096,2	828,2
C_{SO3}	1,1	0,5	6	2,1	0,7
STD	96,3	9,4	6	114,0	88,0
C_{HS}	79,9	7,8	6	94,6	73,0
C_{H2S}	16,4	1,6	6	19,4	15,0
pH	7,74	0,09	10	7,87	7,59
AP	563,7	30,5	10	607,0	516,7
AI	140,2	16,6	10	167,8	115,3
AT	704,0	25,4	10	742,1	659,2
AI/AP	0,25	0,04	10	0,32	0,19
AB	677,4	25,9	10	723,7	644,1
AVT	37,4	26,1	10	101,6	13,7
ST	3132	170	3	3306	2966
SVT	553	23	3	580	536
SST	122	18	3	136	102
SSV	59	12	3	70	46

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela I.8. – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), eficiência de remoção de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}).

T.O.	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
28,3	40,5	49,6	77,4	86,5	45,3
29,3	36,8	51,1	73,7	87,9	40,5
34,3	31,6	39,7	68,5	76,6	41,1
35,3	36,9	44,6	73,8	81,4	28,7
36,3	30,1	49,7	67,0	86,5	39,1
37,3	39,3	46,0	76,2	82,9	42,0
42,0	34,5	43,9	71,4	80,8	34,4
43,0	36,3	43,1	73,2	80,0	31,7
44,0	42,4	50,1	79,2	86,9	-
45,0	44,3	51,0	81,2	87,9	40,6
49,2	-	51,7	-	88,5	27,6

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

E_{ST} – %

E_{SF} – %

E_{SOT} – %

E_{SOF} – %

E_{SO4} – %

Tabela I.9. – Carregamentos volumétricos de matéria oxidável aplicada (COA) e removida para amostras brutas (COR_{ST}) e filtradas (COR_{SF}); carregamentos volumétricos de matéria orgânica removida para amostras brutas (COR_{SOT}) e filtradas (COR_{SOF}); e carregamentos volumétricos de sulfato aplicado (CSA) e removido (CSR).

T.O.	COA	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
28,3	0,47	0,23	0,28	0,44	0,49	1,51	0,75
29,3	-	0,21	0,29	0,42	0,50	-	0,67
30,3	0,57	-	-	-	-	1,53	-
34,3	-	0,18	0,23	0,39	0,44	-	0,68
35,3	0,56	0,21	0,25	0,42	0,46	1,56	0,47
36,3	-	0,17	0,28	0,38	0,49	-	0,65
37,3	0,71	0,22	0,26	0,43	0,47	1,49	0,69
42,0	-	0,20	0,25	0,41	0,46	-	0,57
43,0	0,55	0,21	0,25	0,42	0,46	1,61	0,52
44,0	0,51	0,24	0,29	0,45	0,50	-	-
45,0	0,61	0,25	0,29	0,46	0,50	1,58	0,67
46,0	0,60	-	-	-	-	1,91	-
48,1	0,56	-	-	-	-	1,75	-
49,2	-	-	0,30	-	0,51	-	0,46

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COA – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{ST} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SF} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SOT} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SOF} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

CSA – gSO₄²⁻.L⁻¹.d⁻¹

CSR – gSO₄²⁻.L⁻¹.d⁻¹

Tabela I.10. – Carregamentos específicos de matéria oxidável aplicada (COAE) e removida para amostras brutas ($CORE_{ST}$) e filtradas ($CORE_{SF}$); carregamentos específicos de matéria orgânica removida para amostras brutas ($CORE_{SOT}$) e filtradas ($CORE_{SOF}$); e carregamentos específicos de sulfato aplicado (CSAE) e removido (CSRE).

T.O.	COAE	$CORE_{ST}$	$CORE_{SF}$	$CORE_{SOT}$	$CORE_{SOF}$	CSAE	CSRE
28,3	42	21	25	39	44	134	67
29,3	-	19	26	38	45	-	60
30,3	51	-	-	-	-	137	-
34,3	-	16	20	35	39	-	61
35,3	50	19	23	38	41	139	42
36,3	-	15	25	34	44	-	58
37,3	64	20	23	39	42	133	62
42,0	-	18	22	36	41	-	51
43,0	49	18	22	37	41	143	47
44,0	46	22	25	40	44	-	-
45,0	54	23	26	41	45	140	60
46,0	54	-	-	-	-	170	-
48,1	50	-	-	-	-	156	-
49,2	-	-	26	-	45	-	41

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COAE – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{ST}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOT}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSAE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSRE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

Tabela I.11. – Valores dos perfis temporais de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}) e matéria orgânica filtrada (C_{SOF}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIIb.

Tempo	Ensaio 1		Ensaio 2		Valores Médios	
	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}
0,0	250,1	80,7	276,7	107,3	263,4	94,0
0,5	243,4	62,2	282,3	101,1	262,9	81,7
1,0	245,8	62,1	277,4	93,7	261,6	77,9
1,5	264,4	92,1	297,9	125,6	281,2	108,8
2,0	-	-	252,8	85,8	252,8	85,8
3,0	267,6	72,0	279,9	84,3	273,8	78,2
4,0	266,9	48,4	250,2	31,7	258,6	40,1
5,0	243,4	30,8	248,2	35,6	245,8	30,8
6,0	252,3	45,6	266,3	59,6	259,3	52,6
7,0	248,1	61,8	271,8	85,5	260,0	73,7
8,0	257,8	75,3	252,9	70,4	255,4	72,8

Unidades:

Tempo – h

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

Tabela I.12. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfato (C_{SO_4}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIIb.

Tempo	Ensaio 1	Ensaio 2	Valores Médios
0,0	1094,5	986,8	1040,6
0,5	1066,4	1059,6	1063,0
1,0	1175,2	1076,4	1125,8
1,5	1082,0	1107,6	1094,8
2,0	-	1200,9	1200,9
3,0	1136,3	1099,5	1136,3
4,0	1127,6	1076,3	1127,6
5,0	1099,6	1162,1	1099,6
6,0	1058,3	1165,3	1058,3
7,0	1035,3	1096,2	1035,3
8,0	1054,2	1096,3	1054,2

Unidades:

Tempo – h
 C_{SO_4} – $mgSO_4^{2-} \cdot L^{-1}$

Tabela I.13. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfito (C_{SO_3}), sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto na forma HS^- (C_{HS}), de sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}), pH, alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), para o reator operado na condição IIIb.

Tempo	C_{SO_3}	STD	C_{HS}	C_{H_2S}	pH	AB	AVT
0,0	26,8	82,0	73,6	8,4	7,98	672,6	50,3
0,5	25,8	88,0	78,7	9,3	7,97	621,3	30,6
1,0	18,3	90,0	78,2	11,8	7,86	625,6	34,5
1,5	21,7	84,0	73,8	10,2	7,90	-	-
2,0	14,9	82,0	69,9	12,1	7,80	612,5	33,0
3,0	77,8	90,0	75,0	15,0	7,74	618,4	34,6
4,0	52,4	104,0	85,3	18,7	7,70	633,2	39,8
5,0	-	-	0,0	0,0	7,88	-	-
6,0	33,4	100,0	78,8	21,2	7,61	-	-
7,0	11,4	92,0	71,8	20,2	7,59	669,2	38,1
8,0	12,5	90	75,6	14,4	7,76	671,7	30,6

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_3} – mgDQO.L⁻¹

STD – mgDQO.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H_2S} – mgH₂S.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela I.14. – Valores dos perfis temporais de concentração de oxigênio dissolvido (OD), do potencial de oxi-redução (POR), de concentração de dióxido de carbono no biogás (C_{CO_2}) e concentração de metano no biogás (C_{CH_4}), para o reator operado na condição IIIb.

Tempo	OD	POR	C_{CO_2}	C_{CH_4}
0,0	0,0	-	0,04	0,000
0,5	0,0	-344,2	0,15	0,000
1,0	0,0	-370,9	0,26	0,000
1,5	0,0	-393,6	0,37	0,000
2,0	0,0	-381,6	0,43	0,000
3,0	0,0	-384,2	0,62	0,000
4,0	0,0	-404,6	0,66	0,000
5,0	0,0	-375,3	0,70	0,000
6,0	0,0	-383,5	0,72	0,000
7,0	0,0	-389,2	0,73	0,000
8,0	0,0	-364,9	0,74	0,000

Unidades:

Tempo – h
 OD – mgOD.L⁻¹
 POR – mV
 C_{CO_2} – mM.L⁻¹
 C_{CH_4} – mM.L⁻¹

APÊNDICE J

VALORES DAS VARIÁVEIS NA CONDIÇÃO IIIc

J.1. Condição IIIc – Operação em batelada alimentada de 6 horas com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 1492 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (DQO/[SO₄²⁻] = 0,34)

Tabela J.1. – Concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao afluente.

T.O.	C _{ST}	C _{SO4}	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
55,3	488,3	1586,8	-	-	-	-	-	-	-
56,3	535,1	1682,5	8,71	159,0	48,8	207,8	0,31	176,6	43,9
57,3	542,1	1689,8	8,53	153,3	52,8	206,1	0,34	180,5	36,1
59,0	525,5	1636,4	8,77	159,2	54,6	213,8	0,34	169,9	61,8
60,3	526,0	1562,0	-	-	-	-	-	-	-
62,3	556,7	1635,1	8,75	169,8	62,0	231,7	0,37	201,7	42,3
64,3	502,3	1681,3	-	-	-	-	-	-	-
66,3	572,2	1603,4	8,84	180,3	49,9	230,3	0,28	198,3	45,0
68,3	545,7	-	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela J.2. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao afluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
57,3	3202	498	68	28
64,3	3228	478	80	14

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela J.3. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato (C_{SO4}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) monitoradas no afluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	532,7	26,0	9	572,2	488,3
C_{SO4}	1634,7	47,9	8	1689,8	1562,0
pH	8,72	0,12	5	8,84	8,53
AP	164,3	10,7	5	180,3	153,3
AI	53,6	5,2	5	62,0	48,8
AT	217,9	12,3	5	231,7	206,1
AI/AP	0,33	0,04	5	0,37	0,28
AB	185,4	13,9	5	201,7	169,9
AVT	45,8	9,6	5	61,8	36,1
ST	3215	18	2	3228	3202
SVT	488	14	2	498	478
SST	74	8	2	80	68
SSV	21	10	2	28	14

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela J.4. – Concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}) e concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), referentes ao efluente.

T.O.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{HS}	C_{H2S}
55,3	308,8	251,7	140,5	83,4	1098,7	-	-	-	-
56,3	346,0	292,0	177,7	123,7	995,6	0,8	94,0	78,0	16,0
57,3	362,8	298,8	194,5	130,5	1069,9	-	-	-	-
58,3	310,2	256,5	141,9	88,2	1111,4	1,7	88,0	73,0	15,0
59,0	301,2	240,7	132,9	72,4	1139,7	-	-	-	-
62,3	276,3	239,8	108,0	71,5	1119,1	-	-	-	-
63,3	290,2	231,7	121,9	63,4	1126,9	0,9	82,0	68,0	14,0
64,3	312,0	257,8	143,7	89,5	1139,3	-	-	-	-
65,3	321,1	258,5	152,8	90,2	1095,3	-	-	-	-
66,3	332,7	261,7	164,4	93,4	1130,2	1,9	84,0	69,7	14,3
69,0	-	-	-	-	-	2,6	72,0	59,7	12,3
70,0	-	239,3	-	71,0	1189,3	-	-	-	-

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

Tabela J.5. – pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), referentes ao efluente.

T.O.	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
55,3	7,85	552,5	139,7	692,1	0,25	661,3	43,5
57,3	7,82	564,4	140,5	704,9	0,25	675,0	42,1
59,0	7,85	572,7	146,6	719,3	0,26	685,3	47,8
62,3	7,97	598,0	146,8	744,8	0,25	724,1	29,2
65,3	7,85	634,1	137,2	771,2	0,22	752,4	26,6
71,0	7,83	658,6	146,1	804,7	0,22	781,8	32,2

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

AP – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AI – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AT – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AB – $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$

AVT – $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela J.6. – Concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), referentes ao efluente.

T.O.	ST	SVT	SST	SSV
58,3	2836	468	108	78
63,3	2944	512	100	94

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

ST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SVT – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SST – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

SSV – $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela J.7. – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para concentração de matéria oxidável total não filtrada (C_{ST}) e filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica não filtrada (C_{SOT}) e filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto (C_{HS}), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}), pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), alcalinidade total (AT), relação entre alcalinidade intermediária e parcial (AI/AP), alcalinidade a bicarbonato (AB), ácidos voláteis totais (AVT), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV), monitoradas no efluente.

Variáveis	Média	Desv. Pad.	Amostras	Máximo	Mínimo
C_{ST}	316,1	25,7	10	362,8	276,3
C_{SF}	257,1	21,3	11	298,8	231,7
C_{SOT}	147,8	25,7	10	194,5	108,0
C_{SOF}	88,8	21,3	11	130,5	63,4
C_{SO4}	1110,5	48,8	11	1189,3	995,6
C_{SO3}	1,6	0,8	5	2,6	0,8
STD	84,0	8,1	5	94,0	72,0
C_{HS}	69,7	6,7	5	78,0	59,7
C_{H2S}	14,3	1,4	5	16,0	12,3
pH	7,86	0,05	6	7,97	7,82
AP	596,7	42,0	6	658,6	552,5
AI	142,8	4,2	6	146,8	137,2
AT	739,5	42,8	6	804,7	692,1
AI/AP	0,24	0,02	6	0,26	0,22
AB	713,3	47,5	6	781,8	661,3
AVT	36,9	8,7	6	47,8	26,6
ST	2890	76	2	2944	2836
SVT	490	31	2	512	468
SST	104	6	2	108	100
SSV	86	11	2	94	78

Unidades:

C_{ST} – mgDQO.L⁻¹

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOT} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SO4} – mgSO₄²⁻.L⁻¹

C_{SO3} – mgSO₃²⁻.L⁻¹

STD – mgSTD.L⁻¹

C_{HS} – mgHS.L⁻¹

C_{H2S} – mgH₂S.L⁻¹

AP – mgCaCO₃.L⁻¹

AI – mgCaCO₃.L⁻¹

AT – mgCaCO₃.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

ST – mg.L⁻¹

SVT – mg.L⁻¹

SST – mg.L⁻¹

SSV – mg.L⁻¹

Tabela J.8. – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), eficiência de remoção de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}).

T.O.	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
55,3	41,0	51,9	73,2	84,1	27,4
56,3	33,9	44,2	66,0	76,4	34,2
57,3	30,7	42,9	62,8	75,1	29,3
58,3	40,7	51,0	72,9	83,1	26,6
59,0	42,4	54,0	74,6	86,2	24,7
62,3	47,2	54,2	79,4	86,3	26,1
63,3	44,5	55,7	76,7	87,9	25,6
64,3	40,4	50,7	72,5	82,9	24,8
65,3	38,6	50,6	70,8	82,8	27,7
66,3	36,4	50,0	68,6	82,2	25,4
70,0	-	54,3	-	86,4	21,5

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

E_{ST} – %

E_{SF} – %

E_{SOT} – %

E_{SOF} – %

E_{SO4} – %

Tabela J.9. – Carregamentos volumétricos de matéria oxidável aplicada (COA) e removida para amostras brutas (COR_{ST}) e filtradas (COR_{SF}); carregamentos volumétricos de matéria orgânica removida para amostras brutas (COR_{SOT}) e filtradas (COR_{SOF}); e carregamentos volumétricos de sulfato aplicado (CSA) e removido (CSR).

T.O.	COA	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
55,3	0,53	0,23	0,30	0,42	0,48	1,73	0,45
56,3	0,58	0,19	0,25	0,38	0,44	1,84	0,57
57,3	0,59	0,18	0,24	0,36	0,43	1,84	0,48
58,3	-	0,23	0,29	0,42	0,47	-	0,44
59,0	0,57	0,24	0,31	0,43	0,49	1,79	0,41
60,3	0,57	-	-	-	-	1,70	-
62,3	0,61	0,27	0,31	0,45	0,49	1,78	0,43
63,3	-	0,25	0,32	0,44	0,50	-	0,42
64,3	0,55	0,23	0,29	0,41	0,47	1,83	0,41
65,3	-	0,22	0,29	0,40	0,47	-	0,46
66,3	0,62	0,21	0,29	0,39	0,47	1,75	0,42
68,3	0,60	-	-	-	-	-	-
70,0	-	-	0,31	-	0,49	-	0,35

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COA – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{ST} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SF} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SOT} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

COR_{SOF} – gDQO.L⁻¹.d⁻¹

CSA – gSO₄²⁻.L⁻¹.d⁻¹

CSR – gSO₄²⁻.L⁻¹.d⁻¹

Tabela J.10. – Carregamentos específicos de matéria oxidável aplicada (COAE) e removida para amostras brutas ($CORE_{ST}$) e filtradas ($CORE_{SF}$); carregamentos específicos de matéria orgânica removida para amostras brutas ($CORE_{SOT}$) e filtradas ($CORE_{SOF}$); e carregamentos específicos de sulfato aplicado (CSAE) e removido (CSRE).

T.O.	COAE	$CORE_{ST}$	$CORE_{SF}$	$CORE_{SOT}$	$CORE_{SOF}$	CSAE	CSRE
55,3	47	21	26	37	43	154	40
56,3	52	17	23	34	39	164	50
57,3	53	16	22	32	38	164	43
58,3	-	21	26	37	42	-	39
59,0	51	22	27	38	44	159	36
60,3	51	-	-	-	-	152	-
62,3	54	24	28	40	44	159	38
63,3	-	23	28	39	45	-	38
64,3	49	21	26	37	42	164	36
65,3	-	20	26	36	42	-	41
66,3	56	19	25	35	42	156	37
68,3	53	-	-	-	-	-	-
70,0	-	-	28	-	44	-	32

Unidades:

T.O. – Tempo de operação (dias)

COAE – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{ST}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOT}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

$CORE_{SOF}$ – $\text{mgDQO} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSAE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

CSRE – $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{gSVT}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

Tabela J.11 – Valores dos perfis temporais de concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}) e matéria orgânica filtrada (C_{SOF}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIIc.

Tempo	Ensaio 1		Ensaio 2		Valores Médios	
	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}
0,0	269,9	117,9	271,5	119,5	269,9	118,7
0,5	263,0	132,3	264,4	133,7	263,0	133,0
1,0	262,7	138,7	241,9	117,9	262,7	128,3
1,5	258,5	124,2	235,3	101,0	258,5	112,6
2,0	265,7	131,0	216,3	81,6	265,7	106,3
3,0	257,3	129,5	232,9	105,1	257,3	117,3
4,0	-	-	-	-	-	-
5,0	268,7	125,8	254,2	111,3	268,7	118,6
6,0	262,4	116,3	229,0	82,9	262,4	99,6
7,0	266,5	120,3	218,5	72,3	266,5	96,3
8,0	266,1	119,2	239,3	92,4	266,1	105,8

Unidades:

Tempo – h

C_{SF} – mgDQO.L⁻¹

C_{SOF} – mgDQO.L⁻¹

Tabela J.12 – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfato (C_{SO_4}) e respectivos valores médios, para o reator operado na condição IIIc.

Tempo	Ensaio 1	Ensaio 2	Valores Médios
0,0	1095,3	973,8	1034,6
0,5	1161,2	999,5	1080,4
1,0	1149,7	958,7	1054,2
1,5	1124,3	1035,8	1080,1
2,0	1141,3	999,6	1070,5
3,0	1262,4	1033,2	1262,4
4,0	-	-	-
5,0	1143,1	1058,1	1100,6
6,0	1107,6	1025,0	1066,3
7,0	1188,8	1124,2	1156,5
8,0	1098,0	1189,3	1143,7

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_4} – $mgSO_4^{2-}.L^{-1}$

Tabela J.13. – Valores dos perfis temporais de concentração de sulfito (C_{SO_3}), sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto na forma HS^- (C_{HS}), de sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}), pH, alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT), para o reator operado na condição IIIc.

Tempo	C_{SO_3}	STD	C_{HS}	C_{H_2S}	pH	AB	AVT
0,0	20,1	74,0	64,1	9,9	7,85	781,8	32,2
0,5	13,6	64,0	57,0	7,0	7,95	761,5	32,0
1,0	19,9	60,0	52,3	7,7	7,87	748,6	29,5
1,5	11,3	66,0	57,8	8,2	7,89	750,2	32,3
2,0	13,7	66,0	58,8	7,2	7,95	732,9	31,9
3,0	19,0	62,0	55,2	6,8	7,95	738,0	33,0
4,0	13,0	72,0	63,3	8,7	7,90	738,7	33,0
5,0	14,3	70,0	60,2	9,8	7,83	724,2	34,8
6,0	10,4	72,0	62,7	9,3	7,87	725,4	36,2
7,0	11,1	72,0	63,4	8,6	7,91	760,6	36,3
8,0	14,7	72,0	62,0	10,0	7,83	-	-

Unidades:

Tempo – h

C_{SO_3} – mgDQO.L⁻¹

STD – mgDQO.L⁻¹

C_{HS} – mgHS⁻.L⁻¹

C_{H_2S} – mgH₂S.L⁻¹

AB – mgCaCO₃.L⁻¹

AVT – mgHAc.L⁻¹

Tabela J.14. – Valores dos perfis temporais de concentração de oxigênio dissolvido (OD), do potencial de oxi-redução (POR), de concentração de dióxido de carbono no biogás (C_{CO_2}) e concentração de metano no biogás (C_{CH_4}), para o reator operado na condição IIIc.

Tempo	OD	POR	C_{CO_2}	C_{CH_4}
0,0	0,0	-578,9	0,00	0,000
0,5	0,0	-462,4	0,10	0,000
1,0	0,0	-596,2	0,12	0,000
1,5	0,0	-330,9	0,18	0,000
2,0	0,0	-329,9	0,21	0,000
3,0	0,0	-337,7	0,23	0,000
4,0	0,0	-326,4	-	0,000
5,0	0,0	-322,4	0,29	0,000
6,0	0,0	-328,4	0,29	0,000
7,0	0,0	-332,1	0,24	0,000
8,0	0,0	-330,5	0,23	0,000

Unidades:

Tempo – h
 OD – mgOD.L⁻¹
 POR – mV
 C_{CO_2} – mM.L⁻¹
 C_{CH_4} – mM.L⁻¹