UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

Gregor Franz Friedl

ESTUDO DA REMOÇÃO DE SULFATO EM BIORREATOR
OPERADO EM BATELADA E BATELADA ALIMENTADA
SEQUENCIAIS CONTENDO BIOMASSA IMOBILIZADA E
UTILIZANDO AGITAÇÃO MECÂNICA E “DRAFT-TUBE”

São Carlos

2008

Gregor Franz Friedl

ESTUDO DA REMOÇÃO DE SULFATO EM BIORREATOR
OPERADO EM BATELADA E BATELADA ALIMENTADA
SEQÜENCIAIS CONTENDO BIOMASSA IMOBILIZADA E
UTILIZANDO AGITAÇÃO MECÂNICA E “DRAFT-TUBE”

Dissertação apresentada ao Departamento de
Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

Orientador: 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

Friedl, Gregor Franz
F911e Estudo da remoção de sulfato em biorreator operado em
batelada alimentada seqüenciais contendo biomassa
imobilizada e utilizando agitação mecânica e "Draft-Tube" /
Gregor Franz Friedl ; 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. Remoção de
sulfato. 3. Estratégia de alimentação. 4. ASBBR.
5. Batelada alimentada. 6. Draft-tube. 7. Biomassa
imobilizada. 8. Agitação mecânica. I. Título.

Às famílias Friedl e Bornea,
pelo amor e pela educação.

AGRADECIMENTOS

À família Friedl pelo amor, apoio e compreensão, que apesar da distância, nunca me faltaram.

À família Bornea, meus sogros Ivete e Pedro e cunhados Daniele e Danilo pelo acolhimento, carinho e pelos incontáveis momentos de alegria e felicidade.

À minha esposa Daniane, o meu grande amor, pela paciência e pelas aulas particulares de português.

Ao Prof. Dr. José Alberto Domingues Rodrigues pela confiança transmitida desde os meus tempos de intercambista na Escola de Engenharia Mauá, pela amizade, pela orientação, pelo profissionalismo exemplar e pelas correções em meu trabalho escrito.

Ao Gustavo Mokaitis, um amigo cuja ajuda e experiência foram indispensáveis para a realização deste trabalho. E jamais vou esquecer-me dos nossos momentos de distração durante as mais difíceis etapas deste trabalho.

À Profa. Dra. Suzana Maria Ratusznei e ao Prof. Dr. Roberto Antonio Bezerra Junior pela amizade e apoio científico durante o projeto, e especialmente à Profa. Dra. Catarina pela revisão da minha dissertação e pela participação na minha banca de mestrado.

Ao Prof. Dr. Marcelo Zaiat pela contribuição na minha formação acadêmica e também pela revisão do meu trabalho e participação na minha banca de mestrado.

Aos meus grandes colegas de sala, da EESC, da turma de 2006, pela amizade e companheirismo, pelos churrascos, e pelas aulas de futebol society. Um grande abraço, em especial, vai ao Jorge Luis Rodrigues Pantoja Filho e ao Guilherme Peixoto.

Agradeço à Universidade de São Paulo e à Escola de Engenharia de São Carlos, pelo apoio na realização do meu mestrado e aos funcionários do Departamento de Hidráulica e

Saneamento pela ajuda com os obstáculos burocráticos.

À Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, que foi a primeira que me abriu as portas no Brasil, em 2002, oferecendo-me um estágio. E agora, na realização do meu mestrado, por ter cedido o espaço para que a etapa experimental deste trabalho fosse realizada.

Ao CNPq e à FAPESP, pelo auxílio financeiro e pela bolsa de estudos concedida.

Finalmente quero agradecer a todos que tiveram paciência com o meu português “alemão” e a cada um que, a sua maneira, me ajudou na realização deste trabalho. Muito obrigado!

"Hätten wir das Wort,
hätten wir die Sprache,
wir bräuchten die Waffen nicht."

Ingeborg Bachmann

RESUMO

FRIEDL, G. F. **Estudo da remoção de sulfato em biorreator operado em batelada e batelada alimentada seqüenciais, contendo biomassa imobilizada e utilizando agitação mecânica e “draft-tube”**. 2008. 326 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Um reator anaeróbio tratando esgoto sintético de baixa concentração de matéria orgânica (500 mgDQO.L^{-1}) e enriquecido com diferentes concentrações de sulfato (razões $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34, 0,67 e 0,34) foi submetido à diferentes estratégias de alimentação (batelada e batelada alimentada de 3 h e de 6 h). O reator operou com capacidade de 4,0 L e tratou por ciclo de 8 h um volume de 2,0 L de esgoto sintético. Desta forma, executaram-se 9 condições diferentes que foram submetidas à análise com o objetivo de investigar a influência do tempo de alimentação e da razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ no desempenho do sistema. A temperatura do reator foi constante em $30 \pm 1^\circ\text{C}$ e a agitação mecânica foi fixada em 400 rpm. Como suporte para a imobilização da biomassa foram utilizados cubos de espuma de poliuretano. Os resultados obtidos demonstraram que a operação em batelada alimentada de 3 h com uma razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 0,34 apresentou as melhores condições para a remoção de matéria orgânica (89%). Quanto à remoção de sulfato observou-se uma estagnação neste mesmo modo de operação ao aumentar a concentração de sulfato no afluente, enquanto que na operação com alimentação em batelada alimentada de 6 h, a carga de sulfato removida (CSR) cresceu linearmente. Assim, a maior carga de sulfato removida foi registrada durante o ensaio em batelada alimentada de 6 h com uma razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 0,34, no qual foram removidos $0,55 \text{ gSO}_4^{2-} .(\text{L.d})^{-1}$. Com uma razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34 e um tempo de enchimento de 6 h, o reator apresentou o melhor desempenho em termos de eficiência de remoção de sulfato (71%). Em todos os ensaios o reator apresentou estabilidade, com uma produção alta de alcalinidade a bicarbonato e a concentração de ácidos voláteis se manteve em níveis adequados.

Palavras-chaves: remoção de sulfato, batelada alimentada, estratégia de alimentação, biomassa imobilizada, AnSBBR, agitação mecânica e “draft-tube”

ABSTRACT

FRIEDL, G. F. **Study on sulfate removal in an anaerobic sequencing batch reactor containing immobilized biomass, and utilizing mechanical agitation and “draft-tube”**. 2008. 326 p. Dissertation (Ms.C) – Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

An anaerobic sequencing batch reactor treating synthetic low strength wastewater (500 mgCOD.L^{-1}) enriched with different sulfate concentrations ($\text{COD}/[\text{SO}_4^{2-}]$ ratios of 1,34, 0,67 and 0,34) was operated at different fill times (batch mode and sequencing batch mode of 3 h and 6 h fill time). The reactor operated with a capacity of 4,0 L and treated per 8-h cycle 2,0 L of synthetic wastewater. Thus, 9 different configurations resulted from this configuration and were submitted under analyses with the objective to investigate the influence of each of those parameters on the performance of the system. The reactor was operated at a constant temperature of $30 \pm 1^\circ\text{C}$ and an mechanical agitation rate of 400 rpm. Cubic particles of polyurethane were used as support material for anaerobic biomass immobilization. The results showed that operating the reactor with a fill time of 3 h and a $\text{COD}/[\text{SO}_4^{2-}]$ ratio of 0,34 was the most efficient strategy for COD removal (89%). During the same operation mode (3 h fill time) sulfate removal seemed to suffer stagnation due to the increasing sulfite concentration in the reactor, whereas with a fill time of 6 h the sulfate load removal increased linearly with increasing sulfate load. So the biggest removal, in terms of volumetric sulfate load, was obtained operating the reactor in sequencing batch mode with a fill time of 6 h and a $\text{COD}/[\text{SO}_4^{2-}]$ ratio of 0,34. During this test the reactor removed $0,55 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L.d})^{-1}$ of $2,29 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L.d})^{-1}$ applied on the system. Operating at a $\text{COD}/[\text{SO}_4^{2-}]$ ratio of 1,34 and a fill time of 6 h the reactor obtained the best results in terms of sulfate removal efficiency, with 71% of the sulfate removed from the system. In the entire period of analysis the reactor showed stability with a sufficient production of alkalinity to maintain the concentration of volatile acids in adequate levels.

Keywords: sulfate removal, sequencing batch, feeding strategy, immobilized biomass, AnSBBR, mechanical agitation, “draft-tube”.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ciclo biogeoquímico do enxofre.....	57
Figura 3.2 – Concentração de equilíbrio das formas de sulfeto em meio aquoso.....	62
Figura 3.3 – Tempo necessário para remoções de 10, 50 e 90% de sulfato.....	76
Figura 4.1 – Biorreator anaeróbio com agitação mecânica com impelidor tipo hélice e “draft-tube”, contendo biomassa imobilizada.....	97
Figura 4.2 – Sistema de automação, bombas e reator anaeróbio.....	98
Figura 4.3 – Montagem do “draft-tube” e biomassa imobilizada em espuma de poliuretano.....	99
Figura 4.4 – Impelidor tipo hélice utilizado em todas as condições experimentais.....	99
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 no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.....	115
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 no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.....	115
Figura 5.3 – Concentração de sulfato (C_{SO4}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) no reator operado no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada....	116
Figura 5.4 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e sulfeto na forma HS^- (C_{HS}) no reator operado no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.....	117
Figura 5.5 – Sulfeto re-oxidado para enxofre elementar formando uma incrustação na parede interna do reator.....	117
Figura 5.6 – pH no reator operado no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.....	118
Figura 5.7 – Concentração de alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no reator operado no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.....	118

Figura 5.8 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF}) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	124
Figura 5.9 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	125
Figura 5.10 – 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).....	127
Figura 5.11 – Razão entre a carga de sulfeto removida (CSR) e a carga de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	128
Figura 5.12 – 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).....	129
Figura 5.13 – 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).....	130
Figura 5.14 – Concentração de alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	130
Figura 5.15 – Concentração de matéria orgânica no afluente (C_{ST}^{af}) e efluente (C_{SOF} , C_{SOT}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	131

Figura 5.16 – Carga orgânica volumétrica aplicada (COA_{ST}), removida (COR_{SOT} , COR_{SOF}) e carga orgânica específica aplicada ($COAE_{ST}$) e removida ($CORE_{SOT}$, $CORE_{SOF}$) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	132
Figura 5.17 – Concentração de sulfeto no afluente ($C_{SO_4^{af}}$), no efluente (CSO_4) e eficiência de remoção de sulfeto (ESO_4) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	132
Figura 5.18 – Carga de sulfato volumétrica aplicada (CSA), removida (CSR) e carga de sulfato específica aplicada ($CSAE$) e removida ($CSRE$) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	133
Figura 5.19 – Concentração de matéria oxidável (C_{SF}) e de matéria orgânica (C_{SOF}) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	134
Figura 5.20 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	135
Figura 5.21 – Razão de DQO (matéria orgânica) e sulfato ($DQO/[SO_4^{2-}]$) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	136
Figura 5.22 – Concentração de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- dissolvido (C_{HS}) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	138
Figura 5.23 – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	139
Figura 5.24 – Alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	140

Figura 5.25 – Concentração de ácido acético no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	141
Figura 5.26 – pH e potencial redox (PR) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	142
Figura 5.27 – Concentração de dióxido de carbono (C_{CO_2}) e metano (C_{CH_4}) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).....	143
Figura 5.28 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF}) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....	149
Figura 5.29 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....	150
Figura 5.30 - Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de remoção 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).....	151
Figura 5.31 – Razão entre a carga de sulfato removido (CSR) e a carga de matéria orgânica removida (COR_{SOF}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....	152
Figura 5.32 – 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).....	153
Figura 5.33 - 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).....	154

Figura 5.34 – Concentração de alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....	155
Figura 5.35 – Concentração de matéria orgânica no afluente (C_{ST}^{af}) e efluente (C_{SOF} , C_{SOT}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....	156
Figura 5.36 – Carga orgânica volumétrica aplicada (COA_{ST}), removida (COR_{SOT} , COR_{SOF}) e carga orgânica específica aplicada ($COAE_{ST}$) e removida ($CORE_{SOT}$, $CORE_{SOF}$) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....	157
Figura 5.37 – Concentração de sulfeto no afluente ($C_{SO_4}^{af}$), no efluente (C_{SO_4}) e eficiência de remoção de sulfeto (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).....	157
Figura 5.38 – Carga de sulfato volumétrica aplicada (CSA), removida (CSR) e carga de sulfato específica aplicada (CSAE) e removida (CSRE) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....	158
Figura 5.39 – Concentração de matéria oxidável (C_{SF}) e de matéria orgânica (C_{SOF}) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....	160
Figura 5.40 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....	161
Figura 5.41 – Razão de DQO (matéria orgânica) e sulfato ($DQO/[SO_4^{2-}]$) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....	162

- Figura 5.42** – Concentração de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- dissolvido (C_{HS}) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....**163**
- Figura 5.43** – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....**164**
- Figura 5.44** – Alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....**165**
- Figura 5.45** – Concentração de ácido acético e ácido propiônico no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....**166**
- Figura 5.46** – pH e potencial redox (PR) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....**167**
- Figura 5.47** – Concentração de dióxido de carbono (C_{CO_2}) e metano (C_{CH_4}) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).....**168**
- Figura 5.48** – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF}) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....**173**
- Figura 5.49** – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....**174**
- Figura 5.50** – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de remoção 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).....**175**

Figura 5.51 – Razão entre a carga de sulfato removida (CSR) e a carga de matéria orgânica removida (COR_{SOF}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	176
Figura 5.52 – 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).....	177
Figura 5.53 – 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).....	178
Figura 5.54 – Concentração de alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	179
Figura 5.55 – Concentração de matéria orgânica no afluente (C_{ST}^{af}) e efluente (C_{SOF} , C_{SOT}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	180
Figura 5.56 – Carga orgânica volumétrica aplicada (COA_{ST}), removida (COR_{SOT} , COR_{SOF}) e carga orgânica específica aplicada ($COAE_{ST}$) e removida ($CORE_{SOT}$, $CORE_{SOF}$) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	181
Figura 5.57 – Concentração de sulfeto no afluente (C_{SO_4af}), no efluente (C_{SO_4e}) e eficiência de remoção de sulfeto (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).....	181
Figura 5.58 – Carga de sulfato volumétrica aplicada (CSA), removida (CSR) e carga de sulfato específica aplicada ($CSAE$) e removida ($CSRE$) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	182

Figura 5.59 – Concentração de matéria oxidável (C_{SF}) e de matéria orgânica (C_{SOF}) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	183
Figura 5.60 – Concentração de sulfato (C_{SO4}) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	184
Figura 5.61 – Razão de DQO (matéria orgânica) e sulfato ($DQO/[SO_4^{2-}]$) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	184
Figura 5.62 – Concentração de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- dissolvido (C_{HS}) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	186
Figura 5.63 – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	187
Figura 5.64 – Alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	187
Figura 5.65 – Concentração de ácido acético e ácido propiônico no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	188
Figura 5.66 – pH e potencial redox no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	189
Figura 5.67 – Concentração de dióxido de carbono (C_{CO_2}) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).....	190
Figura 5.68 – Comparação das eficiências na remoção de matéria orgânica filtrada durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	193

Figura 5.69 – Comparação das concentrações de matéria orgânica filtrada no efluente durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	193
Figura 5.70 – Comparação das cargas de matéria orgânica filtrada removida durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	194
Figura 5.71 – Comparação das cargas de matéria orgânica filtrada removida durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	194
Figura 5.72 – Comparação das eficiências de remoção de sulfato (E_{SO_4}) durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	195
Figura 5.73 – Comparação das concentrações de sulfato (C_{SO_4}) durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	196
Figura 5.74 – Comparação das cargas de sulfato removido (CSR) durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	196
Figura 5.75 – Comparação das cargas de sulfato removido (CSR) durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	197
Figura 5.76 – Comparação das razões de carga de sulfato removido (CSR) por carga de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}) durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	199
Figura 5.77 – Comparação das concentrações de sulfeto total dissolvido (STD) no efluente durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	199

Figura 5.78 – Comparação das concentrações de alcalinidade a bicarbonato (AB) no efluente durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	200
Figura 5.79 – Comparação das concentrações de ácidos voláteis totais (AVT) no efluente durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	201
Figura 5.80 – Comparação das concentrações de metano (C_{CH_4}) no efluente durante os perfis das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	202
Figura 5.81 – Comparação das concentrações de dióxido de carbono (C_{CO_2}) no efluente durante os perfis das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).....	202
Figura 5.82 – Microscopia de contraste de fase realizada no inoculo antes do início das operações. [Notação: (a) bacilos de extremidades arredondadas; (b) morfologia filamentosa semelhante à <i>Methanosaeta</i>].....	205
Figura 5.83 – Microscopia de contraste de fase realizada no inoculo após o término das operações (após a condição III). [Notação: (a) cocos; (b) bacilos curvos; (c) bacilos de extremidades arredondadas].....	206

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Concentrações (mg.L^{-1}) de sulfeto não ionizado (H_2S) e sulfeto total dissolvido (STD) causando inibição de 50% na metanogênese, redução de sulfato ou degradação de substratos específicos.....	55
Tabela 3.2 – Propriedades morfológicas e fisiológicas de alguns gêneros das bactérias redutoras de sulfato.....	60
Tabela 3.3 – Informações complementares sobre alguns gêneros de BRS apresentados na Tabela 3.2.....	61
Tabela 4.1 – Composição da água residuária sintética.....	101
Tabela 4.2 – Concentração de Na_2SO_4 e SO_4^{2-} para cada relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$	101
Tabela 4.3 – Composição da solução de sais.....	102
Tabela 4.4 – Tempos de enchimento e reação para as estratégias de alimentação propostas.....	105
Tabela 4.5 – Delineamento experimental da investigação da influência da relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ e da estratégia de alimentação sobre a eficiência e estabilidade do biorreator.....	107
Tabela 5.1 – Quantidade de biomassa no reator (X_{SVT}), concentração de biomassa (C_{XSVT}) e concentração específica de biomassa (C_{XSVT}').....	110
Tabela 5.2 – Resultados médios das variáveis monitoradas na operação do ensaio preliminar, operado em batelada e com uma relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 1,34$	112
Tabela 5.3 – Valores das cargas de matéria orgânica e sulfato aplicadas durante a operação em Condição I, operado em batelada e com uma relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34.....	113
Tabela 5.4 – Valores das cargas de matéria orgânica e sulfato removidas durante a operação em Condição I, operado em batelada e com uma relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34.....	114
Tabela 5.5 – Resultados médios das variáveis monitoradas durante a operação em Condição I ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 1,34$).....	122
Tabela 5.6 – Valores das cargas aplicadas de matéria orgânica e sulfato durante a operação em Condição I, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 1,34$	123

Tabela 5.7 – Valores das cargas removidas de matéria orgânica e de sulfato durante a operação em Condição I, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$	123
Tabela 5.8 – Resultados médios das variáveis monitoradas durante a operação em Condição II ($DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67$).....	147
Tabela 5.9 – Valores das cargas de matéria orgânica e sulfato aplicadas durante a operação em Condição II, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67$	148
Tabela 5.10 – Valores das cargas de matéria orgânica e sulfato removidas durante a operação em Condição II, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67$	148
Tabela 5.11 – Resultados médios das variáveis monitoradas durante a operação em Condição III ($DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$).....	171
Tabela 5.12 – Valores das cargas de matéria orgânica e sulfato aplicadas durante a operação em condição III, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$	172
Tabela 5.13 – Valores das cargas removidas de matéria orgânica e sulfato durante a operação em Condição III, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$	172
Tabela A1 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio preliminar (“C _{ST} ” a “AVT”).....	222
Tabela A2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A1.....	223
Tabela A3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio preliminar (“ST” a “SSV”).....	223
Tabela A4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A3.....	223
Tabela A5 – Valores monitorados do efluente no ensaio preliminar (“Desc.” a “HS”).....	224
Tabela A6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A5.....	225

Tabela A7 – Valores monitorados do efluente no ensaio preliminar (“pH” a “AVT”).....	225
Tabela A8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A7.....	226
Tabela A9 – Valores monitorados do efluente no ensaio preliminar (“ST” a “SSV”).....	226
Tabela A10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A9.....	226
Tabela A11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) do ensaio preliminar.....	227
Tabela A12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A11.....	227
Tabela A13 – Cargas aplicadas e removidas durante o ensaio preliminar.....	228
Tabela A14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A13.....	228
Tabela B1 – Valores monitorados do afluente da condição Ia (“ C_{ST} ” a “AVT”).....	230
Tabela B2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B1.....	231
Tabela B3 – Valores monitorados do afluente da condição Ia (“ST” a “SSV”).....	231
Tabela B4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B3.....	231
Tabela B5 – Valores monitorados do efluente na condição Ia. (“Desc.” a “HS”).....	233
Tabela B6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B5.....	234
Tabela B7 – Valores monitorados do efluente na condição Ia. (“pH” a “AVT”).....	234
Tabela B8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B7.....	235
Tabela B9 – Valores monitorados do efluente na condição Ia. (“ST” a “SSV”).....	235
Tabela B10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B9.....	235

Tabela B11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição Ia.....	236
Tabela B12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B11.....	236
Tabela B13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição Ia.....	237
Tabela B14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B13.....	238
Tabela B15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ia (“ C_{SF} ” a “ C_{HS} ”).....	239
Tabela B16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ia (“pH” a “PR”).....	239
Tabela B17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ia (“Ac.acét.” a “ C_{CH4} ”).....	240
Tabela C1 – Valores monitorados do afluente da condição Ib (“ C_{ST} ” a “AVT”).....	242
Tabela C2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C1.....	243
Tabela C3 – Valores monitorados do afluente da condição Ib (“ST” a “SSV”).....	243
Tabela C4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C3.....	243
Tabela C5 – Valores monitorados do efluente na condição Ib. (“Desc.” a “HS”).....	244
Tabela C6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C5.....	245
Tabela C7 – Valores monitorados do efluente na condição Ib. (“pH” a “AVT”).....	245
Tabela C8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C7.....	246
Tabela C9 – Valores monitorados do efluente na condição Ib. (“ST” a “SSV”).....	246
Tabela C10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C9.....	246

Tabela C11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição Ib.....	247
Tabela C12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C11.....	247
Tabela C13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição Ib.....	248
Tabela C14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C13.....	248
Tabela C15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ib (“ C_{SF} ” a “ C_{HS} ”).....	249
Tabela C16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ib (“pH” a “PR”).....	250
Tabela C17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ib (“Ac.acét.” a “ C_{CH4} ”).....	250
Tabela D1 – Valores monitorados do afluente da condição Ia (“ C_{ST} ” a “AVT”).....	252
Tabela D2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D1.....	253
Tabela D3 – Valores monitorados do afluente da condição Ic (“ST” a “SSV”).....	253
Tabela D4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D3.....	253
Tabela D5 – Valores monitorados do efluente na condição Ic. (“Desc.” a “HS”).....	255
Tabela D6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D5.....	256
Tabela D7 – Valores monitorados do efluente na condição Ic. (“pH” a “AVT”).....	256
Tabela D8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D7.....	257
Tabela D9 – Valores monitorados do efluente na condição Ic. (“ST” a “SSV”).....	257
Tabela D10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D9.....	257

Tabela D11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição Ic.....	258
Tabela D12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D11.....	258
Tabela D13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição Ic.....	259
Tabela D14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D13.....	260
Tabela D15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ic (“ C_{SF} ” a “ C_{HS} ”).....	261
Tabela D16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ic (“pH” a “PR”).....	261
Tabela D17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ic (“Ac.acét.” a “ C_{CH4} ”).....	262
Tabela E1 – Valores monitorados do afluente da condição IIa (“ C_{ST} ” a “AVT”).....	264
Tabela E2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E1.....	265
Tabela E3 – Valores monitorados do afluente da condição IIa (“ST” a “SSV”).....	265
Tabela E4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E3.....	265
Tabela E5 – Valores monitorados do efluente na condição IIa. (“Desc.” a “HS”).....	266
Tabela E6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E5.....	267
Tabela E7 – Valores monitorados do efluente na condição IIa. (“pH” a “AVT”).....	267
Tabela E8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E7.....	267
Tabela E9 – Valores monitorados do efluente na condição IIa. (“ST” a “SSV”).....	268
Tabela E10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E9.....	268

Tabela E11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIa.....	269
Tabela E12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E11.....	269
Tabela E13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição IIa.....	270
Tabela E14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E13.....	271
Tabela E15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIa (“ C_{SF} ” a “ C_{HS} ”).....	272
Tabela E16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIa (“pH” a “PR”).....	272
Tabela E17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIa (“Ac.acét.” a “ C_{CH4} ”).....	273
Tabela F1 – Valores monitorados do afluente da condição IIb (“ C_{ST} ” a “AVT”).....	276
Tabela F2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F1.....	277
Tabela F3 – Valores monitorados do afluente da condição IIb (“ST” a “SSV”).....	277
Tabela F4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F3.....	277
Tabela F5 – Valores monitorados do efluente na condição IIb. (“Desc.” a “HS”).....	278
Tabela F6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F5.....	279
Tabela F7 – Valores monitorados do efluente na condição IIb. (“pH” a “AVT”).....	279
Tabela F8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F7.....	279
Tabela F9 – Valores monitorados do efluente na condição IIb. (“ST” a “SSV”).....	280
Tabela F10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F9.....	280

Tabela F11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição I Ib.....	280
Tabela F12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F11.....	281
Tabela F13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição I Ib.....	281
Tabela F14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F13.....	282
Tabela F15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição I Ib (“ C_{SF} ” a “ C_{HS} ”).....	283
Tabela F16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição I Ib (“pH” a “PR”).....	283
Tabela F17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição I Ib (“Ac.acét.” a “ C_{CH4} ”).....	284
Tabela G1 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição I Ic (“ C_{ST} ” a “AVT”).....	286
Tabela G2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G1.....	287
Tabela G3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição I Ic (“ST” a “SSV”).....	287
Tabela G4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G3.....	287
Tabela G5 – Valores monitorados do efluente na condição I Ic (“Desc.” a “HS”).....	288
Tabela G6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G5.....	289
Tabela G7 – Valores monitorados do efluente na condição I Ic (“pH” a “AVT”).....	289
Tabela G8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G7.....	290
Tabela G9 – Valores monitorados do efluente na condição I Ic (“ST” a “SSV”).....	290

Tabela G10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G9.....	290
Tabela G11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIc.....	291
Tabela G12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G11.....	291
Tabela G13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição IIc.....	292
Tabela G14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G13.....	293
Tabela G15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIc (“ C_{SF} ” a “ C_{HS} ”).....	294
Tabela G16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIc (“pH” a “PR”).....	294
Tabela G17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIc (“Ác.acét.” a “ C_{CH4} ”).....	295
Tabela H1 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIIa (“ C_{ST} ” a “AVT”).....	298
Tabela H2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H1.....	299
Tabela H3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIIa (“ST” a “SSV”).....	299
Tabela H4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H3.....	299
Tabela H5 – Valores monitorados do efluente na condição IIIa (“Desc.” a “HS”).....	300
Tabela H6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H5.....	301
Tabela H7 – Valores monitorados do efluente na condição IIIa (“pH” a “AVT”).....	301
Tabela H8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H7.....	301

Tabela H9 – Valores monitorados do efluente na condição IIIa (“ST” a “SSV”).	302
Tabela H10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H9.	302
Tabela H11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIIa.	302
Tabela H12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H11.	303
Tabela H13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição IIIa.	303
Tabela H14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H13.	304
Tabela H15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIa (“ C_{ST} ” a “ C_{HS} ”).	305
Tabela H16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIa (“pH” a “PR”).	305
Tabela H17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIa (“Ác.acét.” a “ C_{CH4} ”).	306
Tabela I1 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIIb (“ C_{ST} ” a “AVT”).	308
Tabela I2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I1.	309
Tabela I3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIIb (“ST” a “SSV”).	309
Tabela I4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I3.	309
Tabela I5 – Valores monitorados do efluente na condição IIIb (“Desc.” a “HS”).	310
Tabela I6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I5.	311
Tabela I7 – Valores monitorados do efluente na condição IIIb (“pH” a “AVT”).	311

Tabela I8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I7.....	311
Tabela I9 – Valores monitorados do efluente na condição IIIb (“ST” a “SSV”).....	312
Tabela I10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I9.....	312
Tabela I11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIIb.....	312
Tabela I12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I11.....	313
Tabela I13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição IIIb.....	313
Tabela I14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I13.....	314
Tabela I15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIb (“ C_{ST} ” a “ C_{HS} ”).....	315
Tabela I16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIb (“pH” a “PR”).....	315
Tabela I17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIb (“Ác.acét.” a “ C_{CH4} ”).....	316
Tabela J1 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIIc (“ C_{ST} ” a “AVT”).....	318
Tabela J2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J1.....	319
Tabela J3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIIc (“ST” a “SSV”).....	319
Tabela J4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J3.....	319
Tabela J5 – Valores monitorados do efluente na condição IIIc (“Desc.” a “HS”).....	320
Tabela J6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J5.....	321

Tabela J7 – Valores monitorados do efluente na condição IIIc (“pH” a “AVT”)	321
Tabela J8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J7	321
Tabela J9 – Valores monitorados do efluente na condição IIIc (“ST” a “SSV”)	322
Tabela J10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J9	322
Tabela J11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIIc	322
Tabela J12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J11	323
Tabela J13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição IIIc	323
Tabela J14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J13	324
Tabela J15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIc (“ C_{ST} ” a “ C_{HS} ”)	325
Tabela J16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIc (“pH” a “PR”)	325
Tabela J17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIc (“Ác.acét.” a “ C_{CH4} ”)	326

LISTA DE SIGLAS

EEM	Escola de Engenharia Mauá
IMT	Instituto Mauá de Tecnologia
SHS	Departamento de Hidráulica e Saneamento
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
USP	Universidade de São Paulo
UASB	Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Escoamento Ascendente (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>)
AnSBR	Reator Anaeróbio Operado em Bateladas Sequenciais (<i>Anaerobic Sequencing Batch Reactor</i>)
EGSB	Reator Anaeróbio de Leito Expandido (<i>Expanded Granular Sludge Bed</i>)
RAHLF	Reator Anaeróbio Horizontal de Leito Fixo
AnSBBR	Reator Anaeróbio de Leito Fixo Operado em Bateladas Alimentadas Sequenciais (<i>Anaerobic Sequencing Biofilm Batch Reactor</i>)
HAc	Ácido Acético
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
PR	Potencial Redox
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
BRS	Bactérias Redutoras de Sulfato
BRE	Bactérias Redutoras de Enxofre
BAc	Bactérias Acidogênicas
BHAc	Bactérias Acetogênicas

AM	Arquéias Metanogênicas
UAF	Filtro Anaeróbio com Fluxo Ascendente (<i>Upflow Anaerobic Filter</i>)
PU	Poliuretano
EPU	Espuma de Poliuretano
CV	Carvão Vegetal
PE	Polietileno de Baixa Densidade Reciclado
CE	Cerâmica Porosa Confeccionada com Alumina

LISTA DE SÍMBOLOS

DQO	demanda química de oxigênio (mgDQO.L^{-1})
$^{\circ}\text{C}$	graus Celsius
$\Delta G_o'$	entalpia das reações (kJ.mol^{-1})
X_{AM}	concentração de arqueias metanogênicas (gSVT.L^{-1})
X_{BRS}	concentração de bactérias redutoras de sulfato (gSVT.L^{-1})
v/v	porcentagem em volume (%)
C:N:P	razão de unidade de carbono por unidade de nitrogênio por unidade de fósforo
C_{ST}	concentração de matéria oxidável total para amostras não filtradas (mgDQO.L^{-1})
C_{SF}	concentração de matéria oxidável total para amostras filtradas (mgDQO.L^{-1})
C_{SOT}	concentração de matéria orgânica total para amostras não filtradas (mgDQO.L^{-1})
C_{SOF}	concentração de matéria orgânica para amostras filtradas (mgDQO.L^{-1})
I_{STD}	concentração do sulfeto total dissolvido na forma de DQO (mgDQO.L^{-1})
I_{SO3}	concentração do sulfito na forma de DQO (mgDQO.L^{-1})
C_{SO3}	concentração de sulfito ($\text{mgSO}_3^{2-}.\text{L}^{-1}$)
C_{ST}^{af}	concentração de matéria orgânica no afluente para amostras não filtradas (mgDQO.L^{-1})
C_{SO4}^{af}	concentração de sulfato no afluente ($\text{mgSO}_4^{2-}.\text{L}^{-1}$)

C_{SOF}^P	concentração de matéria orgânica para amostras de perfil filtradas (mgDQO.L ⁻¹)
C_{SO4}^P	concentração de sulfato da amostra de perfil (mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)
STD	sulfeto total dissolvido (mg.L ⁻¹)
C_{HS}	concentração de sulfeto na forma HS ⁻ dissolvido (mgHS ⁻ .L ⁻¹)
C_{H2S}	concentração de sulfeto de hidrogênio (H ₂ S) dissolvido (mgH ₂ S.L ⁻¹)
C_{STD}	concentração de sulfeto total dissolvido (mgSTD.L ⁻¹)
pKa	constante de equilíbrio do par HS ⁻ /H ₂ S (7,02)
COA _{ST}	carga orgânica volumétrica aplicada [gDQO.(L.d) ⁻¹]
V _A	volume alimentado por ciclo (L.ciclo ⁻¹)
N	número de ciclos por dia. (ciclos.dia ⁻¹)
V _R	volume útil do reator (L)
F/M	Relação substrato/microrganismos [gDQO.(gSSV.d) ⁻¹]
COR _{ST}	carga volumétrica de matéria oxidável total removida [gDQO.(L.d) ⁻¹]
COR _{SF}	carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida [gDQO.(L.d) ⁻¹]
COR _{SOT}	carga orgânica volumétrica total removida [gDQO.(L.d) ⁻¹]
COR _{SOF}	carga orgânica volumétrica filtrada removida [gDQO.(L.d) ⁻¹]
CSA	carga volumétrica de sulfato aplicada [gDQO.(L.d) ⁻¹]
CSR	carga volumétrica de sulfato removida [gDQO.(L.d) ⁻¹]
C_{SO4}	concentração de sulfato no efluente (gSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)
COAE _{ST}	carga orgânica específica aplicada [gDQO.(L.d) ⁻¹]
X _{SVT}	concentração de biomassa no reator (gSVT.L ⁻¹)
CORE _{ST}	carga específica de matéria oxidável total removida [mgDQO.(gSVT.d) ⁻¹]

$CORE_{SF}$	carga específica de matéria oxidável filtrada removida [mgDQO.(gSVT.d) ⁻¹]
$CORE_{SOT}$	carga orgânica específica total removida [mgDQO.(gSVT.d) ⁻¹]
$CORE_{SOF}$	carga orgânica específica filtrada removida [mgDQO.(gSVT.d) ⁻¹]
$CSAE$	carga de sulfato específica aplicada [mgDQO.(gSVT.d) ⁻¹]
$CSRE$	carga de sulfato específica removida [mgDQO.(gSVT.d) ⁻¹]
E_{ST}	eficiência de remoção da matéria oxidável total para amostras não filtradas (%)
E_{SF}	eficiência da remoção da matéria oxidável total para amostras filtradas (%)
E_{SOT}	eficiência da remoção da matéria orgânica total para amostras não filtradas (%)
E_{SOF}	eficiência da remoção da matéria orgânica para amostras filtradas (%)
E_{SO4}	eficiência da remoção de sulfato (%)
$[SO_4^{2-}]$	concentração do íon sulfato (mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)
$[Na_2SO_4]$	concentração do sulfato de sódio (mgNa ₂ SO ₄ .L ⁻¹)
C_{XSVT}	concentração de biomassa no reator (gSVT.L ⁻¹)
C_{XSVT}'	concentração específica de biomassa no reator (gSVT.gEPU ⁻¹)
AP	alcalinidade parcial (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)
AI	alcalinidade intermediária (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)
AT	alcalinidade total (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)
AB	alcalinidade a bicarbonato (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)
AV	ácidos voláteis (mgHAc.L ⁻¹)
AVT	ácidos voláteis totais (mgHAc.L ⁻¹)
ST	sólidos totais (mg.L ⁻¹)

SVT	sólidos voláteis totais (mg.L ⁻¹)
SST	sólidos suspensos totais (mg.L ⁻¹)
SSV	sólidos suspensos voláteis (mg.L ⁻¹)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	47
2	OBJETIVOS	51
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	53
3.1	O ÍON SULFATO NO MEIO AMBIENTE	53
3.2	O CICLO BIOGEOQUÍMICO DO ENXOFRE	57
3.3	AS BACTÉRIAS REDUTORAS DE SULFATO	58
3.4	REMOÇÃO DE SULFATO	63
3.5	BIORREATORES ANAERÓBIOS	67
3.5.1	DESENVOLVIMENTO	67
3.5.2	REATOR ANAERÓBIO OPERANDO EM BATELADAS SEQUÊNCIAIS (AnSBR)	68
3.5.3	REATORES ANAERÓBIOS OPERANDO EM BATELADAS SEQUENCIAIS COM BIOMASSA IMOBILIZADA (AnSBBR)	70
3.6	BIORREATORES ANAERÓBIOS NA REMOÇÃO DE SULFATO	72
3.6.1	REMOÇÃO DE SULFATO EM REATORES CONTÍNUOS	74
3.6.2	REMOÇÃO DE SULFATO EM REATORES OPERANDO EM BATELADAS SEQUENCIAIS	79
3.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
4	MATERIAIS E MÉTODOS	85
4.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	85
4.1.1	MATÉRIA OXIDÁVEL E MATÉRIA ORGÂNICA	85

4.1.2	SULFETO DE HIDROGÊNIO (H_2S) E SULFETO NA FORMA HS^-	
	DISSOLVIDOS	88
4.1.3	CARGAS VOLUMÉTRICAS	89
4.1.4	CARGAS ESPECÍFICAS	92
4.1.5	EFICIÊNCIAS DE CONVERSÃO	94
4.2	MATERIAIS	96
4.2.1	CONFIGURAÇÃO DO A_nSBBR COM AGITAÇÃO MECÂNICA E “DRAFT-TUBE”	96
4.2.2	INÓCULO	100
4.2.3	MEIO SUPORTE PARA A IMOBILIZAÇÃO DA BIOMASSA	100
4.2.4	ÁGUA RESIDUÁRIA – ESGOTO SINTÉTICO ENRIQUECIDO COM SULFATO	101
4.3	MÉTODOS ANALÍTICOS	103
4.3.1	ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	103
4.3.2	EXAMES MICROBIOLÓGICOS	104
4.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	104
4.4.1	IMOBILIZAÇÃO DA BIOMASSA ANAERÓBIA	104
4.4.2	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO $DQO/[SO_4^{2-}]$ E DA ESTRATÉGIA DE ALIMENTAÇÃO SOBRE A ESTABILIDADE DO PROCESSO E A EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E DE SULFATO	105
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	109
5.1	ENSAIO PRELIMINAR	111
5.2	CONDIÇÃO I – REATOR TRATANDO ÁGUA RESIDUÁRIA NA RELAÇÃO $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$	120

5.2.1	DADOS DE MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO I	121
5.2.2	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA CONDIÇÃO I	131
5.2.3	DADOS DE PERFIL DA CONDIÇÃO I	133
5.3	CONDIÇÃO II – REATOR TRATANDO ÁGUA RESIDUÁRIA NA RELAÇÃO $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,67$	145
5.3.1	DADOS DE MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO II	146
5.3.2	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA CONDIÇÃO II	156
5.3.3	DADOS DE PERFIL DA CONDIÇÃO II	159
5.4	CONDIÇÃO III – REATOR TRATANDO ÁGUA RESIDUÁRIA NA RELAÇÃO $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$	170
5.4.1	DADOS DE MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO III	170
5.4.2	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA CONDIÇÃO III	180
5.4.3	DADOS DE PERFIL DA CONDIÇÃO III	182
5.5	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	191
5.6	ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS DA BIOMASSA IMOBILIZADA	204
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	207
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	211
	APÊNDICES	219
	APÊNDICE A	221
	APÊNDICE B	229
	APÊNDICE C	241
	APÊNDICE D	251
	APÊNDICE E	263
	APÊNDICE F	275

APÊNDICE G	285
APÊNDICE H	297
APÊNDICE I	307
APÊNDICE J	317

1 INTRODUÇÃO

O íon mais estável do enxofre, o sulfato (SO_4^{2-}), pode surgir na natureza por meio de várias fontes naturais como, por exemplo, em atividades vulcânicas, drenagem de rochas com minerais ricos em enxofre ou na água do mar. Fontes antropogênicas que afetam corpos de água naturais são resultantes de atividades industriais, como por exemplo, o processamento de celulose, de alimentos, de xenobióticos e a utilização de combustíveis fósseis.

Por ter uma reatividade e toxicidade baixa, o sulfato não representa uma ameaça direta aos ecossistemas aquáticos e não há restrições rígidas nos padrões de imissão. A Resolução n° 357 de 2005 do CONAMA limita, para águas doces de classe 1, a concentração de sulfato em $250 \text{ mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$. Porém, muitas atividades industriais geram efluentes com concentrações muito além deste valor limítrofe e podem desequilibrar ecossistemas aquáticos e levá-los ao colapso, comprometendo a capacidade de autodepuração. Um indício para má qualidade de um corpo de água pode ser, por exemplo, uma camada preta nos sedimentos, causado pela precipitação de sulfeto combinando com o ferro, formando pirita (FeS_2).

A toxicidade do sulfato se dá devido aos efeitos inibidores do sulfeto de hidrogênio (H_2S), o produto final do processo da redução de sulfato, aos microrganismos responsáveis pela degradação de matéria orgânica e pela própria redução de sulfato. Em meios aquáticos, sob condições anaeróbias, o sulfato pode ser usado como acceptor de elétrons no processo da oxidação de matéria orgânica por um grupo especializado de bactérias, as bactérias redutoras de sulfato (BRS), produzindo, assim, íons de sulfeto. Uma das características do sulfeto é a sua capacidade de penetrar nas membranas celulares e se ligar aos componentes contendo ferro na célula, prejudicando o metabolismo do microrganismo. O H_2S em altas concentrações também pode causar a morte de peixes.

A competição entre arqueias metanogênicas e BRS pelo substrato (matéria orgânica) é um fator importante que influencia a capacidade de remoção de sulfato e de matéria orgânica, bem como na produção de biogás. Neste sentido, o sulfeto pode prejudicar os próprios sistemas de tratamento de esgoto e sua possível presença deve ser considerada no planejamento dos mesmos.

Nas últimas décadas, foram desenvolvidas várias tecnologias para tratar águas residuárias contaminadas por sulfato. No entanto, tratamentos convencionais como, por exemplo, a osmose reversa ou precipitação através de sulfeto de bário ou carbonato de bário, têm alto custo e produzem resíduo sólido químico. Com o avanço na tecnologia de tratamento anaeróbio de água residuária a partir dos anos 70, fruto das descobertas nas áreas de microbiologia e da evolução dos modelos matemáticos da cinética de processos microbiológicos, o tratamento em reatores anaeróbios se tornou uma alternativa econômica e tecnicamente viável. Estes reatores foram inicialmente desenvolvidos visando a remoção anaeróbia de matéria orgânica, mas, ao fornecer condições favoráveis ao crescimento das BRS, estes sistemas podem ser facilmente adaptados para a remoção de sulfato.

Desde os anos 1980, foram feitos diversos trabalhos investigando a remoção de sulfato em reatores anaeróbios contínuos. Estes trabalhos visaram investigar o desempenho de reatores como, por exemplo, o reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), o reator anaeróbio de leito expandido (EGSB) e o reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF). No entanto, há poucos estudos sobre reatores anaeróbios operados em bateladas sequenciais (AnSBR).

Neste contexto, este projeto visa investigar o comportamento do AnSBBR com biomassa imobilizada em espuma de poliuretano no tratamento de água residuária sintética com diferentes concentrações de sulfato (373, 746 e 1493 $\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$) e baixa concentração de matéria orgânica (500 $\text{mgDQO} \cdot \text{L}^{-1}$), operando em diferentes estratégias de operação

(batelada / batelada alimentada), com agitação mecânica e utilizando um “draft-tube”. O emprego de um suporte para imobilização da biomassa em reatores anaeróbios operados em bateladas sequenciais melhora a retenção de sólidos e possibilita a eliminação da sedimentação, uma das fases de operação do AnSBBR.

Existem diversos estudos sobre fatores que afetam o rendimento do AnSBR na remoção de sulfato para atingir um melhor controle do processo. Pesquisas tem enfocado a competição entre BRS e arqueias metanogênicas, o meio de suporte utilizado para a imobilização da biomassa, no tipo de substrato utilizado na alimentação do reator, a razão entre substrato e sulfato ($DQO/[SO_4^{2-}]$) e os parâmetros físico-químicos (pH, temperatura, potencial redox). Entretanto, estudos sobre a estratégia de alimentação, uma das principais características operacionais do sistema, ainda são escassos na literatura.

A operação em batelada alimentada minimiza a relação inicial de substrato/microrganismos, diminuindo qualquer efeito tóxico ou de inibição cinética por excesso de substrato que a água residuária possa impactar no biorreator. A possibilidade de operar com tempos de enchimento mais longos em relação ao tempo total de cada ciclo significa, na prática, a diminuição dos volumes dos tanques de equalização, obrigatório em situações onde não há garantia de carregamento nas ocasiões previstas em projeto. A flexibilidade operacional com a opção de adotar diferentes tempos de enchimento do reator também é motivação para o estudo da batelada e batelada alimentada.

2 OBJETIVOS

Como objetivo geral, o trabalho investigou o desempenho do tratamento de uma água residuária sintética contendo sulfato por um reator anaeróbio operado em bateladas e bateladas alimentadas seqüenciais, com agitação mecânica e utilizando um “draft-tube”, contendo biomassa imobilizada em espuma de poliuretano, sob os aspectos de remoção da matéria orgânica e de sulfato.

Assim, foram estabelecidos, os seguintes objetivos específicos:

- (i) Avaliar os resultados de operação quanto à estabilidade e à eficiência de remoção de matéria orgânica e de sulfato, realizando-se ensaios (tempo de ciclo de 8 h) nos modos de operação em batelada (tempo de enchimento de 10 min) e batelada alimentada seqüenciais (tempos de enchimento de 3 h e 6 h).
- (ii) Avaliar a influência da relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ na alimentação do biorreator sobre a estabilidade e a eficiência de remoção de matéria orgânica e de sulfato, realizando-se ensaios com três níveis de valores relativos ao requerimento teórico estequiométrico (relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ acima, igual e abaixo da estequiométrica).

3.1 O Íon Sulfato no Meio Ambiente

O sulfato é o íon mais estável do enxofre, podendo ser encontrado em vários efluentes de processos industriais e também na natureza, decorrente de processos biogeoquímicos. Em concentrações altas, o sulfato pode trazer um efeito inibidor à biomassa responsável pela degradação da matéria orgânica e dos próprios compostos de enxofre na água. Isso acontece através de possíveis efeitos tóxicos do sulfeto que se forma no processo anaeróbio da redução do sulfato (LENS et al., 1998). Assim, o sulfato pode contribuir para a degradação de corpos de águas naturais e uma possível inibição da atividade microbológica também pode afetar a eficiência de um sistema de tratamento de água residuária e deve ser considerada na operação e planejamento. Segundo Lens et al. (1998), uma concentração de H_2S acima de 150 mg.L^{-1} pode levar o sistema de tratamento anaeróbio a inoperabilidade.

O sulfeto é tóxico porque é capaz de penetrar na membrana celular e se combinar com componentes a base de ferro presentes na célula. Neste caso, o H_2S geralmente é neutralizado no ambiente em combinação com ferro, formando o insolúvel FeS_2 (pirita). A cor preta em muitos sedimentos nos quais a redução de sulfato ocorre se dá por causa desta acumulação de FeS_2 (MADIGAN, 2002). A Tabela 3.1 mostra concentrações de sulfeto total dissolvido (STD; valor que corresponde à soma das diferentes formas de sulfeto) e H_2S encontradas em diversos tipos de lodo de reatores anaeróbios, provocando inibição de 50% na remoção de sulfato e na metanogênese. Segundo Visser et al.¹ (1996, apud LENS et. al, 1998), a inibição

¹ VISSER, A., HULSHOFF POL, L.W., LETTINGA, G. Competition of metanogenic and sulfidogenic bacteria. **Water Science and Technology**, 33, p. 99-100, 1996.

da metanogênese depende das características do lodo. Em lodo suspenso, inibição é determinada pela concentração de H_2S , tanto em faixas de pH baixo quanto em faixas de pH alto (HILTON e OLESZKIEWICZ², 1988 e McCARTNEY e OLESZKIEWICZ³, 1993, apud Lens et al., 1998). Neste caso a inibição foi encontrada em concentrações de H_2S de 50 a 130 mg.L^{-1} . Em lodo granulado, inibição depende da concentração de sulfeto total dissolvido ($\text{STD} = \text{H}_2\text{S} + \text{HS}^- + \text{S}^{2-}$) e 50% de inibição foram observados com concentrações de H_2S de 250 mg.L^{-1} e 90 mg.L^{-1} em faixas de pH de 6,4 a 7,2 e 7,8 a 8,0 respectivamente (VISSER et al., 1996). A inibição da atividade das arqueias metanogênicas é maior com valores de pH mais altos comparado aos valores de pH mais baixos. Além disso, foi constatado que a metanogênese é mais sensível à inibição por H_2S do que a acidogênese, tanto em lodo em suspenso quanto em lodo granular. Uma exceção são bactérias sintróficas, responsáveis pela degradação de propionato, que se-mostraram como microrganismos mais sensíveis à inibição por H_2S . Em um reator anaeróbio de alta taxa em escala de bancada, com lodo imobilizado em biofilme, Isa et al. (1986b) não observaram inibição mesmo com altos níveis de sulfeto de hidrogênio de 1000 $\text{mgH}_2\text{S.L}^{-1}$.

Na literatura há controvérsias sobre a inibição por H_2S , já que os valores de concentração de H_2S apresentados para inibição da metanogênese e sulfetogênese mostram grandes divergências.

² McCARTNEY, D.M.; OLESZKIEWICZ, J.A. Competition between methanogens and sulfate reducers: effect of COD: sulfate ratio and acclimation. **Water Environment Research**, 65, p. 655-664, 1993.

³ HILTON, B. L.; OLESZKIEWICZ, J.A. Sulfide induced inhibition of anaerobic digestion. **Journal of Environmental Engineering**, 114, p. 1377-1391, 1988.

Tabela 3.1 – Concentrações (mg.L^{-1}) de sulfeto não ionizado (H_2S) e sulfeto total dissolvido (STD) causando inibição de 50% na metanogênese, redução de sulfato ou degradação de substratos específicos (LENS et al., 1998).

Tipo de lodo	Substrato	T (°C)	pH	H ₂ S (mg.L ⁻¹)	STD (mg.L ⁻¹)	Ref.
Metanogênese						
Lodo granulado	Acetato	30	7,0 – 7,2	252	810	Koster et al. (1986)
			7,9 – 8,0	90	841	
Lodo granulado	Acetato	30	7,2 – 7,4	184	564	Visser et al. (1996)
			8,1 – 8,3	38	590	
Biofilme	Acetato	35	7,7	>1000	NR	Isa et al. (1986b)
	Acetato/ Etanol		7,3	>1000	NR	
Redução de Sulfato						
Lodo granulado	Acetato	30	7,2 – 7,4	171	615	Visser et al. (1996)
			8,1 – 8,3	57	1125	

Nota: NR, Não registrado.

Em concentrações elevadas, o sulfato surge em efluentes de indústria de papel, de alimentos, de explosivos, de tensoativos, de xenobióticos e também em efluentes de atividades que utilizam combustíveis fósseis (LENS et al., 1998). Nesses efluentes industriais a concentração de SO_4^{2-} pode variar entre 12000 e 35000 mg.L^{-1} (SILVA, 2005). A combustão de combustíveis fósseis também traz uma outra fonte de poluição por compostos de enxofre que são as chuvas ácidas que se formam pela presença de dióxido e trióxido de enxofre, na atmosfera. As consequências destas chuvas ácidas constam da acidificação de águas superficiais e degradação de solos, da vegetação e de muitos ecossistemas. No esgoto sanitário, o sulfato se encontra em concentrações de 20 a 50 mg.L^{-1} (METCALF & EDDY,

1991). A corrosão por sulfeto de hidrogênio pode trazer danos às construções de concreto e também afeta a indústria de exploração de petróleo (MATIAS et al., 2005).

Este processo de acidificação se encontra em maior escala em áreas de mineração, onde águas de drenagem podem apresentar características ácidas, resultado da degradação microbiana de minerais. Acompanhados por uma elevação do pH, estes sulfetos insolúveis podem ser re-oxidados por águas subsuperficiais (por exemplo, água pluvial), gerando águas ricas em sulfato e causando precipitação de metais na bacia do efluente, fenômeno conhecido como “Yellow Boy”. A concentração de sulfato nestas águas pode variar entre 1,5 a 7,2 g.L⁻¹ (LENS et al., 1998).

O sulfato também se forma através de processos naturais e a maior parte do enxofre se encontra nas águas oceânicas e em sais minerais inorgânicos presentes no solo. A combinação de degradação microbiana de minerais e infiltração de águas pluviais pode levar estes sais para regiões mais inferiores do solo. Nestas camadas mais profundas, sob condições anaeróbias, Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) podem produzir sulfetos, que combinados com metais pesados assumem uma forma insolúvel.

Em função destes processos naturais, o sulfato pode ser encontrado em diversas águas de abastecimento e, em baixas concentrações, não representa perigo à saúde humana. O valor limítrofe para águas de abastecimento no Brasil, estabelecido pela Portaria 1.469 do Ministério da Saúde, é 250 mg.L⁻¹ e o CONAMA limita a concentração de sulfato para águas doces de classe 1 também em 250 mgSO₄²⁻.L⁻¹. A Lei nº 997 de 31 de maio de 1976, regulamentada pelo Decreto Estadual de São Paulo 8468 de 1976, no Artigo 19-A, estabelece a concentração máxima de 1.000 mgSO₄²⁻.L⁻¹ em efluentes líquidos lançados direta ou indiretamente nos na rede coletora de esgoto.

3.2 O Ciclo Biogeoquímico do Enxofre

Os processos de transformação de enxofre na natureza são mais complexos do que aquelas de nitrogênio por causa da variedade dos estados de oxidação do enxofre e também, devido ao fato de que algumas transformações ocorrem tanto quimica quanto biologicamente. O enxofre elementar é quimicamente estável. A Figura 3.1 mostra que o enxofre e o sulfato estão sujeitos tanto aos processos de redução quanto aos processos de oxidação.

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

A oxidação de enxofre elementar resulta na formação de sulfato e íons de hidrogênio, levando também à diminuição do pH. A redução de enxofre para sulfeto ocorre através respiração anaeróbia, um processo ecológicamente importante. O habitat das Bactérias Redutoras de Enxofre (BRE) é geralmente o mesmo das Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) e, do ponto de vista ecológico, os dois grupos coexistem.

3.3 As Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS)

O processo da redução de sulfato é realizado pelas Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS), um grupo de microrganismos amplamente distribuído na natureza, que tem a capacidade de utilizar sulfato como aceptor de elétrons na oxidação de matéria orgânica. Porém, em habitat anóxico, a atividade das BRS pode ser limitada devido à escassez tanto de sulfato quanto de matéria orgânica.

A maioria das BRS são bactérias mesofílicas, com crescimento ótimo em temperaturas em torno de 33°C. Devido aos micro-ambientes anaeróbios, as BRS, assim como as arqueias metanogênicas, também podem ser encontradas em reatores aeróbios (LENS et al., 1995a). A capacidade, porém restrita, de usar O₂ como aceptor de elétrons se mostrou no estudo de Dannenberg et al. (1992).

Dolla et al. (2006) investigaram a defesa das BRS contra o oxigênio. As BRS são microrganismos estritamente anaeróbios, porém em muitos casos podem ser encontradas em condições temporariamente aeróbias. As estratégias desenvolvidas pelas BRS contra o oxigênio incluem deslocamento do microrganismo para regiões anóxicas, criação de micro-ambientes anóxicos através de floculação, a agregação de O₂ e sistemas enzimáticos desenvolvidos para redução e eliminação de O₂.

As BRS se apresentam em um espectro muito amplo de microrganismos procariontes e a Tabela 3.2 mostra os principais gêneros, juntamente com algumas características morfológicas e fisiológicas. Nesta tabela, pode-se observar que a maioria dos gêneros possui uma morfologia do tipo *Vibrio*, *Oval* ou *Bacilo* e que são microrganismos mesofílicos, com uma temperatura ótima de crescimento entre 28 e 35°C. No entanto, também encontram-se bactérias termofílicas (até 83°C). A tabela ainda permite analisar que a oxidação da matéria

orgânica é promovida pela metade dos gêneros de forma completa e pela outra metade de forma incompleta. Os doadores de elétrons mais utilizados pelas BRS são H_2 , ácidos graxos e lactato, seguido por etanol, acetato, propionato e ácidos fenílicos.

A Tabela 3.3 traz informações complementares relativas aos gêneros apresentados na Tabela 3.2, indicando fontes de carbono e características morfológicas específicas.

O produto final da redução do sulfato é o gás sulfeto de hidrogênio (H_2S) e suas formas iônicas (HS^- e S^{2-}). Vale mencionar que o sulfeto pode ser produzido tanto pelas BRS quanto emitido por fontes geoquímicas e vulcões. Um exemplo de oxidação completa de acetato é dado na Equação (3.1):

O H_2S é uma substância volátil, entretanto a forma do sulfeto presente na natureza depende do pH. O H_2S é predominante em valores de pH abaixo de 7, enquanto que HS^- e S^{2-} são presentes em valores de pH acima de 7 (Figura 3.2). Em condições aeróbias com pH neutro, o sulfeto (HS^-) oxida rápida e espontaneamente.

Tabela 3.2 – Propriedades morfológicas e fisiológicas de alguns gêneros das bactérias redutoras de sulfato (BALOWS et al., 1991).

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

+, utilizado; (+), pouco utilizado; ±, utilizado ou não utilizado; (±), pouco utilizado ou não utilizado; -, não utilizado; ND, não determinado.

^BSimbologia: 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 deshidrogenase/C₁; I, oxidação incompleta até acetato como produto final.

Tabela 3.3 – Informações complementares sobre alguns gêneros de BRS apresentados na Tabela 3.2.

Gênero	Observações
<i>Desulfovibrio</i>	Algumas espécies podem utilizar metanol, glicerol, glicina, alanina, colina e furfural como fonte de carbono.
<i>Desulfobacter</i>	O lactato pode ser utilizado por algumas poucas espécies.
<i>Desulfobacterium</i>	Algumas espécies podem utilizar metanol, glutarato, glutamato, fenol, alanina, nicotinato e indol como fonte de carbono.
<i>Desulfococcus</i>	Algumas espécies podem utilizar acetona como fonte de carbono.
<i>Desulfomonile</i>	Algumas espécies podem utilizar 3- ou 4-anisato como fonte de carbono.
<i>Desulfotomaculum</i>	Algumas espécies podem utilizar metanol ou alanina como fonte de carbono. Podem-se apresentar como espécies termofílicas, possuindo uma temperatura ótima de desenvolvimento na faixa de 50-65 °C.
<i>Archaeoglobus</i>	Pode utilizar amido ou peptídeos como fonte de carbono. Único representante do domínio <i>Archaea</i> presente na Tabela 3.2; sendo os demais microrganismos do domínio <i>Eukarya</i> .

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).

A Equação 3.2 mostra uma relação entre o sulfeto total dissolvido (STD; soma das concentrações de H_2S , HS^- e S^{2-}) e o sulfeto de hidrogênio livre (H_2S), dependente do pH, apresentada por Muthumbi et al. (2001).

$$[H_2S](mg \cdot L^{-1}) = \frac{STD(mg \cdot L^{-1})}{1 + 10^{pH - pKa}} \quad (3.2)$$

na qual o valor de pKa do par HS^-/H_2S é de 7,02.

Nesta equação, não foi considerado o íon sulfeto na forma S^{2-} . Este íon não ocorre na faixa de pH da digestão anaeróbia (pH 6,0 a 8,0), conforme mostra a Figura 3.2. Diferentemente do termo usado para a concentração de sulfeto de hidrogênio livre ($[H_2S]$) na Equação 3.2, o termo usado neste trabalho para a concentração de sulfeto de hidrogênio livre será “ C_{H_2S} ”.

3.4 Remoção de Sulfato

O tratamento anaeróbio de águas residuárias é um processo biológico que ocorre sem a presença de oxigênio molecular, no qual diferentes microrganismos promovem a transformação de compostos orgânicos mais complexos em (por exemplo: carboidratos, lipídios, proteínas) em produtos mineralizados. Harper e Pohland (1986) dividem o processo anaeróbio em nove etapas, porém, pode-se simplificar o processo em quatro etapas principais com os referentes sub-produtos: hidrólise (de polímeros orgânicos complexos à monômeros tais como açúcares, ácidos orgânicos e aminoácidos); acidogênese (propionato, butirato, etanol, lactato, H_2); acetogênese (acetato); metanogênese (metano) ou sulfetogênese (sulfeto).

Na redução de sulfato (ou sulfetogênese) promovido pelas BRS, o íon de sulfato, a forma mais oxidada de enxofre, é usado como acceptor de elétrons, obtidos na oxidação de matéria orgânica. Alguns doadores de elétrons são H_2 , lactato, propionato, acetato, etanol e outros álcoois. A habilidade de usar sulfato como acceptor de elétrons se restringe às BRS.

Como também mostra a Tabela 3.2, as BRS podem ser divididas em dois grupos: aquelas que oxidam o substrato de forma completa até CO_2 e aquelas que oxidam a matéria orgânica de forma incompleta até acetato. Ao primeiro grupo pertencem, entre outros, *Desulfobacter*, *Desulfobacterium*, *Desulfonema*, *Desulfosarcina*, *Archaeoglobus*, *Desulfohalobium* e ao segundo, *Desulfomicrobium*, *Desulfobulbus*, *Desulfobotulus*, *Thermodesulfobacterium*, *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum* (WIDDEL⁴, 1988, apud VALLERO et al., 2003).

Para ressaltar a importância da presença de sulfato na viabilidade termodinâmica da

⁴ WIDDEL, F. Microbiology and ecology of sulfate and sulfur reducing bacteria. In: ZENDER, A. ed. **Biology of anaerobic microorganisms**. New York, John Wiley & Sons, ISBN 0471882267, p. 459-586, 1988.

transferência de elétrons, a Equação 3.3 mostra a degradação incompleta de butirato para acetato, uma reação com uma energia livre positiva ($\Delta G_o'$, a 37°C). Entretanto, as Equações 3.4 e 3.5 mostram a oxidação de butirato para acetato através da redução de sulfato, o processo anaeróbico promovido pelas BRS. Nota-se que ambas as reações apresentam uma entalpia negativa com produção de sulfeto de hidrogênio. Comparando as duas reações, pode-se observar uma diferença significativa de energia livre, a produção de bicarbonato e a oxidação completa durante a reação da Equação 3.5.

Outro exemplo que pode ser ilustrado é a degradação de propionato para acetato com uma energia livre positiva na reação, como apresentada na Equação 3.6. Entretanto, a degradação de propionato para acetato utilizando o sulfato como aceptor de elétrons, mostrado de forma incompleta na Equação 3.7 e de forma completa a Equação 3.8, permite observar em ambas as reações o ganho de energia livre e a produção de bicarbonato e de sulfeto de hidrogênio.

$$\Delta G_o' = +76,0 \text{ kJ.mol}^{-1} \quad (3.6)$$

$$\Delta G_o' = -37,7 \text{ kJ.mol}^{-1} \quad (3.7)$$

$$\Delta G_o' = -88,9 \text{ kJ.mol}^{-1} \quad (3.8)$$

Quando ocorre a oxidação incompleta do substrato, existe a formação de acetato. O último passo da oxidação da matéria orgânica pode ser executado tanto pelas arqueias metanogênicas (como ilustrado na Equação 3.9) quanto pelas BRS (como ilustrado na Equação 3.10). Pelas equações mostradas abaixo, pode-se observar o ganho de energia livre na oxidação de acetato e a produção de metano, bicarbonato e sulfeto de hidrogênio. Nota-se, portanto, uma competição entre estes grupos de microrganismos.

$$\Delta G_o' = -31,0 \text{ kJ.mol}^{-1} \quad (3.9)$$

$$\Delta G_o' = -47,6 \text{ kJ.mol}^{-1} \quad (3.10)$$

Outro exemplo desta competição pode ser verificado pela oxidação de hidrogênio pelas vias da metanogênese e da sulfetogênese, conforme ilustram as Equações 3.11 e 3.12. Entretanto, vale destacar a metanogênese acetoclástica do exemplo anterior (substrato: acetato) e a metanogênese hidrogenotrófica deste exemplo (substrato: hidrogênio).

$$\Delta G_o' = -32,7 \text{ kJ.mol}^{-1} \quad (3.11)$$

$$\Delta G_o' = -38,1 \text{ kJ.mol}^{-1} \quad (3.12)$$

No metabolismo das BRS, assim como no caso da remoção de nitrogênio amoniacal, pode-se diferenciar entre redução assimilativa e dissimilativa de sulfato. Na redução assimilativa microrganismos utilizam componentes inorgânicos como fonte de nutrientes. Neste processo, apenas a quantidade de SO_4^{2-} necessária para o crescimento da célula é reduzido para ser convertido em material celular. Quando esses componentes são utilizados como aceptores de elétrons para obtenção energia, trata-se do processo de metabolismo dissimilativo. No processo dissimilativo, uma grande quantidade de H_2S e suas formas iônicas são produzidos e excretados para o ambiente, ou seja, não são totalmente utilizados na síntese celular. Diversas bactérias, arqueias, fungos, algas e plantas superiores realizam a redução assimilativa. As BRS e outros organismos, principalmente procariontes, realizam a redução dissimilativa (MADIGAN, 2002). Assim, o produto final do processo de redução de sulfato é o H_2S e suas formas iônicas (HS^- e S^{2-}), sendo produtos naturais importantes que participam de vários processos biogeoquímicos.

3.5 Biorreatores Anaeróbios

3.5.1 Desenvolvimento

Em 1966 e 1970 Dague, McKinney e Pfeffer observaram que a biomassa anaeróbia floculava de forma análoga ao sistema aeróbio de lodos ativados e que a eficiência da floculação era afetada pela carga orgânica, particularmente pela razão substrato/microrganismos (F/M). Estes avanços no controle da biofloculação para melhorar a sedimentabilidade do lodo deram início ao desenvolvimento de vários tipos de reatores anaeróbios. De modo geral, pode-se diferenciar os vários tipos de reatores anaeróbios pela estratégia de alimentação (contínuo e descontínuo) e pela característica da biomassa (granulada, crescimento disperso e imobilizada). Entretanto, todos podem ser empregados no tratamento de águas residuárias industriais como, por exemplo, abatedouro de aves, cervejarias e laticínios, e também no tratamento de esgoto sanitário.

A aplicação de reatores em escala plena, com o objetivo da remoção de matéria orgânica, começou com o desenvolvimento do reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo – UASB (LETTINGA et al., 1980). Outras configurações desenvolvidas mais recentemente são o reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais – AnSBR (DAGUE et al., 1992), o reator anaeróbio de leito expandido – EGSB (KATO et al., 1994), o reator anaeróbio horizontal de leito fixo – RAHLF (ZAIAT et al., 1994) e o reator anaeróbio de leito fixo operado em bateladas alimentadas sequenciais – AnSBBR (RATUSZNEI et al., 2000).

O número de estudos sobre a aplicabilidade destes reatores na remoção de sulfeto é bem menor e a tecnologia ainda está em desenvolvimento. Mizuno et al. (1994) utilizaram no

estudo um reator UASB, Smul et al. (1997) pesquisaram sobre o reator EGSB, enquanto Silva et al. (2002) visaram investigar o desempenho do reator RAHLF na remoção de sulfato.

3.5.2 Reator Anaeróbio Operando em Bateladas Sequenciais (ASBR)

No final da década de 80, Dague e outros pesquisadores da Universidade Estadual de Iowa (Estados Unidos) e um grupo de pesquisadores da Universidade de Ottawa (Canadá) desenvolveram o reator anaeróbio operado em bateladas sequenciais para a remoção de matéria orgânica de águas residuárias, sendo o conceito do reator patenteado em 1993 pelo grupo americano. Os estudos, baseado nas descobertas sobre biofloculação no fim dos anos 60, 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. Dague et al. (1992), além de mostrarem os resultados de tratamento de substrato altamente solúvel (leite desnatado em pó) e esgoto de suínos, verificaram que o ASBR possui características únicas que permitem que o processo de tratamento atinja altas conversões do substrato em metano e dióxido de carbono. A alta razão entre substrato e microrganismos no começo do ciclo levou à uma elevada velocidade de conversão e a baixa razão de (F/M) trouxe 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 e Bagley (2002) investigaram sobre a otimização do desempenho do AnSBR

modificando os parâmetros de operação. O reator tratando glicose com uma carga orgânica de $2,1 \text{ kgDQO} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ foi submetido à 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 alta razão 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 ao consumo de ácidos no reator. Tempo mais longo de enchimento, portanto, melhorou o desempenho do reator no tratamento de um substrato de rápida acidificação, como a glicose. Razões idênticas de F/C, com cargas orgânicas iguais, tempos mais curtos de ciclo e concentrações iniciais de substrato mais baixas também melhoraram a eficiência do ASBR.

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

Em uma continuação do trabalho anterior Sarti et al. (2006) investigaram o desempenho de dois AnSBR 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 água residuária de esgoto sanitário. A concepção da configuração AnSBBR, em escala piloto, baseou-se no trabalho de Ratusznei et al. (2000). Durante a fase experimental de 70 dias, observou-se uma rápida adaptação dos reatores e uma similaridade no desempenho dos mesmos.

3.5.3 Reatores Anaeróbios operando em Bateladas Sequenciais com Biomassa

Imobilizada (ASBBR)

O desenvolvimento de reatores com biomassa imobilizada em materiais inertes tornou possível a operação dos reatores com tempos de detenção hidráulica curtos e tempos de retenção celulares longos. Isso diminuiu significativamente volume reacional e os custos do reator.

Segundo Zaiat et al. (2001), a utilização de reatores contendo células imobilizadas em suporte inerte apresenta a vantagem de se eliminar as incertezas referentes à granulação do lodo. A utilização de suportes inertes também pode melhorar a retenção de biomassa em reatores com agitação mecânica e eliminar o passo de sedimentação, que leva a um menor tempo de operação. No entanto, devem ser empregados suportes adequados, que permitam boa adesão dos microrganismos envolvidos e que tenham custo acessível. Portanto, esta escolha deve ser criteriosa, baseada em ensaios de aderência celular e considerando o aspecto econômico. Os materiais mais usados são suportes de pedras, PVC, carvão ativado, espuma de poliuretano, polietileno ou cerâmica.

Um problema que surge no tratamento de esgoto com baixa carga orgânica é o baixo volume de biogás produzido durante o processo. No caso do tratamento de água residuária com alta carga orgânica, o biogás produzido pode ser usado para mistura do meio líquido contido no reator através de recirculação do gás (SUNG e DAGUE, 1995). Como alternativa quando isso não é efetivo, pode ser usada agitação mecânica ou recirculação de líquido.

Neste contexto, Ratusznei et al. (2000) estudaram a viabilidade de um reator AnSBBR em escala de bancada, com biomassa imobilizada em espuma de poliuretano e agitação mecânica para tratamento de esgoto sintético com baixa carga orgânica. O trabalho visou

diminuir o tempo total do ciclo através da otimização do consumo de substrato, da transferência de massa e da imobilização da biomassa. O reator usado teve uma capacidade total de 2,5 L, com 1,0 L de meio aquoso. O suporte inerte utilizado foi cubos de poliuretano e a agitação foi garantida com um agitador magnético no fundo do reator. O estudo mostrou que a imobilização da biomassa em espuma de poliuretano melhorou a retenção de sólidos e eliminou a necessidade de granulação da biomassa e o passo de sedimentação. Os estudos hidrodinâmicos mostraram que a mistura completa foi atingida com uma rotação de 100 rpm. O reator atingiu estabilidade operacional depois de 10 dias de experimento com 3 ciclos por dia, tratando 0,5 litro de substrato sintético com DQO de 485 mg.L^{-1} . A remoção máxima de 86% foi atingida depois de 3 horas do começo do ciclo.

Em trabalhos posteriores, Ratusznei et al. (2001 e 2003) investigaram sobre a importância da agitação e da estratégia de alimentação na aplicação do AnSBBR. No primeiro trabalho, a agitação foi variada entre 0 e 750 rpm e observou-se um aumento da eficiência de remoção de matéria orgânica com velocidades mais altas de agitação, possibilitando a diminuição do tempo total do ciclo. No estudo sobre o efeito da estratégia de alimentação, os pesquisadores operaram um AnSBBR em modo batelada e batelada alimentada com uma agitação constante de 280 rpm. Nos ensaios de batelada alimentada, foi observada a formação de polímeros extracelulares, que diminuíram a transferência de massa entre biomassa e substrato e provocaram uma queda na remoção de DQO.

Orra et al. (2004) estudaram a degradação de água residuária sintética em AnSBBR com diferentes estratégias de alimentação. A eficiência de remoção mostrou um leve descaimento de 85% para 81% quando o tempo de alimentação foi de 6 min para 360 min.

Em função das vantagens da configuração do AnSBBR, o reator se apresentou potencialmente qualificado a ser utilizado para a remoção de sulfato, podendo fornecer eficiências elevadas na remoção de sulfato, mesmo para águas residuárias com altas cargas de

sulfato. Isto é possível porque, operacionalmente, o reator possui alta flexibilidade para atingir a qualidade desejada do efluente e o grande número de pesquisas já realizadas fornecem uma base sólida para a investigação do AnSBBR na remoção de sulfato, com diferentes estratégias de alimentação.

3.6 Biorreatores Anaeróbios na Remoção de Sulfato

Com o desenvolvimento de reatores anaeróbios, a remoção de sulfato de águas residuárias por meio destes reatores tornou-se uma opção interessante, devido ao baixo custo do sistema comparado aos processos convencionais. Alternativas como osmose reversa ou precipitação através de sulfeto de bário ou carbonato de bário têm alto custo e produzem resíduos sólidos (GHIGLIAZZA et al., 2000).

A redução biológica do sulfato em digestores anaeróbios, em geral, é considerada como indesejável, pois o SO_4^{2-} favorece o crescimento das BRS, que competem com microrganismos metanogênicos por substratos orgânicos e hidrogênio disponíveis. Em consequência da atividade das BRS, o material orgânico deixa de ser transformado em CH_4 formando H_2S , que além de nocivo e corrosivo, possui um odor desagradável e pode ser inibitório ou tóxico para os microrganismos envolvidos no processo de metanogênese. O controle da concentração de sulfeto pode ser realizado, por exemplo, através de diluição, elevação do pH ou oxidação do sulfeto para enxofre elementar (OMIL et al., 1996).

Porém, em casos especiais, como no tratamento de esgoto ou lodo com metais pesados, a presença de sulfeto pode favorecer o processo. Os sulfetos de metais pesados possuem uma solubilidade muito baixa em água, o que leva a precipitação e a redução da

concentração desses metais. Isso diminuí a concentração das formas iônicas solúveis de metais pesados, que podem ser tóxicos para a atividade biológica. Em outros processos sob condições aeróbias, os sulfetos podem ser re-oxidados bioquimicamente a enxofre molecular e reutilizados na indústria (LENS et al., 1995b).

Em reatores anaeróbios sob condições favoráveis ao crescimento das BRS, pode-se reduzir o sulfato para o íon sulfeto em suas diversas formas (S^{2-} , HS^- e H_2S) utilizando matéria orgânica como fonte doadora de elétrons. O produto final, o íon sulfeto, pode ser oxidado a enxofre molecular por bactérias aeróbias. Nestes ambientes anaeróbios, as BRS competem com bactérias acidogênicas (BAc), acetogênicas (BHAc) e arqueias metanogênicas (AM) por substratos como hidrogênio, acetato, etanol, propionato, butirato e metanol, desviando a rota metabólica da produção de metano para a de produção de H_2S . A produção de metano, sulfeto e dos produtos finais da digestão anaeróbia dependem do grau dessa competição, devendo ser considerada em sistemas sulfetogênicos pela determinação da fração relativa de substrato utilizada para a redução de sulfato para H_2S ao invés de convertida em CH_4 (LENS et al., 1995b e 1998).

A relação entre a matéria orgânica, na forma de DQO, e a concentração de sulfato é um aspecto importante na competição entre BRS e microrganismos metanogênicos na operação de sistemas anaeróbios. Baseados na estequiometria da redução de sulfato, Lens et al. (1998) estabeleceram uma razão teórica entre a DQO como doador de elétrons e a concentração de sulfato comoceptor de elétrons. Com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ igual 0,67, a matéria orgânica pode ser teoricamente completamente oxidada via redução de sulfato, ou seja, todo o sulfato presente pode ser reduzido a sulfeto. Para razões maiores, mesmo observada uma predominância da atividade sulfetogênica, nem toda a matéria orgânica será usada para a redução do sulfato e também haverá metanogênese. Para valores menores que 0,67, é necessária a adição de doadores de elétrons para que todo o sulfato possa ser

removido. Em geral, com uma relação de $DQO/[SO_4^{2-}]$ acima de 10, o tratamento de águas residuárias através de arqueias metanogênicas não será afetada por sulfetogênese (RINZEMA e LETTINGA⁵, 1988, apud LENS et al., 1998).

3.6.1 Remoção de Sulfato em Reatores Contínuos

Isa et al. (1986a e 1986b) estudaram a competição entre BRS e arqueais metanogênicas em um reator contínuo de alta taxa, com biomassa imobilizada em espuma de poliuretano. Os pesquisadores avaliaram a redução de sulfato relativo à produção de metano em digestão anaeróbia. O reator mostrou-se com o melhor desempenho em termos de remoção de sulfato com uma concentração de sulfato no afluente de 5000 mg.L^{-1} . Observou-se uma inibição de 50% da atividade tanto das arqueias metanogênicas acetoclásticas quanto das hidrogeniotróficas (ver Tabela 3.1), a partir de uma concentração de 1000 mg.L^{-1} de H_2S . O reator, com volume total de 1,0 L, foi alimentado com diferentes tipos de substrato (acetato, etanol e formiato), com carga orgânica de $2500 \text{ mgDQO} \cdot (\text{L.d})^{-1}$, durante um ciclo total de 24 horas. Apesar da alta concentração de sulfato, houve uma inibição de apenas 12% da produção de metano. O estudo também mostrou que a utilização apenas de acetato como substrato prejudica a redução de sulfato.

Omil et al. (1996) investigaram o efeito da velocidade do fluxo ascendente e da concentração de sulfato sobre a degradação de ácidos graxos voláteis em um reator UASB com biomassa granulada. O trabalho visou esclarecer a competição entre BRS e arqueia

⁵ RINZEMA, A. e LETTINGA, G. The effect of sulphide on the anaerobic degradation of propionate. **Environmental Technology Letters**, 9(2), p. 83-88, 1988.

metanogênica por doadores de elétrons como H_2 , acetato e outros ácidos de cadeia curta, como propionato e butirato. Pelo ponto de vista da cinética e da termodinâmica, as BRS levam vantagem, e para melhor entendimento e controle da competição, foram estudadas diferentes configurações de velocidade do fluxo ascendente no reator. Foi utilizado um reator UASB com volume total de 5,5 litros. A velocidade ascendente foi controlada pela recirculação do efluente. O reator foi alimentado com razões variáveis de acetato, propionato e butirato. O afluente conteve sulfato de sódio, assim como macro e micro-nutrientes. O estudo mostrou que matéria orgânica pode ser removida com sucesso no UASB com velocidades do fluxo ascendente de 1 a 2 $m.h^{-1}$, sob condições sulfetogênicas e apesar de concentrações altas de sulfeto dissolvido (707 mg.L^{-1}) durante a fase final do estudo o reator removeu 64% dos ácidos graxos voláteis.

Baseado nos resultados desse trabalho, que mostrou que as BRS são capazes de utilizar todo o propionato e butirato, Omil et al. (1997) concluíram que a competição sob essas condições pode ser simplificada como sendo a competição por acetato e hidrogênio. Os resultados das simulações confirmaram que o tempo necessário para que as BRS dominem nesta competição pode ser muito longo, principalmente devido à diferença relativa em suas velocidades máximas de crescimento celular, que dependem do pH. O estudo mostrou ainda que a operação do reator com razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ acima da estequiométrica ($DQO/[SO_4^{2-}] > 2$), em uma faixa de pH de 8 a 8,5, assim como a utilização de um inóculo com uma fração significativa de BRS, é uma estratégia para desenvolver biomassa completamente sulfetogênica em um curto período de tempo. Durante todo o período experimental, não se detectou consumo de hidrogênio pelas arqueias metanogênicas. A Figura 3.3 mostra 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 de concentração de arqueias metanogênicas por bactérias redutoras de sulfato) e tempo de retenção celular. Observa-se que o tempo

necessário para a conversão sulfetogênica do substrato diminui significativamente ao aumentar o pH de 7,0 para 7,5.

Figura 3.3 – Tempo necessário para remoções de 10, 50 e 90% de sulfato (Adaptado de OMIL et al., 1997): A) – Efeito do pH, B) – Efeito da composição do inóculo (X_{AM}/X_{BRS} – Relação de concentração de arqueias metanogênicas por bactérias redutoras de sulfato), e C) – Efeito do tempo de retenção celular.

O’Flaherty et al. (1999) também estudaram a competição entre BRS e arqueias metanogênicas analisando o efeito da adição de sulfato sobre a degradação de ácidos voláteis e etanol. Durante 423, dias foram estudadas as interações microbianas em um reator anaeróbio híbrido operado de modo contínuo. Inicialmente, o reator foi inoculado com lodo não adaptado ao sulfato. Durante o ensaio o reator foi submetido a uma concentração de sulfato de 4000 mg.L^{-1} , que resultou em uma inibição completa de degradação de propionato e uma inibição forte da atividade das arqueias metanogênicas acetoclásticas. Testes de toxicidade

mostraram que a metanogênese acetoclástica foi a etapa mais afetada pela inibição por sulfeto. Inibição de 50% foi observada em concentrações de 69 a 150 mgH₂S.L⁻¹ livre, em uma faixa de pH de 6,5 a 8,0. O estudo mostrou quantidades significativas de BRS presentes no lodo não adaptado ao sulfato. Mostrou ainda que, na ausência de sulfato, as BRS podem crescer mediante a fermentação utilizando etanol (LAANBROCK⁶ 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 no restabelecimento da remoção de DQO.

Moosa et al. (2002) estudaram o efeito da concentração de sulfato sobre a cinética da redução anaeróbia do sulfato. O reator contínuo de mistura, com volume total de 1 l (0,8 L meio / 0,2 L biomassa), foi operado com diferentes concentrações (1; 2,5; 5 e 10 kg.m⁻³) de sulfato, inicialmente, em batelada. Depois de atingir uma remoção entre 90 e 95%, o reator foi operado de modo contínuo. Em todos os casos, a velocidade de remoção de sulfato aumentou linearmente com o aumento da carga volumétrica. Com o aumento da concentração inicial do sulfato também aumentou a velocidade máxima de reação.

Em um trabalho posterior, Moosa et al. (2005) estudaram o efeito da temperatura no mesmo processo de redução de sulfato. Mudando a concentração inicial de sulfato, o desempenho de quatro reatores com temperaturas diferentes (20, 25, 30 e 35°C) foi analisado, observando-se um aumento da remoção de sulfato com o aumento da temperatura.

A utilização do potencial redox para controle da oxidação de sulfeto foi apresentada por Khanal et al. (2003). Em um filtro anaeróbio com fluxo ascendente (UAF), os pesquisadores controlaram a adição de oxigênio ao biogás re-circulado através do potencial redox no reator. O reator foi alimentado com uma DQO constante de 18.000 mg.L⁻¹ e uma concentração variável de sulfato (1000, 3000 e 6000 mg.L⁻¹). Na operação com uma

⁶ LAANBROCK, 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**, 133, p. 178-184, 1982.

concentração de sulfato de 6000mg.L^{-1} , o aumento do potencial redox através da adição de oxigênio reduziu o sulfeto dissolvido em 98,5% e a produção, antes inibida de metano, aumentou em 45,9%. Nas outras condições, o sulfato não mostrou efeitos inibidores significativos.

Parravicini et al. (2007) estudaram a aplicação da remoção biológica de sulfato na indústria de polpa de celulose utilizando 4 reatores UASB em escala de bancada e um reator escala piloto. Durante os experimentos no laboratório, os reatores se mostraram eficientes na remoção de sulfato, da matéria orgânica e de zinco. No entanto, para garantir a alta eficiência do processo, os pesquisadores indicaram que é necessário manter o nível de H_2S livre abaixo de 3% (v/v) ($<80\text{ mg.L}^{-1}$). Idade do lodo, pH e concentração de acetato foram outros parâmetros importantes na operação. Com concentrações de H_2S entre 1 e 10% (v/v), aproximadamente, 70% da DQO foi utilizada pelas BRS. O metanol foi identificado como principal fonte de substrato para as arqueias metanogênicas mesofílicas. A produção de metano foi inibida com concentrações de H_2S acima de 10% (v/v) e a remoção máxima de sulfato chegou a 50%.

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) em escala piloto, com biomassa imobilizada em cubos de espuma de poliuretano. Os autores avaliaram a eficiência na remoção de sulfato e matéria orgânica em função da razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$. O reator, com volume total de 94,2 litros, foi inicialmente operado de modo descontínuo para depois ser mudado para alimentação semi-contínua. Esses autores constataram que etanol pode estimular o processo sulfetogênico no tratamento de águas residuárias que requerem a adição de fonte de carbono e doador de elétrons externos, mesmo com razões altas de $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$. Uma remoção máxima de sulfato de 97% foi observada durante condições descontínuas e semi-contínuas.

A utilização do reator RAHLF na remoção de sulfato também foi verificada por Damianovic et al. (2005). O tempo de detenção hidráulica foi de 12 horas e, como fonte de substrato, foram usados etanol e ácidos voláteis. Também foi variada a razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ (5,0 e 1,7). Os resultados mostraram eficiências de remoção de sulfato entre 68 e 97%.

Perez-Rodriguez et al. (1989) estudaram o efeito de algumas argilas minerais utilizadas como suporte de imobilização para o crescimento de BRS em reatores anaeróbios. Esses autores testaram sepiolita natural, sepiolita tratada (para garantir melhor dispersão do material), montmorilonita e vermiculita e compararam esses materiais com poliuretano expandido e PVC. Os autores concluíram que a espuma de poliuretano foi o suporte no qual as BRS cresceram em maior quantidade, seguida pelo PVC e montmorilonita. Segundo os autores, a dificuldade de crescimento de BRS sobre a sepiolita tratada foi, possivelmente, devido à adsorção de alguns componentes necessários para o crescimento dessas bactérias nos canais do mineral, tornando-os inacessíveis.

3.6.2 Remoção de Sulfato em Reatores operando em Bateladas Sequenciais

Ghigliazza et al. (2000) investigaram a cinética do processo da redução biológica de sulfatos solúveis (Na_2SO_4) e pouco solúveis ($CaSO_4$) usando propionato (Pr^-) como substrato. Um reator de batelada alimentada foi alimentado com diferentes razões de Pr^-/SO_4^{2-} . As concentrações de propionato e de sulfato usadas foram de 0,8 a 3,5 $g.L^{-1}$ e 0,9 a 2,4 $g.L^{-1}$, respectivamente. Para garantir que a razão de C:N:P não interferisse no crescimento das bactérias, uma solução de nutrientes também foi adicionada. Ao longo dos ensaios, observou-se a adaptação das BRS no aumento da eficiência de remoção de sulfato. Em ciclos de 48

horas, usando uma razão $\text{Pr-}/\text{SO}_4 \sim 1$, observou-se uma remoção maior do que 98%, correspondente a uma carga removida de $0,7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. Não foi observada inibição por H_2S .

Silva (2005) estudou a remoção de sulfato, com posterior oxidação parcial do sulfeto, em um reator AnSBBR. A água residuária sintética usada nos ensaios foi preparada com base na metodologia descrita por Torres (1992) e os suportes usados durante o trabalho (PU e CV) foram selecionados através de estudos de aderência microbiana. Entre os quatro tipos de materiais suportes avaliados, sendo poliuretano (PU), carvão vegetal (CV), polietileno de baixa densidade reciclado (PE), e cerâmica porosa confeccionada com alumina (CE), as BRS aderiram melhor em espuma de poliuretano (PU) e carvão vegetal. No tratamento de água residuária sintética com relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ igual a 3,2, as BRS foram mais competitivas por substratos orgânicos e hidrogênio do que as bactérias acetogênicas e arqueias metanogênicas. Nesta mesma razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$, o AnSBBR contendo CV como material suporte apresentou melhor desempenho em remoção de DQO e de sulfato do que o AnSBBR contendo PU. Durante o tratamento de água residuária sintética com relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ igual a 1,3, não foi detectado metano no biogás gerado nos AnSBBR's contendo biomassa imobilizada em PU e em CV. No tratamento de água residuária sintética com relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ igual a 0,4, os AnSBBR's com PU e com CV tornaram-se completamente sulfetogênicos. As condições mais favoráveis para a redução de sulfato se apresentaram com relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ igual a 1,3. A adição de etanol em quantidade estequiométrica à concentração de sulfato resultou em melhora do desempenho em redução de sulfato nos AnSBBR's avaliados. Todavia, ocorreu aumento na concentração de ácidos voláteis, possivelmente, devido à oxidação incompleta do etanol a acetato pelas BRS.

Sarti et al. (2006) avaliaram o potencial de tratamento de água residuária industrial rica em sulfato e diluída com esgoto sanitário em AnSBBR contendo biomassa imobilizada em carvão mineral. Para melhor controle da relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$, etanol foi utilizado como

fonte externa de matéria orgânica. O reator com volume total de 1,2 m³ (volume líquido de 0,6 m³) tratou, em um ciclo de 48 h, água residuária rica em sulfato proveniente de processo industrial de sulfonação de óleos vegetais com concentrações de 0,25; 0,50; 1,0; 2,0 e 3,0 gSO₄²⁻.L⁻¹. Durante os 275 dias de operação, foram registradas eficiências na redução de sulfato entre 84 e 95%. Perfis temporais foram realizados em condições estáveis de operação nas concentrações de 1,0; 2,0 e 3,0 gSO₄²⁻.L⁻¹. Nestes perfis houve eficiências na remoção de sulfato superiores a 95%, para tempos de ciclo de 12, 20 e 28 horas. A carga aplicada, em termos de DQO, foi gerada pela adição de etanol, garantindo uma relação de DQO/[SO₄²⁻] de 2,0 durante a primeira fase (0,25 mgSO₄²⁻) da operação. Nesta fase foi registrada a maior eficiência em termos de remoção de SO₄²⁻ (99%). Nas fases seguintes (II, III, IV e V), tentou-se manter esta relação, mas os valores reduziram-se para 1,9±0,7 (Fase II), 1,8±0,3 (Fase III), 1,6±0,4 (Fase IV) e 1,5±0,3 Fase (V). A eficiência de sulfato manteve-se acima de 80% (89% na Fase III) e observou-se menor necessidade de matéria orgânica para a redução de SO₄²⁻, mesmo com maior carga aplicada. Os autores constataram que essa diminuição de consumo de matéria orgânica (etanol) pode estar ligada à queda da atividade metanogênica, principalmente nas Fases IV e V, disponibilizando mais etanol para a redução de sulfato. O trabalho mostrou o potencial no tratamento de águas residuárias ricas em sulfato via processo biológico anaeróbio, com eficiências médias entre 84 e 92%, e a viabilidade da implementação do reator em escala plena na Indústria fornecedora do esgoto industrial utilizado na pesquisa.

3.7 Considerações finais

O potencial tóxico de sulfato em águas residuárias leva à necessidade de tratamento, o qual por processo físico-químico como osmose reversa ou precipitação, tem alto custo e produz resíduo sólido. Assim, avanços no desenvolvimento de reatores anaeróbios tornaram a remoção biológica de sulfato uma alternativa técnica e economicamente viável, havendo recentes pesquisas e aplicações em escala plena que mostram o grande potencial desta tecnologia.

Estudos recentes elucidaram aspectos importantes da degradação do sulfato em biorreatores anaeróbios, como a competição entre arqueias metanogênicas e BRS na utilização de substrato e os parâmetros que influenciam esta competição. No entanto, a maioria destas pesquisas visou investigar o desempenho de reatores contínuos na remoção de sulfato. Além disso, mesmo com o emprego de reatores anaeróbios descontínuos na remoção de matéria orgânica ganhando destaque na última década, encontram-se poucos estudos sobre a aplicação deste tipo de reatores para o tratamento de esgoto rico em sulfato.

Neste contexto, o reator utilizado nesse trabalho foi o reator AnSBBR com biomassa imobilizada em espuma de poliuretano, que mostrou em estudos anteriores flexibilidade e estabilidade operacional para garantir a qualidade desejada do efluente e um bom desempenho, tanto na redução de sulfato quanto na remoção de matéria orgânica na forma de DQO.

Assim, para melhor entendimento do processo de remoção de sulfato em interação com o comportamento do reator em diferentes configurações operacionais, e tendo em vista a importância e escassez de trabalhos sobre o tema, este estudo vem trazer novas informações contribuindo para o desenvolvimento de uma nova tecnologia e propõe o estudo do AnSBBR

em distintas relações entre a carga orgânica e a concentração de sulfato, operado em batelada e batelada alimentada sequenciais, contendo biomassa imobilizada e utilizando agitação mecânica e “draft-tube”

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Fundamentos Teóricos

A análise dos resultados, quanto à eficiência e estabilidade da operação de sistemas de tratamento de águas residuárias para remoção de sulfato, requer o cálculo de algumas variáveis importantes, de forma que se considere os produtos da sulfetogênese.

4.1.1 Matéria Oxidável e Matéria Orgânica

A análise de DQO (Demanda Química de Oxigênio) 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.

Considerando que na água residuária só existam a matéria orgânica, o sulfeto na forma de sulfeto total dissolvido (STD), sendo este a soma dos compostos H_2S , HS^- e S^{2-} , e o sulfito como substâncias passíveis de oxidação, podemos concluir a Equação 4.1 para amostras não filtradas e a Equação 4.2 para amostras filtradas:

$$C_{\text{ST}} = C_{\text{SOT}} + (I_{\text{STD}} + I_{\text{SO}_3}) \quad (4.1)$$

$$C_{\text{SF}} = C_{\text{SOF}} + (I_{\text{STD}} + I_{\text{SO}_3}) \quad (4.2)$$

Nas quais:

C_{ST} = concentração de matéria oxidável total para amostras não filtradas (mgDQO.L^{-1}).

C_{SF} = concentração de matéria oxidável total para amostras filtradas (mgDQO.L^{-1}).

C_{SOT} = concentração de matéria orgânica total para amostras não filtradas (mgDQO.L^{-1}).

C_{SOF} = concentração de matéria orgânica para amostras filtradas (mgDQO.L^{-1}).

I_{STD} = concentração do sulfeto total dissolvido na forma de DQO (mgDQO.L^{-1}).

I_{SO_3} = concentração do sulfito na forma de DQO (mgDQO.L^{-1}).

Pela definição da DQO, toda a matéria oxidável é levada ao estado mais oxidado, tal que se relacione à oxidação pela solução sulfocrômica com a oxidação pelo oxigênio. Desta maneira, para determinar as influências das concentrações do STD e do sulfito na forma de DQO, recorre-se às 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} , estando as mesmas descritas pelas Equações 4.5 e 4.6, respectivamente.

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

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

Nas quais:

C_{STD} = concentração de sulfeto total dissolvido (mg.L^{-1}).

C_{SO_3} = concentração de sulfíto ($\text{mgSO}_3^{2-}.\text{L}^{-1}$).

Substituindo as Equações 4.5 e 4.6 nas Equações 4.1 e 4.2, podemos determinar as concentrações de matéria orgânica para amostras não filtradas e filtradas, conforme ilustrado pelas Equações 4.7 e 4.8, respectivamente:

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

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

Um parâmetro importante neste estudo, a razão entre matéria orgânica e sulfato ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$), foi variado ao longo dos ensaios, modificando assim a disponibilidade de aceptores de elétrons (SO_4^{2-}) para as bactérias redutoras de sulfato (BRS) na remoção do substrato.

Estas razões foram determinadas para as amostras do meio afluyente (Equação 4.9) e durante os perfis de DQO e sulfato (Equação 4.10):

$$\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]^{\text{af}} = C_{\text{ST}}^{\text{af}}/C_{\text{SO}_4}^{\text{af}} \quad (4.9)$$

$$\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]^{\text{P}} = C_{\text{SOF}}^{\text{P}}/C_{\text{SO}_4}^{\text{P}} \quad (4.10)$$

Nas quais:

$C_{\text{ST}}^{\text{af}}$ = concentração de matéria orgânica no afluyente para amostras não filtradas

(mgDQO.L⁻¹).

$C_{\text{SO}_4}^{\text{af}}$ = concentração de sulfato no afluyente (gSO₄²⁻.L⁻¹).

$C_{\text{SOF}}^{\text{P}}$ = concentração de matéria orgânica para amostras de perfil filtradas (mgDQO.L⁻¹).

$C_{\text{SO}_4}^{\text{P}}$ = concentração de sulfato da amostra de perfil (mgSO₄²⁻.L⁻¹).

4.1.2 Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) e Sulfeto na Forma HS⁻ Dissolvidos

A concentração de sulfeto determinada nas amostras corresponde à soma das formas de sulfeto presentes (HS⁻, H₂S e S²⁻ dissolvidos), e é chamada de sulfeto total dissolvido (STD). O cálculo da concentração dos ânions 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. (1998), a presença do íon S²⁻ não ocorre na faixa de pH onde a digestão anaeróbia ocorre.

Desta forma, o trabalho de Muthumbi et al. (2001) apresenta uma relação entre o

sulfeto total dissolvido (STD) e o sulfeto de hidrogênio livre (H_2S), dependente do pH, mostrada pela Equação 4.11:

$$C_{H_2S} = \frac{C_{STD}}{1 + 10^{pH - pKa}} \quad (4.11)$$

Na qual:

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

C_{STD} = concentração de sulfeto total dissolvido ($mgSTD.L^{-1}$).

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

Desta maneira, o cálculo da concentração de sulfeto na forma HS^- (C_{HS}) pode ser realizado conforme a Equação 4.12:

$$C_{HS} = C_{STD} - C_{H_2S} \quad (4.12)$$

Na qual:

C_{HS} = 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), durante um determinado tempo por unidade de volume do reator.

O cálculo da carga orgânica aplicada está relacionado com a concentração afluyente de matéria orgânica, e é definido pela Equação 4.13:

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

Na qual:

COA_{ST} = carga orgânica volumétrica aplicada $[gDQO.(L.d)^{-1}]$.

C_{ST}^{af} = concentração de matéria orgânica no afluyente para amostras não filtradas $(gDQO.L^{-1})$.

V_A = Volume alimentado por ciclo $(L.ciclo^{-1})$.

N = Número de ciclos por dia $(ciclos.dia^{-1})$.

V_R = 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. O cálculo da remoção de matéria oxidável e orgânica, para amostras não filtradas e filtradas, pode ser verificado pelas Equações 4.14 a 4.17:

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

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

$$COR_{SOT} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{SOT}) \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.16)$$

$$COR_{SOF} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{SOF}) \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.17)$$

Nas quais:

COR_{ST} = carga de matéria oxidável total volumétrica removida $[gDQO.(L.d)^{-1}]$.

C_{ST} = concentração de matéria oxidável total no efluente para amostras não filtradas
($mgDQO.L^{-1}$).

COR_{SF} = carga de matéria oxidável filtrada volumétrica removida $[gDQO.(L.d)^{-1}]$.

C_{SF} = concentração de matéria oxidável total no efluente para amostras filtradas
($mgDQO.L^{-1}$).

COR_{SOT} = carga orgânica total volumétrica removida $[gDQO.(L.d)^{-1}]$.

C_{SOT} = concentração de matéria orgânica total no efluente para amostras não filtradas
($mgDQO.L^{-1}$).

COR_{SOF} = carga orgânica filtrada volumétrica removida $[gDQO.(L.d)^{-1}]$.

C_{SOF} = concentração de matéria orgânica total no efluente para amostras filtradas
($mgDQO.L^{-1}$).

O mesmo princípio pode ser aplicado para o sulfato como substrato. Neste caso, a carga de sulfato volumétrica é definida como a quantidade de sulfato, aplicada (CSA) ou removida (CSR), durante um determinado tempo por unidade de volume do reator.

A Equação 4.18 define a carga de sulfato aplicada, enquanto que a Equação 4.19 define a carga de sulfato removida do reator:

$$CSA = \frac{C_{SO4}^{af} \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.18)$$

$$CSR = \frac{(C_{SO4}^{af} - C_{SO4}) \cdot V_A \cdot N}{V_R} \quad (4.19)$$

Nas quais:

CSA = carga volumétrica de sulfato aplicada [gDQO.(L.d)⁻¹].

C_{SO₄^{af}} = concentração de sulfato no afluente (gSO₄²⁻.L⁻¹).

CSR = carga volumétrica de sulfato removida [gDQO.(L.d)⁻¹].

C_{SO₄} = concentração de sulfato no efluente (gSO₄²⁻.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) durante um determinado tempo 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 4.20:

$$COA_{ST} = \frac{C_{ST}^{af} \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot C_{XSVT}} \quad (4.20)$$

Na qual:

COAE_{ST} = carga orgânica específica aplicada [mgDQO.(gSVT.d)⁻¹].

C_{ST}^{af} = concentração de matéria orgânica no afluente para amostras não filtradas
(mgDQO.L⁻¹).

C_{XSVT} = Concentração de biomassa no reator (gSVT.L⁻¹).

A carga orgânica removida específica pode ser calculada tanto para a matéria oxidável como para a matéria orgânica, visto que no afluente esta distinção não existe. O cálculo da remoção específica de matéria oxidável e orgânica, para amostras não filtradas e filtradas, pode ser verificado pelas Equações 4.21 a 4.24:

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

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

$$CORE_{SOT} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{SOT}) \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot C_{XSVT}} \quad (4.23)$$

$$CORE_{SOF} = \frac{(C_{ST}^{af} - C_{SOF}) \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot C_{XSVT}} \quad (4.24)$$

Nas quais:

$CORE_{ST}$ = carga de matéria oxidável total específica removida [mgDQO.(gSVT.d)⁻¹].

C_{ST} = concentração de matéria oxidável total no efluente para amostras não filtradas
(mgDQO.L⁻¹).

$CORE_{SF}$ = carga de matéria oxidável filtrada específica removida [mgDQO.(gSVT.d)⁻¹].

C_{SF} = concentração de matéria oxidável total no efluente para amostras filtradas
(mgDQO.L⁻¹).

$CORE_{SOT}$ = carga orgânica total específica removida [mgDQO.(gSVT.d)⁻¹].

C_{SOT} = concentração de matéria orgânica total no efluente para amostras não filtradas
(mgDQO.L⁻¹).

$CORE_{SOF}$ = carga orgânica filtrada específica removida [mgDQO.(gSVT.d)⁻¹].

C_{SOF} = concentração de matéria orgânica total no efluente para amostras filtradas
(mgDQO.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), durante um determinado tempo por grama de biomassa, em termos de SVT.

A Equação 4.25 define a carga de sulfato aplicada específica, enquanto que a Equação 4.26 define a carga de sulfato removida específica do reator:

$$CSAE = \frac{C_{SO_4}^{af} \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot C_{XSVT}} \quad (4.25)$$

$$CSRE = \frac{(C_{SO_4}^{af} - C_{SO_4}) \cdot V_A \cdot N}{V_R \cdot C_{XSVT}} \quad (4.26)$$

Nas quais:

CSAE = carga de sulfato específica aplicada [mgDQO.(gSVT.d)⁻¹].

C_{SO₄}^{af} = concentração de sulfato no afluente (mgSO₄²⁻.L⁻¹).

CSRE = carga de sulfato específica removida [mgDQO.(gSVT.d)⁻¹].

C_{SO₄} = concentração de sulfato no efluente (mgSO₄²⁻.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 (4.27):

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

Na qual:

E_{ST} = eficiência de remoção da matéria oxidável total para amostras não filtradas (%).

Esta eficiência pode ser calculada, também, para amostras filtradas (E_{SF}), onde a concentração de sólidos suspensos não é considerada, conforme demonstrado pela Equação (4.28):

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

Na qual:

E_{SF} = eficiência da remoção da matéria oxidável total para amostras filtradas (%).

Analogamente, também pode-se calcular as eficiências de remoção da matéria orgânica no reator (E_{SOT} e E_{SOF} , respectivamente) para amostras não filtradas e filtradas, através das Equações (4.29) e (4.30):

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

$$E_{SOF} = \frac{C_{ST}^{af} - C_{SOF}}{C_{ST}^{af}} \cdot 100 \quad (4.30)$$

Nas quais:

E_{SOT} = eficiência da remoção da matéria orgânica total para amostras não filtradas (%).

E_{SOF} = eficiência da remoção da matéria orgânica para amostras filtradas (%).

Da mesma maneira, pode-se definir a eficiência da remoção total de sulfato (E_{SO_4}), de acordo com a Equação (4.31):

$$E_{SO_4} = \frac{C_{SO_4}^{af} - C_{SO_4}}{C_{SO_4}^{af}} \cdot 100 \quad (4.31)$$

Na qual:

E_{SO_4} = eficiência da remoção de sulfato (%).

4.2 Materiais

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

A Figura 4.1 mostra o esquema do reator proposto por Ratusznei et al. (2000) com agitação mecânica (impelidor tipo hélice), operado em batelada e batelada alimentada sequenciais e contendo biomassa imobilizado em espuma de poliuretano (PU). O volume ocupado pela biomassa imobilizada na espuma de PU foi de 0,5 L e o volume do meio líquido residual no reator foi 1,5 L . O volume alimentado e descarregado por ciclo foram ambos de 2,0 L e o volume útil do reator foi de 4,0 L . A câmara aclimatizada usada durante os ensaios garantiu a operação do reator com uma temperatura de $30 \pm 1^\circ\text{C}$.

O “draft-tube” utilizado neste trabalho, um tubo de PVC fixado no centro do reator, teve como função de melhorar e uniformar a recirculação da água residuária tratada no reator.

Figura 4.1 – Biorreator anaeróbico com agitação mecânica realizado por impelidor tipo hélice e “draft-tube”, contendo biomassa imobilizada.

A seguir, são apresentadas as fotografias de detalhes do sistema. A Figura 4.2 mostra o sistema de automação e as bombas, além do reator em operação. A Figura 4.3 apresenta a montagem do “draft-tube” e o enchimento com biomassa imobilizada em espuma de poliuretano. A Figura 4.4 ilustra o detalhe do impelidor tipo hélice de três pás utilizado em todas as operações.

Figura 4.2 – Sistema de automação, bombas e reator anaeróbio.

Figura 4.3 – Montagem do “draft-tube” e biomassa imobilizada em espuma de poliuretano.

Figura 4.4 – Impelidor tipo hélice utilizado em todas as condições experimentais.

4.2.2 Inóculo

O inóculo utilizado em todos os experimentos foi proveniente de reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), tratando água residuária de abatedouro de aves (Avícola Dacar S.A.), sediada em Tietê, SP. O lodo apresentava concentração inicial, em termos de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis totais (SVT), de 64,1 gST.L⁻¹ e 52,8 gSVT.L⁻¹, respectivamente.

4.2.3 Meio suporte para a imobilização da biomassa

O suporte de imobilização da biomassa foi espuma de poliuretano na forma de cubos de 5 mm de aresta, com densidade aparente de 23 kg.m⁻³ e porosidade próxima a 95%. A espuma foi produzida sem adição de corantes ou aditivos pela empresa Edmil Indústria e Comércio, localizada na cidade de Elói Mendes, MG. Testes de adesão realizados por Silva (2005) mostraram o bom desempenho deste material na imobilização de BRS.

4.2.4 Água Residuária – Esgoto Sintético Enriquecido com Sulfato

A água residuária sintética apresentou a DQO de aproximadamente 500 mg.L⁻¹ e teve a composição conforme descrita na Tabela 4.1 (TORRES, 1992). Em adição, foram acrescentadas 3 gotas.L⁻¹ de detergente comercial, com a finalidade de emulsionar o óleo de soja. O sulfato suplementado se encontrou na forma de sulfato de sódio (Na₂SO₄) e a Tabela 4.2 mostra a concentração de Na₂SO₄ utilizada em cada relação DQO/[SO₄²⁻]. Os sais acrescentados ao afluente se encontraram em concentrações conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.1 – Composição da água residuária sintética.

Constituinte	Concentração (mg.L ⁻¹)
Sacarose	35
Amido	114
Extrato de Carne	208
Óleo de Soja	51
Detergente	112
Bicarbonato de Sódio (NaHCO ₃)	200

Tabela 4.2 – Concentração de Na₂SO₄ e SO₄²⁻ para cada relação DQO/[SO₄²⁻].

Relação DQO/[SO ₄ ²⁻]	Concentração Na ₂ SO ₄ (mg.L ⁻¹)	[SO ₄ ²⁻] (mg.L ⁻¹)
1,34	552	373
0,67	1103	746
0,34	2207	1493

Tabela 4.3 – Composição da solução de sais.

Constituinte	mg.L ⁻¹
Cloreto de Magnésio (MgCl ₂ .6H ₂ O)	7,5
Cloreto de Cálcio (CaCl ₂ .2H ₂ O)	4,5
Cloreto de Sódio (NaCl)	250

Os valores da Tabela 4.2 foram obtidos através do cálculo estequiométrico, relacionando as massas moleculares do sulfato (SO₄²⁻, 96 g.mol⁻¹) e do sulfato de sódio (Na₂SO₄, 142 g.mol⁻¹). Desta maneira, a concentração de sulfato a partir de uma concentração de sulfato de sódio é dado pela Equação (4.32):

$$[SO_4^{2-}] = \frac{96}{142} \cdot [Na_2SO_4] \quad (4.32)$$

Na qual:

[SO₄²⁻] = concentração do íon sulfato (mgSO₄²⁻.L⁻¹).

[Na₂SO₄] = concentração do sulfato de sódio (mgNa₂SO₄.L⁻¹).

4.3 Métodos analíticos

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), ácidos voláteis totais e intermediários (AVI), e 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 Ripley et al. (1986), na determinação da alcalinidade.

As análises cromatográficas em fase gasosa foram realizadas com um cromatógrafo Hewlett Packard® modelo 6890, para quantificar os ácidos voláteis intermediários e a composição do biogás (CH₄ e CO₂). Para a análise dos AVI o cromatógrafo utilizou um detector de ionização de chama e coluna Hewlett Packard® Innowax com 30 m de comprimento, 0,25 mm de diâmetro interno e 0,25 µm de espessura do filme. O gás de arraste usado foi o hidrogênio, a uma vazão de 30 mL.min⁻¹, a temperatura do injetor foi igual a 250 °C, a razão de “split” de 20 e o volume de injeção de 1,0 µL. A produção de metano e a composição do biogás foram analisadas por gasômetro de deslocamento de solução de NaOH (concentração 50 g.L⁻¹) para absorção do CO₂. A temperatura da coluna, do injetor e do detector foram 35, 60 e 160 °C e o volume de cada amostra coletada foi de 1 mL.

Ao término dos ensaios, depois de 302 dias de operação, foi realizada a quantificação da biomassa na espuma de poliuretano, em termos de sólidos voláteis totais (SVT). Assim, foram obtidas a quantidade de biomassa presente no reator (X_{SVT}), a concentração (C_{XSVT}) e a

concentração específica (C_{XSVT}), em termos de massa de sólidos voláteis totais (gSVT) por massa espuma de poliuretano (gEPU).

4.3.2 Exames Microbiológicos

Os exames microbiológicos do lodo anaeróbio foram realizados por contraste de fases utilizando microscópio Olympus modelo BH2. Uma prévia caracterização das comunidades microbianas presentes foi realizada conforme Holt et al., (1994).

4.4 Procedimento experimental

4.4.1 Imobilização da Biomassa Anaeróbia

Para a configuração com biomassa imobilizada, o lodo foi imobilizado no suporte de espuma de poliuretano, conforme metodologia proposta por Zaiat et al. (1994). A espuma de poliuretano foi misturada com lodo até que estivesse completamente impregnada pela biomassa ativa. Este contato se deu por 2 horas. Decorrido este período, a espuma com a biomassa imobilizada foi colocada no reator. Em seguida, o reator foi alimentado com o mesmo meio utilizado nos experimentos para lavagem das células fracamente aderidas. O meio foi drenado e o inóculo estava pronto para o reator.

4.4.2 Estudo da influência da relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ e da estratégia de alimentação sobre a estabilidade do processo e a eficiência de remoção de matéria orgânica e de sulfato

A operação do biorreator foi realizada a temperatura de $30 \pm 1^\circ\text{C}$, utilizando-se um ciclo de operação de 8 horas (ou 480 minutos), ou seja, três ciclos por dia. A capacidade do reator foi de 4 litros e o volume tratado por ciclo foi de 2 litros, tal que o volume ocupado pela biomassa e a espuma de PU era de 0,5 litro e houve um volume residual de 1,5 litro de água residuária. A frequência de agitação foi fixada em 400 rpm, realizada por um impelidor tipo hélice (inclinação das pás: 45°) em um “draft-tube”, valor este definido a partir do trabalho de Michelin (2006).

As fases de enchimento e reação dependeram da estratégia de operação utilizada: batelada ou batelada alimentada. Na operação em batelada, o enchimento ocorreu em 10 min e na operação em batelada alimentada, o enchimento ocorreu em 3 e 6 horas como, mostrado na Tabela 4.4. Após o esvaziamento do reator, foi estabelecido um intervalo de tempo de 1 min como segurança no sincronismo de operação das duas bombas usadas na alimentação e descarga, controladas por temporizadores, para então, o próximo ciclo ser iniciado.

Tabela 4.4 – Tempos de enchimento para as estratégias de alimentação propostas.

Estratégias de Alimentação		Tempos de Alimentação
Batelada	(B)	10 min
Batelada Alimentada 1	(FB1)	180 min
Batelada Alimentada 2	(FB2)	360 min

A investigação da influência da relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ sobre a eficiência e estabilidade do processo foi executada através da operação do reator com uma concentração fixa de matéria orgânica da água residuária sintética de 500 mgDQO.L^{-1} , conforme os trabalhos de Orra et al. (2004) e Sarti et al. (2005) visto que o período reacional foi de 8 horas, portanto compatível com a carga orgânica aplicada.

O projeto foi executado em 9 ensaios, submetidos às relações de $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ iguais a 1,34, 0,67 e 0,34. Estes valores foram estipulados a partir da relação teórica estabelecida por Lens et al. (1998), para a qual o reator opera em condições estritamente sulfetogênicas ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 0,67$). Um exemplo para o cálculo desta razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ está apresentada nas Equações 4.33 (sulfetogênese) e 4.34 (redução de O_2).

$$\frac{3 \cdot 96}{2 \cdot 46} \quad \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}/(\text{SO}_4^{2-}) = 92/288$$

e

$$\frac{46}{3 \cdot 32} \quad \text{DQO}/\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} = 96/46 = 2,09$$

Desta forma, para a oxidação de etanol, pode-se calcular a relação teórica entre DQO e SO_4^{2-} , apresentada na Equação 4.35:

$$\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = (92 \cdot 2,09)/288 = 0,67$$

Durante um ensaio preliminar, que durou 27 dias, foram observadas a partida do

reator, a adaptação prévia da biomassa e a familiarização dos métodos analíticos a serem implementados. Nesta condição, o reator foi alimentado de maneira similar à descrita na condição Ia (batelada), ou seja, com um meio contendo sulfato na relação DQO/[SO₄²⁻] de 1,34.

Nos três primeiros ensaios (Ia à Ic, na Tabela 4.5) o reator operou nos três modos de alimentação propostos, tendo uma razão DQO/[SO₄²⁻] de 1,34. Estes ensaios tiveram como finalidade comparar os resultados de operação quanto à eficiência (de remoção da matéria orgânica e de sulfato) e estabilidade nas diferentes estratégias de alimentação.

Os seis outros ensaios com razões DQO/[SO₄²⁻] de 0,67 (IIa a IIc na Tabela 4.5) e 0,34 (IIIa a IIIc na Tabela 4.5) se destinaram a obter dados para comparar o efeito da razão DQO/[SO₄²⁻] em cada modo de alimentação estudado, além de avaliar a estratégia de alimentação mais eficiente.

Tabela 4.5 – Delineamento experimental da investigação da influência da relação DQO/[SO₄²⁻] e da estratégia de alimentação sobre a eficiência e estabilidade do biorreator.

Condições Experimentais		Estratégia de Alimentação		
		Batelada	Bat. Alimentada 1 (FB1)	Bat. Alimentada 2 (FB2)
Razão DQO/[SO ₄ ²⁻]	1,34	Ia (42 dias)	Ib (30 dias)	Ic (36 dias)
	0,67	IIa (34 dias)	IIb (22 dias)	IIc (35 dias)
	0,34	IIIa (27 dias)	IIIb (27 dias)	IIIc (22 dias)

Deste modo, foram iniciados os experimentos com 500 mgDQO.L⁻¹, operando o biorreator pelo período proposto para cada ensaio, variando o tempo de enchimento de 10 minutos para 180 e finalmente para 360 minutos, sempre verificando o comportamento do sistema. Ressalta-se que a carga orgânica volumétrica resultante foi de 0,75 gDQO.(L.d)⁻¹, valor este dentro do intervalo encontrado em literatura e adequado para ser tratado no período

reacional adotado.

O monitoramento do reator foi feito por amostras do afluente e do efluente, medindo-se as concentrações de substrato (medida como demanda química de oxigênio – DQO) e de sulfato, sulfeto, sulfito, de alcalinidade parcial (AP), de alcalinidade intermediária (AI), de alcalinidade total (AT), de alcalinidade a bicarbonato (AB), de ácidos voláteis (AV), de sólidos totais (ST), de sólidos voláteis totais (SVT), de sólidos suspensos totais (SST) e de sólidos suspensos voláteis (SSV), além das medidas de pH e do volume descarregado.

Depois de atingida a estabilidade operacional, foi realizado o perfil ao longo do ciclo de operação de algumas destas variáveis monitoradas. Este perfil foi obtido através da retirada de amostras ao longo das 8 horas de operação de um ciclo. As variáveis de interesse foram concentrações de substrato na forma filtrada (DQO), de sulfato, dos ácidos voláteis totais e intermediários, alcalinidade a bicarbonato, pH e potencial de oxi-redução, além da produção de metano, sulfeto e sulfito. Estes perfis possibilitaram uma melhor compreensão das rotas de degradação ao longo de um ciclo.

As amostras retiradas para obtenção do perfis anteriormente citado foram coletadas em intervalos de tempos de 30 a 60 min, conforme o tipo de variável medida, tendo-se a preocupação de que o volume total retirado por ciclo fosse no máximo de 400 mL, ou seja, 10% da capacidade do reator.

Após obtenção destes perfis, a condição de operação foi mudada, ou seja, o tempo de alimentação foi aumentado, no caso da operação em batelada, ou então foi mudada a relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ do afluente, iniciando-se uma nova fase de operação. O tempo previsto para realização de cada fase foi escolhido pela experiência nos trabalhos já realizados e em andamento nos Laboratórios de Engenharia Bioquímica da EEM-IMT e de Processos Biológicos da EESC-USP.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados em forma de tabelas e gráficos, junto a uma interpretação e discussão dos dados obtidos durante 302 dias de ensaios.

O primeiro ensaio a ser apresentado, o ensaio preliminar, serviu para a adaptação prévia do inóculo às condições operacionais do reator e para o ajuste dos métodos analíticos e operacionais a serem utilizados no trabalho. Após este ensaio, são mostrados os resultados dos ensaios das condições I, II e III, nos quais o reator operou com diferentes razões de $DQO/[SO_4^{2-}]$ e estratégias de alimentação.

Para cada ensaio das condições I, II e III é apresentada uma tabela resumindo os valores do monitoramento, seguida pelos gráficos das variáveis monitoradas durante o ensaio. Uma comparação em forma de histogramas de valores escolhidos do monitoramento das três diferentes estratégias de alimentação de cada condição é apresentada e, finalmente, são discutidos os dados dos perfis, apresentados em forma de gráficos. Esta parte do capítulo serve, principalmente, para discutir o efeito da estratégia de alimentação na sulfetogênese e remoção de substrato.

O capítulo é concluído com uma comparação geral das três condições principais I, II e III com suas diferentes estratégias de alimentação, verificando os possíveis efeitos da razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ na remoção de sulfato e matéria orgânica. A discussão sobre o desempenho do reator relativo à remoção de matéria orgânica é baseada nos valores monitorados da concentração de matéria orgânica filtrada. Desta 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 operação com tempos de alimentação de 10 min, 3 h e 6 h.

Inicialmente, vale mostrar que após a conclusão da parte experimental foi calculado o valor estimativo da quantidade de biomassa presente no reator (X_{SVT}), a concentração (C_{XSVT}), em termos de sólidos voláteis totais (SVT), e a concentração específica (C_{XSVT}'), em termos de massa de sólidos voláteis totais (gSVT) por massa espuma de poliuretano (gEPU). Os resultados são mostrados na Tabela 5.1, e admite-se que os valores podem ser considerados válidos para todos os ensaios, pois não houve perda ou suplementação de inóculo e o volume ocupado pela biomassa se manteve constante.

Tabela 5.1 – Quantidade de biomassa no reator (X_{SVT}), concentração de biomassa (C_{XSVT}) e concentração específica de biomassa (C_{XSVT}').

Variáveis	
X_{SVT} (gSVT)	72,1
C_{XSVT} (gSVT.L ⁻¹)	18,0
C_{XSVT}' (gSVT.gEPU ⁻¹)	1,3

* Volume total de meio líquido igual a 4 L.

As quantidades e concentrações de biomassa no reator são variáveis necessárias para determinar as cargas específicas aplicadas e removidas no reator, que são importantes parâmetros de comparação de eficiência.

5.1 Ensaio Preliminar

Após a montagem e a inoculação do reator com a biomassa imobilizada em espuma de poliuretano (PU), antes armazenada em temperatura de 4°C, foi iniciada a etapa do ensaio preliminar. Este ensaio serviu para ajustar a metodologia utilizada nas análises, para ajustar a operação do AnSBBR e para esperar uma adaptação prévia da biomassa às condições do reator. No decorrer das primeiras semanas, também foi ajustada a rotação da agitação (400 rpm) para otimizar a mistura do meio e a transferência de massa no reator. As bombas de alimentação foram limpadas após 14 dias de ensaio e a bomba de descarga depois do término do ensaio.

Durante 27 dias, o reator foi operado de modo semelhante à condição I (batelada com razão $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$). O encerramento do ensaio preliminar foi justificado com a estabilidade observada no processo da digestão anaeróbia, indicada pelos gráficos de remoção de matéria orgânica e de sulfato (Figuras 5.1 a 5.3), pela produção estável de alcalinidade a bicarbonato e pelos níveis baixos dos ácidos voláteis (Figura 5.7).

Os dados do monitoramento obtidos durante o ensaio preliminar estão apresentados na Tabela 5.2. Os valores monitorados das concentrações de sulfito (C_{SO_3}) no efluente foram descartados, devido aos ajustes feitos na metodologia da análise durante o ensaio.

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

Variável	Afluente		Efluente	
			Ensaio Preliminar	
C_{ST} (mgDQO.L ⁻¹)	526 ±31	(14)	69 ±22	(9)
E_{ST} (%)	-		87 ±4	(9)
C_{SF} (mgDQO.L ⁻¹)	-		43 ±21	(9)
E_{SF} (%)	-		92 ±4	(9)
C_{SOT} (mgDQO.L ⁻¹)	-		49 ±22	(9)
E_{SOT} (%)	-		91 ±4	(9)
C_{SOF} (mgDQO.L ⁻¹)	-		23 ±21	(9)
E_{SOF} (%)	-		96 ±4	(9)
C_{SO4} (mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)	363 ±49	(13)	271 ±41	(8)
E_{SO4} (%)	-		25 ±11	(8)
$DQO/[SO_4^{2-}]^{**}$	1,46 ±0,19	(11)	0,14 ±0,07	(8)
STD (mgSTD.L ⁻¹)	-		14 ±8	(9)
C_{H2S} (mgH ₂ S.L ⁻¹)	-		3 ±2	(9)
C_{HS} (mgHS ⁻ .L ⁻¹)	-		11 ±6	(9)
C_{SO3} (mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹)	-		-	
pH	8,8 ±0,3	(13)	7,6 ±0,2	(13)
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	193 ±12	(13)	382 ±79	(13)
AI/AP	0,3 ±0,0	(13)	0,2 ±0,1	(13)
AVT (mgHAc.L ⁻¹)	47 ±15	(13)	38 ±15	(13)
ST (mg.L ⁻¹)	1596 ±153	(6)	1520 ±251	(8)
SVT (mg.L ⁻¹)	494 ±186	(6)	536 ±138	(8)
SST (mg.L ⁻¹)	84 ±36	(6)	59 ±36	(8)
SSV (mg.L ⁻¹)	92 ±32	(6)	82 ±32	(8)

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

** Para as amostras do afluente, a razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ foi calculada usando a concentração de matéria oxidável (C_{ST}) para o valor da DQO. No caso do efluente, foi utilizada a concentração de matéria orgânica (C_{SOT}).

A Tabela 5.3 mostra as cargas de matéria orgânica aplicadas e removidas tanto os valores volumétricos quanto os específicos, sendo a carga orgânica volumétrica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA), a carga orgânica específica aplicada ($COAE_{ST}$) e a carga específica de sulfato aplicada ($CSAE$).

A Tabela 5.4 apresenta as cargas removidas de sulfato, tanto os valores volumétricos quanto os específicos, sendo a carga de matéria oxidável não filtrada volumétrica removida (COR_{ST}), a carga de matéria oxidável filtrada volumétrica removida (COR_{SF}), a carga de matéria orgânica não filtrada volumétrica removida (COR_{SOT}), a carga de matéria orgânica filtrada volumétrica removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato removida (CSR), a carga de matéria oxidável não filtrada específica removida ($CORE_{ST}$), a carga de matéria oxidável filtrada específica removida ($CORE_{SF}$), a carga de matéria orgânica não filtrada específica removida ($CORE_{SOT}$), a carga de matéria orgânica filtrada específica removida ($CORE_{SOF}$) e a carga específica de sulfato removida ($CSRE$)

Tabela 5.3 – Valores das cargas de matéria orgânica e sulfato aplicadas durante a operação no ensaio preliminar em batelada e com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34.

Variável	Cargas Aplicadas		
$COA_{ST} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	0,79	$\pm 0,05$	(14)
$CSA [gSO_4^{2-}.(L.d)^{-1}]$	0,55	$\pm 0,07$	(13)
$COAE_{ST} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	44	± 3	(14)
$CSAE [mgSO_4^{2-}.(gSVT.d)^{-1}]$	30	± 4	(13)

Tabela 5.4 – Valores das cargas de matéria orgânica e sulfato removidas durante a operação no ensaio preliminar (EP) em batelada e com uma relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34.

Variável	Cargas Removidas		
$\text{COR}_{\text{ST}} [\text{gDQO} \cdot (\text{L.d})^{-1}]$	0,72	$\pm 0,03$	(9)
$\text{COR}_{\text{SF}} [\text{gDQO} \cdot (\text{L.d})^{-1}]$	0,69	$\pm 0,03$	(9)
$\text{COR}_{\text{SOT}} [\text{gDQO} \cdot (\text{L.d})^{-1}]$	0,75	$\pm 0,03$	(9)
$\text{COR}_{\text{SOF}} [\text{gDQO} \cdot (\text{L.d})^{-1}]$	0,72	$\pm 0,03$	(9)
$\text{CSR} [\text{gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L.d})^{-1}]$	0,14	$\pm 0,06$	(8)
$\text{CORE}_{\text{ST}} [\text{mgDQO} \cdot (\text{gSVT.d})^{-1}]$	40	± 2	(9)
$\text{CORE}_{\text{SF}} [\text{mgDQO} \cdot (\text{gSVT.d})^{-1}]$	38	± 2	(9)
$\text{CORE}_{\text{SOT}} [\text{mgDQO} \cdot (\text{gSVT.d})^{-1}]$	42	± 2	(9)
$\text{CORE}_{\text{SOF}} [\text{mgDQO} \cdot (\text{gSVT.d})^{-1}]$	40	± 2	(9)
$\text{CSRE} [\text{mgSO}_4^{2-} \cdot (\text{gSVT.d})^{-1}]$	8	± 3	(8)

A Figura 5.1 mostra os valores de concentração de matéria oxidável no efluente e a eficiência de remoção de matéria oxidável. A Figura 5.2 ilustra a concentração de matéria orgânica no efluente e a eficiência de remoção de matéria orgânica durante o ensaio preliminar.

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 no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.

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 no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.

Os valores dos gráficos 5.1 e 5.2 indicam a estabilidade na remoção de matéria

orgânica e um leve descaimento da atividade microbiana, devido a uma melhor adaptação das BRS às condições do reator. A eficiência de remoção de matéria orgânica se manteve estável (Figura 5.2), atingiu o máximo após 5 dias de operação e caiu no fim do ensaio.

A Figura 5.3 mostra a concentração de sulfato no efluente e a eficiência de remoção de sulfato. Observa-se o aumento da atividade das BRS, a partir do 11^o dia da fase de adaptação. Além da produção de sulfeto, houve também uma oxidação da parte do sulfeto para enxofre elementar na interface do meio reacional com o ar presente no *headspace* do reator, formando uma incrustação na parede interna (Figura 5.5). Vale ressaltar que o reator sempre trabalhou sob condições de anaerobiose, como mostraram os perfis de oxigênio dissolvido das condições I a III.

Figura 5.3 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}) no reator operado no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.

Na Figura 5.4, pode-se observar as concentrações das duas formas de sulfeto presentes (HS^- e H_2S) no reator ao longo do monitoramento do ensaio preliminar e a soma destas concentrações, o sulfeto total dissolvido (STD).

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 no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.

No início do ensaio preliminar, houve pouca atividade das BRS e, portanto, uma baixa produção de sulfeto (Figura 5.4). Valores significantes de concentração de sulfeto no efluente foram registrados a partir do 24^o dia de ensaio.

Figura 5.5 – Sulfeto re-oxidado para enxofre elementar formando uma incrustação na parede interna do reator.

O pH e a alcalinidade a bicarbonato e os ácidos voláteis totais do efluente, respectivamente, mostram as Figuras 5.6 e 5.7.

Figura 5.6 – pH no reator operado no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.

Figura 5.7 – Concentração de alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no reator operado no ensaio preliminar na estratégia de alimentação de batelada.

A estabilidade atingida na produção de alcalinidade a bicarbonato (AB), praticamente desde o primeiro dia de ensaio, e o consumo estável dos ácidos voláteis (AVT) garantiram que o reator operasse na faixa ótima para a digestão anaeróbia logo a partir do 7º dia de operação, com valores de pH entre 7,3 e 7,7 (Figuras 5.6 e 5.7).

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

O reator operou nesta condição durante 108 dias, sendo que a operação em batelada (Ia – tempo de alimentação de 10 min) durou 42 dias, a operação em batelada alimentada FB 1 (Ib – tempo de alimentação de 3 h) 30 dias e batelada alimentada FB 2 (Ic – tempo de alimentação de 6 h) 36 dias.

Antes de iniciar a condição Ib, o reator foi limpo pela primeira vez, tirando o acúmulo de material viscoso e descompactando a espuma de poliuretano com a finalidade de melhorar a transferência de massa no reator. Depois desta limpeza inicial, o reator foi limpo ao término de cada ensaio. Assim como no ensaio preliminar, durante a operação em batelada (Ia), a limpeza da bomba de alimentação ocorreu a cada 14 dias e devido à baixa concentração de sólidos no efluente, a bomba de descarga foi limpa após cada ensaio. Nos ensaios de alimentação em batelada alimentada (Ib e Ic), notou-se um acúmulo de material viscoso na bomba e na tubulação de alimentação e a frequência de limpeza foi maior (semanalmente).

A seguir são apresentados os resultados do monitoramento em forma de tabelas (Tabela 5.5 a 5.7) e gráficos (Figuras 5.8 a 5.13). Uma análise comparativa entre as condições Ia, Ib e Ic é ilustrada nos histogramas das Figuras 5.14 a 5.16, enquanto que as Figuras 5.17 a 5.23 mostram os resultados dos perfis. 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.

5.2.1 Dados de Monitoramento

A Tabela 5.5 apresenta os valores médios monitorados durante a operação do reator com relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ constante de 1,34 para as três diferentes estratégias de alimentação.

A Tabela 5.6 mostra os valores da carga de matéria orgânica e da carga de sulfato aplicadas (cargas volumétricas e específicas). A Tabela 5.7 apresenta as cargas de matéria orgânica e de sulfato removida (cargas volumétricas e cargas específicas) e também as diferenças entre carga de matéria oxidável e carga de matéria orgânica. A comparação destes parâmetros será discutida após a apresentação dos gráficos dos dados de monitoramento.

Tabela 5.5 – Resultados médios das variáveis monitoradas durante a operação em Condição I
($DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$)*.

Variável	Afluente I	Efluente					
		Condição Ia		Condição Ib		Condição Ic	
C_{ST} (mgDQO.L ⁻¹)	502 ±27 ⁽⁴³⁾	122 ±18	⁽²⁰⁾	200 ±38	⁽¹⁶⁾	238 ±31	⁽¹⁶⁾
E_{ST} (%)	- -	75 ±4	⁽²⁰⁾	60 ±7	⁽¹⁶⁾	53 ±6	⁽¹⁶⁾
C_{SF} (mgDQO.L ⁻¹)	- -	87 ±20	⁽²⁰⁾	169 ±35	⁽¹⁶⁾	198 ±34	⁽¹⁶⁾
E_{SF} (%)	- -	83 ±4	⁽²⁰⁾	67 ±7	⁽¹⁶⁾	61 ±7	⁽¹⁶⁾
C_{SOT} (mgDQO.L ⁻¹)	- -	103 ±18	⁽²⁰⁾	149 ±29	⁽¹⁶⁾	159 ±23	⁽¹⁶⁾
E_{SOT} (%)	- -	79 ±4	⁽²⁰⁾	71 ±6	⁽¹⁶⁾	69 ±5	⁽¹⁶⁾
C_{SOF} (mgDQO.L ⁻¹)	- -	68 ±17	⁽²⁰⁾	117 ±29	⁽¹⁶⁾	119 ±30	⁽¹⁶⁾
E_{SOF} (%)	- -	86 ±3	⁽²⁰⁾	77 ±6	⁽¹⁶⁾	77 ±6	⁽¹⁶⁾
C_{SO4} (mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)	385 ±35 ⁽⁴⁶⁾	293 ±34	⁽¹⁴⁾	190 ±54	⁽¹⁴⁾	113 ±38	⁽²¹⁾
E_{SO4} (%)	- -	23 ±8	⁽¹⁴⁾	52 ±14	⁽¹⁴⁾	71 ±10	⁽²¹⁾
$DQO/[SO_4^{2-}]^{**}$	1,32 ±0,14 ⁽³⁸⁾	0,30 ±0,14	⁽¹⁴⁾	0,82 ±0,39	⁽¹⁴⁾	1,08 ±0,77	⁽²¹⁾
STD (mgSTD.L ⁻¹)	- -	9 ±4	⁽¹³⁾	24 ±10	⁽¹¹⁾	39 ±13	⁽⁹⁾
C_{H2S} (mgH ₂ S.L ⁻¹)	- -	3 ±1	⁽¹³⁾	6 ±2	⁽¹¹⁾	8 ±3	⁽⁹⁾
C_{HS} (mgHS ⁻ .L ⁻¹)	- -	6 ±3	⁽¹³⁾	17 ±8	⁽¹¹⁾	28 ±14	⁽⁹⁾
C_{SO3} (mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹)	- -	11 ±9	⁽¹⁷⁾	6 ±3	⁽⁹⁾	7 ±4	⁽⁷⁾
pH	8,7 ±0,2 ⁽²⁹⁾	7,4 ±0,2	⁽¹⁵⁾	7,5 ±0,2	⁽¹²⁾	7,6 ±0,1	⁽⁹⁾
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	192 ±27 ⁽²⁹⁾	379 ±68	⁽¹⁵⁾	562 ±37	⁽¹²⁾	460 ±33	⁽⁹⁾
AI/AP	0,3 ±0,0 ⁽²⁹⁾	0,3 ±0,2	⁽¹⁵⁾	0,3 ±0,1	⁽¹²⁾	0,3 ±0,0	⁽⁹⁾
AVT (mgHAc.L ⁻¹)	39 ±7 ⁽²⁹⁾	21 ±6	⁽¹⁵⁾	29 ±7	⁽¹²⁾	38 ±15	⁽⁹⁾
ST (mg.L ⁻¹)	1688 ±76 ⁽¹⁵⁾	1443 ±69	⁽⁵⁾	1537 ±70	⁽⁵⁾	1497 ±49	⁽⁵⁾
SVT (mg.L ⁻¹)	620 ±91 ⁽¹⁵⁾	489 ±215	⁽⁵⁾	560 ±57	⁽⁵⁾	614 ±27	⁽⁵⁾
SST (mg.L ⁻¹)	48 ±24 ⁽¹⁵⁾	58 ±33	⁽⁵⁾	71 ±26	⁽⁵⁾	82 ±24	⁽⁵⁾
SSV (mg.L ⁻¹)	36 ±15 ⁽¹⁵⁾	73 ±24	⁽⁵⁾	30 ±30	⁽⁵⁾	10 ±10	⁽⁵⁾

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

** Para as amostras do afluente a razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ foi calculada usando a concentração de matéria oxidável (C_{ST}) para o valor da DQO. No caso do efluente foi utilizada a concentração de matéria orgânica (C_{SOT}).

Observa-se que o valor de sólidos no reator mostrou estabilidade devido à boa retenção de sólidos na espuma de poliuretano.

Tabela 5.6 – Valores das cargas aplicadas de matéria orgânica e sulfato durante a operação em Condição I, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$.

Variável	Cargas Aplicadas		
$COA_{ST} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	0,75	$\pm 0,04$	(43)
$CSA [gSO_4^{2-}.(L.d)^{-1}]$	0,58	$\pm 0,05$	(46)
$COAE_{ST} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	42	± 2	(43)
$CSAE [mgSO_4^{2-}.(gSVT.d)^{-1}]$	32	± 3	(46)

Tabela 5.7 – Valores das cargas removidas de matéria orgânica e de sulfato durante a operação em Condição I, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 1,34$.

Variável	Cargas Removidas		
	Condição Ia	Condição Ib	Condição Ic
$COR_{ST} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	$0,56 \pm 0,03$ ⁽²⁰⁾	$0,47 \pm 0,09$ ⁽¹⁶⁾	$0,41 \pm 0,05$ ⁽¹⁶⁾
$COR_{SF} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	$0,61 \pm 0,03$ ⁽²⁰⁾	$0,50 \pm 0,05$ ⁽¹⁶⁾	$0,47 \pm 0,05$ ⁽¹⁶⁾
$COR_{SOT} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	$0,60 \pm 0,05$ ⁽²⁰⁾	$0,53 \pm 0,04$ ⁽¹⁶⁾	$0,53 \pm 0,04$ ⁽¹⁶⁾
$COR_{SOF} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	$0,64 \pm 0,02$ ⁽²⁰⁾	$0,58 \pm 0,04$ ⁽¹⁶⁾	$0,59 \pm 0,04$ ⁽¹⁶⁾
$CSR [gSO_4^{2-}.(L.d)^{-1}]$	$0,13 \pm 0,05$ ⁽¹⁴⁾	$0,30 \pm 0,08$ ⁽¹⁸⁾	$0,41 \pm 0,06$ ⁽²¹⁾
$CORE_{ST} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	31 ± 2 ⁽²⁰⁾	26 ± 5 ⁽¹⁶⁾	23 ± 3 ⁽¹⁶⁾
$CORE_{SF} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	34 ± 2 ⁽²⁰⁾	28 ± 3 ⁽¹⁶⁾	26 ± 3 ⁽¹⁶⁾
$CORE_{SOT} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	33 ± 3 ⁽²⁰⁾	30 ± 2 ⁽¹⁶⁾	29 ± 2 ⁽¹⁶⁾
$CORE_{SOF} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	36 ± 1 ⁽²⁰⁾	32 ± 2 ⁽¹⁶⁾	33 ± 2 ⁽¹⁶⁾
$CSRE [mgSO_4^{2-}.(gSVT.d)^{-1}]$	7 ± 3 ⁽¹⁴⁾	17 ± 4 ⁽¹⁸⁾	23 ± 3 ⁽²¹⁾

A Figura 5.8 mostra a eficiência de remoção de matéria oxidável e a concentração de matéria oxidável no efluente, tanto das amostras filtradas quanto das não filtradas. Na Figura 5.9, pode-se observar a eficiência de remoção de matéria orgânica e a concentração de matéria orgânica encontradas nas análises durante a fase de monitoramento.

Figura 5.8 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF}) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

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

Analisando as Figuras 5.8 e 5.9 é possível verificar que, após a fase de adaptação prévia, a concentração de matéria orgânica filtrada apresentou valores baixos durante o primeiro ensaio em batelada (média de 68 mgDQO.L⁻¹) e se manteve estável, com valores mais altos, nos dois ensaios em batelada alimentada (média de 117 e 119 mgDQO.L⁻¹), correspondendo aos valores de eficiência de remoção de matéria orgânica filtrada de 86%, e 77%, respectivamente.

Os motivos para o aumento das concentrações de matéria orgânica no reator durante a alimentação em batelada podem estar relacionados à maior atividade dos microrganismos sulfetogênicos nestas condições, desfavorecendo a oxidação completa do substrato em um ciclo de tratamento de 8 horas. Além disso, pode ter ocorrido um possível efeito inibidor do sulfeto sobre a biomassa responsável pela degradação de substrato. Um indício para uma interferência destes dois fatores são os níveis maiores de remoção de matéria orgânica (84%) em reatores com configurações parecidas (substrato, imobilização da biomassa, tempo de ciclo), tratando esgoto sintético sem adição de sulfato de sódio (RATUSZNEI et al., 2003).

Nas figuras também se pode observar uma resposta rápida do reator às diferentes condições operacionais implementadas.

A Figura 5.10 apresenta a eficiência na remoção de sulfato e a concentração de SO_4^{2-} ao longo do tempo, na qual se pode observar que a concentração de sulfato no efluente diminuiu significativamente conforme aumentou do tempo de alimentação. Registraram-se concentrações de sulfato de $275 \text{ mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$ no fim da condição Ia, $128 \text{ mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$ no último dia de monitoramento da condição Ib e $101 \text{ mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$ no fim da condição Ic. Os valores de eficiência de remoção de sulfato referentes aos valores da concentração foram, respectivamente, 27% (Ia), 67% (Ib) e 74% (Ic).

Durante o ensaio Ia, notou-se uma oscilação dos valores da concentração de sulfato indicando uma dificuldade das BRS se adaptarem à alimentação em batelada. A partir da Figura 5.10 também se pode inferir que ao mudar a estratégia de alimentação, foi necessário um prazo maior para que a remoção de sulfato atingisse estabilidade (20 dias nos ensaios Ib e Ic) comparado à remoção de matéria orgânica.

Figura 5.10 – 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).

A evolução da razão entre a carga de sulfato removido (CSR) e a carga de matéria orgânica removida (COR_{SOF}) é apresentada na Figura 5.11, que mostra a melhora da remoção de sulfato com o aumento do tempo de alimentação. Pode-se verificar que houve uma menor oxidação de matéria orgânica com tempos de alimentação mais longos (Figura 5.9). Porém, o aproveitamento de matéria orgânica oxidada por unidade de sulfato reduzido foi, em média, três vezes maior durante os ensaios da condição Ic (0,70) do que nos ensaios da condição Ia (0,23) o que pode indicar uma maior assimilação de matéria orgânica pelas bactérias sulfetogênicas nestas condições e um desfavorecimento das arqueias metanogênicas.

Figura 5.11 – Razão entre a carga de sulfeto removida (CSR) e a carga de matéria orgânica filtrada removida (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 Figura 5.12 permite a análise dos valores da concentração das duas formas de sulfeto presentes (HS^- e H_2S) no reator ao longo do monitoramento, na qual se observa que o aumento de sulfato reduzido também se refletiu nas concentrações maiores de sulfeto durante a operação do reator em batelada alimentada. A concentração média de 39 mg.L^{-1} (ver Tabela 5.5) no ensaio Ic significa que a produção de sulfeto total dissolvido aumentou mais de quatro vezes comparada à condição Ia (9 mg.L^{-1}) e pode ter surtido um possível efeito inibidor à atividade da biomassa neste modo de operação.

Figura 5.12 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (CH_2S) e sulfeto na forma HS^- (CH_S) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

A Figura 5.13 apresenta os valores monitorados do pH e da concentração de sulfito. Estes parâmetros não apresentaram variações significativas ao longo do monitoramento da condição I. A concentração de sulfito se manteve abaixo de $20 \text{ mgSO}_3^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$ e o valor do pH ficou estável dentro da faixa ótima para a digestão anaeróbia.

A produção de alcalinidade a bicarbonato e o consumo de ácidos voláteis totais estão apresentados na Figura 5.14, podendo-se concluir que a produção de AB foi suficiente para garantir condições estáveis para a operação do reator, fato também corroborado pelo consumo constante dos AVT. Pode-se inferir que a alimentação em batelada alimentada proporcionou uma produção maior e uma melhor distribuição de bicarbonato de sódio ao longo do ciclo. A produção maior de AB em reatores com maior atividade de bactérias redutoras de sulfato foi constatada pelo estudo de Cadavid et al.⁷ (1999, apud SILVA et al., 2002).

⁷ CADAVID, D.E.L.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Performance of horizontal-flow anaerobic immobilized sludge (HAIS) reactor treating synthetic substrate subjected to decreasing COD to sulphate ratios. **Water Science and Technology**, 39, p. 99-106, 1999.

Figura 5.13 – Concentração de sulfito (CSO_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).

Figura 5.14 – Concentração de alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

O aumento dos valores médios dos AVT, com 21 $mgHAc \cdot L^{-1}$ no ensaio Ia, 29 $mgHAc \cdot L^{-1}$ no ensaio Ib e 39 $mgHAc \cdot L^{-1}$ no ensaio Ic leva a uma possível conclusão de que

um tempo de alimentação mais longo favorece a oxidação incompleta de matéria orgânica nestes ensaios com uma razão DQO/[SO₄²⁻] de 1,34. Entretanto, este efeito não foi observado nos ensaios com razões DQO/[SO₄²⁻] de 0,67 e 0,34, mas sim um comportamento inverso.

5.2.2 Análise Comparativa dos Resultados da Condição I

A Figura 5.15 mostra a comparação dos valores médios da concentração de matéria orgânica no efluente e das eficiências de remoção de matéria orgânica obtidas durante os três diferentes modos de operação da condição I, enquanto que a Figura 5.16 mostra as cargas volumétricas e específicas de matéria orgânica aplicada e removida.

Figura 5.15 – Concentração de matéria orgânica no afluente (C_{ST}^{af}) e efluente (C_{SOF} , C_{SOT}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Figura 5.16 – Carga orgânica volumétrica aplicada (COA_{ST}), removida (COR_{SOT}, COR_{SOF}) e carga orgânica específica aplicada (COA_{E_{ST}}) e removida (CORE_{SOT}, CORE_{SOF}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.17 e 5.16 comparam os valores médios das concentrações de sulfato e eficiências de remoção de sulfato e das cargas volumétricas e específicas aplicadas e removidas, respectivamente.

Figura 5.17 – Concentração de sulfeto no afluente (C_{SO₄^{af}}), no efluente (C_{SO₄}) e eficiência de remoção de sulfeto (E_{SO₄}) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Figura 5.18 – Carga de sulfato volumétrica aplicada (CSA), removida (CSR) e carga de sulfato específica aplicada (CSAE) e removida (CSRE) no reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Em suma, observa-se nas Figuras 5.15 e 5.16 que ocorreu uma leve diminuição da remoção de matéria orgânica com o aumento do tempo de enchimento, enquanto que melhorou significativamente, a remoção de sulfeto com tempos de alimentação maiores (Figuras 5.17 e 5.18).

5.2.3 Dados de Perfil

Depois de atingir estabilidade operacional durante o monitoramento, foram realizados os perfis ao longo do ciclo de 8 horas.

Analogamente aos resultados obtidos durante o monitoramento, os gráficos apresentados a seguir exibem que o reator teve o melhor desempenho, em termos de remoção de SO_4^{2-} , durante a operação em batelada alimentada e demonstrou o melhor resultado para

remoção de matéria orgânica durante a operação em batelada. É importante ressaltar que, devido ao efeito de diluição no reator, os primeiros pontos dos perfis apresentam valores inferiores ao do afluente.

As Figuras 5.19 e 5.20 mostram as concentrações de matéria orgânica filtrada oxidável e orgânica e de sulfato, respectivamente, durante os três perfis da condição I.

Figura 5.19 – Concentração de matéria oxidável (C_{SF}) e de matéria orgânica (C_{SOF}) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

O perfil da condição Ia (alimentação em batelada) mostra o rápido consumo de matéria orgânica (C_{SOF}) nas primeiras duas horas do ciclo. Após esta etapa inicial, a remoção

diminuiu e não se observou significativa remoção de matéria orgânica nas últimas horas do perfil. Durante o perfil da condição Ib (alimentação em batelada alimentada de 3 h), houve um acúmulo de substrato nas primeiras duas horas de alimentação, seguido por um consumo constante do substrato até o fim do ciclo. Interpretando o gráfico da condição Ic, com tempo de alimentação de 6 horas, pode-se inferir que a quantidade de matéria orgânica removida se igualou à quantidade de matéria orgânica alimentada. A remoção de substrato continuou após o término da alimentação, de forma que caiu a concentração de matéria orgânica até o fim do ciclo de tratamento.

Figura 5.20 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

A remoção de sulfato mostrou um comportamento semelhante à remoção de matéria orgânica nas três diferentes estratégias de alimentação, porém com fases de remoção menos acentuada.

Na operação em batelada alimentada, houve remoção de sulfato nas primeiras duas horas do ciclo (de 356 para 299 $mgSO_4^{2-} . L^{-1}$) e não foi observada remoção no tempo restante

do ciclo. De modo geral, a alimentação em batelada alimentada apresentou uma remoção maior de sulfato, com uma velocidade de remoção suficientemente alta para que não houvesse acúmulo de sulfato durante a fase de alimentação. Ao encerrar a alimentação, a atividade das BRS não parou, de forma que a concentração de sulfato diminuiu constantemente nas últimas 5 horas de reação no caso da condição Ib (efluente: $160 \text{ mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$), e durante as últimas 2 horas no caso da condição Ic (efluente: $88 \text{ mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$).

Para ilustrar o efeito de diluição a Figura 5.21 mostra a razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ ao longo do perfil. A maior remoção de sulfato e a baixa atividade das arqueias metanogênicas na alimentação em batelada alimentada também se refletiram nas razões $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ durante os perfis das diferentes modos de operação.

Figura 5.21 – Razão de DQO (matéria orgânica) e sulfato ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Na condição Ia, a razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ se encontrou-se praticamente durante o ciclo inteiro abaixo do valor estequiométrico (0,67) necessário para a remoção, teoricamente, completa de sulfato. No perfil da condição Ib, a predominância da atividade das BRS e a

suplementação mais lenta de substrato e SO_4^{2-} contribuíram para que a razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ crescesse durante as duas horas de alimentação, até atingir um valor máximo de 1,10 e ficar acima de 0,67 durante mais 4 horas de reação.

Na batelada alimentada de 6 horas (Ic), houve um consumo de matéria orgânica semelhante à condição Ib, porém uma remoção maior de sulfato. Isso resultou em níveis mais baixos de SO_4^{2-} no reator, fator determinante para que a razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ se encontrasse durante o ciclo de 8 horas em uma alta faixa de 1,06 a 1,08.

Os valores das diferentes formas de sulfeto (HS^- e H_2S) e o valor do sulfeto total dissolvido (STD) se encontram na Figura 5.22. A Figura 5.23 mostra a concentração de sulfeto. Em função da baixa remoção de SO_4^{2-} durante a alimentação em batelada, a produção de sulfeto também foi baixa. Por outro lado, a produção aumentou no caso da alimentação em batelada alimentada. Na Figura 5.22, pode-se observar que, durante a alimentação FB 2, o reator produziu uma quantidade seis vezes maior de STD (48 mg.L^{-1}) do que na alimentação em batelada (8 mg.L^{-1}). Esta diferença, provavelmente, seria maior considerando o sulfeto re-oxidado durante o enchimento do reator (ver Figura 5.5).

Figura 5.22 – Concentração de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- dissolvido (C_{HS}) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Figura 5.23 – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Durante a maior parte do ciclo na condição Ia, a produção de sulfito se manteve constantemente abaixo de valores de $20 \text{ mgSO}_3^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$ (Figura 5.23). Níveis maiores de SO_3^{2-} foram observados somente após 5 horas de ciclo na condição Ib e no começo da condição Ic.

A produção de alcalinidade a bicarbonato e o consumo de ácidos voláteis totais ao longo do perfil são indicados na Figura 5.24. O consumo dos ácidos intermediários, do ácido acético e do ácido propiônico em específico, é apresentado na Figura 5.25. Os valores dos parâmetros pH e potencial redox, também importantes para a determinação da estabilidade do processo anaeróbio, são mostrados na Figura 5.26.

Figura 5.24 – Alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

A partir do perfil da alcalinidade a bicarbonato na Figura 5.24, pode-se verificar que a produção de AB foi suficiente para garantir estabilidade em todas as condições. Foram encontradas concentrações mais altas de AB na operação em batelada alimentada, fato provavelmente induzido pela suplementação de NaHCO_3 de forma mais distribuída ao longo do ciclo na alimentação em batelada alimentada e pela predominância das BRS neste modo de alimentação.

Os perfis dos AVT mostram um pico de ácidos voláteis bem característico após a 1ª meia hora e até a 4ª hora de ciclo para a condição Ia, indicando neste período uma fase de acidogênese mais pronunciada, comum em reatores operados em batelada. Nos perfis das

condições Ib e Ic, a produção de ácidos voláteis foi menos acentuada e tamponada pela geração de AB.

Observa-se que a produção dos AVT no final dos perfis apresentados na Figura 5.24 não corresponde aos valores médios encontrados durante o monitoramento da condição I, na qual a produção de AVT na operação em batelada (Ia) foi menor do que na operação em batelada alimentada (Ib e Ic).

Figura 5.25 – Concentração de ácido acético no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Na análise das amostras de ácidos intermediários, apenas na condição Ic notou-se a presença de ácido acético (Figura 5.25). Na cromatografia não foi detectada a produção de outros ácidos.

Figura 5.26 – pH e potencial redox (PR) no perfil do 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 o meio tratado apresentou, em todas as condições de operação, um pH entre 7,16 e 7,66, o que indica a estabilidade do processo anaeróbico e a operação do reator dentro da faixa ótima para a digestão anaeróbia. As condições anaeróbicas foram garantidas, como mostra a Figura 5.26 através do potencial redox, e também corroborado pelo perfil do oxigênio dissolvido, que sempre apresentou um valor de $0,0 \text{ mgOD.L}^{-1}$.

A produção dos biogases dióxido de carbono e metano é mostrada na Figura 5.27. Pode-se notar a produção maior de CO_2 até a 4ª hora do ciclo da condição Ia, já que foi a condição que mostrou o melhor desempenho na remoção de matéria orgânica e que coincide com o período onde grande parte da matéria orgânica foi consumida.

Com eficiências menores na remoção de substrato, a produção de CO_2 também ficou menor na alimentação em batelada alimentada. O aumento de modo constante durante a condição Ic corresponde à alimentação mais distribuída.

Figura 5.27 – Concentração de dióxido de carbono (C_{CO_2}) e metano (C_{CH_4}) no perfil do reator operado na condição I nas estratégias de alimentação de batelada (Ia), batelada alimentada – 3h (Ib) e batelada alimentada – 6h (Ic).

Ao analisar o perfil do dióxido de carbono deve ser considerada uma possível dissociação de CO_2 durante a etapa de alimentação, oriundo do bicarbonato adicionado no afluente. A produção de metano também corrobora o bom desempenho observado na remoção de matéria orgânica durante a alimentação em batelada, apresentando um pico acentuado de

CH₄ entre a 2^a e 4^a hora de ciclo na condição Ia. Um possível motivo para o aumento das concentrações de metano durante a condição Ic é a utilização de gás carbônico pelas bactérias metanogênicas autotróficas.

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

Após 108 dias de ensaio na condição I, foi aumentada a concentração de sulfato no meio afluente ($748 \text{ mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$) e o reator entrou no modo de operação II, tratando água residuária com uma razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,67, sempre com um ciclo de tratamento de 8 horas. Dos 91 dias que o reator operou nesta condição, 34 foram destinados para investigar o comportamento do reator na alimentação em batelada (IIa), 22 dias para a batelada alimentada com tempo de enchimento de 3 h (IIb) e 35 dias para a batelada alimentada com tempo de enchimento de 6 h (IIc).

Além do aumento da concentração de sulfato, não houve alteração qualquer na composição do afluente, na aparelhagem ou na biomassa utilizada.

A seguir serão apresentadas as tabelas (Tabela 5.8 a 5.10) e os gráficos do monitoramento (Figura 5.28 a 5.34), uma comparação destes dados em forma de histogramas, acrescentada pelas cargas volumétricas e específicas aplicadas e removidas (Figura 5.35 a 5.38) e a discussão da condição II será concluída com a apresentação dos dados do perfil (Figura 5.39 a 5.47).

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.

5.3.1 Dados de Monitoramento

A Tabela 5.8 mostra os valores médios monitorados durante a operação do reator com as estratégias de alimentação batelada (IIa), batelada alimentada 1 (IIb) e batelada alimentada 2 (IIc).

A concentração dos sólidos totais (ST) no efluente não mostrou grandes variações durante os ensaios, que reflete a estabilidade observada. A retenção de sólidos na espuma de poliuretano também contribuiu para concentrações de sólidos mais equilibradas ao longo da operação do reator.

A Tabela 5.9 mostra os valores da carga de matéria orgânica e da carga de sulfato aplicadas (cargas volumétricas e específicas). A Tabela 5.10 apresenta as cargas removidas de matéria orgânica e de sulfato (cargas volumétricas e cargas específicas) e também as diferenças entre carga de matéria oxidável e carga de matéria orgânica.

Tabela 5.8 – Resultados médios das variáveis monitoradas durante a operação na Condição II
(DQO/[SO₄²⁻] = 0,67)*.

Variável	Afluente II	Efluente					
		Condição IIa		Condição IIb		Condição IIc	
C _{ST} (mgDQO.L ⁻¹)	503 ±32 (38)	268 ±46 (16)		325 ±20 (10)		263 ±29 (14)	
E _{ST} (%)	-	48 ±9 (16)		35 ±4 (10)		47 ±6 (14)	
C _{SF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	232 ±46 (16)		288 ±24 (10)		228 ±24 (14)	
E _{SF} (%)	-	55 ±9 (16)		42 ±5 (10)		54 ±5 (14)	
C _{SOT} (mgDQO.L ⁻¹)	-	176 ±46 (16)		187 ±22 (10)		163 ±58 (14)	
E _{SOT} (%)	-	66 ±9 (16)		63 ±4 (10)		67 ±12 (14)	
C _{SOF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	138 ±46 (16)		150 ±29 (10)		128 ±53 (14)	
E _{SOF} (%)	-	73 ±9 (16)		70 ±6 (10)		74 ±11 (14)	
C _{SO4} (mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)	752 ±38 (35)	475 ±85 (15)		442 ±42 (12)		448 ±28 (14)	
E _{SO4} (%)	-	36 ±11 (15)		42 ±5 (12)		40 ±4 (14)	
DQO/[SO ₄ ²⁻]**	0,67 ±0,04 (33)	0,17 ±0,17 (15)		0,43 ±0,1 (12)		0,35 ±0,11 (14)	
STD (mgSTD.L ⁻¹)	-	48 ±22 (10)		67 ±9 (5)		52 ±15 (8)	
C _{H2S} (mgH ₂ S.L ⁻¹)	-	18 ±8 (10)		19 ±3 (5)		12 ±3 (8)	
C _{HS} (mgHS ⁻ .L ⁻¹)	-	32 ±14 (10)		47 ±7 (5)		40 ±12 (8)	
C _{SO3} (mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹)	-	12 ±4 (9)		19 ±8 (4)		10 ±2 (8)	
pH	8,6 ±0,3 (23)	7,5 ±0,5 (9)		7,4 ±0,2 (6)		7,6 ±0,1 (11)	
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	184 ±36 (23)	511 ±78 (9)		556 ±53 (6)		560 ±50 (11)	
Al/AP	0,3 ±0,1 (23)	0,4 ±0,0 (9)		0,4 ±0,0 (6)		0,3 ±0,1 (11)	
AVT (mgHAc.L ⁻¹)	40 ±7 (23)	64 ±6 (9)		55 ±14 (6)		35 ±11 (11)	
ST (mg.L ⁻¹)	2230 ±69 (11)	2048 ±27 (5)		1757 ±420 (2)		2048 ±152 (4)	
SVT (mg.L ⁻¹)	614 ±59 (11)	576 ±63 (5)		557 ±120 (2)		637 ±154 (4)	
SST (mg.L ⁻¹)	43 ±18 (11)	75 ±23 (5)		66 ±25 (2)		76 ±25 (4)	
SSV (mg.L ⁻¹)	17 ±15 (11)	9 ±9 (5)		24 ±24 (2)		49 ±17 (4)	

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

** Para as amostras do afluente a razão DQO/[SO₄²⁻] foi calculada usando a concentração de matéria oxidável (C_{ST}) para o valor da DQO. No caso do efluente foi utilizada a concentração de matéria orgânica (C_{SOT}).

Tabela 5.9 – Valores das cargas de matéria orgânica e sulfato aplicadas durante a operação em Condição II, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 0,67$.

Variável	Cargas Aplicadas		
$\text{COA}_{\text{ST}} [\text{gDQO} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$	0,76	$\pm 0,05$	(38)
$\text{CSA} [\text{gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$	1,13	$\pm 0,06$	(35)
$\text{COAE}_{\text{ST}} [\text{mgDQO} \cdot (\text{gSVT} \cdot \text{d})^{-1}]$	42	± 3	(38)
$\text{CSAE} [\text{mgSO}_4^{2-} \cdot (\text{gSVT} \cdot \text{d})^{-1}]$	63	± 3	(35)

Tabela 5.10 – Valores das cargas de matéria orgânica e sulfato removidas durante a operação na Condição II, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 0,67$.

Variável	Cargas Removidas		
	Condição IIa	Condição IIb	Condição IIc
$\text{COR}_{\text{ST}} [\text{gDQO} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$	0,36 $\pm 0,07$ ⁽¹⁶⁾	0,26 $\pm 0,03$ ⁽¹⁰⁾	0,35 $\pm 0,04$ ⁽¹⁴⁾
$\text{COR}_{\text{SF}} [\text{gDQO} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$	0,42 $\pm 0,07$ ⁽¹⁶⁾	0,32 $\pm 0,04$ ⁽¹⁰⁾	0,41 $\pm 0,04$ ⁽¹⁴⁾
$\text{COR}_{\text{SOT}} [\text{gDQO} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$	0,50 $\pm 0,07$ ⁽¹⁶⁾	0,47 $\pm 0,03$ ⁽¹⁰⁾	0,50 $\pm 0,09$ ⁽¹⁴⁾
$\text{COR}_{\text{SOF}} [\text{gDQO} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$	0,56 $\pm 0,07$ ⁽¹⁶⁾	0,53 $\pm 0,04$ ⁽¹⁰⁾	0,56 $\pm 0,08$ ⁽¹⁴⁾
$\text{CSR} [\text{gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$	0,40 $\pm 0,13$ ⁽¹⁵⁾	0,48 $\pm 0,06$ ⁽¹²⁾	0,46 $\pm 0,04$ ⁽¹⁴⁾
$\text{CORE}_{\text{ST}} [\text{mgDQO} \cdot (\text{gSVT} \cdot \text{d})^{-1}]$	20 ± 4 ⁽¹⁶⁾	15 ± 2 ⁽¹⁰⁾	20 ± 2 ⁽¹⁴⁾
$\text{CORE}_{\text{SF}} [\text{mgDQO} \cdot (\text{gSVT} \cdot \text{d})^{-1}]$	23 ± 4 ⁽¹⁶⁾	18 ± 2 ⁽¹⁰⁾	22 ± 2 ⁽¹⁴⁾
$\text{CORE}_{\text{SOT}} [\text{mgDQO} \cdot (\text{gSVT} \cdot \text{d})^{-1}]$	28 ± 4 ⁽¹⁶⁾	26 ± 2 ⁽¹⁰⁾	28 ± 5 ⁽¹⁴⁾
$\text{CORE}_{\text{SOF}} [\text{mgDQO} \cdot (\text{gSVT} \cdot \text{d})^{-1}]$	31 ± 4 ⁽¹⁶⁾	29 ± 2 ⁽¹⁰⁾	31 ± 4 ⁽¹⁴⁾
$\text{CSRE} [\text{mgSO}_4^{2-} \cdot (\text{gSVT} \cdot \text{d})^{-1}]$	22 ± 7 ⁽¹⁵⁾	27 ± 3 ⁽¹²⁾	25 ± 2 ⁽¹⁴⁾

A Figura 5.28 apresenta a eficiência de remoção de matéria oxidável e a concentração de matéria oxidável no efluente, tanto das amostras filtradas quanto das não filtradas. Na Figura 5.29, pode-se observar a eficiência de remoção de matéria orgânica e a concentração de matéria orgânica encontrada nas análises durante a fase de monitoramento.

Figura 5.28 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF}) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Figura 5.29 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A análise da Figura 5.29 permite verificar que a biomassa teve dificuldades para se adaptar à razão mais baixa de $DQO/[SO_4^{2-}]$ durante os primeiros 17 dias da condição IIa, visto que os valores da remoção de matéria orgânica apresentaram pouca estabilidade neste período. Não houve oscilação dessa forma nos valores da concentração de matéria orgânica no efluente nos ensaios IIb e IIc.

Durante a fase do monitoramento das três condições, a remoção de DQO não diminuiu

significativamente com o aumento do tempo de alimentação, como foi observado nos ensaios anteriores. Assim, os valores da eficiência de remoção na condição IIa (E_{SO_4} ; 73%), na condição IIb (70%) e na condição IIc (74%) não diferiram significativamente.

A Figura 5.30 apresenta a eficiência na remoção de sulfato e a concentração de SO_4^{2-} e mostra que, durante o ensaio de alimentação em batelada, houve fases de alta remoção de sulfato seguidas por quedas da atividade das BRS. Além disso, observou-se uma tendência de a remoção de SO_4^{2-} ser menos significativa nesta condição do que nas operações em batelada alimentada (IIb e IIc), característica esta já constatada nos ensaios da condição I.

Figura 5.30 - Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de remoção 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).

Na alimentação em batelada, o valor médio encontrado para a concentração de sulfato no efluente foi $475 mgSO_4^{2-}.L^{-1}$ (36 % em termos de eficiência). Com médias de $442 mgSO_4^{2-}.L^{-1}$ (42%) na alimentação em batelada alimentada de 3 horas e $448 mgSO_4^{2-}.L^{-1}$ (41%) na alimentação em batelada alimentada de 6 horas, a remoção de sulfato se estabilizou em

níveis praticamente iguais.

Figura 5.31 – Razão entre a carga de sulfato removido (CSR) e a carga de matéria orgânica removida (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 evolução da razão entre a carga de sulfato removido (CSR) e a carga de matéria orgânica removida (COR_{SOF}) é apresentada na Figura 5.31, cuja análise permite outra vez verificar que há a tendência de a remoção de sulfato ser prejudicada pela alimentação em batelada. Analogamente aos resultados na remoção de matéria orgânica e de sulfato, os gráficos das duas outras estratégias de alimentação, IIb e IIc, encontram-se em faixas semelhantes (0,69 a 1,07 e 0,63 a 1,15, respectivamente). Isto significa que com uma concentração mais alta de SO_4^{2-} no meio afluente, houve uma maior remoção de sulfato por unidade de matéria orgânica removida do que durante o ensaio Ic (média de 0,70), o ensaio com o melhor desempenho na condição I.

Na Figura 5.32 pode-se observar as concentrações das duas formas de sulfeto presentes (HS^- e H_2S) no reator ao longo do monitoramento e a soma destes valores, denominada com sulfeto total dissolvido (STD).

Figura 5.32 – Concentrações de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (CH₂S) e sulfeto na forma HS⁻ (CHS) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

O gráfico da produção de sulfeto durante o ensaio IIa, mostrado na Figura 5.32, reflete a oscilação observada na remoção de sulfato. Nesta condição, foram encontrados valores entre 17 e 80 mg.L⁻¹ de sulfeto total dissolvido (STD) no efluente. Com o aumento do tempo de alimentação nas condições IIb e IIc, também foi registrada uma produção maior de sulfeto, com médias de 67 mg.L⁻¹, no ensaio IIb, e 52 mg.L⁻¹, no ensaio IIc. Este menor valor de concentração média de sulfeto obtido na condição IIb pode ser devido à maior reoxidação de sulfeto.

A Figura 5.33 apresenta os valores monitorados do pH e da concentração de sulfito. Pode-se verificar que o pH ficou estável (dentro da neutralidade) na faixa ótima para a digestão anaeróbia (pH 6 a 8) e que a concentração de sulfito se manteve abaixo de 20 mgSO₃²⁻.L⁻¹ durante toda a fase do monitoramento.

Figura 5.33 - 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 produção de alcalinidade a bicarbonato e o consumo de ácidos voláteis totais são apresentados na Figura 5.34, que mostra que a produção de AB apresentou, em todas as condições, estabilidade e foi suficientemente alta para garantir o tamponamento dos ácidos voláteis no meio tratado. Em média, a condição IIa gerou $511 \text{ mgCaCO}_3 \cdot L^{-1}$, enquanto que as condições de alimentação em batelada alimentada de 3 e de 6 horas, analogamente à condição I, tiveram em média produções mais altas, com $556 \text{ mgCaCO}_3 \cdot L^{-1}$ (IIb) e $561 \text{ mgCaCO}_3 \cdot L^{-1}$ (IIc), respectivamente.

Figura 5.34 – Concentração de alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Pode-se observar que, nos três ensaios, os valores de AVT se apresentaram estáveis e em níveis controlados, e que houve uma diminuição da produção de AVT com aumento do tempo de enchimento. O valor médio encontrado durante a alimentação em batelada (IIa) foi 64 mgHAc.L⁻¹, 55 mgHAc.L⁻¹ na condição IIb e 35 mgHAc.L⁻¹ na condição IIc.

Na condição II, a concentração de sulfato no afluente pareceu ser suficientemente alta para reprimir a atividade das aquéias metanogênicas, mesmo na alimentação em batelada. Quanto submetidos à razão DQO/[SO₄²⁻] de 0,67, as BRS também pareceram ter quantidades suficientes de sulfato para oxidar mais substrato de forma completa, principalmente nas condições com alimentação em batelada alimentada, nas quais as BRS foram mais competitivas e perderam, provavelmente, menos substrato para bactérias não sulfetogênicas.

5.3.2 Análise Comparativa dos Resultados da Condição II

A Figura 5.35 mostra uma comparação dos valores médios da concentração de matéria orgânica no efluente e das eficiências de remoção de matéria orgânica obtidas durante os três diferentes modos de operação da condição II; enquanto que a Figura 5.36 compara as cargas volumétricas e específicas de matéria orgânica aplicada e removida.

Figura 5.35 – Concentração de matéria orgânica no afluente (C_{STa}) e efluente (C_{SOFe} , C_{SOTe}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Figura 5.36 – Carga orgânica volumétrica aplicada (COA_{ST}), removida (COR_{SOT}, COR_{SOF}) e carga orgânica específica aplicada (COA_{E_{ST}}) e removida (CORE_{SOT}, CORE_{SOF}) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.37 e 5.38 comparam as concentrações e as eficiências de remoção de sulfato e as cargas volumétricas e específicas de sulfato aplicadas e removidas, respectivamente.

Figura 5.37 – Concentração de sulfeto no afluente (CSO_{4a}), no efluente (CSO_{4e}) e eficiência de remoção de sulfeto (ESO₄) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Figura 5.38 – Carga de sulfato volumétrica aplicada (CSA), removida (CSR) e carga de sulfato específica aplicada (CSAE) e removida (CSRE) no reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Diferentemente da condição I, a condição II, com uma razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 0,67, não induziu um favorecimento da biomassa metanogênica e uma remoção maior de matéria orgânica com a operação do reator em batelada, como mostram as Figuras 5.35 e 5.36. As cargas de matéria orgânica filtrada removida no ensaio IIa foi em média $0,56 \text{ gDQO} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, $0,53 \text{ gDQO} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ no ensaio IIb e, novamente, $0,56 \text{ gDQO} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ no ensaio IIc.

Uma possível causa para o baixo rendimento no ensaio IIa pode ser encontrada nos níveis maiores de sulfeto na condição IIa ($48 \text{ mgSTD} \cdot \text{L}^{-1}$) comparado à condição Ia ($9 \text{ mgSTD} \cdot \text{L}^{-1}$). Uma possível inibição da metanogênese pelo sulfeto pode ter resultada na oxidação incompleta de substrato, enquanto que o predomínio das BRS nos ensaios com batelada alimentada garantiu uma estabilidade maior da digestão anaeróbia e uma oxidação de acetato pela via da sulfetogênese.

Com a atividade mais acentuada das BRS na alimentação em batelada, as cargas removidas de sulfato (CSR) foram menos divergentes nas diferentes estratégias de alimentação, conforme apresentado nas Figuras 5.37 e 5.38. Entretanto, houve novamente uma remoção maior de sulfato com a estratégia de alimentação de batelada, sendo que em média o reator removeu $0,40 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, na condição IIa, $0,48 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, na

condição IIb e $0,46 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, na condição IIc.

5.3.3 Dados de Perfil

Depois de atingir estabilidade operacional durante o monitoramento, foram realizados os perfis ao longo do ciclo de 8 horas. É importante ressaltar que, devido ao efeito de diluição no reator, os primeiros pontos dos perfis apresentam valores inferiores ao do afluente.

As Figuras 5.39 e 5.40 mostram as concentrações de matéria orgânica filtrada e não filtrada e de sulfato, respectivamente, durante os três perfis da condição II. Por meio da análise da Figura 5.39, pode-se observar que, após o enchimento do reator na operação em batelada, o substrato (C_{SOF}) foi constantemente consumido até o fim do ciclo. Já no ensaio IIb, a alimentação em batelada alimentada de 3 horas, o fornecimento constante e o menor consumo de matéria orgânica na etapa inicial do ciclo, provocaram um leve acúmulo de substrato nas primeiras 3 horas do perfil, para depois ser reduzido nas últimas 5 horas do tratamento. O perfil da condição IIc se comportou de forma semelhante à condição IIb. Houve um leve acúmulo, porém menos acentuado, de substrato até a 5ª hora do ciclo, e depois o consumo de matéria orgânica até o fim do ciclo.

Figura 5.39 – Concentração de matéria oxidável (C_{SF}) e de matéria orgânica (C_{SOF}) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Observa-se também um comportamento menos linear da remoção de matéria orgânica nos ensaios com alimentação em batelada, enquanto os valores ao longo do perfil do ensaio em batelada alimentada mostraram-se mais previsíveis.

Figura 5.40 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

De modo geral, os gráficos da remoção de sulfato (Figura 5.40) apresentaram as mesmas características dos gráficos de remoção de matéria orgânica, com concentrações de SO_4^{2-} crescentes na etapa de alimentação, e uma redução constante da concentração de sulfato após a etapa da alimentação até o fim do ciclo.

Para ilustrar o efeito de diluição na razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ a Figura 5.42 mostra as razões destes dois parâmetros ao longo do perfil de 8 h. Pode-se observar que o efeito de diluição do meio mantido no reator contribuiu para que a razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ ficasse abaixo de 0,67, valor este correspondente à razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ do meio afluente da condição II. A figura também reflete o menor consumo de matéria orgânica durante o ensaio com tempo de alimentação de 3 horas (IIb).

Figura 5.41 – Razão de DQO (matéria orgânica) e sulfato ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Os valores das diferentes formas de sulfeto (HS^- e H_2S) e o valor do sulfeto total dissolvido (STD) se encontram na Figura 5.42. A Figura 5.43 mostra a concentração de sulfeto.

A produção de sulfetos (STD) se apresentou maior durante as operações em batelada alimentada, sendo que os níveis de sulfeto produzidos condiziam com a eficiência na redução de sulfato no reator. Nota-se no começo dos ciclos a diluição da concentração do sulfeto residual no reator. Na operação em batelada, a produção da maior parte de sulfeto aconteceu nas primeiras duas horas de operação; enquanto que na operação em batelada alimentada o sulfeto acumulou no reator a partir do começo da segunda metade do ciclo.

Figura 5.42 – Concentração de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- dissolvido (C_{HS}) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Figura 5.43 – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A partir das curvas apresentadas na Figura 5.43, pode-se inferir que durante todos os ensaios não houve fases expressivas de produção e de redução de sulfito ao longo do ciclo de 8 horas. Além disso, pode-se observar que em todas as condições a produção de sulfito foi pouca, com a maioria dos valores registrados abaixo de $20 \text{ mg.SO}_3^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$.

A produção de alcalinidade a bicarbonato e o consumo de ácidos voláteis totais ao longo do perfil é ilustrado na Figura 5.44. A Figura 5.45 apresenta o consumo dos ácidos intermediários (ácido acético e ácido propiônico). Os valores dos parâmetros pH e potencial redox, também importantes para a determinação e o controle da estabilidade do processo anaeróbio, são mostrados na Figura 5.46.

Figura 5.44 – Alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A partir do perfil da alcalinidade a bicarbonato na Figura 5.44, pode-se verificar que a produção de AB foi suficiente para garantir estabilidade em todas as condições. Foram encontradas concentrações mais altas de AB nas operações em batelada alimentada, reação provavelmente induzida pela suplementação de NaHCO_3 uniformemente ao longo do ciclo, na alimentação e pelo predomínio das BRS neste modo de alimentação.

Os perfis dos AVT mostram um pico de ácidos voláteis bem característico após a 1ª meia hora e até a 4ª hora de ciclo para a condição IIa, indicando neste período uma fase de acidogênese mais pronunciada, comum em reatores operados em batelada. Nos perfis das

condições IIb e IIc, a produção de ácidos voláteis foi menos acentuada e tamponada pela geração de AB.

Figura 5.45 – Concentração de ácido acético e ácido propiônico no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A concentração elevada de ácido acético na operação em batelada (máximo de 150 mg.L⁻¹), mostrada na Figura 5.45, indica uma certa instabilidade no equilíbrio entre as bactérias acetogênicas e arqueias metanogênicas, eventualmente provocada pela maior competitividade das BRS na utilização de acetato nesta condição II, e também afetada por uma possível inibição por sulfeto. A produção de ácido acético foi menos acentuada nas

alimentações em batelada alimentada.

Figura 5.46 – pH e potencial redox (PR) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

A geração elevada de ácidos voláteis provocou uma queda do pH na condição IIa (Figura 5.46). As condições anaeróbias foram garantidas, como mostra a Figura 5.46, através do potencial redox, e também corroborado pelo perfil do oxigênio dissolvido, que sempre apresentou um valor de $0,0 \text{ mgOD.L}^{-1}$.

A produção dos biogases (dióxido de carbono e metano) mostra a Figura 5.47. A maior produção de dióxido de carbono foi detectada durante a operação do reator em batelada, e as concentrações nos outros dois ensaios com alimentação em batelada alimentada constataram curvas semelhantes .

Figura 5.47 – Concentração de dióxido de carbono (C_{CO_2}) e metano (C_{CH_4}) no perfil do reator operado na condição II nas estratégias de alimentação de batelada (IIa), batelada alimentada – 3h (IIb) e batelada alimentada – 6h (IIc).

Em comparação aos ensaios anteriores, houve pouca produção de CH₄ durante as condições IIa e IIc e, aparentemente, nenhuma atividade metanogênica durante a condição batelada alimentada com tempo de alimentação de 3 horas. O motivo deve ser o maior

consumo de acetato pelas BRS que, com o aumento da concentração de sulfato, se tornaram mais competitivas do que as arqueias metanogênicas.

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

O reator operou nesta condição durante 76 dias, sendo que a operação em batelada (IIIa) durou 27 dias, a operação em batelada alimentada FB1 (IIIb) também 27 dias e batelada alimentada FB 2 (IIIc) 22 dias. Como anteriormente não houve qualquer alteração na composição do afluente, na aparelhagem ou na biomassa utilizada.

Após a apresentação das tabelas do monitoramento (Tabela 5.11 a 5.13), seguem os gráficos do monitoramento (Figura 5.48 a 5.54), uma comparação destes dados em forma de histogramas, acrescentada pelas cargas volumétricas e específicas aplicadas e removidas, (Figura 5.55 a 5.58) e a discussão da condição II será concluída com a apresentação dos dados do perfil (Figura 5.59 a 5.67).

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.

5.4.1 Dados de Monitoramento

As Tabelas 5.11 a 5.13 mostram os valores médios monitorados durante a operação do reator com relação $DQO/[SO_4^{2-}]$ constante de 0,34 e com as estratégias de alimentação batelada (IIIa), batelada alimentada 1 (IIIb) e batelada alimentada 2 (IIIc).

Tabela 5.11 – Resultados médios das variáveis monitoradas durante a operação em Condição III ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 0,34$).*

Variável	Afluente III	Efluente		
		Condição IIIa	Condição IIIb	Condição IIIc
C_{ST} (mgDQO.L ⁻¹)	505 ±22 ⁽²⁹⁾	302 ±34 ⁽⁹⁾	267 ±33 ⁽¹⁰⁾	303 ±25 ⁽¹⁰⁾
E_{ST} (%)	-	39 ±7 ⁽⁹⁾	47 ±6 ⁽¹⁰⁾	41 ±5 ⁽¹⁰⁾
C_{SF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	274 ±26 ⁽⁹⁾	231 ±22 ⁽¹⁰⁾	264 ±22 ⁽¹⁰⁾
E_{SF} (%)	-	45 ±5 ⁽⁹⁾	54 ±4 ⁽¹⁰⁾	48 ±4 ⁽¹⁰⁾
C_{SOT} (mgDQO.L ⁻¹)	-	183 ±26 ⁽⁹⁾	91 ±33 ⁽¹⁰⁾	174 ±18 ⁽¹⁰⁾
E_{SOT} (%)	-	63 ±5 ⁽⁹⁾	82 ±6 ⁽¹⁰⁾	66 ±3 ⁽¹⁰⁾
C_{SOF} (mgDQO.L ⁻¹)	-	155 ±20 ⁽⁹⁾	55 ±18 ⁽¹⁰⁾	135 ±14 ⁽¹⁰⁾
E_{SOF} (%)	-	69 ±4 ⁽⁹⁾	89 ±4 ⁽¹⁰⁾	73 ±3 ⁽¹⁰⁾
C_{SO_4} (mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹)	1529 ±83 ⁽³¹⁾	1211 ±119 ⁽¹²⁾	1210 ±77 ⁽¹²⁾	1216 ±73 ⁽¹⁰⁾
E_{SO_4} (%)	-	18 ±8 ⁽¹²⁾	21 ±5 ⁽¹²⁾	23 ±5 ⁽¹⁰⁾
$\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]^{**}$	0,30 ±0,10 ⁽³⁰⁾	0,15 ±0,03 ⁽¹²⁾	0,1 ±0,0 ⁽¹²⁾	0,15 ±0,02 ⁽¹⁰⁾
STD (mgSTD.L ⁻¹)	-	60 ±15 ⁽⁶⁾	87 ±7 ⁽⁷⁾	59 ±6 ⁽⁷⁾
$C_{\text{H}_2\text{S}}$ (mgH ₂ S.L ⁻¹)	-	15 ±4 ⁽⁶⁾	16 ±2 ⁽⁷⁾	12 ±2 ⁽⁷⁾
C_{HS} (mgHS.L ⁻¹)	-	45 ±13 ⁽⁶⁾	71 ±6 ⁽⁷⁾	47 ±4 ⁽⁷⁾
C_{SO_3} (mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹)	-	11 ±3 ⁽⁴⁾	10 ±1 ⁽⁵⁾	8 ±1 ⁽⁶⁾
pH	8,7 ±0,1 ⁽²⁰⁾	7,4 ±0,3 ⁽⁸⁾	7,7 ±0,1 ⁽⁷⁾	7,6 ±0,1 ⁽⁶⁾
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	195 ±14 ⁽²⁰⁾	565 ±80 ⁽⁸⁾	611 ±25 ⁽⁷⁾	536 ±34 ⁽⁶⁾
AI/AP	0,3 ±0,0 ⁽²⁰⁾	0,4 ±0,1 ⁽⁸⁾	0,3 ±0,0 ⁽⁷⁾	0,3 ±0,0 ⁽⁶⁾
AVT (mgHAc.L ⁻¹)	38 ±5 ⁽²⁰⁾	54 ±5 ⁽⁸⁾	26 ±5 ⁽⁷⁾	47 ±10 ⁽⁶⁾
ST (mg.L ⁻¹)	3178 ±149 ⁽⁷⁾	3002 ±42 ⁽²⁾	2908 ±229 ⁽³⁾	2788 ±113 ⁽²⁾
SVT (mg.L ⁻¹)	644 ±171 ⁽⁷⁾	483 ±262 ⁽²⁾	567 ±70 ⁽³⁾	399 ±47 ⁽²⁾
SST (mg.L ⁻¹)	50 ±18 ⁽⁷⁾	74 ±0 ⁽²⁾	75 ±55 ⁽³⁾	84 ±6 ⁽²⁾
SSV (mg.L ⁻¹)	23 ±17 ⁽⁷⁾	65 ±10 ⁽²⁾	41 ±2 ⁽³⁾	67 ±7 ⁽²⁾

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

** Para as amostras do afluente a razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ foi calculada usando a concentração de matéria oxidável (C_{ST}) para o valor da DQO. No caso do efluente foi utilizada a concentração de matéria orgânica (C_{SOT}).

Os valores estáveis dos sólidos indicam a estabilidade do processo anaeróbio na condição III e a retenção de sólidos na espuma de poliuretano.

A Tabela 5.12 mostra os valores da carga de matéria orgânica e da carga de sulfato aplicados (cargas volumétricas e específicas). A Tabela 5.13 apresenta as cargas removidas de matéria orgânica e de sulfato (cargas volumétricas e cargas específicas) e também as diferenças entre carga de matéria oxidável e carga de matéria orgânica.

Tabela 5.12 – Valores das cargas aplicadas de matéria orgânica e sulfato durante a operação em condição III, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$.

Variável	Cargas Aplicadas		
$COA_{ST} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	0,76	$\pm 0,03$	⁽²⁹⁾
$CSA [gSO_4^{2-}.(L.d)^{-1}]$	2,29	$\pm 0,12$	⁽³¹⁾
$COAE_{ST} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	42	± 2	⁽²⁹⁾
$CSAE [mgSO_4^{2-}.(gSVT.d)^{-1}]$	127	± 7	⁽³¹⁾

Tabela 5.13 – Valores das cargas removidas de matéria orgânica e sulfato durante a operação em Condição III, operado em batelada e batelada alimentada com uma relação $DQO/[SO_4^{2-}] = 0,34$.

Variável	Cargas Removidas		
	Condição IIIa	Condição IIIb	Condição IIIc
$COR_{ST} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	0,29 $\pm 0,05$ ⁽⁹⁾	0,36 $\pm 0,05$ ⁽¹⁰⁾	0,31 $\pm 0,04$ ⁽¹⁰⁾
$COR_{SF} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	0,34 $\pm 0,04$ ⁽⁹⁾	0,41 $\pm 0,03$ ⁽¹⁰⁾	0,37 $\pm 0,03$ ⁽¹⁰⁾
$COR_{SOT} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	0,47 $\pm 0,04$ ⁽⁹⁾	0,62 $\pm 0,05$ ⁽¹⁰⁾	0,50 $\pm 0,03$ ⁽¹⁰⁾
$COR_{SOF} [gDQO.(L.d)^{-1}]$	0,52 $\pm 0,03$ ⁽⁹⁾	0,68 $\pm 0,03$ ⁽¹⁰⁾	0,56 $\pm 0,02$ ⁽¹⁰⁾
$CSR [gSO_4^{2-}.(L.d)^{-1}]$	0,41 $\pm 0,18$ ⁽¹²⁾	0,49 $\pm 0,11$ ⁽¹²⁾	0,55 $\pm 0,11$ ⁽¹⁰⁾
$CORE_{ST} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	16 ± 3 ⁽⁹⁾	20 ± 3 ⁽¹⁰⁾	17 ± 2 ⁽¹⁰⁾
$CORE_{SF} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	19 ± 2 ⁽⁹⁾	23 ± 2 ⁽¹⁰⁾	20 ± 2 ⁽¹⁰⁾
$CORE_{SOT} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	26 ± 2 ⁽⁹⁾	35 ± 3 ⁽¹⁰⁾	28 ± 1 ⁽¹⁰⁾
$CORE_{SOF} [mgDQO.(gSVT.d)^{-1}]$	29 ± 2 ⁽⁹⁾	38 ± 2 ⁽¹⁰⁾	31 ± 1 ⁽¹⁰⁾
$CSRE [mgSO_4^{2-}.(gSVT.d)^{-1}]$	22 ± 10 ⁽¹²⁾	27 ± 6 ⁽¹²⁾	30 ± 6 ⁽¹⁰⁾

A Figura 5.48 apresenta a eficiência de remoção de matéria oxidável e a concentração de matéria oxidável no efluente, tanto das amostras filtradas quanto das não filtradas. Na Figura 5.50, pode-se observar a eficiência de remoção de matéria orgânica e a concentração de matéria orgânica encontrada nas análises durante a fase de monitoramento.

Figura 5.48 – Concentração de matéria oxidável (C_{ST} , C_{SF}) e eficiência de remoção de matéria oxidável (E_{ST} , E_{SF}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Observa-se na Figura 5.49 a alta remoção de matéria orgânica no ensaio com o reator operando com alimentação em batelada alimentada de 3 horas (89%) e uma remoção menor no outro ensaio em batelada alimentada (IIIc) com 74% de eficiência. Durante o ensaio com alimentação em batelada (IIIa), o consumo de substrato foi parecido às outras condições, removendo 69%. A Figura 5.49 também mostra a estabilidade do processo anaeróbico durante os 76 dias de operação.

Figura 5.49 – Concentração de matéria orgânica (C_{SOT} , C_{SOF}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Aparentemente houve um desfavorecimento do crescimento das BRS na operação em batelada, na qual elas podem ter perdido substrato para outras oxidadoras incompletas. Já nos ensaios IIIb e IIIc, aumentou a atividade das BRS com respeito à remoção de sulfato e à oxidação de acetato pela sulfetogênese. Não foi detectada produção de metano durante os três perfis da condição III.

A Figura 5.50 apresenta a eficiência na remoção de sulfato e a concentração de SO_4^{2-} ao longo do monitoramento.

Figura 5.50 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) e eficiência de remoção 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 remoção de sulfato, ilustrada na Figura 5.50, aumentou levemente com o aumento do tempo de alimentação. Houve uma remoção de 18% de SO_4^{2-} no ensaio IIIa, 21% no ensaio IIIb e 23% na condição IIIc. A Figura também mostra a estabilidade operacional do

reator durante todos os ensaios.

A evolução da razão entre a carga de sulfato removida (CSR) e a carga de matéria orgânica removida (COR_{SOF}) durante o monitoramento é apresentada na Figura 5.51.

Figura 5.51 – Razão entre a carga de sulfato removida (CSR) e a carga de matéria orgânica removida (COR_{SOF}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Após uma fase com relações altas de CSR/COR_{SOF} no início do ensaio IIIa, o valor desta razão abaixou e média calculada a partir dos valores dos últimos 15 dias de ensaio encontrou-se em torno de 0,66. As médias das condições IIIb e IIIc foram 0,71 e 0,81, respectivamente. Esta diferença nos ensaios com batelada alimentada foi provocada, principalmente, pela maior remoção de matéria orgânica na alimentação em batelada alimentada de 3 horas.

Na Figura 5.52 verificam-se as concentrações das duas formas de sulfeto presentes (HS^- e H_2S) no reator ao longo do monitoramento e a soma, denominada com sulfeto total dissolvido (STD).

Figura 5.52 – 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).

Mostra-se na Figura 5.52 que a atividade das BRS produziu, em média, 60 mg.L^{-1} de sulfeto em termos de sulfeto total dissolvido (STD) na condição IIIa, 87 mg.L^{-1} na condição IIIb e 59 mg.L^{-1} na condição IIIc. A baixa produção de sulfeto na alimentação em batelada em relação à alimentação em batelada alimentada desta condição, pode-se explicar, pela possível perda de substrato das BRS para outros microrganismos que oxidam a matéria orgânica de forma incompleta.

Apesar da alta remoção de sulfato foi encontrada uma baixa concentração de sulfeto durante a condição IIIc, o que pode ser consequência da reoxidação de parte do sulfeto durante o tempo de enchimento.

A Figura 5.53 apresenta os valores monitorados do pH e da concentração de sulfeto. O valor do pH se manteve dentro da neutralidade, enquanto que a produção de sulfeto sempre permaneceu abaixo de uma concentração de $20 \text{ mgSO}_3^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$.

Figura 5.53 – 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).

A produção de alcalinidade a bicarbonato e o consumo de ácidos voláteis totais estão apresentados na Figura 5.54. Em todas as condições, a produção de alcalinidade a bicarbonato e o consumo de ácidos voláteis totais foram suficientemente altas para garantir a estabilidade no processo anaeróbio. A produção de AB caiu durante os primeiros 10 dias de ensaio juntamente com a atividade das BRS.

Figura 5.54 – Concentração de alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Vale ressaltar outra vez que, praticamente, não houve atividade de arqueias metanogênicas, ou seja, a oxidação completa da matéria orgânica foi exclusivamente promovida pelas BRS.

Na condição IIIa, com uma média de concentração de AVT de 54 mgHAc.L⁻¹, o baixo consumo dos AVT provavelmente foi resultado da baixa atividade das BRS e de uma possível perda de substrato para outras oxidadoras incompletas. No ensaio IIIb (alimentação de 3 h), a menor concentração de 26,3 mgHAc.L⁻¹ foi, possivelmente provocada pelo tempo reacional mais longo e pela maior atividade das redutoras acidogênicas e acetogênicas na remoção de matéria orgânica.

5.4.2 Análise Comparativa dos Resultados da Condição III

A Figura 5.55 mostra a comparação dos valores médios da concentração de matéria orgânica no efluente e das eficiências de remoção de matéria orgânica obtidos durante a condição III; enquanto que a Figura 5.56 mostra as cargas volumétricas e específicas de matéria orgânica aplicada e removida.

Figura 5.55 – Concentração de matéria orgânica no afluente (C_{STa}) e efluente (C_{SOFe} , C_{SOTe}) e eficiência de remoção de matéria orgânica (E_{SOT} , E_{SOF}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Nas comparações das concentrações e cargas de matéria orgânica removida (Figura 5.55 e 5.56) verifica-se, novamente, a maior remoção durante o ensaio em batelada alimentada de 3 horas (IIIb).

Figura 5.56 – Carga orgânica volumétrica aplicada (COA_{ST}), removida (COR_{SOT}, COR_{SOF}) e carga orgânica específica aplicada (COA_{E_{ST}}) e removida (CORE_{SOT}, CORE_{SOF}) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.57 e 5.58 comparam, respectivamente, as concentrações de sulfato, as eficiências de remoção de sulfato e as cargas volumétricas e específicas aplicadas e removidas relativas aos diferentes modos de operação.

Figura 5.57 – Concentração de sulfeto no afluente (CSO_{4a}), no efluente (CSO_{4e}) e eficiência de remoção de sulfeto (ESO₄) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Figura 5.58 – Carga de sulfato volumétrica aplicada (CSA), removida (CSR) e carga de sulfato específica aplicada (CSAE) e removida (CSRE) no reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

As Figuras 5.57 e 5.58 mostram a baixa eficiência na remoção de sulfato em todos os ensaios. Em termos de carga de sulfato, o reator removeu $41 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L.d})^{-1}$ no ensaio IIIa, $49 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L.d})^{-1}$ no ensaio IIIb e $55 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L.d})^{-1}$ no ensaio IIIc. Mostrou-se uma certa incapacidade de remover toda a matéria orgânica, seja por possíveis efeitos inibidores do sulfeto ou por causa do metabolismo mais lento das BRS.

5.4.3 Dados de Perfil

As Figuras 5.59 e 5.60 mostram perfis das concentrações de matéria orgânica (filtrada e não filtrada) e de sulfato.

A Figura 5.59 mostra que, durante o perfil do ensaio com alimentação em batelada

(IIIa), boa parte de matéria orgânica foi consumida até a metade do ciclo de 8 horas. A alimentação em batelada alimentada favoreceu, na competição por substrato, as BRS. Porém, com um metabolismo mais lento e a alimentação gradual de substrato, houve um acúmulo de matéria orgânica durante esta fase de alimentação nas condições IIIb e IIIc.

Figura 5.59 – Concentração de matéria oxidável (C_{SF}) e de matéria orgânica (C_{SOF}) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

O perfil da remoção de sulfato apresentado na Figura 5.60 mostra que não houve expressivas etapas de remoção durante os ciclos de tratamento. A razão DQO/[SO₄²⁻] ao longo do perfil é ilustrada na Figura 5.61.

Figura 5.60 – Concentração de sulfato (C_{SO_4}) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Figura 5.61 – Razão de DQO (matéria orgânica) e sulfato ($DQO/[SO_4^{2-}]$) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Devido aos efeitos de diluição, a razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ diminuiu durante o perfil, atingindo valores abaixo do valor de 0,34 calculado para a razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ no meio afluente. Os valores de concentração das diferentes formas de sulfeto (HS^- e H_2S) e o valor do sulfeto total dissolvido (STD) se encontram na Figura 5.62 e a Figura 5.63 mostra a concentração de sulfito.

Por meio da Figura 5.62 pode-se verificar que, apesar de a condição IIIc ter sido a condição mais favorável para a remoção de sulfato, a concentração de sulfeto no efluente foi menor do que na condição IIIb. O motivo para tal resultado provavelmente está ligado à maior reoxidação de parte do sulfeto durante o ensaio IIIc, com um tempo de alimentação de 6 horas. Nesta condição, a concentração de sulfito manteve-se abaixo de $15 \text{ mgSO}_3^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$.

A produção de alcalinidade a bicarbonato e o consumo de ácidos voláteis totais ao longo do perfil estão indicados na Figura 5.64. O consumo dos ácidos intermediários, do ácido acético e do ácido propiônico especificamente, é apresentado na Figura 5.65. Os valores dos parâmetros pH e potencial redox, também importantes para a determinação da estabilidade do processo anaeróbio, é mostrado na Figura 5.66.

Figura 5.62 – Concentração de sulfeto total dissolvido (STD), sulfeto de hidrogênio (C_{H_2S}) e sulfeto na forma HS^- dissolvido (C_{HS}) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Figura 5.63 – Concentração de sulfito (C_{SO_3}) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

Figura 5.64 – Alcalinidade a bicarbonato (AB) e ácidos voláteis totais (AVT) no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

A Figura 5.64 mostra a estabilidade da produção de alcalinidade a bicarbonato ao longo dos perfis. Foram registradas baixas concentrações de AVT durante o ensaio IIIb, enquanto que os perfis dos ácidos voláteis das condições IIIa e IIIc indicam um menor consumo dos AVT durante ciclo de tratamento de 8 horas.

Figura 5.65 – Concentração de ácido acético e ácido propiônico no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

O menor consumo de ácidos voláteis intermediários nos ensaios IIIa e IIIc é confirmado pela Figura 5.65, a qual apresenta as altas concentrações do ácido acético e propiônico nos perfis destas condições.

Figura 5.66 – pH e potencial redox no perfil do reator operado na condição III nas estratégias de alimentação de batelada (IIIa), batelada alimentada – 3h (IIIb) e batelada alimentada – 6h (IIIc).

A menor produção de AB e o menor consumo de AVT na condição IIIa foram responsáveis pelos valores mais baixos do pH no ensaio em batelada, porém estes valores ainda se encontram na faixa ótima para a digestão anaeróbia.

Os valores do potencial redox se estabilizaram em uma faixa de -380 a -410 mV e os valores do perfil de oxigênio dissolvido foram sempre iguais a $0,0 \text{ mgOD.L}^{-1}$.

A produção do biogás dióxido de carbono é mostrada na Figura 5.67. Não houve produção de metano durante a operação na condição III. Uma maior produção de dióxido de carbono foi registrada na alimentação em batelada.

Figura 5.67 – Concentração de dióxido de carbono (C_{CO_2}) no perfil do 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

Neste Capítulo será apresentada uma comparação entre os valores médios de variáveis monitorados durante os nove ensaios das condições I, II e III para avaliar, de forma global, o efeito do tempo de alimentação e da razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ sobre a eficiência da remoção tanto de sulfato quanto de matéria orgânica. Esta análise comparativa dos resultados das condições experimentais objetiva verificar a influência da concentração de sulfato e, conseqüentemente, da relação $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ sobre a eficiência do reator. Assim, será possível interpretar melhor a relação entre as condições I, II e III, ou seja, as relações $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34, 6,67 e 0,34, respectivamente, e as estratégias de alimentação B (condições a), FB1 (condições b) e FB2 (condições c), ou seja, tempos de alimentação de 10 min, 3 h e 6 h, respectivamente.

A Figura 5.68 mostra as eficiências de remoção de matéria orgânica e as respectivas concentrações de matéria orgânica se encontram na Figura 5.69.

A análise das Figuras 5.68 a 5.71 permite verificar que houve nos ensaios com razões $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34 uma maior remoção de matéria orgânica no ensaio com alimentação em batelada (Ia) e, ao se aumentar o tempo de alimentação (ensaio Ib e Ic), essa remoção diminuiu.

Nos ensaios com razões $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 0,67 e 0,34 observou-se um comportamento inverso do reator com respeito à remoção de matéria orgânica. Por outro lado, similar à condição Ia, a alimentação em batelada (ensaio IIa e IIIa) apresentou-se como um modo de alimentação desfavorável à assimilação de substrato pelas BRS. Apesar disso, nestes ensaios em batelada com concentrações mais altas de sulfato no afluente, a atividade das BRS e a produção de sulfeto foram suficientemente altas para surtir um possível efeito inibidor ao

processo da metanogênese acetoclástica, provocando um acúmulo de ácidos voláteis nos efluentes. Ao se aumentar o tempo de alimentação, a atividade das BRS aumentou e contribuiu para que houvesse um consumo maior de acetato por estes microrganismos. Assim, a eficiência de remoção de matéria orgânica foi maior nos ensaios em batelada alimentada (FB1 e FB2) do que nos ensaios em batelada (B).

Principalmente nos ensaios em batelada alimentada 1 (FB1; tempo de alimentação de 3 horas), o aumento da concentração de sulfato pareceu estimular a oxidação completa do substrato pela via da sulfetogênese, levando o reator a remover 89% do substrato alimentado, sendo a melhor eficiência dos 9 ensaios (Figura 5.68).

Nos ensaios em batelada alimentada 2 (FB2; condições c), a diminuição da razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ não melhorou de forma significativa a remoção de substrato.

Pode-se verificar que houve um patamar maior de matéria orgânica residual no reator, que removeu em média 77% de matéria orgânica, comparado às pesquisas com reatores que operaram em configurações semelhantes (substrato, imobilização da biomassa, tempo de ciclo), porém sem adição de sulfato (RATUSZNEI et al., 2003).

Os possíveis motivos para a menor remoção de matéria orgânica são a oxidação incompleta do substrato, devido ao um ciclo de tratamento muito curto (8 horas) para o metabolismo mais lento das BRS, e um possível efeito inibidor do sulfeto na biomassa responsável pela remoção da matéria orgânica.

Figura 5.68 – Comparação das eficiências na remoção de matéria orgânica filtrada durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).

Figura 5.69 – Comparação das concentrações de matéria orgânica filtrada no efluente durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).

Figura 5.70 – Comparação das cargas de matéria orgânica filtrada removidas durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).

Figura 5.71 – Comparação das cargas de matéria orgânica filtrada removidas durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).

A Figura 5.71 mostra outra vez que o aumento da concentração de sulfato surtiu mais efeito na alimentação em batelada (B) e batelada alimentada de 3 horas (FB1), na qual uma

maior quantidade de matéria orgânica foi oxidada de forma completa.

As Figuras 5.72 e 5.73 mostram a eficiência na remoção de sulfato com as respectivas concentrações de SO_4^{2-} no efluente e afluente, enquanto que as Figuras 5.74 e 5.75 mostram as cargas de sulfeto removidas e aplicadas.

Figura 5.72 – Comparação das eficiências de remoção de sulfato (E_{SO_4}) durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).

Figura 5.73 – Comparação das concentrações de sulfato (C_{SO_4}) durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB 1) e batelada alimentada – 6h (FB 2).

Figura 5.74 – Comparação das cargas de sulfato removido (CSR) durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).

Figura 5.75– Comparação das cargas de sulfato removido (CSR) durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB1) e batelada alimentada – 6h (FB2).

A Figura 5.74 mostra que, com uma razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ igual ou menor do que o valor estequiométrico de 0,67, não há estratégia de alimentação que desfavorecesse as BRS significativamente, enquanto que na condição I com uma razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 1,34 a remoção de sulfato foi 3 vezes maior na condição Ic do que na condição Ia. A Figura 5.72 ilustra que, com exceção da baixa atividade das BRS na condição Ia, as eficiências das respectivas estratégias de alimentação na remoção de sulfato diminuíram significativamente conforme aumentou a concentração de sulfato no afluente. Tal fato que parece estar ligado à dificuldade das BRS, em todas as 9 condições, de aproveitar a parte da matéria orgânica que ficou como substrato residual no reator (ver Figura 5.69), o que contribuiu para que não houvesse quantidades maiores de carga de sulfato removido (CSR) nos ensaios da condição III (Figura 5.74 e Figura 5.75). As quantidades removidas de carga de sulfato encontraram-se em uma faixa de $0,30 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ (Ib) a $0,55 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ (IIIc).

Na Figura 5.75 pode-se observar que, nos ensaios com alimentação de 10 min (B) e ensaios com alimentação de 3 h (FB1), o aumento da carga de sulfato aplicada (CSA) não induziu a uma remoção maior de sulfato, enquanto que nos ensaios com alimentação de 6 h (FB2), a carga de sulfato removida (CSR) aumentou linearmente conforme aumentava a CSA.

Um possível motivo para a estagnação da remoção de sulfato nos ensaios em batelada pode ser o a desvantagem das BRS na competição por substrato neste modo de alimentação. Já nos ensaios com alimentação de 3 h (FB1), o reator não parece acompanhar o comportamento observado na remoção de matéria orgânica, ou seja, desta condição também ser a mais favorável para a remoção de sulfato com o reator operando com uma CSA de $2,29 \text{ gSO}_4^{2-} \cdot (\text{L.d})^{-1}$ (razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ de 0,34). Isto provavelmente ocorreu devido a um possível efeito inibidor do sulfeto na atividade das BRS a partir da 4^a hora do ciclo de tratamento (ver Figura 5.62; perfil da concentração de sulfeto total dissolvido).

De modo geral, uma concentração maior de sulfato no afluente aumentou a razão de carga de sulfato removido (CSR) por carga de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), como mostra a Figura 5.76. O valor baixo na condição IIIb (FB1) foi provocado pela divergência entre a remoção de matéria orgânica e a remoção de sulfato neste ensaio.

A Figura 5.77 mostra que a produção de sulfeto aumentou nas respectivas estratégias de alimentação conforme diminuiu a razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$. Também ilustra o efeito da reoxidação de sulfeto nos ensaios com alimentação em batelada alimentada de 6 horas (FB2). Apesar da carga de sulfeto removida ter sido igual ou maior nestes ensaios, comparada a remoção de sulfato nas condições com alimentação de 3 horas (FB1), a concentração de sulfeto total dissolvido (STD) no reator foi menor.

Figura 5.76 – Comparação das razões de carga de sulfato removido (CSR) por carga de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}) durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB 1) e batelada alimentada – 6h (FB 2).

Figura 5.77 – Comparação das concentrações de sulfeto total dissolvido (STD) no efluente durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB 1) e batelada alimentada – 6h (FB 2).

Verifica-se na Figura 5.78 uma produção maior de AB durante os ensaios de batelada alimentada (FB1 e FB2), nas quais as BRS foram mais ativas. Uma influência da razão DQO/[SO₄²⁻] foi observada principalmente durante as operações em batelada (B), nas quais a

produção de alcalinidade a bicarbonato (AB) aumentava conforme a razão $\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}]$ diminuía, comportamento este provavelmente também induzido pela maior atividade das BRS nas condições IIa e IIIa e pela diminuição de consumo de bicarbonato pelas arqueias metanogênicas nestes ensaios.

Figura 5.78 – Comparação das concentrações de alcalinidade a bicarbonato (AB) no efluente durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB 1) e batelada alimentada – 6h (FB 2).

Durante os ensaios da condição I, o aumento do tempo de alimentação contribuiu para que a competitividade das arqueias metanogênicas caísse com o efeito do acúmulo de AVT nas operações em batelada alimentada, conforme mostrado na Figura 5.79. Nos ensaios II e III registrou-se uma tendência inversa, com produções maiores de AVT durante a alimentação em batelada e concentrações menores na alimentação em batelada alimentada. Os motivos para estas concentrações mais altas nos ensaios em batelada foram, de um lado, a supressão da metanogênese e, do outro, a perda de substrato das BRS para oxidadoras incompletas nestas condições, provocando assim uma atividade mais baixa das BRS e prejudicando uma possível

oxidação completa de substrato pela via da sulfetogênese.

Figura 5.79 – Comparação das concentrações de ácidos voláteis totais (AVT) no efluente durante o monitoramento das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB 1) e batelada alimentada – 6h (FB 2).

A Figura 5.80 mostra que a produção de metano caiu significativamente com o aumento da concentração de sulfato no meio afluente. Isso mostra a vantagem das BRS na competição por substrato em razões $DQO/[SO_4^{2-}] < 0,67$.

A produção de dióxido de carbono diminuiu com tempos de enchimentos mais longos, indicando a atividade maior das BRS nestas condições. Por outro lado, aumentou conforme diminuiu a razão $DQO/[SO_4^{2-}]$, principalmente nos ensaios com alimentação em batelada (Figura 5.81). Uma possível explicação para as diferenças na ensaio em batelada é a diminuição do consumo de CO_2 pelas arqueias metanogênicas com o aumento da concentração de sulfato.

Figura 5.80 – Comparação das concentrações de metano (C_{CH_4}) no efluente durante os perfis das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB 1) e batelada alimentada – 6h (FB 2).

Figura 5.81 – Comparação das concentrações de dióxido de carbono (C_{CO_2}) no efluente durante os perfis das condições I, II e III, nas estratégias de alimentação de batelada, batelada alimentada – 3h (FB 1) e batelada alimentada – 6h (FB 2).

Comparando-se as eficiências de remoção de sulfato com as de reatores de outros estudos, o reator teve, com a remoção mais baixa de 23% (Ia) e a mais alta de 71% (Ic), um desempenho menor. Porém, este projeto não teve como finalidade otimizar a remoção de sulfato nas 9 condições propostas no estudo, mas sim avaliar o comportamento e a evolução

do reator nas diferentes estratégias de alimentação e razões de $DQO/[SO_4^{2-}]$.

Em um estudo investigando a influência da razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ na remoção de sulfato e de matéria orgânica em um reator operado em batelada, Silva et al. (2002) encontraram a uma eficiência de remoção de sulfato de 65% e de 61% para a DQO alimentando o reator uma razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,5. Com uma razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,8, o reator removeu 69% de sulfato e 85% de matéria orgânica. A remoção de sulfato aumentou significativamente (90%) após a suplementação de etanol no meio afluente, alimentando o reator com uma razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 10,6. Em um trabalho posterior, Silva et al. (2005) obtiveram remoções de 96% trabalhando com um reator ASBBR com biomassa imobilizada em espuma de poliuretano, uma $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,3 e um ciclo de tratamento de 24 horas.

Sarti et al. (2006) registraram durante 275 dias de operação eficiências na redução de sulfato entre 84 e 95% em um reator ASBBR de escala piloto (V_T de $1,2m^3$), com suplementação de etanol e tempos de ciclo de 12, 20 e 28 horas. Mizuno et al. (1994) obtiveram uma remoção de sulfato de 90% trabalhando com um reator contínuo de mistura completa, utilizando uma razão alta de $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 15,0 e um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 8 horas. Já em um estudo de Omil et al. (1996), o reator UASB, operado com uma razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,4 e um TDH de 0,27 horas, removeu 27% do sulfato alimentado.

Observa-se nestes estudos que a remoção de sulfato pode ser controlada principalmente pela razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ no meio afluente, pelo substrato utilizado e pelo tempo de reação.

5.6 Análises microbiológicas da biomassa imobilizada

Amostras do lodo da biomassa imobilizada em espuma de poliuretano foram analisadas antes da operação do reator e após o término da etapa de ensaios de 302 dias. As Figuras 5.82 e 5.83 apresentam as morfologias microbianas identificadas durante os exames microbiológicos de contraste de fase.

A Figura 5.82 mostra que as principais morfologias encontradas na biomassa do reator antes do início dos ensaios foram bacilos de extremidades arredondadas, provavelmente bactérias acidogênicas. Verifica-se também a presença de células semelhantes à *Methanosaeta*, visto que foi registrada produção de metano nos primeiros ensaios.

Na Figura 5.83, observa-se que após o término da condição III (razão DQO/[SO₄²⁻] de 0,34) a quantidade de bacilos curvos semelhantes às bactérias redutoras de sulfato nas microscopias aumentou, e pode-se verificar a presença de cocos. Também foram encontrados os bacilos de extremidades arredondadas; entretanto não observou-se a presença das morfologias semelhantes a *Methanosaeta*, que foram encontradas no início das operações.

Figura 5.82 – 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*].

A partir das microscopias de contraste de fase, pode-se inferir que a diminuição da razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ pode ter favorecido o desenvolvimento de bacilos curvos semelhantes a bactérias redutoras de sulfato e prejudicou o desenvolvimento das morfologias semelhantes a *Methanosaeta*, observadas na análise microbiológica no início da operação (Figura 5.82). A ausência de morfologias semelhantes a *Methanosaeta* no lodo analisado ao término dos ensaios pode ser corroborado pelo perfil de concentração de metano (CH_4) durante os ensaios da condição III, nos quais não se detectou metano no biogás.

Figura 5.83 – Microscopia de contraste de fase realizada no inoculo após o término das operações (após a condição III). [Notação: (a) cocos; (b) bacilos curvos; (c) bacilos de extremidades arredondadas]

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões

A análise dos resultados obtidos durante os ensaios propostos nos permite concluir sobre o efeito do tempo de alimentação e da razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ sobre o desempenho do reator na remoção de sulfato e de matéria orgânica.

Quanto ao efeito do tempo de alimentação, conclui-se que o aumento do tempo de alimentação favoreceu as BRS na competição por matéria orgânica e remoção de sulfato e desfavoreceu outros microorganismos anaeróbios na assimilação de substrato.

Neste sentido, observou-se durante os ensaios com razões $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34 uma maior remoção de matéria orgânica no ensaio com alimentação em batelada (ensaio Ia) e, ao aumentar o tempo de alimentação (ensaio Ib e Ic), essa remoção diminuiu. Entretanto, nos ensaios com razões $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,67 e 0,34 notou-se um comportamento inverso, com remoções maiores de matéria orgânica nos ensaios com alimentação em batelada alimentada (ensaio FB1 e FB2) do que na alimentação em batelada (ensaio B).

Com o aumento do tempo de enchimento houve um maior efeito de oxidação de sulfeto para enxofre elementar.

A produção de dióxido de carbono diminuiu com tempos de enchimentos mais longos, indicando predominância da atividade das BRS nestas condições. Também houve uma diminuição da produção de metano, possivelmente afetada pelo maior consumo de acetato

pelas BRS e pelas concentrações crescentes de sulfeto e seu efeito inibidor.

Quanto ao efeito da razão $DQO/[SO_4^{2-}]$, conclui-se que, durante os ensaios em batelada (ensaios B) e batelada alimentada de 6 horas (ensaios FB2), a carga de matéria orgânica removida (COR_{SOF}) diminuiu conforme aumentou a concentração de sulfato no afluente. Já nos ensaios com batelada alimentada de 3 horas (ensaios FB1), o aumento da concentração de sulfato melhorou a remoção de matéria orgânica.

Nos ensaios em batelada (ensaios B), a carga de sulfato removida (CSR) aumentou significativamente ao diminuir-se a razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 1,34 para 0,67 e ficou neste nível no ensaio com razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,34. Além disso, notou-se uma dificuldade das BRS ao se adaptarem a essa estratégia de alimentação.

Nos primeiros ensaios com batelada alimentada de 3 horas (ensaios FB1), registrou-se uma tendência deste modo de operação também fornecer as melhores condições para a remoção de sulfato, conforme foi observado na remoção de substrato. Mas ao aumentar-se a concentração de sulfato no afluente (ensaio IIIb; $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,34), houve uma estagnação da remoção de sulfato, possivelmente provocada pela produção alta de sulfeto e uma possível inibição da sulfetogênese por este íon. Nos ensaios com tempo de alimentação de 6 h (ensaios FB2), a carga de sulfato removida cresceu linearmente, o que indica uma certa resistência da sulfetogênese nesse modo de operação contra o efeito inibidor do sulfeto por meio da oxidação de parte desses íons para enxofre elementar.

Em todas as condições, o aumento da concentração de sulfato induziu um maior aproveitamento da matéria orgânica para a remoção de sulfato, ou seja a razão carga de sulfato removida (CSR) por carga da matéria orgânica removida aumentou (COR_{SOF}). Entretanto, em termos de eficiência de remoção de sulfato, verificou-se uma diminuição em todos os modos de operação (ensaios B, FB1 e FB2) conforme aumentou-se a carga de sulfato aplicada.

A concentração de sulfeto total dissolvido (STD) aumentou ao diminuir a razão DQO/[SO₄²⁻]. Além disso, a produção de metano caiu significativamente nas condições com maiores concentrações de sulfato, enquanto que a produção de dióxido de carbono aumentou, principalmente nos ensaios em batelada.

Em termos gerais, observou-se uma remoção menor de matéria orgânica (média de 77%) comparado à eficiência de remoção de matéria orgânica (84%) em reatores com configurações parecidas (substrato, imobilização da biomassa, tempo de ciclo) tratando esgoto sintético sem adição de sulfeto de sódio.

Comparado às eficiências de remoção de sulfato com reatores de outros estudos, o reator teve, com a remoção mais baixa de 23% (Ia) e a mais alta de 71% (Ic), um desempenho pior. Nestes outros estudos, eficiências maiores foram obtidas principalmente através de ciclos de tratamentos mais longos, razões de DQO/[SO₄²⁻] mais altas e alimentação com substratos (etanol) facilmente assimiláveis pelas BRS.

Por fim, a produção de alcalinidade a bicarbonato (AB) foi estável e suficientemente alta para garantir o tamponamento dos ácidos voláteis e a estabilidade da digestão anaeróbia. Observou-se um aumento da produção de AB, conforme aumentou a atividade das bactérias redutoras de sulfato.

6.2 Sugestões

- Aplicar uma aeração de forma intermitente no reator, para verificar os efeitos inibitórios durante os ensaios com razão $DQO/[SO_4^{2-}]$ de 0,34 nas comunidades microbianas presentes e para possibilitar uma maior conversão dos produtos da sulfetogênese em enxofre molecular;
- Aplicar metais pesados em diferentes concentrações ao aflente 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.
- Separar a fonte de matéria orgânica e a fonte sulfato e aplicar estratégias de alimentações diferentes (batelada alimentada para a fonte de matéria orgânica e batelada para a fonte de sulfato), com a finalidade de fornecer condições que favorecem o metabolismo das BRS.

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.

BRASIL. Lei nº 997 de 31 de maio de 1976, regulamentada pelo Decreto Estadual 8468 de 1976, no Artigo 19-A. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente. **Diário Oficial da União**, São Paulo, SP, v.86, n.102, 01 jun. 1976.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 mar. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 1.469, de 29 de dezembro de 2000. Dispõe sobre o controle e a vigilância da Qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, 29 dez. 2000.

CADAVID, D.E.L.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Performance of horizontal-flow anaerobic immobilized sludge (HAIS) reactor treating synthetic substrate subjected to decreasing COD to sulphate ratios. **Water Science and Technology**, 39, p. 99-106, 1999.

DAGUE, R.R.; McKINNEY, R.E.; PFEFFER, J.T. Anaerobic activated sludge. **Journal Water Pollution Control Federation**, 38, p. 220-225, 1966.

DAGUE, R.R.; McKINNEY, R.E.; PFEFFER, J.T. Solids retention in anaerobic waste treatment systems. **Journal Water Pollution Control Federation**, 42(2), R29-R46, 1970.

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

DAMIANOVIC, MHRZ.; SAKAMOTO, IK.; FORESTI, E. Biofilm Adaptation to Sulphate Reduction in Anaerobic Immobilized Biomass Reactors Submitted to Different COD/Sulphate Ratios. In: **Proceedings of VIII Taller Y Simposio Latinoamericano sobre Digestion Anaerobia**, Punta del Este, Uruguay, 2005.

DANNENBERG, S.; KRODER, M.; DILING, W.; CYPIONKA, H. Oxidation of H₂, organic compounds and inorganic sulfur compounds coupled to reduction of O₂ or nitrate by sulfate-reducing bacteria. **Archives of Microbiology**, 158, p. 93-99, 1992.

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

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

HARPER, S.R.; POHLAND, F.G. Recent Developments in Hydrogen Management During Anaerobic Biological Wastewater Treatment. **Biotechnology an Bioengineering**, 28, p. 585-602, 1986.

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.

HILTON, B.L.; OLESZKIEWICZ, J.A. Sulphide induced inhibition of anaerobic digestion. **Journal of Environmental Engineering**, 114, p. 1377-1391, 1988.

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

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

KHANAL, S.K.; SHANG, C.; HUANG, J.-C. Use of ORP (oxidation-reduction potential) to control oxygen dosing for online sulfide oxidation in anaerobic treatment of high sulfate wastewater. **Water Science and Technology**, 47(12), p. 183-189, 2003.

KOSTER, I.; RINZEMA, A.; DE VEGT, L.; LETTINGA, G. Sulfide inhibition of the methanogenic activity of granular sludge at different pH levels. **Water Research**, 12, p. 1561-1567, 1986.

LAANBROCK, 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**, 133, p. 178-184, 1982.

LENS, P.; MASSONE, A.; ROZZI, A.; VERSTRAETE, W. Effect of sulphate concentration on aerobic fixed biofilm reactors. **Water Research**, 29(3), p. 857-870, 1995a.

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**, 29(3), p. 871-880, 1995b.

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

LENS, P.N.L.; OMIL, F.; LEMA, J.M.; HULSHOFF POL, L.W. Biotreatment of sulfate-rich waste water. **Environmental technologies to treat sulfur pollution: Principles and Engineering**, p. 153-173, Edited by Piet Lens and Look Hulshoff Pol, IWA Publishing, 2000.

LETTINGA, G.; HOBMA, S.W.; KLAPWIJK, A.; VAN VELSEN, A.F.M.; DE ZEEUW, W.J. Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment. **Biotechnology and Bioengineering**, 22, p. 699-734, 1980.

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

MATIAS, P.M.; PEREIRA I.A.C.; SOARES C.M.; CARRONDO M.A. Sulfate respiration from hydrogen in *Desulfovibrio* bacteria: a structural biology overview. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, 89, p. 292-329, 2005.

McCARTNEY, D.M.; OLESZKIEWICZ, J.A. Competition between methanogens and sulfate reducers: effect of COD: sulfate ratio and acclimation. **Water Environment Research**, 65, p. 655-664, 1993.

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

MICHELAN, R.; ZIMMER, T.R.; RODRIGUES, J.A.D.; RATUSZNEI, S.M.; MORAES, D.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Análise do Efeito do Tipo de Impelidor sobre o Desempenho de um ASBR Aplicado ao Tratamento de Esgoto Sintético. **Proceedings of the 2nd International Water Conference**, Porto-Portugal, p. 273-283, 2006.

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**, 30(8), p. 45-54, 1994.

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

MOOSA, S.; NEMATI, 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**, 60, p. 3517-3524, 2005.

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**, 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**, 31(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**, 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**, 31, p. 699-710, 1996.

OMIL, F.; VISSER, A.; HULSHOFF, P.L.W.; LETTINGA, G. Simulación dinámica de la competición entre bacterias productoras de metano y bacterias sulfato reductoras en reactores anaerobios de lodos granulares. **Afinidad**, LIV(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**, 49, p. 303-310, 2004.

PARRAVICINI, V.; SVARDAL, K.; KROISS, H. Application of anaerobic biological treatment for sulphate removal in viscose industry wastewater. **Water Science and Technology**, 55(6), p.181-189, 2007.

PEREZ RODRIGUEZ, J.L.; CARRETERO, M.I.; MAQUEDA, C. Behaviour of sepiolite, vermiculite and montmorillonite as supports in anaerobic digesters. **Applied Clay Science**, 4, p. 69-82, 1989

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

RATUSZNEI, S.M.; RODRIGUES, J.A.D.; CAMARGO, E.F.M.; ZAIAT, M.; BORZANI, W. Influence of agitation rate on the performance of a stirred anaerobic sequencing batch reactor containing immobilized biomass. **Water Science and Technology**, 44, p. 305-312, 2001.

RATUSZNEI, S.M.; RODRIGUES, J.A.D.; CAMARGO, E.F.M.; RIBEIRO, R.; ZAIAT, M. Effects of feeding strategy on the stability and efficiency of a stirred anaerobic sequential fed-batch reactor containing immobilized biomass. **Bioresource Technology**, 90(2), p. 199-205, 2003.

RINZEMA, A.; LETTINGA, G. The effect of sulphide on the anaerobic degradation of propionate. **Environmental Technology Letters**, 9(2), p. 83-88, 1988.

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

SARTI, A.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Tratamento de Esgoto Sanitário Utilizando Reatores Anaeróbios Operados em Bateladas Sequenciais. **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 Sanitaria Ambiental**, 11(1), p. 73-82, 2006.

SHIZAS, I.; BAGLEY, D.M. Improving anaerobic sequencing batch reactor performance by modifying operational parameters. **Water Research**, 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**, 37(9), p. 927-935, 2002.

SILVA, A.J. **Biodessulfatação com Posterior Oxidação Parcial do Sulfeto em Reatores Operados em Bateladas Sequenciais**. 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**, 48, p. 297-303, 1997.

SUNG, S.; DAGUE, R.R. Laboratory studies on the anaerobic sequencing batch reactor. **Water Environment Research**, 67(3), p. 294-301, 1995.

APHA, AWWA, WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 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

VALLERO, M. V. G.; TREVINO, R. H. M.; PAULO, P. L., LETTINGA, G.; LENS, P. N. L. Effect of sulfate on methanol degradation in thermophilic (55 °C) methanogenic UASB reactors. **Enzyme Microbiology Technology**. 32 (6), p. 676-687, 2003.

VASSOUGH, M.; SHAKERI, M.; ALEMZADEH, I. Performance of Anaerobic Baffled Reactor Treating Synthetic Wastewater Influenced by Decreasing COD/SO₄ Ratios. **Chemical Engineering and Processing**, 42, p. 811-816, 2003.

VISSER, A.; HULSHOFF POL; L.W.; LETTINGA, G. Competition of methanogenic and sulfidogenic bacteria. **Water Science and Technology**, 33, p. 99-100, 1996.

WIDDEL, F. Microbiology and ecology of sulfate and sulfur reducing bacteria. In: ZENDER, A. ed. **Biology of anaerobic microorganisms**. New York, John Wiley & Sons, ISBN 0471882267, p. 459-586, 1988.

ZAIAT, M.; CABRAL, A.K.A.; FORESTI, E. Reator anaeróbio horizontal de leito fixo para tratamento de águas residuárias: concepção e avaliação preliminar de desempenho. **Revista Brasileira de Engenharia – Caderno de Engenharia Química**, 11(2), p. 3-42, 1994.

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**, 55(1): 29-35, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NO ENSAIO PRELIMINAR

A1 Dados de Monitoramento

Durante o ensaio preliminar foram monitoradas as seguintes variáveis do meio afluyente:

concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), 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) e concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela A1 a A4).

Tabela A1 – Valores monitorados do afluyente utilizado no ensaio preliminar (“ C_{ST} ” a “AVT”).

Dia	C_{ST}	$[SO_4^{2-}]$	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
0	563,0	356,6	-	-	-	-	-	-
1	542,1	344,0	9,03	199,5	45,2	0,23	202,2	59,9
2	521,3	337,9	9,19	208,6	46,6	0,22	204,5	71,3
3	511,7	360,2	9,09	205,0	45,8	0,22	204,8	64,8
4	-	350,3	8,91	179,9	49,2	0,27	201,6	38,7
5	-	-	9,13	197,5	43,0	0,22	189,2	72,2
7	525,9	402,9	-	-	-	-	-	-
8	-	-	8,66	166,9	53,7	0,32	196,3	34,3
9	544,1	480,3	-	-	-	-	-	-
10	-	392,3	8,79	171,7	48,3	0,28	194,8	35,4
11	489,3	420,1	8,51	173,1	49,6	0,29	199,0	33,5
12	543,6	-	8,57	177,2	54,4	0,31	202,9	40,4
18	563,6	-	-	-	-	-	-	-
21	540,5	-	-	-	-	-	-	-
22	561,7	318,6	-	-	-	-	-	-
23	476,0	305,2	8,8	165,1	44,1	0,27	179,9	41,3
24	468,9	317,5	8,51	170,6	46,4	0,27	187,3	41,8
25	512,8	339,4	8,46	150,9	46,1	0,31	170,7	37,0
26	-	-	8,77	157,3	41,8	0,27	173,3	36,4

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 $[SO_4^{2-}]$ mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela A2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A1

	C _{ST}	[SO ₄ ²⁻]	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
média	526,0	363,5	8,8	178,7	47,3	0,3	192,8	46,7
dp.	31,2	48,8	0,3	18,4	3,8	0,0	11,8	14,6
qu.	14	13	13	13	13	13	13	13
máx.	563,6	480,3	9,2	208,6	54,4	0,3	204,8	72,2
mín.	468,9	305,2	8,5	150,9	41,8	0,2	170,7	33,5

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 [SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela A3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio preliminar (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
2	1772	578	106	110
4	1464	262	116	68
8	1366	256	76	80
11	1710	648	120	144
23	1650	658	42	54
25	1612	564	42	94

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela A4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A3

	ST	SVT	SST	SSV
média	1596	494	84	92
dp.	153	186	36	32
qu.	6	6	6	6
máx.	1772	658	120	144
mín.	1366	256	42	54

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Durante o ensaio preliminar foram monitoradas as seguintes variáveis do efluente:

descarga (Desc.), 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 ($[SO_4^{2-}]$), concentração de sulfito ($[SO_3^{2-}]$), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto ($[HS^-]$), concentração de sulfeto de hidrogênio ($[H_2S]$), 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), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela A5 a A10).

Tabela A5 – Valores monitorados do efluente no ensaio preliminar (“Desc.” a “HS”).

Dia	Desc.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	$[SO_4^{2-}]$	$[SO_3^{2-}]$	STD	$[H_2S]$	$[HS^-]$
1	1,91	-	-	-	-	-	-	9,6	1,8	7,8
2	1,94	55,7	83,0	34,7	62,0	283,1	-	10,5	1,7	8,8
3	1,95	67,1	81,1	46,9	60,9	248,5	-	10,1	1,5	8,6
4	1,96	38,1	50,1	17,9	29,9	283,8	-	10,1	2,8	7,3
5	1,98	30,1	49,1	9,9	28,9	210,1	-	-	-	-
8	2,04	23,2	59,2	3,0	39,0	296,8	-	-	-	-
10	1,98	33,5	53,6	13,6	33,7	-	-	9,9	3,2	6,8
11	2,02	28,1	66,1	8,2	46,2	313,3	-	9,9	3,3	6,7
12	2,04	29,4	63,1	9,5	43,2	314,6	-	-	-	-
19	1,84	83,1	117,4	63,2	97,5	-	-	-	-	-
23	1,99	-	-	-	-	218,5	-	9,0	1,6	7,4
24	2,01	-	-	-	-	-	-	28,5	5,9	22,6
25	2,04	-	-	-	-	-	-	26,0	5,1	20,9
26	2,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Unidades:	Dia	d	$[SO_4^{2-}]$	$mgSO_4^{2-}.L^{-1}$
	Desc.	L	$[SO_3^{2-}]$	$mgSO_3^{2-}.L^{-1}$
	C_{ST}	$mgDQO.L^{-1}$	STD	$mg.L^{-1}$
	C_{SF}	$mgDQO.L^{-1}$	$[H_2S]$	$mgH_2S.L^{-1}$
	C_{SOT}	$mgDQO.L^{-1}$	$[HS^-]$	$mgHS^-.L^{-1}$
	C_{SOF}	$mgDQO.L^{-1}$		

Tabela A6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A5

	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
média	2,0	43,1	69,2	23,0	49,0	271,1	-	13,7	3,0	10,7
dp.	0,1	20,7	21,8	20,7	21,8	40,8	-	7,7	1,6	6,3
qu.	13	9	9	9	9	8	-	9	9	9
máx.	2,0	83,1	117,4	63,2	97,5	314,6	-	28,5	5,9	22,6
mín.	1,8	23,2	49,1	3,0	28,9	210,1	-	9,0	1,5	6,7

Unidades:	Dia	d	[SO ₄ ²⁻]	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	[SO ₃ ²⁻]	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C _{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C _{SF}	mgDQO.L ⁻¹	[H ₂ S]	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C _{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	[HS ⁻]	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C _{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela A7 – Valores monitorados do efluente no ensaio preliminar (“pH” a “AVT”)

Dia	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
1	7,67	354,9	55,2	410,1	0,16	381,7	40,1
2	7,75	339,4	47,8	387,2	0,14	349,6	53,0
3	7,79	329,3	47,6	376,9	0,14	338,3	54,3
4	7,45	269,9	69,0	338,9	0,26	322,3	23,3
5	7,94	345,7	48,5	394,2	0,14	357,5	51,8
8	7,32	246,9	76,8	323,6	0,31	313,0	14,9
10	7,37	262,1	64,0	326,1	0,24	310,4	22,1
11	7,35	260,8	71,3	332,1	0,27	301,2	43,4
12	7,31	261,0	82,0	343,0	0,31	329,7	18,8
23	7,69	419,5	85,0	504,5	0,20	467,6	52,0
24	7,62	433,4	88,9	522,3	0,21	488,9	47,1
25	7,65	420,4	106,4	526,8	0,25	495,6	44,0
26	7,63	430,2	98,9	529,1	0,23	510,7	25,9

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela A8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A7

	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
média	7,6	336,4	72,4	408,8	0,2	382,0	37,7
dp.	0,2	71,9	19,5	82,3	0,1	78,8	14,6
qu.	13	13	13	13	13	13	13
máx.	7,9	433,4	106,4	529,1	0,3	510,7	54,3
mín.	7,3	246,9	47,6	323,6	0,1	301,2	14,9

Unidades: Dia d AT mgCaCO₃.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹ AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹ AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela A9 – Valores monitorados do efluente no ensaio preliminar (“ST” a “SSV”)

Dia	ST	SVT	SST	SSV
2	1356	386	80	106
4	2008	766	98	60
8	1796	626	88	88
11	1420	334	100	96
23	1314	496	30	114
25	1474	594	22	38

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela A10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A9

	ST	SVT	SST	SSV
média	1561	534	70	84
dp.	278	161	35	29
qu.	6	6	6	6
máx.	2008	766	100	114
mín.	1314	334	22	38

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela A11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) do ensaio preliminar.

Dia	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
2	89,4	84,2	93,4	88,2	22,1
3	87,2	84,6	91,1	88,4	31,6
4	92,8	90,5	96,6	94,3	21,9
5	94,3	90,7	98,1	94,5	42,2
8	95,6	88,7	99,4	92,6	18,4
10	93,6	89,8	97,4	93,6	-
11	94,7	87,4	98,4	91,2	13,8
12	94,4	88,0	98,2	91,8	13,5
19	84,2	77,7	88,0	81,5	-
23	-	-	-	-	39,9

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

Tabela A12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A11.

	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
média	91,8	86,8	95,6	90,7	25,4
dp.	3,9	4,2	3,9	4,1	11,2
qu.	9	9	9	9	8
máx.	95,6	90,7	99,4	94,5	42,2
mín.	84,2	77,7	88,0	81,5	13,5

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

A partir destes valores monitorados durante o ensaio preliminar foram calculadas:

a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável não filtrada removida (COR_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida (COR_{SF}), a carga volumétrica de matéria orgânica não filtrada removida (COR_{SOT}), a carga volumétrica de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA) e a carga volumétrica de sulfato removida (CSR) (Tabela A13).

Tabela A13 – Cargas aplicadas e removidas durante o ensaio preliminar.

Dia	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
0	-	-	-	-	-	534,9	-
1	813,2	-	-	-	-	516,0	-
2	782,0	705,5	664,6	736,9	696,0	506,9	120,6
3	767,6	688,4	667,4	718,7	697,7	540,3	172,4
4	-	731,9	713,9	762,2	744,2	525,4	119,6
5	-	743,9	715,4	774,2	745,7	-	230,1
7	788,9	-	-	-	-	604,3	-
8	-	754,3	700,3	784,6	730,6	-	100,1
9	816,2	-	-	-	-	720,5	-
10	-	738,8	708,7	768,6	738,4	588,4	545,2
11	734,0	746,9	689,9	776,7	719,7	630,1	75,2
12	815,4	745,0	694,4	774,8	724,2	-	73,3
18	845,4	-	-	-	-	-	-
19	-	664,4	613,0	694,2	642,8	-	545,2
21	810,8	-	-	-	-	-	-
22	842,6	-	-	-	-	477,9	-
23	714,0	-	-	-	-	457,7	217,5
24	703,4	-	-	-	-	476,2	-
25	769,2	-	-	-	-	509,2	-

Unidades: todos em [g.(L.d)⁻¹]

Tabela A14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A13.

	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
média	784,8	724,3	685,3	754,6	715,5	545,2	219,9
dp.	45,8	31,1	32,8	31,0	32,7	73,2	179,7
qu.	13	9	9	9	9	13	10
máx.	845,4	754,3	715,4	784,6	745,7	720,5	545,2
mín.	703,4	664,4	613,0	694,2	642,8	457,7	73,3

APÊNDICE B

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NA CONDIÇÃO Ia

Nesta Condição o reator operou 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).

B1 Dados de monitoramento

Durante os ensaios da Condição I foram monitoradas as seguintes variáveis do meio afluente: concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), 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) e concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela B1 a B4).

Tabela B1 – Valores monitorados do afluente da condição Ia (“ C_{ST} ” a “AVT”).

Dia	C_{ST}	$[SO_4^{2-}]$	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
0	-	301,1	-	-	-	-	-	-
1	472,3	306,4	-	-	-	-	-	-
2	508,7	273,7	8,80	170,4	44,4	0,26	187,8	38,2
4	536,9	496,1	8,89	162,9	40,9	0,25	174,1	41,8
7	452,6	-	-	-	-	-	-	-
8	-	437,6	-	-	-	-	-	-
9	482,8	-	-	-	-	-	-	-
11	499,0	384,2	9,14	173,4	41,8	0,24	184,8	42,8
14	484,9	373,4	8,82	160,6	48,6	0,30	166,6	60,0
16	492,6	417,4	-	-	-	-	-	-
18	483,8	374,0	9,00	189,5	50,8	0,27	206,6	47,5
21	568,9	352,0	8,74	182,1	41,9	0,23	197,4	37,5
23	513,6	358,9	-	-	-	-	-	-
25	534,8	365,3	8,62	156,2	47,7	0,31	178,3	36,1
28	490,7	386,8	-	-	-	-	-	-
30	480,9	395,9	-	-	-	-	-	-
32	496,9	387,4	8,69	174,4	52,9	0,30	200,4	37,9
35	-	385,7	-	-	-	-	-	-
37	475,3	-	8,51	195,4	65,5	0,34	236,6	34,3
38	-	387,1	-	-	-	-	-	-
39	484,3	403,8	-	-	-	-	-	-
42	459,8	370,9	8,56	209,6	56,6	0,27	234,6	44,5

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 $[SO_4^{2-}]$ mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela B2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B1

	C _{ST}	[SO ₄ ²⁻]	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
média	495,5	376,7	8,8	177,5	49,1	0,3	196,7	42,1
dp.	28,7	49,2	0,2	16,8	7,7	0,0	23,8	7,5
qu.	18	19	10	10	10	10	10	10
máx.	568,9	496,1	9,1	209,6	65,5	0,3	236,6	60,0
mín.	452,6	273,7	8,5	156,2	40,9	0,2	166,6	34,3

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 [SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela B3 – Valores monitorados do afluyente da condição Ia (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
1	1660	654	36	40
17	1692	526	54	18
23	1488	382	36	36
31	1608	676	70	62
38	1640	514	10	26

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela B4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B3

	ST	SVT	SST	SSV
média	1618	550	41	36
dp.	79	119	22	17
qu.	5	5	5	5
máx.	1692	676	70	62
mín.	1488	382	10	18

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Durante a condição Ia foram monitoradas as seguintes variáveis do efluente:

descarga (Desc.), 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 ($[SO_4^{2-}]$), concentração de sulfito ($[SO_3^{2-}]$), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto ($[HS^-]$), concentração de sulfeto de hidrogênio ($[H_2S]$), 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), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela B5 a B10).

Tabela B5 – Valores monitorados do efluente na condição Ia. (“Desc.” a “HS”).

Dia	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
0	2,02	149,1	118,3	110,5	79,7	-	13,0	18,0	3,1	14,9
1	2,00	131,9	103,6	109,9	81,6	-	15,0	9,5	3,0	6,5
2	2,00	130,1	92,8	110,1	72,8	-	25,0	7,5	1,9	5,6
3	2,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2,01	130,1	101,4	114,5	85,8	284,2	8,0	7,0	1,1	5,9
7	2,09	130,1	75,1	114,5	59,5	-	-	-	-	-
8	2,04	-	-	-	-	-	5,0	6,0	2,3	3,7
9	2,03	143,3	110,6	130,5	97,8	251,2	14,0	5,0	1,9	3,1
10	2,05	109,1	64,8	96,3	52,0	288,4	-	-	-	-
11	2,01	128,2	82,7	116,0	69,9	321,4	-	-	-	-
13	2,02	145,0	92,6	132,2	79,8	-	-	-	-	-
14	2,03	-	-	-	-	233,5	32,0	-	-	-
15	2,06	-	-	-	-	313,2	6,0	4,0	0,9	3,1
16	2,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	2,06	135,0	70,2	127,0	62,2	332,1	-	-	-	-
18	2,01	99,3	59,8	85,8	46,3	333,4	27,5	-	-	-
21	2,00	99,5	64,2	91,3	56,0	297,8	1,0	-	-	-
22	2,01	114,7	79,5	97,7	62,5	265,5	-	8,4	1,3	7,1
23	2,00	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-
24	1,96	88,3	61,8	70,2	43,7	297,7	6,5	-	-	-
25	1,98	85,0	55,3	67,3	37,6	-	12,5	7,6	3,7	3,9
28	1,96	123,4	90,6	99,7	66,9	291,9	-	10,6	5,2	5,4
29	1,99	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	2,00	-	-	-	-	251,5	13,0	7,5	2,7	4,8
31	2,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	2,00	108,2	78,9	84,5	55,2	-	-	-	-	-
35	1,98	-	-	-	-	365,3	-	-	-	-
36	2,00	125,6	104,8	101,1	80,3	291,9	0,5	11,0	2,7	8,3
37	2,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	2,02	123,3	110,6	98,6	85,9	275,1	3,5	12,0	3,3	8,7
41	1,98	133,1	112,7	106,6	86,2	-	-	-	-	-

Unidades: Dia d
 Desc. L
 C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 C_{SF} mgDQO.L⁻¹
 C_{SOT} mgDQO.L⁻¹
 C_{SOF} mgDQO.L⁻¹

[SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 [SO₃²⁻] mgSO₃²⁻.L⁻¹
 STD mg.L⁻¹
 [H₂S] mgH₂S.L⁻¹
 [HS⁻] mgHS⁻.L⁻¹

Tabela B6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B5

	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
média	2,0	121,6	86,5	103,2	68,1	293,4	11,9	8,8	2,5	6,2
dp.	0,0	18,2	20,0	17,8	16,5	34,5	9,3	3,6	1,2	3,2
qu.	31	20	20	20	20	16	16	13	13	13
máx.	2,1	149,1	118,3	132,2	97,8	365,3	32,0	18,0	5,2	14,9
mín.	2,0	85,0	55,3	67,3	37,6	233,5	0,5	4,0	0,9	3,1

Unidades:	Dia	d	[SO ₄ ²⁻]	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	[SO ₃ ²⁻]	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C _{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C _{SF}	mgDQO.L ⁻¹	[H ₂ S]	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C _{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	[HS ⁻]	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C _{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela B7 – Valores monitorados do efluente na condição Ia. (“pH” a “AVT“).

Dia	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
0	7,72	417,2	40,2	457,4	0,1	442,5	21,0
1	7,37	365,6	131,7	497,4	0,4	483,5	19,5
2	7,51	357,5	107,7	465,2	0,3	443,4	30,7
4	7,75	355,1	37,0	392,1	0,1	377,1	21,2
7	7,55	297,3	50,0	347,3	0,2	336,9	14,6
8	7,26	331,3	52,2	383,5	0,2	366,9	23,3
11	7,37	274,8	46,4	321,2	0,2	298,8	31,6
14	7,59	383,1	60,7	443,8	0,2	422,8	29,5
16	7,23	206,0	62,9	268,9	0,3	249,7	27,2
18	7,49	-	-	-	-	-	-
21	7,77	-	-	-	-	-	-
23	7,24	255,6	168,0	423,7	0,7	415,3	11,8
25	7,06	205,9	145,0	350,9	0,7	343,2	10,9
29	7,29	245,8	121,3	367,1	0,5	352,5	20,6
31	7,66	312,4	44,2	356,6	0,1	316,8	20,0
32	7,53	257,4	111,9	369,3	0,4	356,7	17,8
37	7,47	378,6	117,4	496,0	0,3	481,9	19,9

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela B8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B7

	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
média	7,5	309,6	86,4	396,0	0,3	379,2	21,3
dp.	0,2	66,7	44,0	66,2	0,2	67,8	6,3
qu.	17	15	15	15	15	15	15
máx.	7,8	417,2	168,0	497,4	0,7	483,5	31,6
mín.	7,1	205,9	37,0	268,9	0,1	249,7	10,9

Unidades: Dia d AT $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$
AP $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ AB $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$
AI $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ AVT $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela B9 – Valores monitorados do efluente na condição Ia. (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
1	1572	746	38	92
10	1390	784	12	108
17	1466	322	110	58
23	1416	366	66	74
31	1416	386	62	40
38	1398	330	58	68

Unidades: 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 B10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B9

	ST	SVT	SST	SSV
média	1443	489	58	73
dp.	69	215	33	24
qu.	6	6	6	6
máx.	1572	784	110	108
mín.	1390	322	12	40

Unidades: 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 B11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição Ia.

Dia	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
0	69,9	76,1	77,7	83,9	-
1	73,4	79,1	77,8	83,5	-
2	73,7	81,3	77,8	85,3	-
4	73,7	79,5	76,9	82,7	24,6
7	73,7	84,8	76,9	88,0	-
9	71,1	77,7	73,7	80,3	33,3
10	78,0	86,9	80,6	89,5	23,4
11	74,1	83,3	76,6	85,9	14,7
13	70,7	81,3	73,3	83,9	-
14	-	-	-	-	38,0
15	-	-	-	-	16,9
17	72,8	85,8	74,4	87,4	11,8
18	80,0	87,9	82,7	90,7	11,5
21	79,9	87,0	81,6	88,7	21,0
22	76,9	84,0	80,3	87,4	29,5
24	82,2	87,5	85,8	91,2	21,0
25	82,8	88,8	86,4	92,4	-
28	75,1	81,7	79,9	86,5	22,5
30	-	-	-	-	33,2
32	78,2	84,1	82,9	88,9	-
36	74,7	78,8	79,6	83,8	22,5
38	75,1	77,7	80,1	82,7	27,0
41	73,1	77,3	78,5	82,6	-

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

Tabela B12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B11.

	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
média	75,5	82,5	79,2	86,3	23,4
dp.	3,7	4,0	3,6	3,3	7,9
qu.	20	20	20	20	15
máx.	82,8	88,8	86,4	92,4	38,0
mín.	69,9	76,1	73,3	80,3	11,5

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

A partir destes valores monitorados durante a condição Ia foram calculadas:

a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável não filtrada removida (COR_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida (COR_{SF}), a carga volumétrica de matéria orgânica não filtrada removida (COR_{SOT}), a carga volumétrica de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA) e a carga volumétrica de sulfato removida (CSR) (Tabela B13).

Tabela B13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição Ia.

Dia	COA_{ST}	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
0	-	519,6	565,8	577,5	623,7	451,6	-
1	708,5	545,4	587,8	578,4	620,8	459,6	-
2	763,1	548,1	604,0	578,1	634,0	410,6	-
4	805,4	548,1	591,1	571,5	614,5	744,2	138,9
7	678,9	548,1	630,6	571,5	654,0	-	-
8	-	-	-	-	-	656,3	-
9	724,2	528,3	577,3	547,5	596,5	-	188,2
10	-	579,6	646,0	598,8	665,2	-	132,5
11	748,5	550,9	619,2	569,3	638,4	576,3	82,9
13	-	525,7	604,3	544,9	623,5	-	565,1
14	727,4	-	-	-	-	560,1	214,8
15	-	-	-	-	-	-	95,2
16	738,9	-	-	-	-	626,1	-
17	-	540,7	637,9	552,7	649,9	-	66,9
18	725,7	594,3	653,5	614,5	673,8	561,0	65,0
21	853,4	594,0	646,9	606,3	659,2	528,0	118,4
22	-	571,2	624,0	596,7	649,5	-	166,8
23	770,4	-	-	-	-	538,3	-
24	-	610,8	650,5	637,9	677,7	-	118,6
25	802,2	615,7	660,3	642,3	686,8	547,9	-
28	736,1	558,1	607,3	593,7	642,9	580,2	127,2
30	721,4	-	-	-	-	593,9	187,8
31	-	-	-	-	-	-	-
32	745,4	580,9	624,9	616,5	660,4	581,1	-
35	-	-	-	-	-	578,6	17,1
36	-	554,8	586,0	591,6	622,8	-	127,2
37	713,0	-	-	-	-	-	-
38	-	558,3	577,3	595,3	614,4	580,7	152,5
39	726,5	-	-	-	-	605,7	-
41	-	543,6	574,2	583,3	613,9	-	-
42	689,7	-	-	-	-	556,4	-

Unidades: todos em [g.(L.d)⁻¹]

Tabela B14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela B13.

	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
média	743,2	560,8	613,5	588,4	641,1	565,1	150,9
dp.	43,1	27,3	30,0	26,7	24,8	73,8	117,9
qu.	18	20	20	20	20	19	17
máx.	853,4	615,7	660,3	642,3	686,8	744,2	565,1
mín.	678,9	519,6	565,8	544,9	596,5	410,6	17,1

B2 Dados de perfil

Durante os perfis da condição Ia foram monitorados:

concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e concentração de sulfeto (C_{HS}), de pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade a bicarbonato (AB), oxigênio dissolvido (OD), potencial redox (PR), ácido acético (Ác. acét.), ácido propiônico (Ác. prop.), concentração de dióxido de carbono (C_{CO2}) e concentração de metano (C_{CH4}).

Tabela B15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ia (“C_{SF}” a “C_{HS}”).

Tempo	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SO4}	C _{SO4}	C _{SO3}	STD	C _{H2S}	C _{HS}
	03/04	03/04	09/04	09/04	03/04	09/04	04/04	04/04	04/04	04/04
0	281,3	278,1	306,3	303,1	367,9	343,3	11,0	0,5	0,1	0,4
0,5	214,7	205,9	245,9	237,1	356,7	315,6	11,5	3,3	0,6	2,7
1	158,0	143,7	200,5	186,2	339,9	300,8	11,5	6,0	1,4	4,6
1,5	135,0	117,1	168,9	151,0	325,2	307,2	14,5	7,5	1,9	5,6
2	128,2	104,6	155,5	131,9	322,4	275,0	10,5	10,8	2,4	8,3
3	108,9	90,4	143,8	125,3	347,6	271,7	7,5	8,5	1,8	6,7
4	104,3	79,4	123,2	98,3	369,9	282,2	17,0	10,8	2,3	8,4
5	88,5	67,1	103,4	82,0	347,0	250,0	19,5	8,8	1,9	6,9
6	80,0	59,2	100,0	79,2	355,2	268,8	14,0	9,0	2,0	7,0
7	76,4	61,8	88,9	74,3	362,3	252,2	13,0	6,0	1,2	4,8
8	68,0	50,4	93,3	75,7	365,3	251,5	13,0	7,5	1,5	6,0

Unidades: Tempo h
C_{SF} mgDQO.L⁻¹
C_{SOF} mgDQO.L⁻¹
C_{SO4} mgSO₄²⁻.L⁻¹
C_{SO3} mgSO₃²⁻.L⁻¹
STD mgSTD.L⁻¹
C_{H2S} mgH₂S.L⁻¹
C_{HS} mgHS⁻.L⁻¹

Tabela B16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ia (“pH” a “PR”).

Tempo	pH	5,75	4,3	4,0-7,0	AP	AI	AVT	AB	OD	PR
	05/04	05/04	05/04	05/04	05/04	05/04	05/04	05/04	09/04	09/04
0	7,97	4,08	0,77	6,17	227,3	42,9	62,6	225,8	0,0	-286,4
0,5	7,71	4,64	1,06	7,25	258,5	59,1	73,5	265,4	0,0	-351,5
1	7,57	5,07	1,17	7,59	282,5	65,2	77,0	293,0	0,0	-366,3
1,5	7,52	5,17	1,16	7,57	288,0	64,6	76,8	298,2	0,0	-369,4
2	7,57	5,49	1,12	7,51	305,9	62,4	76,2	314,2	0,0	-370,5
3	7,60	5,41	1,04	6,80	301,4	57,9	69,0	310,4	0,0	-373,3
4	7,60	5,43	1,23	6,04	302,5	68,5	61,3	327,6	0,0	-375,4
5	7,60	5,39	0,87	5,28	300,3	48,5	53,5	310,7	0,0	-378,1
6	7,58	5,45	0,84	5,14	303,6	46,8	52,1	313,4	0,0	-379,7
7	7,64	5,48	0,77	5,34	305,3	42,9	54,2	309,8	0,0	-379,8
8	7,66	5,58	0,79	5,29	310,9	44,0	53,7	316,8	0,0	-379,8

Unidades: Tempo h
AP mgCaCO₃.L⁻¹
AI mgCaCO₃.L⁻¹
AVT mgHAc.L⁻¹
AB mgCaCO₃.L⁻¹
OD mgOD.L⁻¹
Pot. Red. mV

Tabela B17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ia (“Ac.acét.” a “C_{CH4}”).

Tempo	Ác.acét.	Ác. prop.	C_{CO2}	C_{CH4}
	05/04	05/04	02/04	02/04
0	0,00	0,00	0,02	-
0,5	0,00	0,00	0,62	0,26
1	0,00	0,00	0,81	0,36
1,5	0,00	0,00	0,89	0,45
2	0,00	0,00	1,16	0,61
3	0,00	0,00	1,27	0,66
4	0,00	0,00	1,13	0,38
5	0,00	0,00	1,17	0,41
6	0,00	0,00	1,34	0,18
7	0,00	0,00	1,52	0,35
8	0,00	0,00	1,48	0,42

Unidades: Tempo	h	C_{CO_2}	mM.L^{-1}
Ác. acet.	mg.L^{-1}	C_{CH_4}	mM.L^{-1}
Ác. prop.	mg.L^{-1}		

APÊNDICE C

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NA CONDIÇÃO Ib

Nesta Condição o reator operou em batelada alimentada de 3 h, com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L^{-1} e concentração de sulfato de $373 \text{ mgSO}_4^{2-}.\text{L}^{-1}$ ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 1,34$).

C1 Dados de monitoramento

Durante os ensaios da condição Ib foram monitoradas as seguintes variáveis do meio afluente:

concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), 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) e concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela C1 a C4).

Tabela C1 – Valores monitorados do afluente na condição Ib. (“ C_{ST} ” a “AVT”).

Dia	C_{ST}	$[SO_4^{2-}]$	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
2	468,2	408,9	8,60	207,1	59,7	0,29	243,3	33,1
4	488,3	405,8	8,39	191,2	68,0	0,36	234,9	34,2
7	493,1	380,6	-	-	-	-	-	-
8	-	-	8,59	200,7	64,1	0,32	243,5	30,1
9	491,9	392,0	8,66	184,0	75,3	0,41	227,1	45,3
11	483,7	390,1	-	-	-	-	-	-
14	514,7	371,1	7,96	168,8	63,8	0,38	206,4	36,9
16	499,2	364,1	-	-	-	-	-	-
18	560,4	411,4	9,17	186,1	42,5	0,23	193,2	49,8
21	515,7	409,2	8,79	182,4	48,2	0,26	204,7	36,5
23	495,5	372,4	-	-	-	-	-	-
25	495,7	408,1	-	-	-	-	-	-
28	491,7	408,8	8,96	185,1	54,0	0,29	200,1	54,9
29	560,6	-	-	-	-	-	-	-

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 $[SO_4^{2-}]$ mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela C2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C1

	C _{ST}	[SO ₄ ²⁻]	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
média	504,5	393,5	8,6	188,2	59,4	0,3	219,1	40,1
dp.	27,6	17,6	0,4	11,8	10,8	0,1	20,3	8,8
qu.	13	12	8	8	8	8	8	8
máx.	560,6	411,4	9,2	207,1	75,3	0,4	243,5	54,9
mín.	468,2	364,1	8,0	168,8	42,5	0,2	193,2	30,1

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 [SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela C3 – Valores monitorados do afluentes na condição Ib. (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
2	1704	612	78	44
9	1742	718	26	18
17	1748	622	74	56
23	1754	634	82	62

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela C4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C3

	ST	SVT	SST	SSV
média	1737	646	65	45
dp.	23	49	26	19
qu.	4	4	4	4
máx.	1754	718	82	62
mín.	1704	612	26	18

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Durante a condição Ib foram monitoradas as seguintes variáveis do efluente:

descarga (Desc.), 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 ($[SO_4^{2-}]$), concentração de sulfito ($[SO_3^{2-}]$), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto ($[HS^-]$), concentração de sulfeto de hidrogênio ($[H_2S]$), 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), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela C5 a C10).

Tabela C5 – Valores monitorados do efluente na condição Ib (“Desc.” a “HS”).

Dia	Desc.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	$[SO_4^{2-}]$	$[SO_3^{2-}]$	STD	$[H_2S]$	$[HS^-]$
0	1,98	135,1	116,7	102,5	84,1	256,5	-	15,5	3,9	11,6
1	2,10	147,1	127,3	108,5	88,7	242,0	8,0	18,5	4,7	13,8
2	1,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1,98	135,3	121,4	97,5	83,6	268,1	4,0	-	-	-
4	2,01	182,7	147,4	141,9	106,6	236,2	-	20,0	6,2	13,8
7	1,91	-	-	-	-	250,3	6,0	14,8	4,6	10,2
8	1,91	192,1	163,0	174,1	145,0	273,6	-	8,4	3,1	5,3
9	1,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	2,01	232,8	206,6	178,9	152,7	210,5	-	26,4	7,9	18,5
11	1,89	214,8	194,5	167,7	147,4	220,5	5,5	23,0	7,3	15,7
14	1,86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1,88	212,4	182,0	147,8	117,4	183,0	3,0	32,0	10,2	21,8
17	2,08	201,5	185,2	136,9	120,6	133,8	-	-	-	-
18	2,02	266,4	235,7	201,8	171,1	130,8	-	-	-	-
21	1,89	211,0	146,1	146,4	81,5	139,7	-	-	-	-
22	2,00	173,2	144,2	122,0	93,0	155,8	8,0	-	-	-
23	1,88	-	-	-	-	173,5	-	-	-	-
24	1,98	211,9	174,7	161,2	124,0	147,3	5,5	24,8	4,2	20,6
25	1,95	217,6	147,4	166,9	96,7	135,5	4,5	41,0	7,0	34,0
28	1,88	229,6	187,9	156,1	114,4	140,6	-	-	-	-
29	2,00	239,6	220,6	166,1	147,1	128,4	12,5	35,5	9,5	26,0

Unidades:	Dia	d	$[SO_4^{2-}]$	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	$[SO_3^{2-}]$	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C_{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C_{SF}	mgDQO.L ⁻¹	$[H_2S]$	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C_{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	$[HS^-]$	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C_{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela C6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C5

	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
média	2,0	200,2	168,8	148,5	117,1	190,3	6,3	23,6	6,2	17,4
dp.	0,1	37,6	35,4	29,3	28,6	53,7	2,9	9,7	2,4	8,0
qu.	21	16	16	16	16	18	9	11	11	11
máx.	2,1	266,4	235,7	201,8	171,1	273,6	12,5	41,0	10,2	34,0
mín.	1,9	135,1	116,7	97,5	81,5	128,4	3,0	8,4	3,1	5,3

Unidades:	Dia	d	[SO ₄ ²⁻]	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	[SO ₃ ²⁻]	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C _{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C _{SF}	mgDQO.L ⁻¹	[H ₂ S]	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C _{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	[HS ⁻]	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C _{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela C7 – Valores monitorados do efluente na condição Ib. (“pH” a “AVT”).

Dia	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
0	7,51	463,0	95,3	558,4	0,2	538,3	28,2
4	7,39	477,3	134,9	612,2	0,3	598,0	20,0
8	7,28	390,3	114,3	504,6	0,3	483,7	29,4
10	7,41	412,3	146,4	558,7	0,4	538,3	28,7
11	7,37	425,2	127,4	552,5	0,3	531,8	29,2
17	7,37	485,0	138,9	623,9	0,3	611,4	17,5
18	7,74	484,3	132,4	616,7	0,3	589,8	38,0
21	7,55	480,9	117,8	598,7	0,2	580,9	25,1
22	7,39	478,3	119,6	597,9	0,3	600,6	21,0
23	7,73	489,0	78,1	567,1	0,2	540,5	37,5
24	7,73	467,0	132,4	599,4	0,3	579,8	27,6
28	7,48	431,6	150,4	582,1	0,3	552,8	41,2

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela C8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C7

	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
média	7,5	457,0	124,0	581,0	0,3	562,2	28,6
dp.	0,2	33,3	20,8	34,2	0,1	37,4	7,3
qu.	12	12	12	12	12	12	12
máx.	7,7	489,0	150,4	623,9	0,4	611,4	41,2
mín.	7,3	390,3	78,1	504,6	0,2	483,7	17,5

Unidades: Dia d AT $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$
AP $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ AB $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$
AI $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ AVT $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela C9 – Valores monitorados do efluente na condição Ib. (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
2	1460	472	40	10
9	1504	588	62	58
17	1522	550	68	68
23	1550	562	112	92
30	1648	626	72	64

Unidades: 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 C10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C9

	ST	SVT	SST	SSV
média	1537	560	71	58
dp.	70	57	26	30
qu.	5	5	5	5
máx.	1648	626	112	92
mín.	1460	472	40	10

Unidades: 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 C11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição Ib.

Dia	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
0	73,2	76,9	79,7	83,3	34,8
1	70,8	74,8	78,5	82,4	38,5
3	73,2	75,9	80,7	83,4	31,9
4	63,8	70,8	71,9	78,9	40,0
7	-	-	-	-	36,4
8	61,9	67,7	65,5	71,3	30,5
10	53,9	59,0	64,5	69,7	46,5
11	57,4	61,4	66,8	70,8	44,0
16	57,9	63,9	70,7	76,7	53,5
17	60,1	63,3	72,9	76,1	66,0
18	47,2	53,3	60,0	66,1	66,8
21	58,2	71,0	71,0	83,8	64,5
22	65,7	71,4	75,8	81,6	60,4
23	-	-	-	-	55,9
24	58,0	65,4	68,0	75,4	62,6
25	56,9	70,8	66,9	80,8	65,6
28	54,5	62,8	69,1	77,3	64,3
29	52,5	56,3	67,1	70,8	67,4

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

Tabela C12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C11.

	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
média	60,3	66,5	70,6	76,8	51,6
dp.	7,4	7,0	5,8	5,7	13,6
qu.	16	16	16	16	18
máx.	73,2	76,9	80,7	83,8	67,4
mín.	47,2	53,3	60,0	66,1	30,5

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

A partir destes valores monitorados durante a condição Ib foram calculadas:

a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável não filtrada removida (COR_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida (COR_{SF}), a carga volumétrica de matéria orgânica não filtrada removida (COR_{SOT}), a carga volumétrica de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA) e a carga volumétrica de sulfato removida (CSR) (Tabela C13).

Tabela C13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição Ib.

Dia	COA_{ST}	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
0	-	554,1	581,7	603,0	630,6	-	205,6
1	-	536,1	565,8	594,0	623,7	-	227,3
2	702,3	-	-	-	-	613,3	-
3	-	553,8	574,7	610,5	631,4	-	188,1
4	732,5	482,7	535,7	543,9	596,9	608,7	236,1
7	739,7	-	-	-	-	570,9	214,9
8	-	468,6	512,3	495,6	539,3	-	179,9
9	737,9	-	-	-	-	587,9	-
10	-	407,6	446,9	488,4	527,7	-	274,5
11	725,6	434,6	465,0	505,2	535,7	585,1	259,5
14	772,1	-	-	-	-	556,6	-
16	748,8	438,2	483,8	535,1	580,7	546,2	315,8
17	-	454,5	479,0	551,4	575,9	-	389,7
18	840,6	357,2	403,2	454,1	500,1	617,0	394,1
21	773,6	440,3	537,6	537,2	634,5	613,8	380,7
22	-	497,0	540,5	573,8	617,3	-	356,6
23	743,3	-	-	-	-	558,6	330,0
24	-	438,9	494,7	515,0	570,8	-	369,3
25	743,6	430,4	535,7	506,4	611,7	612,1	387,1
28	737,6	412,4	474,9	522,6	585,2	613,2	379,4
29	840,9	397,4	425,9	507,6	536,1	-	397,8

Unidades: todos em $[g.(L.d)^{-1}]$

Tabela C14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela C13.

	COA_{ST}	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
média	756,8	456,5	503,6	534,0	581,1	590,3	304,8
dp.	41,4	56,3	53,2	43,9	42,8	26,3	80,6
qu.	13	16	16	16	16	12	18
máx.	840,9	554,1	581,7	610,5	634,5	617,0	397,8
mín.	702,3	357,2	403,2	454,1	500,1	546,2	179,9

C2 Dados de perfil

Durante os perfis da condição Ib foram monitorados:

concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e concentração de sulfeto (C_{HS}), de pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade a bicarbonato (AB), oxigênio dissolvido (OD), potencial redox (PR), ácido acético (Ác. acét.), ácido propiônico (Ác. prop.), concentração de dióxido de carbono (C_{CO2}) e concentração de metano (C_{CH4}).

Tabela C15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ib (“ C_{SF} ” a “ C_{HS} ”).

Tempo	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SF}	C_{SOF}	C_{SO4}	C_{SO4}	C_{SO3}	STD	C_{H2S}	C_{HS}
	09/05	09/05	10/05	10/05	09/05	10/05	11/05	11/05	11/05	11/05
0	0,0	71,5	0,0	61,7	173,5	147,3	10,0	0,0	0,0	0,0
0,5	214,4	176,9	193,4	155,9	234,3	198,5	12,5	17,5	4,0	13,5
1	217,4	178,4	254,5	215,5	214,2	213,6	5,0	19,0	5,7	13,3
1,5	231,7	207,4	247,5	223,2	223,7	219,9	11,5	11,0	3,3	7,7
2	288,8	247,4	272,3	230,9	222,6	222,3	7,0	20,0	6,6	13,4
3	260,3	216,7	262,6	219,0	228,1	229,2	13,0	20,5	8,3	12,2
4	222,3	166,2	236,4	180,3	190,3	191,9	5,5	27,5	11,9	15,6
5	197,7	121,3	181,8	105,4	175,7	178,2	7,0	37,5	13,9	23,6
6	184,5	105,0	213,5	134,0	173,3	153,2	7,5	39,0	13,4	25,6
7	171,2	90,2	151,3	70,3	176,0	143,9	5,0	40,0	12,9	27,1
8	154,4	71,5	144,6	61,7	173,5	147,3	4,5	41,0	12,7	28,3

Unidades: Tempo	h	C_{SO3}	$\text{mgSO}_3^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$
C_{SF}	$\text{mgDQO} \cdot \text{L}^{-1}$	STD	$\text{mgSTD} \cdot \text{L}^{-1}$
C_{SOF}	$\text{mgDQO} \cdot \text{L}^{-1}$	C_{H2S}	$\text{mgH}_2\text{S} \cdot \text{L}^{-1}$
C_{SO4}	$\text{mgSO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$	C_{HS}	$\text{mgHS}^- \cdot \text{L}^{-1}$

Tabela C16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ib (“pH” a “PR”).

Tempo	pH	5,75	4,3	4,0-7,0	AP	AI	AVT	AB	OD	PR
	08/05	08/05	08/05	08/05	08/05	08/05	08/05	08/05	08/05	08/05
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	7,57	4,52	1,22	5,11	383,8	103,6	34,1	463,2	0,0	-340,7
1	7,41	4,61	1,25	5,18	391,4	106,1	34,5	473,0	0,0	-369,8
1,5	7,41	4,45	1,30	5,66	377,8	110,4	37,7	461,4	0,0	-374,1
2	7,35	4,49	1,29	5,45	381,2	109,5	36,3	464,9	0,0	-375,0
3	7,21	4,25	1,39	6,17	360,8	118,0	41,1	449,7	0,0	-377,9
4	7,16	4,68	1,59	5,07	397,3	135,0	33,8	508,3	0,0	-380,4
5	7,27	5,30	1,42	4,54	450,0	120,6	30,3	549,1	0,0	-382,4
6	7,32	5,43	1,64	3,55	461,0	139,2	23,7	583,5	0,0	-384,0
7	7,36	5,46	1,57	3,52	463,6	133,3	23,5	580,2	0,0	-383,5
8	7,39	5,80	1,45	3,15	492,4	123,1	21,0	600,6	0,0	-383,0

Unidades: Tempo h

AP mgCaCO₃.L⁻¹

AI mgCaCO₃.L⁻¹

AVT mgHAc.L⁻¹

AB mgCaCO₃.L⁻¹

OD mgOD.L⁻¹

Pot. Red. mV

Tabela C17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ib (“Ác.acét.” a “C_{CH4}”).

Tempo	Ác.acét.	Ác. prop.	C _{CO2}	C _{CH4}
	10/05	10/05	07/05	07/05
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,00	0,35	0,04
1	0,00	0,00	0,63	0,08
1,5	0,00	0,00	0,77	0,11
2	0,00	0,00	0,81	0,12
3	0,00	0,00	0,75	0,09
4	0,00	0,00	0,71	0,13
5	0,00	0,00	0,61	0,36
6	0,00	0,00	0,65	0,13
7	0,00	0,00	0,70	0,13
8	0,00	0,00	0,68	0,11

Unidades: Tempo h

Ác. acet. mg.L⁻¹

Ác, prop. mg.L⁻¹

C_{CO2} mM.L⁻¹

C_{CH4} mM.L⁻¹

APÊNDICE D

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NA CONDIÇÃO Ic

Nesta Condição o reator operou em batelada alimentada de 6 h, com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L^{-1} e concentração de sulfato de $373 \text{ mgSO}_4^{2-}.\text{L}^{-1}$ ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 1,34$).

D1 Dados de monitoramento

Durante os ensaios da condição Ic foram monitoradas as seguintes variáveis do meio afluyente:

concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), 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) e concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela D1 a D4).

Tabela D1 – Valores monitorados do afluyente utilizado no ensaio da condição Ic (“ C_{ST} ” a “AVT”).

Dia	C_{ST}	$[SO_4^{2-}]$	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
0		421,6						
2		401,0	8,61	149,3	43,9	0,29	167,12	36,68
5	511,7	408,5	8,63	146,1	43,9	0,30	164,26	36,24
7	505,3	402,1	8,82	150,1	49,4	0,33	174,95	34,60
9	503,3	378,5	8,77	151,0	41,9	0,28	165,56	38,48
12	503	363,6	8,82	149,9	44,5	0,30	168,23	36,75
14	506,4	373,9	-	-	-	-	-	-
16	497	392,8	8,84	146,7	42,7	0,29	165,46	33,73
19	527,8	387,5	8,66	144,1	45,0	0,31	165,67	33,03
21	516,3	366,4	-	-	-	-	-	-
23	484,9	361,8	8,49	141,5	46,8	0,33	165,41	32,19
26	-	-	8,64	137,2	56,0	0,41	172,57	29,01
27	-	392,3	-	-	-	-	-	-
29	506,2	382,2	-	-	-	-	-	-
30	576,5	404,6	8,69	142,9	45,3	0,32	159,80	40,08
33	485,7	-	8,54	162,3	50,2	0,31	184,68	39,21
34	-	375,7	-	-	-	-	-	-

Unidades: C_{ST} $mgDQO.L^{-1}$
 $[SO_4^{2-}]$ $mgSO_4^{2-}.L^{-1}$
 AP $mgCaCO_3.L^{-1}$
 AI $mgCaCO_3.L^{-1}$
 AB $mgCaCO_3.L^{-1}$
 AVT $mgHAc.L^{-1}$

Tabela D2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D1

	C _{ST}	[SO ₄ ²⁻]	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
média	510,3	387,5	8,7	147,4	46,3	0,3	168,5	35,5
dp.	24,0	17,8	0,1	6,5	4,1	0,0	6,7	3,3
qu.	12	15	11	11	11	11	11	11
máx.	576,5	421,6	8,8	162,3	56,0	0,4	184,7	40,1
mín.	484,9	361,8	8,5	137,2	41,9	0,3	159,8	29,0

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 [SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela D3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição Ic (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
0	1772	566	26	40
7	1718	706	56	34
14	1780	626	54	24
21	1686	676	68	26
28	1696	700	38	20
35	1626	688	10	30

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela D4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D3

	ST	SVT	SST	SSV
média	1713	660	42	29
dp.	58	54	22	7
qu.	6	6	6	6
máx.	1780	706	68	40
mín.	1626	566	10	20

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Durante a condição Ic foram monitoradas as seguintes variáveis do efluente:

descarga (Desc.), 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 ($[SO_4^{2-}]$), concentração de sulfito ($[SO_3^{2-}]$), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto ($[HS^-]$), concentração de sulfeto de hidrogênio ($[H_2S]$), 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), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela D5 a D10).

Tabela D5 – Valores monitorados do efluente na condição Ic (“Desc.” a “HS”).

Dia	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
1	1,78	150,9	135,1	109,5	93,7	167,7	-	20,0	4,3	15,7
2	1,85	217,1	147,1	137,3	67,3	149,7	-	-	-	-
5	1,88	-	-	-	-	169,3	-	-	-	-
6	1,78	243,2	135,3	161,0	53,1	143,1	11,0	40,0	8,6	31,4
7	1,92	219,4	182,7	139,6	102,9	-	-	-	-	-
8	1,88	238,3	192,1	168,2	122,0	139,1	6,5	34,4	7,4	27,0
9	1,88	237,6	232,8	157,8	153,0	129,0	-	-	-	-
12	1,82	239,5	214,8	159,7	135,0	129,9	-	-	-	-
13	1,94	-	-	-	-	173,3	3,0	18,4	3,9	14,5
14	1,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	1,92	249,4	203,1	169,6	123,3	157,2	9,0	39,0	8,4	30,6
16	1,94	286,1	240,9	206,3	161,1	122,6	-	-	-	-
19	1,96	230,5	203,9	150,7	124,1	103,0	-	-	-	-
20	1,99	239,6	206,5	141,4	108,3	75,6	11,0	48,0	10,3	37,7
21	2,00	-	-	-	-	69,0	-	-	-	-
22	2,04	-	-	-	-	65,8	-	-	-	-
23	2,04	209,3	184,2	129,5	104,4	57,0	-	-	-	-
26	2,01	-	-	-	-	65,8	-	-	-	-
27	2,04	249,0	228,9	169,2	149,1	81,1	-	-	-	-
28	1,97	-	-	-	-	74,8	2,5	50,0	10,7	39,3
30	1,95	257,8	222,9	178,0	143,1	90,4	-	-	-	-
33	2,01	256,0	211,7	176,2	131,9	106,2	-	-	-	-
34	2,05	-	-	-	-	101,4	-	55,0	11,8	43,2
35	2,03	279,4	230,2	182,2	133,0	-	6,0	48,0	10,3	37,7

Unidades: Dia d
Desc. L
C_{ST} mgDQO.L⁻¹
C_{SF} mgDQO.L⁻¹
C_{SOT} mgDQO.L⁻¹
C_{SOF} mgDQO.L⁻¹
[SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
[SO₃²⁻] mgSO₃²⁻.L⁻¹
STD mg.L⁻¹
[H₂S] mgH₂S.L⁻¹
[HS⁻] mgHS⁻.L⁻¹

Tabela D6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D5

	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
média	1,9	237,7	198,3	158,5	119,1	112,9	7,0	39,2	8,4	30,8
dp.	0,1	30,8	33,9	23,5	29,8	38,4	3,5	13,0	2,8	10,2
qu.	24	16	16	16	16	21	7	9	9	9
máx.	2,1	286,1	240,9	206,3	161,1	173,3	11,0	55,0	11,8	43,2
mín.	1,8	150,9	135,1	109,5	53,1	57,0	2,5	18,4	3,9	14,5

Unidades:	Dia	d	[SO ₄ ²⁻]	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	[SO ₃ ²⁻]	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C _{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C _{SF}	mgDQO.L ⁻¹	[H ₂ S]	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C _{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	[HS ⁻]	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C _{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela D7 – Valores monitorados do efluente na condição Ic (“pH” a “AVT”).

Dia	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
2	7,64	388,9	100,8	489,7	0,3	470,4	27,2
9	7,61	381,7	112,3	494,0	0,3	457,6	51,4
12	7,45	343,9	113,8	457,7	0,3	421,4	51,1
14	7,72	366,1	99,9	466,0	0,3	426,5	55,7
16	7,57	347,6	109,7	457,4	0,3	419,3	53,6
19	7,68	381,7	104,2	485,9	0,3	470,9	21,3
21	7,59	416,7	99,0	515,7	0,2	500,9	20,8
23	7,59	406,0	121,3	527,2	0,3	511,3	22,5
30	7,58	378,5	115,8	494,3	0,3	464,0	42,8

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela D8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D7

	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
média	7,6	379,0	108,5	487,6	0,3	460,2	38,5
dp.	0,1	24,1	7,9	24,3	0,0	33,2	15,3
qu.	9	9	9	9	9	9	9
máx.	7,7	416,7	121,3	527,2	0,3	511,3	55,7
mín.	7,5	343,9	99,0	457,4	0,2	419,3	20,8

Unidades: Dia d AT $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$
AP $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ AB $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$
AI $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ AVT $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela D9 – Valores monitorados do efluente na condição Ic (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
7	1464	580	92	76
14	1578	632	106	74
21	1456	590	98	54
28	1506	644	66	60
35	1482	622	48	60

Unidades: 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 D10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D9

	ST	SVT	SST	SSV
média	1497	614	82	65
dp.	49	27	24	10
qu.	5	5	5	5
máx.	1578	644	106	76
mín.	1456	580	48	54

Unidades: 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 D11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição Ic.

Dia	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
1	70,4	73,5	78,5	81,6	56,7
2	57,5	71,2	73,1	86,8	61,4
5	-	-	-	-	56,3
6	52,3	73,5	68,5	89,6	63,1
7	57,0	64,2	72,6	79,8	-
8	53,3	62,4	67,0	76,1	64,1
9	53,4	54,4	69,1	70,0	66,7
12	53,1	57,9	68,7	73,5	66,5
13	-	-	-	-	55,3
15	51,1	60,2	66,8	75,8	59,4
16	43,9	52,8	59,6	68,4	68,4
19	54,8	60,0	70,5	75,7	73,4
20	53,1	59,5	72,3	78,8	80,5
21	-	-	-	-	82,2
22	-	-	-	-	83,0
23	59,0	63,9	74,6	79,5	85,3
26	-	-	-	-	83,0
27	51,2	55,1	66,8	70,8	79,1
28	-	-	-	-	80,7
30	49,5	56,3	65,1	72,0	76,7
33	49,8	58,5	65,5	74,2	72,6
34	-	-	-	-	73,8
35	45,3	54,9	64,3	73,9	-

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

Tabela D12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela D11.

	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
média	53,4	61,2	68,9	76,7	70,9
dp.	6,0	6,6	4,6	5,8	9,9
qu.	16	16	16	16	21
máx.	70,4	73,5	78,5	89,6	85,3
mín.	43,9	52,8	59,6	68,4	55,3

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

A partir destes valores monitorados durante a condição Ic foram calculadas:

a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável não filtrada removida (COR_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida (COR_{SF}), a carga volumétrica de matéria orgânica não filtrada removida (COR_{SOT}), a carga volumétrica de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA) e a carga volumétrica de sulfato removida (CSR) (Tabela D13).

Tabela D13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição Ic.

Dia	COA_{ST}	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
0	-	539,2	562,9	601,3	625,0	632,4	-
1	-	-	-	-	-	-	329,7
2	-	439,9	544,9	559,6	664,6	601,5	356,7
5	767,6	-	-	-	-	612,8	327,3
6		400,7	562,6	524,0	685,9	-	366,6
7	758,0	436,4	491,5	556,1	611,2	603,1	-
8	-	408,1	477,4	513,2	582,5	-	372,6
9	755,0	409,1	416,3	528,8	536,0	567,7	387,7
12	754,5	406,3	443,3	526,0	563,0	545,3	386,4
13	-	-	-	-	-	-	321,2
14	759,6	-	-	-	-	560,8	-
15	-	391,4	460,9	511,1	580,6	-	345,5
16	745,5	336,4	404,2	456,1	523,9	589,2	397,3
19	791,7	419,8	459,7	539,5	579,4	581,2	426,7
20	-	406,1	455,8	553,4	603,1	-	467,8
21	774,5	-	-	-	-	549,6	477,7
22	-	-	-	-	-	-	482,5
23	727,4	451,6	489,2	571,3	608,9	542,6	495,7
26	-	-	-	-	-	-	482,5
27	-	392,0	422,2	511,7	541,9	588,4	459,6
28	-	-	-	-	-	-	469,0
29	759,3	-	-	-	-	573,3	-
30	864,8	378,8	431,2	498,5	550,9	606,9	445,7
33	728,6	381,5	448,0	501,2	567,7	-	421,9
34	-	-	-	-	-	563,5	429,1
35	-	346,4	420,2	492,2	566,0	-	-

Unidades: todos em [g.(L.d)⁻¹]

Tabela D14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela A13.

	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
média	765,5	409,0	468,1	527,7	586,9	581,2	411,9
dp.	35,9	46,3	50,8	35,2	44,7	26,8	57,6
qu.	12	16	16	16	16	15	21
máx.	864,8	539,2	562,9	601,3	685,9	632,4	495,7
mín.	727,4	336,4	404,2	456,1	523,9	542,6	321,2

D2 Dados de perfil

Durante os perfis da condição Ic foram monitorados:

concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e concentração de sulfeto (C_{HS}), de pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade a bicarbonato (AB), oxigênio dissolvido (OD), potencial redox (PR), ácido acético (Ác. acét.), ácido propiônico (Ác. prop.), concentração de dióxido de carbono (C_{CO2}) e concentração de metano (C_{CH4}).

Tabela D15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ic (“C_{SF}” a “C_{HS}”).

Tempo	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SO4}	C _{SO4}	C _{SO3}	STD	C _{H2S}	C _{HS}
	13/06	13/06	19/06	19/06	13/06	19/06	20/06	20/06	20/06	20/06
0	227,2	135,4	220,4	128,6	73,6	90,4	19,0	44,0	11,3	32,7
0,5	200,3	117,4	182,0	99,1	93,0	114,7	24,5	39,0	11,1	27,9
1	191,7	120,8	188,2	117,3	99,3	117,5	24,5	33,0	8,9	24,1
1,5	227,1	150,3	214,5	137,7	102,8	116,3	24,0	36,0	10,6	25,4
2	226,9	144,0	228,9	146,0	107,1	125,6	14,5	40,0	11,2	28,8
3	240,2	170,9	269,5	200,2	105,0	135,0	16,5	33,0	11,7	21,3
4	206,4	123,5	234,7	151,8	114,4	131,1	14,5	40,0	15,5	24,5
5	237,2	157,5	269,0	189,3	112,2	133,2	8,5	39,0	15,3	23,7
6	249,1	169,3	252,2	172,4	108,4	125,7	9,0	39,0	15,5	23,5
7	217,9	127,9	192,3	102,3	84,6	106,6	10,0	44,0	18,5	25,5
8	318,8	221,6	218,7	121,5	74,8	101,4	6,0	48,0	20,7	27,3

Unidades: Tempo h
C_{SF} mgDQO.L⁻¹
C_{SOF} mgDQO.L⁻¹
C_{SO4} mgSO₄²⁻.L⁻¹
C_{SO3} mgSO₃²⁻.L⁻¹
STD mgSTD.L⁻¹
C_{H2S} mgH₂S.L⁻¹
C_{HS} mgHS⁻.L⁻¹

Tabela D16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ic (“pH” a “PR”).

Tempo	pH	5,75	4,3	4,0-7,0	AP	AI	AVT	AB	OD	PR
	12/06	12/06	12/06	12/06	12/06	12/06	12/06	12/06	12/01	12/06
0	7,50	5,36	1,94	4,39	386,9	140,0	29,1	506,3	0,0	-300,0
0,5	7,44	5,32	1,75	4,72	384,0	126,3	31,3	488,2	0,0	-340,0
1	7,47	5,40	1,98	4,57	389,8	142,9	30,3	511,2	0,0	-350,0
1,5	7,42	5,07	1,81	4,78	366,0	130,7	31,7	474,2	0,0	-360,0
2	7,45	5,03	1,97	4,80	363,1	142,2	31,8	482,7	0,0	-365,8
3	7,30	4,88	2,05	4,95	352,3	148,0	32,8	477,0	0,0	-370,2
4	7,24	4,66	2,21	4,95	336,4	159,5	32,8	472,6	0,0	-373,0
5	7,23	4,57	2,07	5,58	329,9	149,4	37,0	453,1	0,0	-374,9
6	7,22	4,89	2,32	5,14	353,0	167,5	34,0	496,3	0,0	-376,6
7	7,18	4,90	2,37	4,88	353,7	171,1	32,3	501,8	0,0	-380,1
8	7,16	5,06	1,45	4,66	365,3	104,7	30,9	448,0	0,0	-382,1

Unidades: Tempo h
AP mgCaCO₃.L⁻¹
AI mgCaCO₃.L⁻¹
AVT mgHAc.L⁻¹
AB mgCaCO₃.L⁻¹
OD mgOD.L⁻¹
Pot. Red. mV

Tabela D17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição Ic (“Ác.acét.” a “C_{CH4}”).

Tempo	Ác.acét.	Ác. prop.	C_{CO2}	C_{CH4}
	00/01	00/01	15/06	07/05
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,00	0,43	0,05
1	18,77	0,00	0,49	0,07
1,5	0,00	0,00	0,70	0,11
2	0,00	0,00	0,81	0,15
3	0,00	0,00	0,95	0,21
4	0,00	0,00	1,07	0,28
5	23,59	0,00	1,18	0,37
6	26,08	0,00	1,27	0,48
7	26,40	0,00	1,32	0,54
8	44,11	0,00	1,42	0,62

Unidades: Tempo	h	C_{CO_2}	mM.L^{-1}
Ác. acet.	mg.L^{-1}	C_{CH_4}	mM.L^{-1}
Ác. prop.	mg.L^{-1}		

APÊNDICE E

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NA CONDIÇÃO IIa

Nesta Condição o reator operou 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).

E1 Dados de monitoramento

Durante os ensaios da condição IIa foram monitoradas as seguintes variáveis do meio afluyente:

concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), 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) e concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela E1 a E4).

Tabela E1 – Valores monitorados do afluyente utilizado no ensaio da condição IIa (“ C_{ST} ” a “AVT”).

Dia	C_{ST}	$[SO_4^{2-}]$	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
1	-	749,2	8,66	186,7	53,2	0,29	209,3	43,1
4	482,2	697,1	8,65	182,1	55,8	0,31	211,3	37,6
6	466,3	705,4	8,63	178,6	55,5	0,31	208,1	36,6
8	486,5	723,3	8,77	182,4	57,1	0,31	212,3	38,4
11	533	746,0	8,66	136,0	43,8	0,32	153,7	36,9
13	488	717,3	-	-	-	-	-	-
15	451,5	718,3	7,18	124,7	74,7	0,60	157,3	59,2
18	526,2	811,7	8,61	176,0	63,0	0,36	213,0	36,6
20	560,7	722,3	-	-	-	-	-	-
22	534,1	731,4	8,62	177,9	51,9	0,29	200,6	41,2
25	574,3	-	-	-	-	-	-	-
26	-	788,0	8,79	176,6	51,0	0,29	194,7	46,3
27	547,9	-	-	-	-	-	-	-
29	510,7	743,6	-	-	-	-	-	-
32	483,7	-	-	-	-	-	-	-
33	-	781,1	8,69	87,8	26,3	0,30	200,0	39,9

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 $[SO_4^{2-}]$ mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela E2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E1

	C _{ST}	[SO ₄ ²⁻]	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
média	511,2	741,1	8,5	160,9	53,2	0,3	196,0	41,6
dp.	38,0	34,1	0,5	33,2	12,5	0,1	22,2	6,9
qu.	13	13	10	10	10	10	10	10
máx.	574,3	811,7	8,8	186,7	74,7	0,6	213,0	59,2
mín.	451,5	697,1	7,2	87,8	26,3	0,3	153,7	36,6

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 [SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela E3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIa (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
6	2196	614	32	18
13	2192	632	46	0
20	2240	684	30	12
27	2242	572	36	22

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela E4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E3

	ST	SVT	SST	SSV
média	2218	626	36	13
dp.	27	46	7	10
qu.	4	4	4	4
máx.	2242	684	46	22
mín.	2192	572	30	0

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Durante a condição IIa foram monitoradas as seguintes variáveis do efluente:

descarga (Desc.), 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 ($[SO_4^{2-}]$), concentração de sulfito ($[SO_3^{2-}]$), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto ($[HS^-]$), concentração de sulfeto de hidrogênio ($[H_2S]$), 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), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela E5 a E10).

Tabela E5 – Valores monitorados do efluente na condição IIa (“Desc.” a “ HS^- ”).

Dia	Desc.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	$[SO_4^{2-}]$	$[SO_3^{2-}]$	STD	$[H_2S]$	$[HS^-]$
4	2,01	312,4	280,0	214,1	181,7	450,8	-	-	-	-
6	2,00	261,8	232,9	120,6	91,7	417,5	6,0	70,0	24,9	45,1
7	2,01	335,0	302,3	206,4	173,7	406,9	13,0	63,0	22,5	40,5
8	2,00	254,0	230,9	254,0	230,9	391,8	-	-	-	-
11	1,99	-	-	-	-	481,0	-	-	-	-
12	2,16	242,8	215,1	197,3	169,6	505,2	7,5	22,0	7,8	14,2
13	2,10	237,8	208,2	139,5	109,9	-	-	-	-	-
14	2,19	233,8	191,3	197,6	155,1	573,4	11,0	17,0	6,1	10,9
15	2,01	196,1	166,3	97,8	68,0	506,3	-	-	-	-
18	2,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	1,96	355,9	309,1	257,6	210,8	391,9	-	-	-	-
20	2,02	338,7	306,3	185,3	152,9	369,7	17,0	75,0	26,7	48,3
21	1,98	246,5	201,2	132,6	87,3	401,6	9,5	56,0	20,0	36,0
22	2,00	226,1	194,5	127,8	96,2	543,2	-	-	-	-
26	1,97	306,9	278,7	167,6	139,4	432,7	16,5	68,0	24,2	43,8
27	2,00	236,6	196,6	174,3	134,3	-	-	30,0	10,7	19,3
28	2,02	252,5	194,7	154,2	96,4	616,0	-	-	-	-
29	1,98	255,8	209,1	190,8	110,8	0,0	15,0	31,0	11,0	20,0
32	1,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	1,96	-	218,3	0,0	139,7	632,8	13,0	38,0	13,5	24,5

Unidades:	Dia	d	$[SO_4^{2-}]$	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	$[SO_3^{2-}]$	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C_{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C_{SF}	mgDQO.L ⁻¹	$[H_2S]$	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C_{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	$[HS^-]$	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C_{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela E6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E5

	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
média	2,0	268,3	231,5	165,7	138,1	445,1	12,1	47,0	16,8	30,2
dp.	0,1	46,5	45,7	61,6	45,6	144,4	3,9	21,7	7,7	14,0
qu.	20	16	17	17	17	16	9	10	10	10
máx.	2,2	355,9	309,1	257,6	230,9	632,8	17,0	75,0	26,7	48,3
mín.	2,0	196,1	166,3	0,0	68,0	0,0	6,0	17,0	6,1	10,9

Unidades:	Dia	d	[SO ₄ ²⁻]	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	[SO ₃ ²⁻]	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C _{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C _{SF}	mgDQO.L ⁻¹	[H ₂ S]	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C _{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	[HS ⁻]	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C _{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela E7 – Valores monitorados do efluente na condição IIa (“pH” a “AVT”).

Dia	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
4	7,46	479,2	159,1	638,2	0,3	589,4	68,8
8	7,64	498,3	161,3	659,7	0,3	606,6	74,7
11	7,36	418,1	140,6	558,7	0,3	513,3	64,0
13	7,32	362,9	122,7	485,7	0,3	439,5	65,0
15	7,18	374,3	154,5	528,8	0,4	483,8	63,5
19	7,36	482,4	190,2	672,7	0,4	627,3	63,8
22	7,16	360,0	133,8	493,8	0,4	448,8	63,4
27	6,82	312,7	143,7	456,4	0,5	418,3	53,8
32	7,37	332,4	128,8	461,2	0,4	468,3	60,4

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela E8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E7

	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
média	7,3	402,3	148,3	550,6	0,4	510,6	64,2
dp.	0,2	69,7	20,6	86,1	0,0	78,2	5,7
qu.	9	9	9	9	9	9	9
máx.	7,6	498,3	190,2	672,7	0,5	627,3	74,7
mín.	6,8	312,7	122,7	456,4	0,3	418,3	53,8

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela E9 – Valores monitorados do efluente na condição IIa (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
6	2048	618	86	68
13	2058	614	108	50
20	2010	630	50	44
27	2038	492	62	52
34	2084	526	70	56

Unidades: ST mg.L⁻¹
SVT mg.L⁻¹
SST mg.L⁻¹
SSV mg.L⁻¹

Tabela E10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E9

	ST	SVT	SST	SSV
média	2048	576	75	54
dp.	27	63	23	9
qu.	5	5	5	5
máx.	2084	630	108	68
mín.	2010	492	50	44

Unidades: ST mg.L⁻¹
SVT mg.L⁻¹
SST mg.L⁻¹
SSV mg.L⁻¹

Tabela E11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIa.

Dia	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
4	38,9	45,2	58,1	64,5	39,2
6	48,8	54,4	76,4	82,1	43,7
7	34,5	40,9	59,6	66,0	45,1
8	50,3	54,8	50,3	54,8	47,1
11	-	-	-	-	35,1
12	52,5	57,9	61,4	66,8	31,8
13	53,5	59,3	72,7	78,5	-
14	54,3	62,6	61,3	69,7	22,6
15	61,6	67,5	80,9	86,7	31,7
19	30,4	39,5	49,6	58,8	47,1
20	33,7	40,1	63,7	70,1	50,1
21	51,8	60,6	74,1	82,9	45,8
22	55,8	61,9	75,0	81,2	26,7
26	40,0	45,5	67,2	72,7	41,6
27	53,7	61,5	65,9	73,7	-
28	50,6	61,9	69,8	81,1	16,9
29	50,0	59,1	62,7	78,3	-
33	-	57,3	-	72,7	14,6

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

Tabela E12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E11.

	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
média	47,5	54,7	65,6	73,0	35,9
dp.	9,1	8,9	9,0	8,9	11,5
qu.	16	17	16	17	15
máx.	61,6	67,5	80,9	86,7	50,1
mín.	30,4	39,5	49,6	54,8	14,6

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

A partir destes valores monitoradas durante a condição IIa foram calculadas:

a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável não filtrada removida (COR_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida (COR_{SF}), a carga volumétrica de matéria orgânica não filtrada removida (COR_{SOT}), a carga volumétrica de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA) e a carga volumétrica de sulfato removida (CSR) (Tabela E13).

Tabela E13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição IIa.

Dia	COA_{ST}	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
1	-	-	-	-	-	1123,7	-
4	723,3	298,1	346,7	445,6	494,2	1045,7	435,5
6	699,5	374,0	417,4	585,8	629,2	1058,2	485,4
7	-	264,2	313,3	457,1	506,2	-	501,3
8	729,8	385,7	420,4	385,7	420,4	1084,9	524,0
11	799,5	-	-	-	-	1119,0	390,2
12	-	402,5	444,1	470,8	512,3	-	353,9
13	732,0	410,0	454,4	557,5	601,9	1075,9	-
14	-	416,0	479,8	470,3	534,1	-	251,6
15	677,3	472,6	517,3	620,0	664,7	1077,5	352,2
18	789,3	-	-	-	-	1217,5	-
19	-	232,9	303,1	380,3	450,5	-	523,9
20	841,1	258,7	307,3	488,8	537,4	1083,4	557,2
21	-	397,0	464,9	567,8	635,8	-	509,2
22	801,2	427,6	475,0	575,0	622,4	1097,1	296,9
25	861,5	-	-	-	-	-	-
26	-	306,4	348,7	515,3	557,6	1182,0	462,6
27	821,9	411,8	471,8	505,3	565,3	-	-
28	-	388,0	474,7	535,4	622,1	-	187,7
29	766,1	383,0	453,1	480,5	600,5	1115,4	1111,7
32	725,6	-	-	-	-	-	-
33	-	-	439,3	-	557,2	1171,7	162,5

Unidades: todos em $[g.(L.d)^{-1}]$

Tabela E14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela E13.

	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
média	766,7	364,3	419,5	502,6	559,5	1111,7	444,1
dp.	57,0	69,7	68,6	68,9	68,4	51,1	216,7
qu.	13	16	17	16	17	13	16
máx.	861,5	472,6	517,3	620,0	664,7	1217,5	1111,7
mín.	677,3	232,9	303,1	380,3	420,4	1045,7	162,5

E2 Dados de perfil

Durante os perfis da condição IIa foram monitorados:

concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e concentração de sulfeto (C_{HS}), de pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade a bicarbonato (AB), oxigênio dissolvido (OD), potencial redox (PR), ácido acético (Ác. acét.), ácido propiônico (Ác. prop.), concentração de dióxido de carbono (C_{CO2}) e concentração de metano (C_{CH4}).

Tabela E15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIa (“C_{SF}” a “C_{HS}”).

Tempo	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SO4}	C _{SO4}	C _{SO3}	STD	C _{H2S}	C _{HS}
	19/07	19/07	24/07	24/07	19/07	24/07	24/07	20/07	20/07	20/07
0	225,0	217,0	351,1	343,1	743,3	752,0	10,0	3,0	0,5	2,5
0,5	273,6	239,5	330,3	296,2	693,8	720,2	10,5	16,0	6,3	9,7
1	336,4	291,7	309,9	265,2	716,8	707,7	28,5	19,5	9,2	10,3
1,5	167,3	116,9	303,2	252,8	716,1	705,5	2,0	25,0	12,8	12,2
2	338,0	277,8	304,2	244,0	690,2	672,0	16,0	28,5	15,4	13,1
3	249,5	196,0	261,9	208,4	685,6	657,9	7,5	26,0	14,9	11,1
4	284,3	233,1	256,4	205,2	689,9	631,5	6,0	25,0	15,1	9,9
5	183,7	133,5	235,6	185,4	648,2	647,1	11,0	24,0	14,3	9,7
6	202,6	137,4	214,7	149,5	638,3	651,3	11,0	31,5	19,5	12,0
7	134,7	66,5	205,5	137,3	641,5	636,9	21,0	32,0	19,1	12,9
8	163,2	98,2	218,3	153,3	616,0	632,8	15,0	31,0	19,3	11,7

Unidades: Tempo h
 C_{SF} mgDQO.L⁻¹
 C_{SOF} mgDQO.L⁻¹
 C_{SO4} mgSO₄²⁻.L⁻¹
 C_{SO3} mgSO₃²⁻.L⁻¹
 STD mgSTD.L⁻¹
 C_{H2S} mgH₂S.L⁻¹
 C_{HS} mgHS⁻.L⁻¹

Tabela E16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIa (“pH” a “PR”).

Tempo	pH	5,75	4,3	4,0-7,0	AP	AI	AVT	AB	OD	PR
	18/07	18/07	18/07	18/07	18/07	18/07	18/07	18/07	19/07	19/07
0	7,75	2,00	0,80	3,95	324,6	129,9	49,9	419,1	0,0	-267,3
0,5	7,23	2,04	1,03	4,32	331,1	167,2	54,5	459,6	0,0	-340,1
1	7,09	5,18	1,96	5,71	256,7	97,1	72,1	302,7	0,0	-350,6
1,5	7,02	5,30	2,20	6,22	262,7	109,0	78,5	315,9	0,0	-353,8
2	6,97	5,43	2,33	6,42	269,1	115,5	81,1	327,0	0,0	-354,4
3	6,91	5,70	2,44	6,71	282,5	120,9	84,7	343,3	0,0	-354,4
4	6,86	5,74	2,63	6,12	284,5	130,3	77,3	360,0	0,0	-357,7
5	6,87	6,00	2,60	5,80	297,4	128,9	73,2	374,2	0,0	-358,6
6	6,83	6,22	2,80	5,18	308,3	138,8	65,4	400,6	0,0	-359,1
7	6,87	6,19	2,86	4,78	306,8	141,7	60,3	405,7	0,0	-359,9
8	6,82	6,31	2,90	4,26	312,7	143,7	53,8	418,3	0,0	-360,9

Unidades: Tempo h
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 OD mgOD.L⁻¹
 Pot. Red. mV

Tabela E17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIa (“Ác.acét.” a “C_{CH4}”).

Tempo	Ác.acét.	Ác. prop.	C _{CO2}	C _{CH4}
	24/07	24/07	17/07	17/07
0	53,16	0,00	0,00	0,00
0,5	73,51	6,10	0,25	0,00
1	103,54	9,57	0,60	0,01
1,5	112,18	8,90	0,81	0,00
2	149,50	9,90	1,05	0,00
3	87,41	6,56	1,42	0,01
4	81,54	4,05	1,60	0,02
5	87,73	0,00	1,65	0,02
6	66,40	0,00	1,69	0,02
7	84,93	0,00	1,98	0,03
8	66,75	0,00	1,96	0,03

Unidades: Tempo h C_{CO2} mM.L⁻¹
 Ác. acet. mg.L⁻¹ C_{CH4} mM.L⁻¹
 Ác, prop. mg.L⁻¹

APÊNDICE F

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NA CONDIÇÃO IIb

Nesta Condição o reator operou em batelada alimentada de 3 h, com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L^{-1} e concentração de sulfato de $746 \text{ mgSO}_4^{2-}.\text{L}^{-1}$ ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 0,67$).

F1 Dados de monitoramento

Durante os ensaios da condição IIb foram monitoradas as seguintes variáveis do meio afluente:

concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), 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) e concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela F1 a F4).

Tabela F1 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIb (“ C_{ST} ” a “AVT”).

Dia	C_{ST}	$[SO_4^{2-}]$	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
0	475,9	751,4	-	-	-	-	-	-
2	479,3	828,3	9,13	90,5	24,2	0,27	73,6	57,9
5	548,4	778,5						
6	-	-	8,76	86,8	27,4	0,32	88,4	36,3
7	525,8	784,2	-	-	-	-	-	-
9	538,4	840,4	6,11	173,4	39,7	0,23	178,8	48,3
12	529,6	800,6	5,69	161,5	56,5	0,35	191,4	37,4
14	498,3	751,6	-	-	-	-	-	-
16	415,3	667,9	-	-	-	-	-	-
19	499,6	749,5	-	-	-	-	-	-
20	-	-	5,57	158,1	64,1	0,41	199,3	32,2
21	500,2	696,7	-	-	-	-	-	-

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 $[SO_4^{2-}]$ mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela F2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F1

	C _{ST}	[SO ₄ ²⁻]	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
média	501,1	764,9	7,1	134,1	42,4	0,3	146,3	42,4
dp.	38,8	54,0	1,7	41,9	17,6	0,1	60,3	10,5
qu.	10	10	5	5	5	5	5	5
máx.	548,4	840,4	9,1	173,4	64,1	0,4	199,3	57,9
mín.	415,3	667,9	5,6	86,8	24,2	0,2	73,6	32,2

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 [SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela F3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIb (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
0	2220	530	24	0
7	2182	644	44	52
14	2166	554	52	6

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela F4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F3

	ST	SVT	SST	SSV
média	2189	576	40	19
dp.	28	60	14	28
qu.	3	3	3	3
máx.	2220	644	52	52
mín.	2166	530	24	0

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Durante a condição IIb foram monitoradas as seguintes variáveis do efluente:

descarga (Desc.), 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 ($[SO_4^{2-}]$), concentração de sulfito ($[SO_3^{2-}]$), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto ($[HS^-]$), concentração de sulfeto de hidrogênio ($[H_2S]$), 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), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela F5 a F10).

Tabela F5 – Valores monitorados do efluente na condição IIb (“Desc.” a “ HS^- ”).

Dia	Desc.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	$[SO_4^{2-}]$	$[SO_3^{2-}]$	STD	$[H_2S]$	$[HS^-]$
1	2,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	2,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	1,96	313,0	306,5	176,0	169,5	520,9	-	-	-	-
6	2,06	342,5	280,2	177,1	114,8	462,0	27,0	80,0	23,0	57,0
7	1,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	2,06	346,2	299,0	204,3	157,1	463,0	9,5	70,0	20,2	49,8
9	2,00	345,7	313,6	208,7	176,6	484,0	-	-	-	-
12	1,94	315,9	256,4	178,9	119,4	477,0	-	-	-	-
13	1,94	340,1	303,8	225,6	189,3	437,9	22,5	55,0	15,8	39,2
14	2,03	-	-	-	-	431,5	-	-	-	-
15	2,10	340,1	325,5	203,1	188,5	414,7	-	-	-	-
16	1,98	289,6	258,5	156,5	121,5	427,1	15,5	65,0	18,7	46,3
19	2,00	307,2	268,2	170,2	131,2	428,2	-	-	-	-
20	2,12	-	-	-	-	388,0	-	63,3	18,2	45,1
21	1,92	311,2	271,4	174,2	134,4	370,8	-	-	-	-

Unidades:	Dia	d	$[SO_4^{2-}]$	$mgSO_4^{2-}.L^{-1}$
	Desc.	L	$[SO_3^{2-}]$	$mgSO_3^{2-}.L^{-1}$
	C_{ST}	$mgDQO.L^{-1}$	STD	$mg.L^{-1}$
	C_{SF}	$mgDQO.L^{-1}$	$[H_2S]$	$mgH_2S.L^{-1}$
	C_{SOT}	$mgDQO.L^{-1}$	$[HS^-]$	$mgHS^-.L^{-1}$
	C_{SOF}	$mgDQO.L^{-1}$		

Tabela F6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F5

	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
média	2,0	325,2	288,3	187,4	150,2	442,1	18,6	66,7	19,2	47,5
dp.	0,1	20,1	24,4	21,5	29,3	41,9	7,7	9,2	2,7	6,6
qu.	15	10	10	10	10	12	4	5	5	5
máx.	2,1	346,2	325,5	225,6	189,3	520,9	27,0	80,0	23,0	57,0
mín.	1,9	289,6	256,4	156,5	114,8	370,8	9,5	55,0	15,8	39,2

Unidades:	Dia	d	[SO ₄ ²⁻]	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	[SO ₃ ²⁻]	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C _{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C _{SF}	mgDQO.L ⁻¹	[H ₂ S]	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C _{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	[HS ⁻]	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C _{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela F7 – Valores monitorados do efluente na condição IIb (“pH” a “AVT”).

Dia	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
5	7,32	221,4	67,1	288,5	0,3	470,0	48,5
7	7,36	434,0	159,5	593,5	0,4	560,6	46,3
9	7,71	428,6	151,6	580,1	0,4	525,6	76,8
12	7,55	459,2	141,1	600,3	0,3	558,7	58,6
15	7,33	420,0	173,8	593,8	0,4	598,7	61,2
20	7,33	470,8	174,5	645,4	0,4	620,0	35,8

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela F8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F7

	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
média	7,4	405,7	144,6	550,3	0,4	555,6	54,5
dp.	0,2	92,3	40,1	130,2	0,0	53,4	14,2
qu.	6	6	6	6	6	6	6
máx.	7,7	470,8	174,5	645,4	0,4	620,0	76,8
mín.	7,3	221,4	67,1	288,5	0,3	470,0	35,8

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela F9 – Valores monitorados do efluente na condição IIb (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
7	1460	472	48	72
14	2054	642	84	38

Unidades: ST mg.L⁻¹
SVT mg.L⁻¹
SST mg.L⁻¹
SSV mg.L⁻¹

Tabela F10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F9

	ST	SVT	SST	SSV
média	1757	557	66	55
dp.	420	120	25	24
qu.	2	2	2	2
máx.	2054	642	84	72
mín.	1460	472	48	38

Unidades: ST mg.L⁻¹
SVT mg.L⁻¹
SST mg.L⁻¹
SSV mg.L⁻¹

Tabela F11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIb.

Dia	E _{ST}	E _{SF}	E _{SOT}	E _{SOF}	E _{SO4}
5	37,5	38,8	64,9	66,2	31,9
6	31,6	44,1	64,7	77,1	39,6
8	30,9	40,3	59,2	68,6	39,5
9	31,0	37,4	58,4	64,8	36,7
12	37,0	48,8	64,3	76,2	37,6
13	32,1	39,4	55,0	62,2	42,7
14	-	-	-	-	43,6
15	32,1	35,0	59,5	62,4	45,8
16	42,2	48,4	68,8	75,8	44,2
19	38,7	46,5	66,0	73,8	44,0
20	-	-	-	-	49,3
21	37,9	45,8	65,2	73,2	51,5

Unidades: E_{ST}, E_{SF}, E_{SOT}, E_{SOF} %
E_{SO4} %

Tabela F12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F11.

	E _{ST}	E _{SF}	E _{SOT}	E _{SOF}	E _{SO4}
média	35,1	42,5	62,6	70,0	42,2
dp.	4,0	4,9	4,3	5,9	5,5
qu.	10	10	10	10	12
máx.	42,2	48,8	68,8	77,1	51,5
mín.	30,9	35,0	55,0	62,2	31,9

Unidades: E_{ST}, E_{SF}, E_{SOT}, E_{SOF} %
E_{SO4} %

A partir destes valores monitoradas durante a condição Iib foram calculadas:

a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável não filtrada removida (COR_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida (COR_{SF}), a carga volumétrica de matéria orgânica não filtrada removida (COR_{SOT}), a carga volumétrica de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA) e a carga volumétrica de sulfato removida (CSR) (Tabela F13).

Tabela F13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição Iib.

Dia	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
0	713,9	-	-	-	-	1127,1	-
2	719,0	-	-	-	-	1242,4	-
5	822,6	282,1	291,9	487,7	497,4	1167,7	366,0
6	-	237,9	331,3	486,0	579,4	-	454,4
7	788,7	-	-	-	-	1176,3	-
8	-	232,3	303,1	445,2	516,0	-	452,9
9	807,6	233,1	281,2	438,6	486,8	1260,7	421,4
12	794,4	277,8	367,0	483,3	572,6	1200,9	431,9
13	-	241,5	295,9	413,2	467,7	-	490,4
14	747,5	-	-	-	-	1127,4	500,1
15	-	241,5	263,4	447,0	468,9	-	525,2
16	623,0	317,2	363,9	516,9	569,4	1001,9	506,7
19	749,4	290,8	349,3	496,4	554,9	1124,2	505,0
20	-	-	-	-	-	-	565,4
21	750,3	284,8	344,5	490,4	550,1	1045,1	591,1

Unidades: todos em [g.(L.d)⁻¹]

Tabela F14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela F13.

	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
média	751,6	263,9	319,2	470,5	526,3	1147,4	484,2
dp.	58,2	30,1	36,6	32,3	44,0	80,9	62,9
qu.	10	10	10	10	10	10	12
máx.	822,6	317,2	367,0	516,9	579,4	1260,7	591,1
mín.	623,0	232,3	263,4	413,2	467,7	1001,9	366,0

F2 Dados de perfil

Durante os perfis da condição IIb foram monitorados:

concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e concentração de sulfeto (C_{HS}), de pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade a bicarbonato (AB), oxigênio dissolvido (OD), potencial redox (PR), ácido acético (Ác. acét.), ácido propiônico (Ác. prop.), concentração de dióxido de carbono (C_{CO2}) e concentração de metano (C_{CH4}).

Tabela F15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIb (“CST” a “C_{HS}”).

Tempo	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SO4}	C _{SO4}	C _{SO3}	STD	C _{H2S}	C _{HS}
	08/08	08/08	14/08	14/08	08/08	14/08	10/08	10/08	10/08	10/08
0	310,5	170,6	278,1	138,2	421,3	376,3	29,5	67,0	18,5	48,5
0,5	309,1	219,2	307,4	217,5	536,6	463,5	9,5	44,0	11,9	32,1
1	311,9	235,5	320,1	243,7	569,2	517,5	2,0	38,0	11,2	26,8
1,5	323,0	251,7	331,0	259,7	583,6	581,3	6,5	35,0	11,3	23,7
2	325,2	256,4	335,0	266,2	587,1	549,3	4,0	34,0	11,9	22,1
3	322,5	247,9	329,9	255,3	603,3	538,7	3,0	37,0	15,1	21,9
4	308,8	228,7	314,4	234,3	579,2	513,3	10,5	39,0	15,3	23,7
5	305,2	206,6	298,1	199,5	502,8	450,8	13,0	48,0	16,3	31,7
6	304,6	191,5	285,7	172,6	469,2	451,0	5,6	56,0	20,5	35,5
7	305,1	174,8	286,8	156,5	445,0	391,7	11,3	64,0	22,7	41,3
8	304,4	171,3	286,8	153,7	431,5	388,0	15,5	65,0	22,0	43,0

Unidades: Tempo h
C_{SF} mgDQO.L⁻¹
C_{SOF} mgDQO.L⁻¹
C_{SO4} mgSO₄²⁻.L⁻¹
C_{SO3} mgSO₃²⁻.L⁻¹
STD mgSTD.L⁻¹
C_{H2S} mgH₂S.L⁻¹
C_{HS} mgHS⁻.L⁻¹

Tabela F16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIb (“pH” a “PR”).

Tempo	pH	5,75	4,3	4,0-7,0	AP	AI	AVT	AB	OD	PR
	09/08	09/08	09/08	09/08	09/08	09/08	09/08	09/08	09/08	09/08
0	7,46	7,05	2,06	6,03	500,2	146,2	68,5	597,7	0,0	-270,0
0,5	7,47	5,84	1,82	5,77	414,4	129,1	65,6	496,9	0,0	-331,9
1	7,42	5,49	1,79	5,87	389,5	127,0	66,7	469,2	0,0	-370,1
1,5	7,36	4,98	1,92	6,08	353,3	136,2	69,1	440,5	0,0	-379,1
2	7,31	4,75	1,91	6,09	337,0	135,5	69,2	423,4	0,0	-382,8
3	7,20	4,45	1,90	6,46	315,7	134,8	73,4	398,4	0,0	-384,3
4	7,23	5,17	2,14	6,62	366,8	151,8	75,3	465,2	0,0	-390,1
5	7,33	5,39	2,20	6,44	382,4	156,1	73,2	486,6	0,0	-393,1
6	7,28	5,85	2,36	6,10	415,1	167,5	69,3	533,3	0,0	-395,1
7	7,30	6,35	2,51	5,60	450,6	178,1	63,7	583,5	0,0	-398,7
8	7,33	6,40	2,65	5,38	454,1	188,0	61,2	598,7	0,0	-400,3

Unidades: Tempo h
AP mgCaCO₃.L⁻¹
AI mgCaCO₃.L⁻¹
AVT mgHAc.L⁻¹
AB mgCaCO₃.L⁻¹
OD mgOD.L⁻¹
Pot. Red. mV

Tabela F17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIb (“Ác.acét.” a “C_{CH4}”).

Tempo	Ác.acét.	Ác. prop.	C_{CO2}	C_{CH4}
	08/08	08/08	07/08	07/08
0	49,90	0,00	0,00	0,00
0,5	70,08	0,00	0,20	0,00
1	116,81	0,00	0,29	0,00
1,5	58,78	0,00	0,43	0,00
2	57,62	5,06	0,56	0,00
3	67,77	0,00	0,82	0,00
4	91,66	0,00	0,89	0,00
5	76,06	0,00	0,94	0,00
6	63,42	0,00	0,97	0,00
7	66,41	0,00	0,96	0,00
8	67,27	0,00	0,97	0,00

Unidades: Tempo	h	C_{CO_2}	mM.L^{-1}
Ác. acet.	mg.L^{-1}	C_{CH_4}	mM.L^{-1}
Ác. prop.	mg.L^{-1}		

APÊNDICE G

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NA CONDIÇÃO IIc

Nesta Condição o reator operou em batelada alimentada de 6 h, com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L^{-1} e concentração de sulfato de $746 \text{ mgSO}_4^{2-}.\text{L}^{-1}$ ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 0,67$).

G1 Dados de monitoramento

Durante os ensaios da condição IIc foram monitoradas as seguintes variáveis do meio afluyente:

concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), 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) e concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela G1 a G4).

Tabela G1 – Valores monitorados do afluyente utilizado no ensaio da condição IIc (“ C_{ST} ” a “AVT”).

Dia	C_{ST}	$[SO_4^{2-}]$	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
1	512,4	742,1	8,84	167,2	57,3	0,34	203,0	30,2
4	558	751,5	-	-	-	-	-	-
5	-	-	8,91	170,0	49,1	0,29	192,2	37,9
6	487,8	758,7	-	-	-	-	-	-
8	486,7	738,0	8,75	158,0	47,6	0,30	181,3	34,1
11	493,5	776,5	8,76	153,9	50,0	0,32	177,7	36,9
13	487,5	727,8	-	-	-	-	-	-
15	500,8	811,0	9,01	173,6	43,3	0,25	185,9	43,6
19	495,4	737,7	8,78	159,6	47,6	0,30	184,0	32,7
20	487,5	-	-	-	-	-	-	-
25	512	-	-	-	-	-	-	-
26	490	772,6	-	-	-	-	-	-
28	489,7	754,3	-	-	-	-	-	-
29	500,7	744,5	8,31	175,9	57,3	0,33	205,8	38,6
32	492,6	722,3	8,51	182,1	53,2	0,29	211,2	34,1
34	482,4	-	-	-	-	-	-	-

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 $[SO_4^{2-}]$ mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela G2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G1

	C _{ST}	[SO ₄ ²⁻]	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
média	498,5	753,1	8,7	167,5	50,7	0,3	192,6	36,0
dp.	18,7	24,4	0,2	9,8	5,0	0,0	12,5	4,2
qu.	15	12	8	8	8	8	8	8
máx.	558,0	811,0	9,0	182,1	57,3	0,3	211,2	43,6
mín.	482,4	722,3	8,3	153,9	43,3	0,2	177,7	30,2

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 [SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela G3 – Valores monitorados do afluentes utilizado no ensaio da condição IIc (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
6	2282	638	88	16
13	2404	648	30	10
20	2162	706	30	30
34	2248	536	58	16

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela G4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G3

	ST	SVT	SST	SSV
média	2274	632	52	18
dp.	100	71	28	8
qu.	4	4	4	4
máx.	2404	706	88	30
mín.	2162	536	30	10

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Durante a condição IIc foram monitoradas as seguintes variáveis do efluente:

descarga (Desc.), 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 ($[SO_4^{2-}]$), concentração de sulfito ($[SO_3^{2-}]$), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto ($[HS^-]$), concentração de sulfeto de hidrogênio ($[H_2S]$), 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), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela G5 a G10).

Tabela G5 – Valores monitorados do efluente na condição IIc (“Desc.” a “ HS^- ”).

Dia	Desc.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	$[SO_4^{2-}]$	$[SO_3^{2-}]$	STD	$[H_2S]$	$[HS^-]$
0	1,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1,94	251,5	207,3	145,5	101,3	466,7	-	-	-	-
4	2,00	235,8	207,8	121,0	93,0	444,7	11,5	56,3	12,2	44,1
5	2,12	265,4	229,5	159,4	123,5	393,9	-	-	-	-
6	1,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1,88	235,5	215,1	97,1	76,7	426,8	12,3	68,0	14,7	53,3
8	1,94	227,2	200,8	121,2	94,8	409,6	-	-	-	-
11	2,08	253,5	219,7	147,5	113,7	416,1	-	-	-	-
12	2,14	247,7	213,9	96,0	62,2	430,3	8,7	75,0	16,2	58,8
13	2,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	2,04	240,7	206,4	103,7	69,4	479,2	10,0	67,5	14,6	52,9
15	2,00	248,6	225,9	142,6	119,9	456,0	-	-	-	-
19	1,98	305,3	265,9	207,9	168,5	455,4	12,3	47,5	14,0	33,5
20	1,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	2,00	321,9	285,5	224,5	188,1	-	12,3	47,5	10,3	37,2
26	2,08	297,3	244,0	225,8	172,5	494,4	7,5	35,0	7,6	27,4
27	1,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	2,00	285,5	245,8	285,5	245,8	455,9	-	-	-	-
29	1,96	272,4	228,5	208,5	164,6	460,4	7,3	31,3	6,8	24,5
32	1,88	-	-	-	-	469,2	-	-	-	-
33	2,04	-	-	-	-	465,1	9,0	40,0	8,7	31,3
34	2,00	-	-	-	-	-	11,0	57,0	12,3	44,7

Unidades:	Dia	d	$[SO_4^{2-}]$	$mgSO_4^{2-}.L^{-1}$
	Desc.	L	$[SO_3^{2-}]$	$mgSO_3^{2-}.L^{-1}$
	C_{ST}	$mgDQO.L^{-1}$	STD	$mg.L^{-1}$
	C_{SF}	$mgDQO.L^{-1}$	$[H_2S]$	$mgH_2S.L^{-1}$
	C_{SOT}	$mgDQO.L^{-1}$	$[HS^-]$	$mgHS^-.L^{-1}$
	C_{SOF}	$mgDQO.L^{-1}$		

Tabela G6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G5

	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
média	2,0	263,5	228,3	163,3	128,1	448,2	10,2	52,5	11,7	40,8
dp.	0,1	29,1	24,5	57,9	52,7	27,7	2,0	14,8	3,3	11,8
qu.	22	14	14	14	14	15	10	10	10	10
máx.	2,1	321,9	285,5	285,5	245,8	494,4	12,3	75,0	16,2	58,8
mín.	1,8	227,2	200,8	96,0	62,2	393,9	7,3	31,3	6,8	24,5

Unidades:	Dia	d	[SO ₄ ²⁻]	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	[SO ₃ ²⁻]	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C _{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C _{SF}	mgDQO.L ⁻¹	[H ₂ S]	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C _{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	[HS ⁻]	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C _{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela G7 – Valores monitorados do efluente na condição Ilc (“pH” a “AVT”).

Dia	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
5	7,66	510,9	136,8	647,7	0,3	630,0	24,9
6	7,76	545,5	110,4	655,9	0,2	639,5	23,0
8	7,70	447,8	118,2	566,1	0,3	553,5	17,6
11	7,69	452,7	139,7	592,4	0,3	577,4	21,1
13	7,65	470,1	91,3	561,5	0,2	535,2	37,0
15	7,74	458,3	94,0	552,4	0,2	526,5	36,5
19	7,42	412,9	123,0	536,0	0,3	503,0	46,4
20	7,62	411,0	129,2	540,3	0,3	512,6	39,0
27	7,51	410,5	122,8	533,3	0,3	498,7	48,8
28	7,32	419,3	151,4	533,3	0,4	609,2	39,2
32	7,52	470,6	142,4	613,0	0,3	579,6	47,0

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela G8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G7

	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
média	7,6	455,4	123,6	575,6	0,3	560,5	34,6
dp.	0,1	43,4	19,3	45,3	0,1	50,4	11,1
qu.	11	11	11	11	11	11	11
máx.	7,8	545,5	151,4	655,9	0,4	639,5	48,8
mín.	7,3	410,5	91,3	533,3	0,2	498,7	17,6

Unidades: Dia d AT $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$
 AP $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ AB $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$
 AI $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ AVT $\text{mgHAc}\cdot\text{L}^{-1}$

Tabela G9 – Valores monitorados do efluente na condição IIc (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
6	2072	672	110	46
13	2232	732	50	40
20	2024	736	76	74
34	1864	410	68	36

Unidades: 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 G10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G9

	ST	SVT	SST	SSV
média	2048	637	76	49
dp.	152	154	25	17
qu.	4	4	4	4
máx.	2232	736	110	74
mín.	1864	410	50	36

Unidades: 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 G11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIc.

Dia	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
1	49,5	58,4	70,8	79,7	38,0
4	52,7	58,3	75,7	81,3	41,0
5	46,8	54,0	68,0	75,2	47,7
7	52,8	56,8	80,5	84,6	43,3
8	54,4	59,7	75,7	81,0	45,6
11	49,1	55,9	70,4	77,2	44,8
12	50,3	57,1	80,7	87,5	42,9
14	51,7	58,6	79,2	86,1	36,4
15	50,1	54,7	71,4	75,9	39,5
19	38,8	46,7	58,3	66,2	39,5
21	35,4	42,7	55,0	62,3	-
26	40,4	51,0	54,7	65,4	34,4
28	42,7	50,7	42,7	50,7	39,5
29	45,4	54,2	58,2	67,0	38,9
32	-	-	-	-	37,7
33	-	-	-	-	38,2

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

Tabela G12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G11.

	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
média	47,1	54,2	67,2	74,3	40,5
dp.	5,8	4,9	11,6	10,6	3,7
qu.	14	14	14	14	15
máx.	54,4	59,7	80,7	87,5	47,7
mín.	35,4	42,7	42,7	50,7	34,4

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

A partir destes valores monitorados durante a condição IIc foram calculadas:

a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável não filtrada removida (COR_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida (COR_{SF}), a carga volumétrica de matéria orgânica não filtrada removida (COR_{SOT}), a carga volumétrica de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA) e a carga volumétrica de sulfato removida (CSR) (Tabela G13).

Tabela G13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição IIc.

Dia	COA_{ST}	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
1	768,6	370,5	436,8	529,5	595,8	1113,1	429,7
4	837,0	394,0	436,0	566,2	608,2	1127,3	462,7
5	-	349,6	403,5	508,6	562,5	-	538,8
6	731,7	-	-	-	-	1138,1	-
7	-	394,5	425,1	602,1	632,7	-	489,5
8	730,1	406,9	446,5	565,9	605,5	1107,0	515,3
11	740,3	367,5	418,2	526,5	577,2	1164,8	505,5
12	-	376,2	426,9	603,7	654,4	-	484,2
13	731,3	-	-	-	-	1091,7	-
14	-	386,7	438,1	592,2	643,6	-	410,8
15	751,2	374,8	408,9	533,8	567,9	1216,6	445,7
19	743,1	289,8	348,9	435,9	495,0	1106,6	446,5
20	731,3	-	-	-	-	-	-
21	-	264,9	319,5	411,0	465,6	-	-
25	768,0	-	-	-	-	-	-
26	735,0	301,8	381,7	409,0	489,0	1158,9	388,0
28	734,6	319,5	379,0	319,5	379,0	1131,5	445,8
29	751,1	339,1	405,0	435,0	500,9	1116,8	439,0
32	738,9	-	-	-	-	1083,5	425,8
33	-	-	-	-	-	-	432,0
34	723,6	-	-	-	-	-	-

Unidades: todos em [g.(L.d)⁻¹]

Tabela G14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela G13.

	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
média	747,7	352,5	405,3	502,8	555,5	1129,6	457,3
dp.	28,1	43,6	36,7	86,9	79,1	36,7	41,6
qu.	15	14	14	14	14	12	15
máx.	837,0	406,9	446,5	603,7	654,4	1216,6	538,8
mín.	723,6	264,9	319,5	319,5	379,0	1083,5	388,0

G2 Dados de perfil

Durante os perfis da condição IIc foram monitorados:

concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e concentração de sulfeto (C_{HS}), de pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade a bicarbonato (AB), oxigênio dissolvido (OD), potencial redox (PR), ácido acético (Ác. acét.), ácido propiônico (Ác. prop.), concentração de dióxido de carbono (C_{CO2}) e concentração de metano (C_{CH4}).

Tabela G15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIc (“C_{SF}” a “C_{HS}”).

Tempo	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SO4}	C _{SO4}	C _{SO3}	STD	C _{H2S}	C _{HS}
	17/09	17/09	18/09	18/09	17/09	18/09	19/09	19/09	19/09	19/09
0	254,2	168,4	232,9	147,1	460,0	452,6	9,0	42,0	8,3	33,7
0,5	233,4	173,4	218,2	158,2	472,8	459,7	10,3	29,0	5,9	23,1
1	237,6	175,9	222,7	161,0	471,7	456,5	8,8	30,0	5,7	24,3
1,5	238,3	180,0	229,9	171,6	495,4	539,3	11,8	28,0	6,5	21,5
2	237,3	179,0	247,6	189,3	506,2	519,5	11,5	28,0	7,0	21,0
3	223,4	163,5	250,0	190,1	509,7	489,1	9,8	29,0	8,5	20,5
4	221,4	170,0	226,7	175,3	489,3	520,7	7,0	25,0	7,8	17,2
5	236,4	176,6	224,4	164,6	514,7	504,5	9,0	29,0	10,0	19,0
6	234,8	149,0	218,2	132,4	493,8	479,4	9,3	42,0	14,7	27,3
7	231,4	129,4	219,5	117,5	454,9	475,7	10,0	50,0	17,5	32,5
8	232,0	115,8	223,2	107,0	469,2	465,1	11,0	57,0	19,6	37,4

Unidades: Tempo h
C_{SF} mgDQO.L⁻¹
C_{SOF} mgDQO.L⁻¹
C_{SO4} mgSO₄²⁻.L⁻¹
C_{SO3} mgSO₃²⁻.L⁻¹
STD mgSTD.L⁻¹
C_{H2S} mgH₂S.L⁻¹
C_{HS} mgHS⁻.L⁻¹

Tabela G16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIc (“pH” a “Pot.Red.”).

Tempo	pH	5,75	4,3	4,0-7,0	AP	AI	AVT	AB	OD	PR
	13/09	13/09	13/09	13/09	13/09	13/09	13/09	13/09	13/09	13/09
0	7,65	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	40,0	570,0	0,0	-330,4
0,5	7,63	5,43	1,63	3,60	458,8	137,7	38,7	569,0	0,0	-384,1
1	7,67	5,31	1,59	3,85	448,6	134,3	41,3	553,6	0,0	-379,5
1,5	7,56	5,49	1,38	3,71	463,8	116,6	39,8	552,1	0,0	-388,4
2	7,52	5,24	1,37	3,55	442,7	115,7	38,1	531,4	0,0	-392,8
3	7,42	5,23	1,60	3,43	441,9	135,2	36,8	550,9	0,0	-397,1
4	7,38	5,03	1,76	3,47	425,0	148,7	37,3	547,2	0,0	-397,3
5	7,32	4,83	1,86	4,01	408,1	157,1	43,1	534,6	0,0	-398,5
6	7,31	5,09	1,77	4,67	430,0	149,5	50,1	544,0	0,0	-400,0
7	7,31	5,42	1,95	4,41	457,9	164,7	47,3	589,0	0,0	-402,8
8	7,32	5,54	2,00	3,65	468,0	169,0	39,2	609,2	0,0	-404,0

Unidades: Tempo h
AP mgCaCO₃.L⁻¹
AI mgCaCO₃.L⁻¹
AVT mgHAc.L⁻¹
AB mgCaCO₃.L⁻¹
OD mgOD.L⁻¹
Pot. Red. mV

Tabela G17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIc (“Ác.acét.” a “C_{CH4}”).

Tempo	Ác.acét.	Ác. prop.	C _{CO2}	C _{CH4}
	17/09	17/09	11/09	11/09
0	0,00	0,00	0,01	0,00
0,5	0,00	0,00	0,15	0,00
1	0,00	0,00	0,32	0,00
1,5	26,38	0,00	0,37	0,00
2	33,51	0,00	0,46	0,00
3	39,01	0,00	0,62	0,00
4	41,04	0,00	0,76	0,01
5	44,72	0,00	0,92	0,02
6	44,53	0,00	1,02	0,02
7	41,57	0,00	1,06	0,03
8	30,50	0,00	1,09	0,03

Unidades: Tempo h C_{CO2} mM.L⁻¹
 Ác. acet. mg.L⁻¹ C_{CH4} mM.L⁻¹
 Ác, prop. mg.L⁻¹

APÊNDICE H

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NA CONDIÇÃO IIIa

Nesta Condição o reator operou em batelada com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L⁻¹ e concentração de sulfato de 1493 mgSO₄²⁻.L⁻¹ (DQO/[SO₄²⁻] = 0,34).

H1 Dados de monitoramento

Durante os ensaios da condição IIIa foram monitoradas as seguintes variáveis do meio afluyente:

concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), 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) e concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela H1 a H4).

Tabela H1 – Valores monitorados do afluyente utilizado no ensaio da condição IIIa (“ C_{ST} ” a “AVT”).

Dia	C_{ST}	$[SO_4^{2-}]$	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
0	483,9	-	-	-	-	-	-	-
1	-	1493	8,65	175,3	57,8	0,33	207,1	36,6
4	489,5	1535,2	8,72	175,6	56,6	0,32	207,9	34,3
7	502,2	1420,4	-	-	-	-	-	-
8	515,3	1469,1	8,6	182,8	47,6	0,26	201,4	40,9
11	-	1495,1	-	-	-	-	-	-
14	494,2	1511,6	8,79	182,2	50,9	0,28	207,8	35,7
15	499,6	1449,3	8,74	177,1	54,8	0,31	206,6	35,7
18	470,7	1455,5	8,59	171,7	55,7	0,32	203,2	34,1
20	491,3	-	-	-	-	-	-	-
21	496,5	1541	-	-	-	-	-	-
22	-	1479,9	-	-	-	-	-	-
25	539,7	1447,5	-	-	-	-	-	-

Unidades:

C_{ST}	mgDQO.L ⁻¹
$[SO_4^{2-}]$	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela H2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H1.

	C _{ST}	[SO ₄ ²⁻]	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
média	498,3	1481,6	8,7	177,4	53,9	0,3	205,7	36,2
dp.	18,7	38,0	0,1	4,3	3,9	0,0	2,7	2,5
qu.	10	11	6	6	6	6	6	6
máx.	539,7	1541,0	8,8	182,8	57,8	0,3	207,9	40,9
mín.	470,7	1420,4	8,6	171,7	47,6	0,3	201,4	34,1

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 [SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela H3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIIa (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
9	3282	846	64	58
20	3198	484	44	28

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela H4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H3.

	ST	SVT	SST	SSV
média	3240	665	54	43
dp.	59	256	14	21
qu.	2	2	2	2
máx.	3282	846	64	58
mín.	3198	484	44	28

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Durante a condição IIIa foram monitoradas as seguintes variáveis do efluente:

descarga (Desc.), 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 ($[SO_4^{2-}]$), concentração de sulfito ($[SO_3^{2-}]$), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto ($[HS^-]$), concentração de sulfeto de hidrogênio ($[H_2S]$), 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), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela H5 a H10).

Tabela H5 – Valores monitorados do efluente na condição IIIa (“Desc.” a “ HS^- ”).

Dia	Desc.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	$[SO_4^{2-}]$	$[SO_3^{2-}]$	STD	$[H_2S]$	$[HS^-]$
4	2,10	372,3	327,6	210,2	165,5	1069,5		80,0	15,5	64,5
5	2,02	309,5	283,8	172,9	147,2	1057,8	8,0	67,5	21,0	46,5
6	2,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1,83	286,0	264,6	164,1	142,7	1104,2	-	-	-	-
8	2,04	316,2	274,5	201,5	159,8	1070,8	-	56,3	11,1	45,2
11	2,00	-	-	-	-	1121,1	-	-	-	-
12	1,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	2,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	2,02	263,0	246,6	183,9	167,5	1252,4	8,3	38,8	11,0	27,7
15	1,92	256,9	237,3	135,0	115,4	1304,9	-	-	-	-
18	1,97	286,1	262,8	164,2	140,9	1322,0	-	-	-	-
19	2,04	312,2	288,1	195,2	171,1	1291,2	15,3	57,0	17,7	39,3
20	2,01	-	-	-	-	1378,7	-	-	-	-
21	1,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	1,94	-	-	-	-	1233,5	-	-	-	-
26	2,00	312,5	277,8	216,4	181,7	1331,6	10,5	47,0	14,6	32,4

Unidades:	Dia	d	$[SO_4^{2-}]$	$mgSO_4^{2-}.L^{-1}$
	Desc.	L	$[SO_3^{2-}]$	$mgSO_3^{2-}.L^{-1}$
	C_{ST}	$mgDQO.L^{-1}$	STD	$mg.L^{-1}$
	C_{SF}	$mgDQO.L^{-1}$	$[H_2S]$	$mgH_2S.L^{-1}$
	C_{SOT}	$mgDQO.L^{-1}$	$[HS^-]$	$mgHS^-.L^{-1}$
	C_{SOF}	$mgDQO.L^{-1}$		

Tabela H6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H5.

	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
média	2,0	301,6	273,7	182,6	154,6	1211,5	10,5	57,8	15,2	42,6
dp.	0,1	34,4	26,2	26,1	20,1	118,7	3,4	14,6	3,9	13,0
qu.	16	9	9	9	9	12	4	6	6	6
máx.	2,1	372,3	327,6	216,4	181,7	1378,7	15,3	80,0	21,0	64,5
mín.	1,8	256,9	237,3	135,0	115,4	1057,8	8,0	38,8	11,0	27,7

Unidades:	Dia	d	[SO ₄ ²⁻]	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	[SO ₃ ²⁻]	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C _{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C _{SF}	mgDQO.L ⁻¹	[H ₂ S]	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C _{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	[HS ⁻]	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C _{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela H7 – Valores monitorados do efluente na condição IIIa (“pH” a “AVT”).

Dia	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
4	7,66	553,4	164,5	717,9	0,3	685,6	45,6
6	7,72	544,2	125,0	669,1	0,2	635,4	47,5
8	7,65	528,0	143,8	671,8	0,3	632,3	55,7
14	7,44	439,0	144,4	583,4	0,3	544,5	54,7
15	7,11	362,9	146,8	509,7	0,4	468,1	58,6
18	7,13	357,2	155,2	512,4	0,4	473,7	54,5
21	6,94	362,6	194,8	557,3	0,5	515,8	58,5
26	7,43	378,5	151,4	529,9	0,4	566,3	55,2

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela H8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H7.

	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
média	7,4	440,7	153,2	593,9	0,4	565,2	53,8
dp.	0,3	87,9	20,2	81,4	0,1	79,8	4,8
qu.	8	8	8	8	8	8	8
máx.	7,7	553,4	194,8	717,9	0,5	685,6	58,6
mín.	6,9	357,2	125,0	509,7	0,2	468,1	45,6

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela H9 – Valores monitorados do efluente na condição IIIa (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
6	2972	668	74	72
20	3032	298	74	58

Unidades: ST mg.L⁻¹
SVT mg.L⁻¹
SST mg.L⁻¹
SSV mg.L⁻¹

Tabela H10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H9.

	ST	SVT	SST	SSV
média	3002	483	74	65
dp.	42	262	0	10
qu.	2	2	2	2
máx.	3032	668	74	72
mín.	2972	298	74	58

Unidades: ST mg.L⁻¹
SVT mg.L⁻¹
SST mg.L⁻¹
SSV mg.L⁻¹

Tabela H11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIIa.

Dia	E _{ST}	E _{SF}	E _{SOT}	E _{SOF}	E _{SO4}
4	25,3	34,3	57,8	66,8	27,8
5	37,9	43,0	65,3	70,5	28,6
7	42,6	46,9	67,1	71,4	25,5
8	36,5	44,9	59,6	67,9	27,7
11	-	-	-	-	24,3
14	47,2	50,5	63,1	66,4	15,5
15	48,4	52,4	72,9	76,8	11,9
18	42,6	47,3	67,1	71,7	10,8
19	37,3	42,2	60,8	65,7	12,9
20	-	-	-	-	6,9
25	-	-	-	-	16,7
26	37,3	44,2	56,6	63,5	10,1

Unidades: E_{ST}, E_{SF}, E_{SOT}, E_{SOF} %
E_{SO4} %

Tabela H12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H11.

	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
média	39,5	45,1	63,4	69,0	18,2
dp.	6,9	5,3	5,2	4,0	8,0
qu.	9	9	9	9	12
máx.	48,4	52,4	72,9	76,8	28,6
mín.	25,3	34,3	56,6	63,5	6,9

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

A partir destes valores monitorados durante a condição IIIa foram calculadas:

a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável não filtrada removida (COR_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida (COR_{SF}), a carga volumétrica de matéria orgânica não filtrada removida (COR_{SOT}), a carga volumétrica de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA) e a carga volumétrica de sulfato removida (CSR) (Tabela H13).

Tabela H13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição IIIa.

Dia	COA_{ST}	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
0	725,9	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	2239,5	-
4	734,3	189,0	256,0	432,1	499,2	2302,8	618,2
5	-	283,2	321,7	488,1	526,6	-	635,7
7	753,3	318,4	350,5	501,3	533,4	2130,6	566,1
8	773,0	273,1	335,7	445,2	507,7	2203,7	616,2
11	-	-	-	-	-	2242,7	540,8
14	741,3	352,9	377,5	471,7	496,3	2267,4	343,8
15	749,4	362,1	391,5	545,0	574,4	2174,0	265,1
18	706,1	318,3	353,2	501,2	536,1	2183,3	239,4
19		279,1	315,3	454,7	490,9	-	285,6
20	737,0	-	-	-	-	-	154,4
21	744,8	-	-	-	-	2311,5	-
22		-	-	-	-	2219,9	-
25	809,6	-	-	-	-	2171,3	372,2
26	-	278,7	330,7	422,8	474,9	-	225,0

Unidades: todos em $[g.(L.d)^{-1}]$

Tabela H14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela H13.

	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
média	747,4	295,0	336,9	473,6	515,5	2222,4	405,2
dp.	28,0	51,6	39,3	39,2	30,2	56,9	178,1
qu.	10	9	9	9	9	11	12
máx.	809,6	362,1	391,5	545,0	574,4	2311,5	635,7
mín.	706,1	189,0	256,0	422,8	474,9	2130,6	154,4

H2 Dados de perfil

Durante os perfis da condição IIIa foram monitorados:

concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e concentração de sulfeto (C_{HS}), de pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade a bicarbonato (AB), oxigênio dissolvido (OD), potencial redox (PR), ácido acético (Ác. acét.), ácido propiônico (Ác. prop.), concentração de dióxido de carbono (C_{CO2}) e concentração de metano (C_{CH4}).

Tabela H15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIa (“C_{ST}” a “C_{HS}”).

Tempo	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SO4}	C _{SO4}	C _{SO3}	STD	C _{H2S}	C _{HS}
	10/10	10/10	16/10	16/10	10/10	16/10	16/10	16/10	16/10	16/10
0	430,8	429,0	415,0	413,2	1470,0	1477,3	8,8	0,0	0,0	0,0
0,5	411,9	392,0	376,3	356,4	1362,8	1509,7	9,5	9,0	4,3	4,7
1	395,8	359,8	360,8	324,8	1366,3	1398,4	10,3	17,0	9,3	7,7
1,5	344,4	296,8	339,1	291,5	1344,0	1348,4	8,0	23,0	13,3	9,7
2	374,5	312,3	328,1	265,9	1320,8	1314,1	11,0	30,0	18,1	11,9
3	336,1	266,3	305,5	235,7	1323,5	1385,2	9,3	34,0	20,5	13,5
4	316,0	218,1	279,9	182,0	1345,6	1275,2	9,5	48,0	28,9	19,1
5	314,2	222,2	272,7	180,7	1306,5	1385,5	10,0	45,0	26,8	18,2
6	284,0	194,5	281,0	191,5	1313,9	1350,7	7,8	44,0	25,5	18,5
7	292,2	194,2	247,4	149,4	1359,0	1282,1	10,3	48,0	25,9	22,1
8	264,6	168,5	217,8	121,7	1378,7	1331,6	10,5	47,0	26,2	20,8

Unidades: Tempo h
C_{SF} mgDQO.L⁻¹
C_{SOF} mgDQO.L⁻¹
C_{SO4} mgSO₄²⁻.L⁻¹
C_{SO3} mgSO₃²⁻.L⁻¹
STD mgSTD.L⁻¹
C_{H2S} mgH₂S.L⁻¹
C_{HS} mgHS⁻.L⁻¹

Tabela H16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIa (“pH” a “PR”).

Tempo	pH	5,75	4,3	4,0-7,0	AP	AI	AVT	AB	OD	PR
	11/10	11/10	11/10	11/10	11/10	11/10	11/10	11/10	11/10	11/10
0	7,32	3,32	1,33	4,65	248,7	99,6	46,9	315,0	0,0	-350,0
0,5	7,08	3,25	1,54	5,35	243,5	115,4	54,0	320,5	0,0	-365,0
1	6,96	3,63	1,74	6,50	271,9	130,3	65,6	355,7	0,0	-375,0
1,5	6,90	3,66	2,11	7,20	274,2	158,1	72,6	380,7	0,0	-375,0
2	6,86	3,75	2,12	7,17	280,9	158,8	72,3	388,4	0,0	-384,0
3	6,86	4,03	2,35	7,75	301,9	176,0	78,2	422,4	0,0	-384,0
4	6,86	4,13	2,43	7,15	309,4	182,0	72,1	440,2	0,0	-384,0
5	6,87	4,40	2,43	7,44	329,6	182,0	75,1	458,3	0,0	-388,0
6	6,90	4,51	2,43	7,00	337,8	182,0	70,6	469,7	0,0	-391,0
7	6,97	4,94	2,43	6,60	370,1	182,0	66,6	504,8	0,0	-391,0
8	6,94	4,84	2,60	5,80	362,6	194,8	58,5	515,8	0,0	-393,0

Unidades: Tempo h
AP mgCaCO₃.L⁻¹
AI mgCaCO₃.L⁻¹
AVT mgHAc.L⁻¹
AB mgCaCO₃.L⁻¹
OD mgOD.L⁻¹
Pot. Red. mV

Tabela H17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIa (“Ác.acét.” a “C_{CH4}”).

Tempo	Ác.acét.	Ác. prop.	C _{CO2}	C _{CH4}
	16/10	16/10	09/10	09/10
0	0,00	0,00	0,01	0,00
0,5	0,00	0,00	0,19	0,00
1	72,27	0,00	0,50	0,00
1,5	0,00	0,00	0,99	0,00
2	56,99	6,45	1,26	0,00
3	68,94	6,91	1,80	0,00
4	69,47	5,87	2,13	0,00
5	69,34	4,66	2,40	0,00
6	77,71	0,00	2,51	0,00
7	95,44	0,00	2,60	0,00
8	63,49	0,00	2,62	0,00

Unidades: Tempo h C_{CO2} mM.L⁻¹
 Ác. acet. mg.L⁻¹ C_{CH4} mM.L⁻¹
 Ác, prop. mg.L⁻¹

APÊNDICE I

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NA CONDIÇÃO IIIb

Nesta Condição o reator operou em batelada alimentada de 3 h, com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L^{-1} e concentração de sulfato de $1493 \text{ mgSO}_4^{2-}.\text{L}^{-1}$ ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 0,34$).

I1 Dados de monitoramento

Durante os ensaios da condição IIIb foram monitoradas as seguintes variáveis do meio afluyente:

concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), 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) e concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela I1 a I4).

Tabela II – Valores monitorados do afluyente utilizado no ensaio da condição IIIb (“ C_{ST} ” a “AVT”).

Dia	C_{ST}	$[SO_4^{2-}]$	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
2	495,1	1473	-	-	-	-	-	-
5	459	1406	8,7	173,2	53,6	0,31	201,7	35,3
7	490,9	1406	-	-	-	-	-	-
9	-	1542,8	8,82	173,5	47,0	0,27	205,3	21,5
12	541,4	1587,1	8,73	157,0	51,1	0,33	178,3	42,0
14	541,7	1649,5	8,59	152,2	52,5	0,35	179,3	35,7
15	489,4	1663,3	8,77	157,3	48,8	0,31	179,1	38,0
19	490,3	1551,2	8,77	157,0	49,1	0,31	181,0	35,4
21	479	1617,3	8,48	155,0	55,4	0,36	185,0	35,7
23	535,9	1440,2	-	-	-	-	-	-
26	544,7	1550,9	8,57	153,3	48,0	0,31	171,8	41,5

Unidades:

C_{ST}	mgDQO.L ⁻¹
$[SO_4^{2-}]$	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela I2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I1.

Dia	C _{ST}	[SO ₄ ²⁻]	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
média	506,7	1535,2	8,7	159,8	50,7	0,3	185,2	35,6
dp.	31,1	92,6	0,1	8,6	2,9	0,0	11,9	6,3
qu.	10	11	8	8	8	8	8	8
máx.	544,7	1663,3	8,8	173,5	55,4	0,4	205,3	42,0
mín.	459,0	1406,0	8,5	152,2	47,0	0,3	171,8	21,5

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 [SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela I3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIIb (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
8	3066	878	30	24
22	3346	566	82	10
28	3292	732	46	14

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela I4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I3.

Dia	ST	SVT	SST	SSV
média	3235	725	53	16
dp.	149	156	27	7
qu.	3	3	3	3
máx.	3346	878	82	24
mín.	3066	566	30	10

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Durante a condição IIIb foram monitoradas as seguintes variáveis do efluente:

descarga (Desc.), 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 ($[SO_4^{2-}]$), concentração de sulfito ($[SO_3^{2-}]$), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto ($[HS^-]$), concentração de sulfeto de hidrogênio ($[H_2S]$), 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), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela I5 a I10).

Tabela I5 – Valores monitorados do efluente na condição IIIb (“Desc.” a “ HS^- ”).

Dia	Desc.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	$[SO_4^{2-}]$	$[SO_3^{2-}]$	STD	$[H_2S]$	$[HS^-]$
1	1,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	2,03	331,5	245,6	155,3	69,4	1235,9	-	-	-	-
6	2,08	270,6	224,8	110,9	65,1	1266,2	8,5	79,0	14,4	64,6
7	1,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1,98	241,5	202,4	81,8	42,7	1123,5	8,8	79,0	14,4	64,6
9	1,94	254,3	223,0	78,1	46,8	1152,7	-	-	-	-
12	1,96	293,7	254,9	117,5	78,7	1108,0	-	-	-	-
13	2,05	279,3	256,4	82,1	59,2	1140,0	11,0	97,5	17,7	79,8
15	2,04	278,1	253,8	92,1	67,8	1166,1	-	92,0	15,9	76,1
19	1,97	226,5	205,6	38,5	17,6	1272,9	-	93,0	19,4	73,6
20	2,02	-	-	-	-	1279,8	-	-	-	-
21	2,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	2,00	221,5	206,0	55,7	40,2	1322,7	10,1	81,9	14,9	67,0
23	2,00	272,3	241,6	95,2	64,5	1301,1	10,7	87,5	15,9	71,6
26	2,00	-	-	-	-	1155,9	-	-	-	-

Unidades:

Dia	d	$[SO_4^{2-}]$	$mgSO_4^{2-}.L^{-1}$
Desc.	L	$[SO_3^{2-}]$	$mgSO_3^{2-}.L^{-1}$
C_{ST}	$mgDQO.L^{-1}$	STD	$mg.L^{-1}$
C_{SF}	$mgDQO.L^{-1}$	$[H_2S]$	$mgH_2S.L^{-1}$
C_{SOT}	$mgDQO.L^{-1}$	$[HS^-]$	$mgHS^-.L^{-1}$
C_{SOF}	$mgDQO.L^{-1}$		

Tabela I6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I5.

	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
média	2,0	266,9	231,4	90,7	55,2	1210,4	9,8	87,1	16,1	71,0
dp.	0,0	32,8	21,7	32,6	18,2	76,6	1,1	7,4	1,9	5,9
qu.	16	10	10	10	10	12	5	7	7	7
máx.	2,1	331,5	256,4	155,3	78,7	1322,7	11,0	97,5	19,4	79,8
mín.	1,9	221,5	202,4	38,5	17,6	1108,0	8,5	79,0	14,4	64,6

Unidades:	Dia	d	[SO ₄ ²⁻]	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	[SO ₃ ²⁻]	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C _{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C _{SF}	mgDQO.L ⁻¹	[H ₂ S]	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C _{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	[HS ⁻]	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C _{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela I7 – Valores monitorados do efluente na condição IIIb (“pH” a “AVT”).

Dia	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
5	7,64	516,6	135,4	652,0	0,3	627,3	34,8
7	7,75	507,6	106,7	614,3	0,2	593,3	29,6
9	7,83	518,4	107,9	626,3	0,2	605,8	28,9
12	7,68	515,8	137,7	653,5	0,3	636,1	24,5
15	7,72	494,3	150,5	644,7	0,3	628,8	22,4
19	7,62	459,1	122,9	582,0	0,3	564,0	25,3
21	7,61	481,2	151,9	633,1	0,3	619,7	18,8

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela I8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I7.

	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
média	7,7	499,0	130,4	629,4	0,3	610,7	26,3
dp.	0,1	22,3	18,6	25,3	0,0	25,3	5,2
qu.	7	7	7	7	7	7	7
máx.	7,8	518,4	151,9	653,5	0,3	636,1	34,8
mín.	7,6	459,1	106,7	582,0	0,2	564,0	18,8

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela I9 – Valores monitorados do efluente na condição IIIb (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
8	2648	584	14	40
22	2994	490	120	44
28	3082	628	90	40

Unidades: ST mg.L⁻¹
SVT mg.L⁻¹
SST mg.L⁻¹
SSV mg.L⁻¹

Tabela I10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I9.

	ST	SVT	SST	SSV
média	2908	567	75	41
dp.	229	70	55	2
qu.	3	3	3	3
máx.	3082	628	120	44
mín.	2648	490	14	40

Unidades: ST mg.L⁻¹
SVT mg.L⁻¹
SST mg.L⁻¹
SSV mg.L⁻¹

Tabela I11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIIb.

Dia	E _{ST}	E _{SF}	E _{SOT}	E _{SOF}	E _{SO4}
5	34,6	51,5	69,4	86,3	19,5
6	46,6	55,6	78,1	87,2	17,5
8	52,3	60,1	83,9	91,6	26,8
9	49,8	56,0	84,6	90,8	24,9
12	42,0	49,7	76,8	84,5	27,8
13	44,9	49,4	83,8	88,3	25,7
15	45,1	49,9	81,8	86,6	24,0
19	55,3	59,4	92,4	96,5	17,1
20	-	-	-	-	16,6
22	56,3	59,3	89,0	92,1	13,8
23	46,3	52,3	81,2	87,3	15,2
26	-	-	-	-	24,7

Unidades: E_{ST}, E_{SF}, E_{SOT}, E_{SOF} %
E_{SO4} %

Tabela I12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I11.

	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
média	47,3	54,3	82,1	89,1	21,2
dp.	6,5	4,3	6,4	3,6	5,0
qu.	10	10	10	10	12
máx.	56,3	60,1	92,4	96,5	27,8
mín.	34,6	49,4	69,4	84,5	13,8

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

A partir destes valores monitorados durante a condição IIIb foram calculadas:

a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável não filtrada removida (COR_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida (COR_{SF}), a carga volumétrica de matéria orgânica não filtrada removida (COR_{SOT}), a carga volumétrica de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA) e a carga volumétrica de sulfato removida (CSR) (Tabela I13).

Tabela I13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição IIIb.

Dia	COA_{ST}	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
2	742,7	-	-	-	-	2209,5	-
5	688,5	262,9	391,7	527,2	656,0	2109,0	449,0
6	-	354,2	422,9	593,8	662,5	-	403,5
7	736,4	-	-	-	-	2109,0	-
8	-	397,9	456,5	637,5	696,1	-	617,6
9	-	378,7	425,6	643,0	689,9	2314,2	573,8
12	812,1	319,6	377,8	583,9	642,1	2380,7	640,8
13	-	341,2	375,5	637,0	671,3	-	592,8
14	812,6	-	-	-	-	2474,3	-
15	734,1	343,0	379,4	621,9	658,3	2495,0	553,7
19	735,5	420,4	451,7	702,3	733,6	2326,8	393,5
20	-	-	-	-	-	-	383,1
21	718,5	-	-	-	-	2426,0	2302,8
22	-	427,9	451,1	676,6	699,8	-	318,8
23	803,9	351,7	397,7	617,4	663,4	2160,3	351,2
26	817,1	-	-	-	-	2326,4	569,0

Unidades: todos em $[g.(L.d)^{-1}]$

Tabela I14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela I13.

	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
média	760,1	359,7	413,0	624,0	677,3	2302,8	626,9
dp.	46,7	49,3	32,6	48,9	27,3	138,9	515,4
qu.	10	10	10	10	10	11	13
máx.	817,1	427,9	456,5	702,3	733,6	2495,0	2302,8
mín.	688,5	262,9	375,5	527,2	642,1	2109,0	318,8

I2 Dados de perfil

Durante os perfis da condição IIIb foram monitorados:

concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e concentração de sulfeto (C_{HS}), de pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade a bicarbonato (AB), oxigênio dissolvido (OD), potencial redox (PR), ácido acético (Ác. acét.), ácido propiônico (Ác. prop.), concentração de dióxido de carbono (C_{CO2}) e concentração de metano (C_{CH4}).

Tabela I15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIb (“C_{ST}” a “C_{HS}”).

Tempo	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SO4}	C _{SO4}	C _{SO3}	STD	C _{H2S}	C _{HS}
	06/11	06/11	12/11	12/11	06/11	12/11	09/11	09/11	09/11	09/11
0	209,3	32,2	245,6	68,5	1249,0	1291,1	10,6	87,5	16,0	71,5
0,5	206,3	68,2	233,1	95,0	1271,6	1320,6	9,5	68,1	13,9	54,2
1	221,0	88,7	247,0	114,7	1289,9	1326,2	8,8	65,3	15,1	50,2
1,5	228,9	107,9	258,6	137,6	1347,3	1332,4	8,3	59,7	16,2	43,5
2	229,1	108,1	258,3	137,3	1287,1	1351,8	7,9	59,7	17,0	42,7
3	242,7	116,0	277,2	150,5	1331,3	1382,6	8,5	62,5	21,2	41,3
4	212,9	72,5	267,0	126,6	1305,4	1306,2	8,3	69,4	23,5	45,9
5	210,0	55,5	260,9	106,4	1321,9	1294,9	8,6	76,4	24,3	52,1
6	209,7	46,8	254,4	91,5	1254,6	1283,7	8,7	80,6	24,9	55,7
7	193,9	25,4	237,4	68,9	1294,3	1239,1	9,5	83,3	24,5	58,8
8	202,2	25,1	228,4	51,3	1279,8	1155,9	10,7	87,5	18,6	68,9

Unidades: Tempo h
C_{SF} mgDQO.L⁻¹
C_{SOF} mgDQO.L⁻¹
C_{SO4} mgSO₄²⁻.L⁻¹
C_{SO3} mgSO₃²⁻.L⁻¹
STD mgSTD.L⁻¹
C_{H2S} mgH₂S.L⁻¹
C_{HS} mgHS.L⁻¹

Tabela I16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIb (“pH” a “PR”).

Tempo	pH	5,75	4,3	4,0-7,0	AP	AI	AVT	AB	OD	PR
	07/11	07/11	07/11	07/11	07/11	07/11	07/11	07/11	07/11	07/11
0	7,69	7,27	1,76	3,79	516,0	124,9	24,6	623,4	0,0	-350,0
0,5	7,63	6,04	1,71	4,70	428,7	121,4	30,5	528,4	0,0	-370,0
1	7,56	5,83	1,74	5,65	413,8	123,5	36,7	511,2	0,0	-389,0
1,5	7,47	5,59	1,82	6,25	396,7	129,2	40,6	497,1	0,0	-393,0
2	7,44	5,54	1,70	6,60	393,2	120,7	42,9	483,4	0,0	-394,0
3	7,33	5,04	1,99	7,40	357,7	141,2	48,1	464,8	0,0	-395,0
4	7,33	5,74	2,14	7,31	407,4	151,9	47,5	525,5	0,0	-400,0
5	7,37	6,04	2,10	5,71	428,7	149,0	37,1	551,4	0,0	-404,0
6	7,39	6,44	2,07	4,64	457,1	146,9	30,2	582,6	0,0	-407,0
7	7,42	6,69	2,06	3,79	474,8	146,2	24,6	603,5	0,0	-408,0
8	7,61	6,78	2,14	2,90	481,2	151,9	18,8	619,7	0,0	-410,0

Unidades: Tempo h
AP mgCaCO₃.L⁻¹
AI mgCaCO₃.L⁻¹
AVT mgHAc.L⁻¹
AB mgCaCO₃.L⁻¹
OD mgOD.L⁻¹
Pot. Red. mV

Tabela I17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIb (“Ác.acét.” a “C_{CH4}”).

Tempo	Ác. acét.	Ác. prop.	C _{CO2}	C _{CH4}
	06/11	06/11	05/11	05/11
0	0,00	0,00	0,03	0,00
0,5	0,00	0,00	0,27	0,00
1	0,00	0,00	0,48	0,00
1,5	0,00	0,00	0,66	0,00
2	0,00	0,00	0,77	0,00
3	0,00	0,00	0,97	0,00
4	0,00	0,00	1,02	0,00
5	0,00	0,00	1,03	0,00
6	0,00	0,00	1,04	0,00
7	0,00	0,00	1,05	0,00
8	0,00	0,00	1,03	0,00

Unidades: Tempo	h	C_{CO_2}	mM.L^{-1}
Ác. acet.	mg.L^{-1}	C_{CH_4}	mM.L^{-1}
Ác. prop.	mg.L^{-1}		

APÊNDICE J

VALORES DAS VARIÁVEIS MONITORADAS NA CONDIÇÃO IIIc

Nesta Condição o reator operou em batelada alimentada de 6 h, com concentração de matéria orgânica de 500 mgDQO.L^{-1} e concentração de sulfato de $1493 \text{ mgSO}_4^{2-}.\text{L}^{-1}$ ($\text{DQO}/[\text{SO}_4^{2-}] = 0,34$).

J1 Dados de monitoramento

Durante os ensaios da condição IIIc foram monitoradas as seguintes variáveis do meio afluente:

concentração de matéria orgânica (C_{ST}), concentração de sulfato ($[SO_4^{2-}]$), 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) e concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela J1 a J4).

Tabela J1 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIIc (“ C_{ST} ” a “AVT”).

Dia	C_{ST}	$[SO_4^{2-}]$	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
1	507,4	1676,3	-	-	-	-	-	-
3	523,7	1692,7	8,73	156,1	51,7	0,33	177,9	42,2
6	496,7	1541,4	8,5	157,6	47,1	0,30	177,8	37,9
8	503,8	1652,6	-	-	-	-	-	-
10	515	1567,5	8,71	180,3	54,3	0,30	204,9	41,9
13	510,6	1511,9	8,82	179,4	56,7	0,32	206,8	41,3
15	505,8	1450,5	-	-	-	-	-	-
17	506,2	1503,5	8,67	182,4	54,0	0,30	203,7	46,1
20	519,8	1625,1	8,59	180,6	55,2	0,31	206,4	41,5

Unidades:

C_{ST}	mgDQO.L ⁻¹
$[SO_4^{2-}]$	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela J2 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J1.

	C _{ST}	[SO ₄ ²⁻]	pH	AP	AI	AI/AP	AB	AVT
média	509,9	1580,2	8,7	172,7	53,2	0,3	196,2	41,8
dp.	8,4	85,3	0,1	12,4	3,4	0,0	14,3	2,6
qu.	9	9	6	6	6	6	6	6
máx.	523,7	1692,7	8,8	182,4	56,7	0,3	206,8	46,1
mín.	496,7	1450,5	8,5	156,1	47,1	0,3	177,8	37,9

Unidades: C_{ST} mgDQO.L⁻¹
 [SO₄²⁻] mgSO₄²⁻.L⁻¹
 AP mgCaCO₃.L⁻¹
 AI mgCaCO₃.L⁻¹
 AB mgCaCO₃.L⁻¹
 AVT mgHAc.L⁻¹

Tabela J3 – Valores monitorados do afluente utilizado no ensaio da condição IIIc (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
8	3142	494	34	8
15	2918	508	52	22

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Tabela J4 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J3.

	ST	SVT	SST	SSV
média	2265	476	40	13
dp.	1502	305	25	8
qu.	7	7	7	7
máx.	3346	878	82	24
mín.	3	3	3	3

Unidades: ST mg.L⁻¹
 SVT mg.L⁻¹
 SST mg.L⁻¹
 SSV mg.L⁻¹

Durante a condição IIIc foram monitoradas as seguintes variáveis do efluente:

descarga (Desc.), 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 ($[SO_4^{2-}]$), concentração de sulfito ($[SO_3^{2-}]$), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto ($[HS^-]$), concentração de sulfeto de hidrogênio ($[H_2S]$), 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), concentração de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos solúveis totais (SST) e sólidos solúveis voláteis (SSV) (Tabela J5 a J10).

Tabela J5 – Valores monitorados do efluente na condição IIIc (“Desc.” a “HS”).

Dia	Desc.	C_{ST}	C_{SF}	C_{SOT}	C_{SOF}	$[SO_4^{2-}]$	$[SO_3^{2-}]$	STD	$[H_2S]$	$[HS^-]$
3	1,99	285,0	256,1	165,4	136,5	1295,7	9,3	65,9	12,3	53,6
6	1,99	291,8	246,7	172,2	127,1	1350,3	-	-	-	-
7	2,02	280,1	251,3	145,0	116,2	1283,1	9,1	66,7	13,7	53,0
8	2,00	275,1	241,9	155,5	122,3	-	-	-	-	-
9	2,00	303,7	253,0	171,7	121,0	1254,8	10,9	64,9	13,3	51,6
10	2,01	316,1	271,4	196,5	151,8	1199,7	-	-	-	-
13	2,02	292,9	250,2	180,1	137,4	1153,4	-	55,6	10,6	45,0
14	2,06	300,6	266,7	166,3	132,4	1155,1	9,3	66,3	13,6	52,7
15	2,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	2,00	338,9	297,0	192,0	150,1	1238,1	9,5	72,5	14,9	57,6
17	2,08	349,2	308,1	199,6	158,5	1160,5	10,4	73,8	15,1	58,6
20	2,00	-	-	-	-	1172,3	-	-	-	-

Unidades:	Dia	d	$[SO_4^{2-}]$	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	$[SO_3^{2-}]$	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C_{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C_{SF}	mgDQO.L ⁻¹	$[H_2S]$	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C_{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	$[HS^-]$	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C_{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela J6 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J5.

	Desc.	C _{ST}	C _{SF}	C _{SOT}	C _{SOF}	[SO ₄ ²⁻]	[SO ₃ ²⁻]	STD	[H ₂ S]	[HS ⁻]
média	2,0	303,3	264,2	174,4	135,3	1226,3	9,7	66,5	13,3	53,2
dp.	0,0	24,6	22,2	17,8	14,3	68,9	0,7	5,9	1,6	4,5
qu.	12	10	10	10	10	10	6	7	7	7
máx.	2,1	349,2	308,1	199,6	158,5	1350,3	10,9	73,8	15,1	58,6
mín.	2,0	275,1	241,9	145,0	116,2	1153,4	9,1	55,6	10,6	45,0

Unidades:	Dia	d	[SO ₄ ²⁻]	mgSO ₄ ²⁻ .L ⁻¹
	Desc.	L	[SO ₃ ²⁻]	mgSO ₃ ²⁻ .L ⁻¹
	C _{ST}	mgDQO.L ⁻¹	STD	mg.L ⁻¹
	C _{SF}	mgDQO.L ⁻¹	[H ₂ S]	mgH ₂ S.L ⁻¹
	C _{SOT}	mgDQO.L ⁻¹	[HS ⁻]	mgHS ⁻ .L ⁻¹
	C _{SOF}	mgDQO.L ⁻¹		

Tabela J7 – Valores monitorados do efluente na condição IIIc (“pH” a “AVT”).

Dia	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
3	7,68	450,8	130,0	580,8	0,3	547,8	46,5
6	7,58	441,5	131,4	572,9	0,3	543,3	41,7
8	7,59	418,2	131,4	549,6	0,3	520,3	41,3
10	7,62	408,5	129,5	538,0	0,3	500,0	53,5
13	7,67	465,8	138,3	604,1	0,3	566,4	53,1
16	7,44	494,1	152,0	646,1	0,3	597,5	68,5

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela J8 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J7.

	pH	AP	AI	AT	AI/AP	AB	AVT
média	7,6	446,5	135,4	581,9	0,3	545,9	50,8
dp.	0,1	31,4	8,7	39,2	0,0	34,2	10,2
qu.	6	6	6	6	6	6	6
máx.	7,7	494,1	152,0	646,1	0,3	597,5	68,5
mín.	7,4	408,5	129,5	538,0	0,3	500,0	41,3

Unidades:	Dia	d	AT	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AP	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AB	mgCaCO ₃ .L ⁻¹
	AI	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	AVT	mgHAc.L ⁻¹

Tabela J9 – Valores monitorados do efluente na condição IIIc (“ST” a “SSV”).

Dia	ST	SVT	SST	SSV
8	2868	366	80	62
15	2708	432	88	72

Unidades: ST mg.L⁻¹
SVT mg.L⁻¹
SST mg.L⁻¹
SSV mg.L⁻¹

Tabela J10 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J9.

	ST	SVT	SST	SSV
média	2788	399	84	67
dp.	113	47	6	7
qu.	2	2	2	2
máx.	2868	432	88	72
mín.	2708	366	80	62

Unidades: ST mg.L⁻¹
SVT mg.L⁻¹
SST mg.L⁻¹
SSV mg.L⁻¹

Tabela J11 – Eficiência de remoção de matéria oxidável não filtrada (E_{ST}) e filtrada (E_{SF}), de matéria orgânica não filtrada (E_{SOT}) e filtrada (E_{SOF}) e eficiência de redução de sulfato (E_{SO4}) da condição IIIc.

Dia	E _{ST}	E _{SF}	E _{SOT}	E _{SOF}	E _{SO4}
3	44,1	49,8	67,6	73,2	18,0
6	42,8	51,6	66,2	75,1	14,5
7	45,1	50,7	71,6	77,2	18,8
8	46,0	52,6	69,5	76,0	-
9	40,4	50,4	66,3	76,3	20,6
10	38,0	46,8	61,5	70,2	24,1
13	42,6	50,9	64,7	73,1	27,0
14	41,0	47,7	67,4	74,0	26,9
15	-	-	-	-	29,3
16	33,5	41,8	62,3	70,6	21,6
17	31,5	39,6	60,8	68,9	26,6
20	-	-	-	-	25,8

Unidades: E_{ST}, E_{SF}, E_{SOT}, E_{SOF} %
E_{SO4} %

Tabela J12 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J11.

	E_{ST}	E_{SF}	E_{SOT}	E_{SOF}	E_{SO4}
média	40,5	48,2	65,8	73,5	23,0
dp.	4,8	4,3	3,5	2,8	4,6
qu.	10	10	10	10	11
máx.	46,0	52,6	71,6	77,2	29,3
mín.	31,5	39,6	60,8	68,9	14,5

Unidades: E_{ST} , E_{SF} , E_{SOT} , E_{SOF} %
 E_{SO4} %

A partir destes valores monitorados durante a condição IIIc foram calculadas:

a carga volumétrica de matéria orgânica aplicada (COA_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável não filtrada removida (COR_{ST}), a carga volumétrica de matéria oxidável filtrada removida (COR_{SF}), a carga volumétrica de matéria orgânica não filtrada removida (COR_{SOT}), a carga volumétrica de matéria orgânica filtrada removida (COR_{SOF}), a carga volumétrica de sulfato aplicada (CSA) e a carga volumétrica de sulfato removida (CSR) (Tabela J13).

Tabela J13 – Cargas aplicadas e removidas durante a condição IIIc.

Dia	COA_{ST}	COR_{ST}	COR_{SF}	COR_{SOT}	COR_{SOF}	CSA	CSR
1	761,1	-	-	-	-	2514,5	-
3	785,6	337,3	380,7	516,7	560,0	2539,1	426,7
6	745,1	327,1	394,8	506,5	574,1	2312,1	344,8
7	-	344,7	387,9	547,4	590,6	-	445,6
8	755,7	352,2	402,0	531,5	581,3	2478,9	-
9	-	309,3	385,3	507,2	583,3	-	488,1
10	772,5	290,7	357,7	470,0	537,1	2351,3	570,7
13	765,9	325,5	389,5	494,7	558,7	2267,9	640,2
14	-	313,9	364,8	515,5	566,3	-	637,6
15	758,7	-	-	-	-	2175,8	-
16	-	256,5	319,3	476,8	539,7	-	513,1
17	759,3	241,0	302,7	465,4	527,0	2255,3	629,5
20	779,7	-	-	-	-	2437,7	611,8

Unidades: todos em $[g.(L.d)^{-1}]$

Tabela J14 – Valores médios, desvio padrão, quantidade de amostras e valores máximos e mínimos para os valores apresentados na Tabela J13.

	COA _{ST}	COR _{ST}	COR _{SF}	COR _{SOT}	COR _{SOF}	CSA	CSR
média	764,8	309,8	368,5	503,2	561,8	2370,3	530,8
dp.	12,6	36,9	33,2	26,7	21,5	127,9	103,3
qu.	9	10	10	10	10	9	10
máx.	785,6	352,2	402,0	547,4	590,6	2539,1	640,2
mín.	745,1	241,0	302,7	465,4	527,0	2175,8	344,8

J2 Dados de perfil

Durante os perfis da condição IIIc foram monitorados:

concentração de matéria oxidável filtrada (C_{SF}), concentração de matéria orgânica filtrada (C_{SOF}), concentração de sulfato (C_{SO4}), concentração de sulfito (C_{SO3}), concentração de sulfeto total dissolvido (STD), concentração de sulfeto de hidrogênio (C_{H2S}) e concentração de sulfeto (C_{HS}), de pH, alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI), ácidos voláteis totais (AVT), alcalinidade a bicarbonato (AB), oxigênio dissolvido (OD), potencial redox (PR), ácido acético (Ác. acét.), ácido propiônico (Ác. prop.), concentração de dióxido de carbono (C_{CO2}) e concentração de metano (C_{CH4}).

Tabela J15 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIc (“C_{ST}” a “C_{HS}”).

Tempo	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SF}	C _{SOF}	C _{SO4}	C _{SO4}	C _{SO3}	STD	C _{H2S}	C _{HS}
	28/11	28/11	03/12	03/12	28/11	03/12	30/11	30/11	30/11	30/11
0	282,7	113,5	241,1	71,9	1135,9	1241,7	8,7	83,8	21,9	61,8
0,5	260,9	126,4	224,5	90,0	1175,3	1169,7	10,3	66,3	13,5	52,7
1	258,2	128,5	228,0	98,3	1151,1	1192,0	11,3	63,8	12,6	51,2
1,5	258,0	128,4	239,5	109,9	1173,9	1200,1	10,4	63,8	13,5	50,2
2	266,5	144,3	238,5	116,3	1134,9	1210,2	11,0	60,0	13,7	46,3
3	267,2	150,0	247,3	130,1	1136,8	1310,2	10,9	57,5	15,3	42,2
4	282,8	166,0	260,6	143,8	1084,5	1214,2	9,2	57,5	15,6	41,9
5	290,8	169,2	238,3	116,7	1300,0	1274,6	7,8	60,0	18,5	41,5
6	282,4	155,7	238,1	111,4	1156,1	1286,2	8,8	62,5	20,2	42,3
7	268,3	131,2	239,2	102,1	1101,9	1224,2	10,6	67,5	20,5	47,0
8	258,4	108,8	233,2	83,6	1117,3	1172,3	10,4	73,8	21,0	52,7

Unidades: Tempo h
C_{SF} mgDQO.L⁻¹
C_{SOF} mgDQO.L⁻¹
C_{SO4} mgSO₄²⁻.L⁻¹
C_{SO3} mgSO₃²⁻.L⁻¹
STD mgSTD.L⁻¹
C_{H2S} mgH₂S.L⁻¹
C_{HS} mgHS.L⁻¹

Tabela J16 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIc (“pH” a “PR”).

Tempo	pH	5,75	4,3	4,0-7,0	AP	AI	AVT	AB	OD	PR
	29/11	29/11	29/11	29/11	29/11	29/11	29/11	29/11	29/11	29/11
0	7,49	6,71	1,94	9,90	492,7	142,4	70,6	585,0	0,0	-310,0
0,5	7,63	6,38	1,81	9,55	468,4	132,9	68,1	553,0	0,0	-320,0
1	7,65	6,35	1,74	8,91	466,2	127,8	63,5	548,9	0,0	-345,0
1,5	7,61	6,22	1,78	9,59	456,7	130,7	68,4	538,8	0,0	-359,0
2	7,57	5,99	1,79	8,74	439,8	131,4	62,3	527,0	0,0	-380,0
3	7,48	5,93	1,91	9,88	435,4	140,2	70,5	525,6	0,0	-395,0
4	7,47	5,91	1,93	9,61	433,9	141,7	68,5	527,0	0,0	-397,0
5	7,39	5,76	1,96	9,46	422,9	143,9	67,5	518,9	0,0	-398,0
6	7,36	5,73	1,97	9,69	420,7	144,6	69,1	516,3	0,0	-399,0
7	7,40	6,34	2,05	9,92	465,5	150,5	70,7	565,8	0,0	-400,0
8	7,44	6,73	2,07	9,61	494,1	152,0	68,5	597,5	0,0	-402,0

Unidades: Tempo h
AP mgCaCO₃.L⁻¹
AI mgCaCO₃.L⁻¹
AVT mgHAc.L⁻¹
AB mgCaCO₃.L⁻¹
OD mgOD.L⁻¹
Pot. Red. mV

Tabela J17 – Valores dos perfis temporais para o reator operado na condição IIIc (“Ác.acét.” a “C_{CH4}”).

Tempo	Ác.acét.	Ác. prop.	C _{CO2}	C _{CH4}
	28/11	28/11	05/11	05/11
0	58,63	0,00	0,01	0,00
0,5	54,86	0,00	0,02	0,00
1	53,67	0,00	0,03	0,00
1,5	56,02	0,00	0,41	0,00
2	44,12	0,00	0,49	0,00
3	54,74	0,00	0,66	0,00
4	52,20	4,21	0,82	0,00
5	60,34	4,96	0,95	0,00
6	59,54	0,00	1,08	0,00
7	62,17	4,25	1,14	0,00
8	53,40	0,00	1,20	0,00

Unidades: Tempo	h	C_{CO_2}	mM.L^{-1}
Ác. acet.	mg.L^{-1}	C_{CH_4}	mM.L^{-1}
Ác. prop.	mg.L^{-1}		