



DESEMPENHO DE REATOR UASB EM ESCALA PLENA NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO E LODO ATIVADO EM EXCESSO DO PÓS-TRATAMENTO

RESUMO

Esse trabalho avaliou o efeito do descarte de lodo aeróbio no desempenho do reator UASB. De modo geral, não houve impacto negativo no processo de digestão anaeróbia em termos de DQO dissolvida no efluente, que foi semelhante quando o afluente era composto essencialmente de esgoto bruto, na ordem de 60 a 80 mg/L. Por outro lado, os resultados indicaram uma tendência de redução da qualidade do efluente do reator UASB em termos de DQO total e sólidos em suspensão, quando da alimentação desse reator com excesso de lodo aeróbio.

A composição do biogás variou quando o sistema era alimentado com excesso de lodo aeróbio no afluente, apresentando, nessa condição, maior concentração de CO₂ e menor concentração de H₂S. Outro aspecto importante observado foi à falta de correlação entre os parâmetros DQO removida e produção volumétrica de biogás quando o afluente do reator UASB continha excesso de lodo aeróbio.

A qualidade do efluente final da ETE não foi impactada pela operação de descarte de lodo aeróbio no reator UASB, tendo mantido durante a maior parte do tempo DQO média na ordem de 40 mg/L no efluente e concentração de SST em média na ordem de 25 mg/L.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo Aeróbio em Excesso, Excesso de Lodo, Reator UASB.

INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas combinados (anaeróbio seguido de aeróbio) de tratamento de esgotos é uma solução bastante interessante, já que reduz a carga orgânica do esgoto e diminui o custo operacional da planta de tratamento com energia elétrica, além da unidade de tratamento anaeróbio gerar um lodo digerido e, portanto, mais estabilizado para disposição controlada no meio ambiente ou uso benéfico. Contudo, além do reator anaeróbio prejudicar o desempenho da desnitrificação no reator aeróbio, devido à baixa disponibilidade de matéria orgânica rapidamente biodegradável para o processo de redução do nitrato, diferentes pesquisadores apresentam posições contraditórias, principalmente quanto à viabilidade do uso da unidade anaeróbia para estabilização do lodo gerado na unidade de pós-tratamento aeróbio. Alguns autores entendem ser viável o descarte de lodo aeróbio na unidade anaeróbia, por permitir que o lodo seja parcialmente estabilizado e adensado na unidade anaeróbia, melhorando seu aspecto e facilitando as etapas posteriores de desaguamento e higienização. Outros pesquisadores afirmam que o descarte de lodo aeróbio deveria ocorrer após uma etapa de adensamento. Quem defende essa posição, alega que o descarte diretamente no reator UASB provoca eventuais perdas de sólidos junto com o efluente final, prejudicando, portanto, a eficiência do processo de tratamento, e causando efeitos deletérios indesejáveis no corpo receptor.

OBJETIVO

Essa pesquisa teve por objetivo avaliar o desempenho do reator UASB operando em escala plena no tratamento de esgoto sanitário e adensamento simultâneo de lodo ativado do pós-tratamento, bem como o impacto dessa operação na qualidade do efluente final e nas características do biogás produzido.

METODOLOGIA UTILIZADA

O estudo foi desenvolvido na ETE 'E', que fica localizada na aglomeração urbana de Jundiaí, no Estado de São Paulo. O sistema de tratamento dessa estação é composto por um processo anaeróbio, através de reatores UASB, e um processo aeróbio de lodos ativados, com emprego de Reatores de Fluxo Alternado.

Durante a pesquisa, a ETE operou em média com 52% de sua capacidade nominal, ou seja, tratando uma vazão média de aproximadamente 300 litros por segundo. A figura 1 apresenta uma visão panorâmica da estação.



Figura 1: Vista Geral da ETE 'E'

A fase líquida do processo de tratamento da ETE 'E' inicia pelo gradeamento grosseiro localizado à montante da elevatória final, conforme figura a seguir.

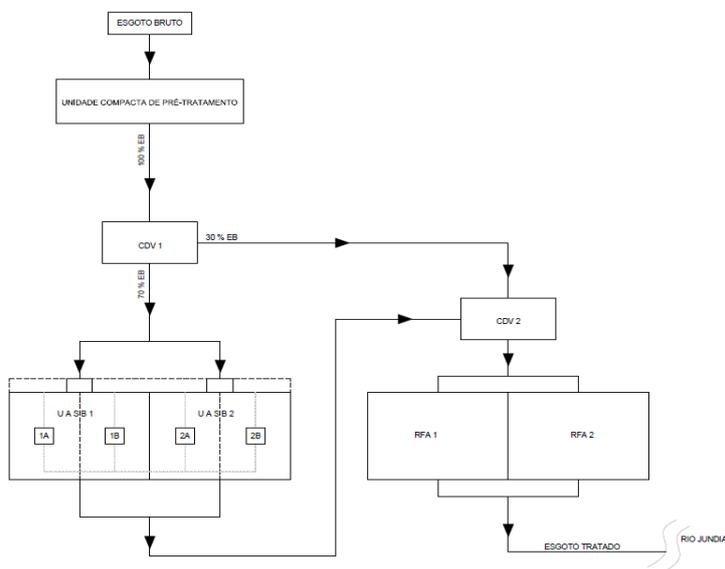


Figura 2. Fluxograma da Fase Líquida da ETE 'E'

Após passagem pelo gradeamento grosseiro da ETE, o esgoto segue para a elevatória final, de onde é recalcado para o sistema de pré-tratamento para remoção de sólidos finos, areia e gordura. Após o pré-tratamento, o esgoto segue para a primeira caixa divisora de vazão – CDVI, onde é distribuído para o processo secundário. Da CDVI, dois terços da vazão são encaminhados para tratamento em dois módulos de reatores anaeróbios do tipo UASB. Cada módulo é dividido em dois reatores UASB. As linhas de efluente tratado nos reatores UASB são encaminhadas através de tubulações para a segunda caixa divisora de vazão – CDVII. A CDVII recebe, além da vazão de efluente tratado pelos reatores UASB, um terço do esgoto bruto proveniente do pré-tratamento, de modo a fornecer matéria orgânica rapidamente biodegradável como doadora de elétrons para o processo de redução do nitrato formado nos tanques de aeração. A vazão afluyente à CDVII é então distribuída para o sistema de lodos ativados composto de dois reatores de fluxo alternado - RFA.

A fase sólida da estação é composta pelo lodo de excesso dos reatores aeróbios e anaeróbios, além das unidades mecanizadas de desaguamento do lodo, conforme apresentado na figura 3.

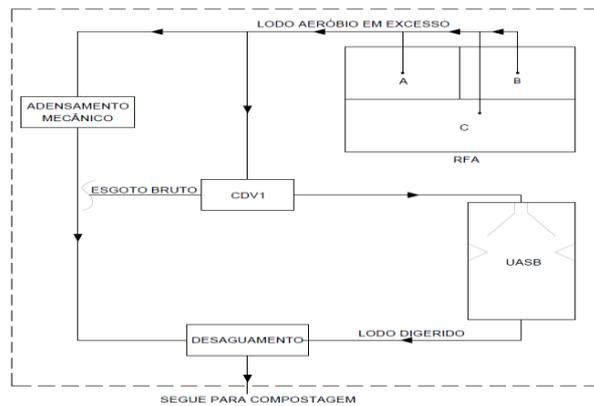


Figura 3. Fluxograma da Fase Sólida da ETE 'E'

Durante a primeira fase do projeto de pesquisa, em 2016, o descarte de lodo aeróbio para o UASB, quando realizado, ocorreu de forma contínua, ou seja, 24 horas por dia. Esse lodo de excesso era misturado com o esgoto bruto na CDVI, antes de ser alimentado no reator UASB. Como durante esse período a operação de descarte de lodo aeróbio para o UASB foi intermitente ao longo do ano, assim como a remoção de excesso de lodo anaeróbio desse reator, os dados de monitoramento foram categorizados e agrupados da seguinte forma:

- NN: Sem descarte de lodo aeróbio para UASB e sem remoção de excesso de lodo do UASB para Unidade de Desaguamento
- NS: Sem descarte de lodo aeróbio para UASB e com remoção de excesso de lodo do UASB para Unidade de Desaguamento
- SN: Com descarte de lodo aeróbio para UASB e sem remoção de excesso de lodo do UASB para Unidade de Desaguamento
- SS: Com descarte de lodo aeróbio para UASB e com remoção de excesso de lodo do UASB para Unidade de Desaguamento

RESULTADOS OBTIDOS

A figura 4 apresenta a variação da vazão média afluyente a ETE ao longo de 2016.

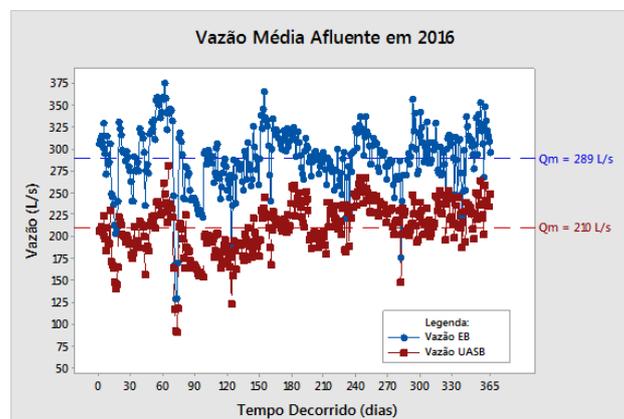


Figura 4 – Variação da Vazão Média Afluyente à ETE e ao Reator UASB em 2016

Nesse período, a vazão média afluyente à ETE variou de 129 a 375 L/s. A média anual foi de 289 L/s, variando, dentro do intervalo de 95% de confiança, entre 285 a 293 L/s. Já a vazão média afluyente ao reator UASB variou de 91 a 280 L/s, com média anual de 210 L/s, variando, com intervalo de 95% de confiança, entre 207 e 213 L/s. A figura 5 apresenta a vazão média e máxima horária afluyente a estação ao longo do ano de 2016, assim como a vazão média de excesso de lodo aeróbio, dos dias efetivos de descarte de lodo aeróbio para o reator UASB.

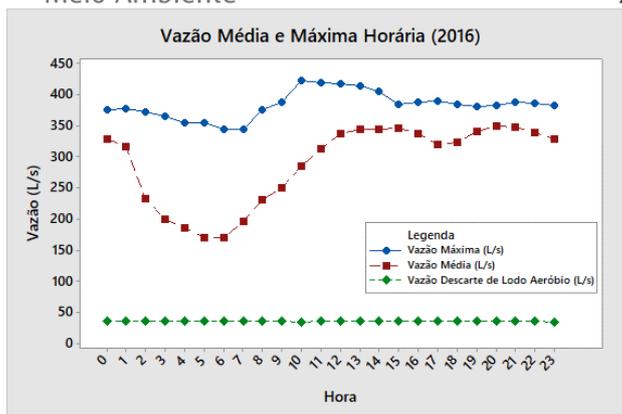


Figura 5 – Variação das Vazões Horárias Afluente a ETE e Vazão Horária de Descarte de Lodo Aeróbio (2016)

Observa-se que a vazão média apresenta um comportamento decrescente da meia noite às 06 horas da manhã, quando há uma inflexão no gráfico e um comportamento crescente até atingir um máximo próximo das 15 horas. Após às 15 horas há uma oscilação na vazão afluente e uma tendência de queda acentuada a partir das 21 horas. Com relação a vazão máxima horária, a máxima vazão observada em 2016 não ultrapassou 450 L/s, o que infere que não houve sobrecarga hidráulica na ETE.

As figuras a seguir apresentam as características do esgoto afluente ao reator UASB, após passar pelas unidades de pré-tratamento, em função dos parâmetros DQO total, SO_4^- , SST e SSV. A figura 6 apresenta a variação, a média e o intervalo de confiança para a média da DQO total afluente ao reator UASB em 2016.

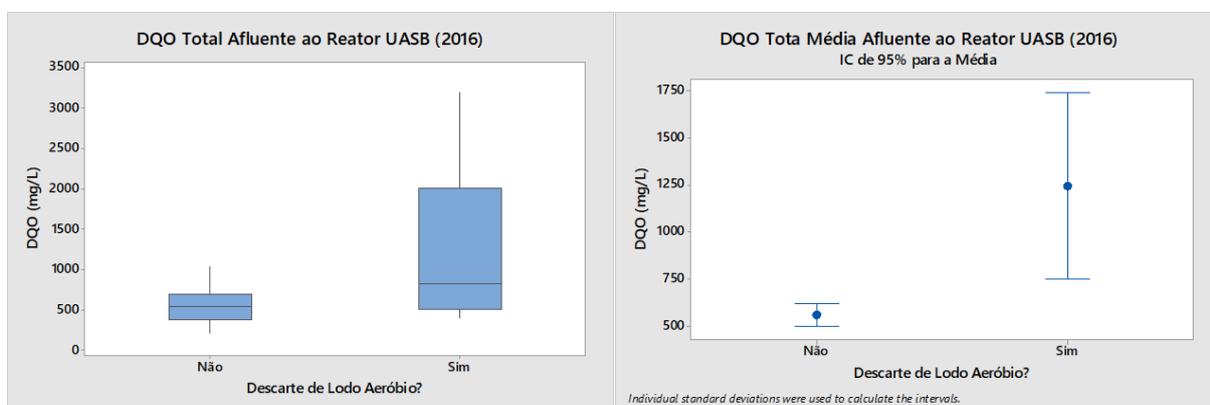


Figura 6 – Variação e Concentração Média da DQO Total Afluente ao Reator UASB em 2016

A DQO total afluente ao reator UASB apresentou um comportamento bastante variável quando o afluente era composto de esgoto bruto e lodo aeróbio de excesso. Quando o afluente era composto apenas de esgoto bruto, a DQO variou de 227 a 1042 mg/L, com 50 % dos dados concentrados entre 378 e 698 mg/L. A média de DQO total nessa condição foi de 562 mg/L, com intervalo de 95 % de confiança variando entre 500 e 624 mg/L. Em comparação com as concentrações típicas de DQO no esgoto doméstico, pode-se considerar o esgoto afluente a ETE 'E' como um esgoto com características típicas de esgoto doméstico. Infere-se que as concentrações máximas estejam associadas a lançamentos de efluente industrial na rede coletora. Quando o reator UASB foi alimentado com esgoto bruto misturado com excesso de lodo aeróbio, a concentração de DQO total foi mais elevada, variando de 406 a 3180 mg/L, sendo que 50% dos dados se concentraram entre 503 e 2010 mg/L. A concentração média de DQO total nessa condição foi de 1245 mg/L, com intervalo de 95% de confiança entre 751 e 1740 mg/L. Para verificar se a concentração média de DQO total do afluente é coerente com o recebimento de lodo aeróbio de excesso, encontra-se apresentado na figura 7 a concentração de sólidos em suspensão totais e em suspensão voláteis da linha de descarte de lodo aeróbio para o reator UASB.

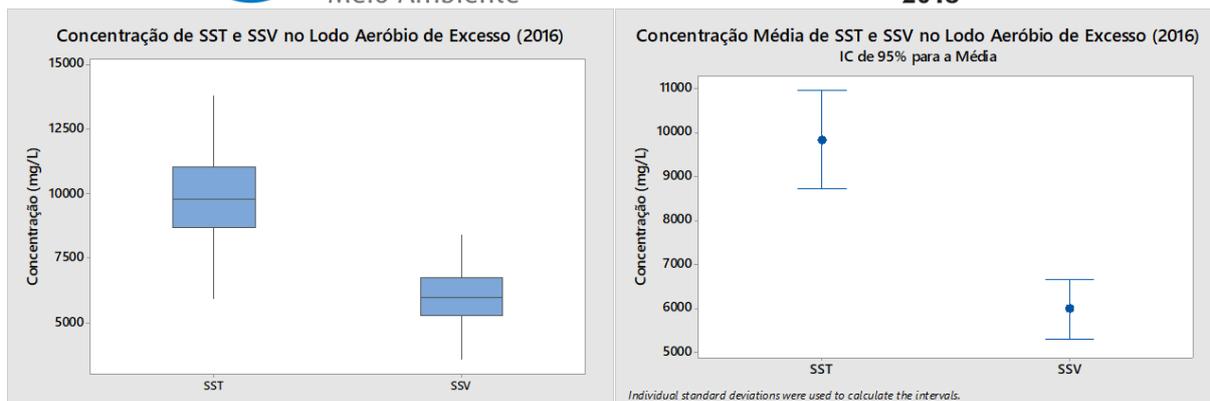


Figura 7 – Concentração de Sólidos em Suspensão na Linha de Descarte de Lodo Aeróbio (2016)

Observa-se da figura 7 que a concentração de sólidos em suspensão voláteis do lodo de excesso variou de 3612 a 8414 mg/L, com 50 % dos dados concentrados entre 5290 e 6737 mg/L. A alta concentração de sólidos em suspensão da linha de retorno é coerente com a alta concentração de sólidos mantida no tanque de aeração durante o ano de 2016, que foram extremamente elevadas devido a baixa capacidade de remoção de lodo da estação. No gráfico à direita, observa-se que a média da concentração de SSV foi de aproximadamente 6000 mg/L, com intervalo de 95 % de confiança variando entre 5320 e 6679 mg/L. Van Haandel & Marais (1999) sugerem que o coeficiente de correlação entre DQO e SSV varie de 1,42 a 1,50, sendo que o valor mais usual é de 1,48 mg.DQO/mg.SSV. Considerando a concentração média de SSV na linha de descarte de lodo aeróbio para o reator UASB, na ordem de 6000 mg/L (IC de 5320 a 6679 mg/L), o equivalente de DQO total seria, considerando o fator de 1,48, igual a 8880 mg/L (IC de 7873 a 9885 mg/L). A DQO de mistura na CDVI é proporcional a DQO proveniente com o esgoto bruto e a DQO do lodo aeróbio de excesso, conforme apresentado na equação 1.

$$DQO_{mistura} = \frac{DQO_{total,EB} \cdot Q_{EB} + DQO_{total,Lodo.Aeróbio} \cdot Q_{Lodo.Aeróbio}}{Q_{EB} + Q_{Lodo.Aeróbio}} \quad (\text{Equação 1})$$
$$DQO_{mistura} = \frac{562 \cdot 289 + 8880 \cdot 32,5}{289 + 32,5}$$
$$DQO_{mistura} = 1403 \text{ mg/L}$$

A DQO de mistura a partir das concentrações médias de DQO presentes no esgoto bruto afluente e no excesso de lodo aeróbio foi de 1403 mg/L. Como a média da DQO total afluente com presença de lodo aeróbio de excesso foi de 1245 mg/L (IC de 751 a 1740 mg/L), infere-se que as medições de DQO total no afluente apresentaram-se coerentes.

A concentração de sulfato variou de 26 a 58 mg/L, com 50 % dos valores concentrados entre 38 e 48 mg/L (1º e 3º quartil), valores esses que coincidem com as concentrações típicas observadas nos esgotos sanitários de origem doméstica.

A figura 8 apresenta a variação da concentração de sólidos em suspensão do afluente ao reator UASB, com e sem parcela de lodo aeróbio de excesso.

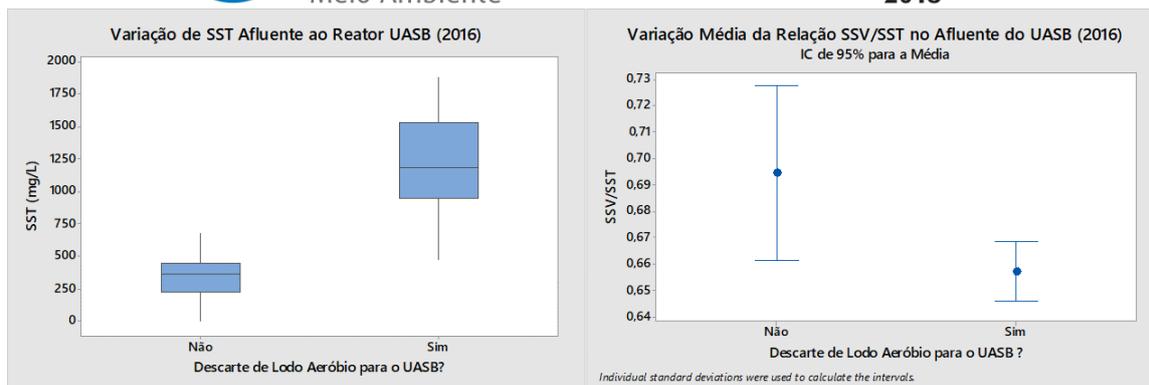


Figura 8 – Variação da Concentração de Sólidos em Suspensão no Afluente ao Reator UASB em 2016

Observa-se que a concentração de sólidos em suspensão totais foi bem superior quando havia descarte de lodo aeróbio para adensamento no reator UASB, com 50 % dos dados concentrados entre 943 (1º quartil) e 1534 mg/L (3º quartil). Na condição sem descarte de lodo aeróbio para o UASB, a tendência central da concentração de SST variou de 229 (1º quartil) a 448 mg/L (3º quartil). A média da relação entre sólidos em suspensão voláteis e sólidos em suspensão totais foi ligeiramente menor quando da presença de lodo aeróbio, com intervalo de confiança variando de 0,64 a 0,67. Quando havia apenas esgoto bruto no afluente do UASB, o intervalo de confiança para a média dessa relação variou de 0,66 a 0,73.

Com base nos dados de vazão e nas características dimensionais do reator UASB, foram elaborados os gráficos de "box-plot" dos parâmetros operacionais de controle do reator. A figura 9 apresenta a variação do tempo de detenção hidráulico e a variação da velocidade ascensional no reator UASB em 2016.

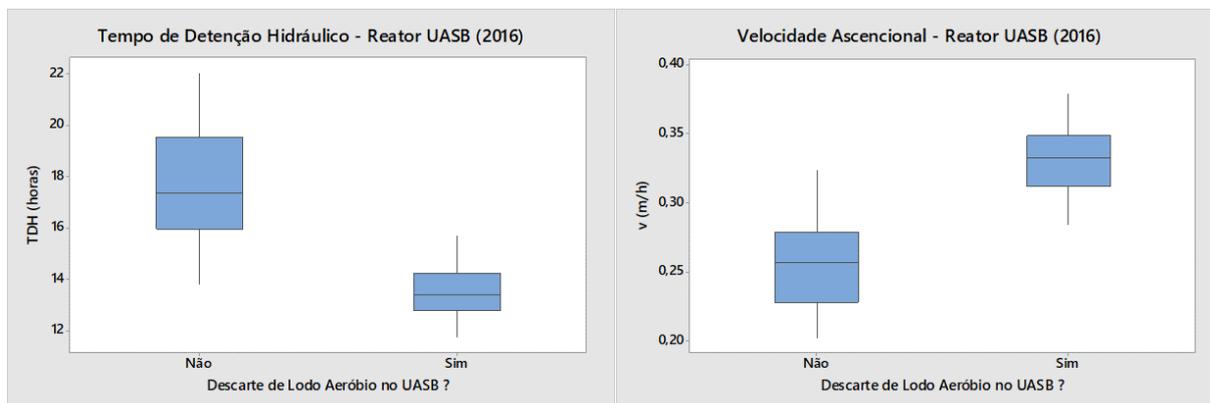


Figura 9 – Variação do Tempo de Detenção Hidráulico e Velocidade Ascensional no UASB em 2016

Conforme se pode verificar na figura 9, o tempo de detenção hidráulico no reator UASB em 2016 variou de 13,8 a 22,0 horas, com 50 % dos dados variando de 15,9 a 19,5 horas (1º e 3º quartil). Na condição com descarte de lodo aeróbio, o tempo de detenção hidráulico apresentou-se ligeiramente menor, variando de 11,7 a 15,6 horas, com 50% dos dados concentrados entre 12,7 e 14,2 horas (1º e 3º quartil). Nas duas condições, o tempo de detenção hidráulico se apresentou bem acima do tempo de detenção hidráulico de projeto, que foi de 8 horas para a vazão média. As velocidades ascensionais foram inferiores às velocidades máximas estabelecidas na NBR 12209/2011 para vazão média (0,50 a 0,70 m/h), logo, eventos de perdas de sólidos com o efluente não devem ter sido ocasionados por arraste hidráulico no reator. Quando não alimentado com lodo aeróbio de excesso, a velocidade variou de 0,20 a 0,32 m/h, com 50% dos dados entre 0,22 e 0,27 m/h. Quando alimentado com lodo aeróbio, a velocidade ascensional foi pouco superior, variando de 0,28 a 0,37 m/h, com 50 % dos valores concentrados entre 0,31 e 0,35 m/h.

A figura 10 apresenta as condições ambientais de operação do reator UASB durante o ano de 2016, nos períodos com e sem alimentação de lodo aeróbio em excesso.

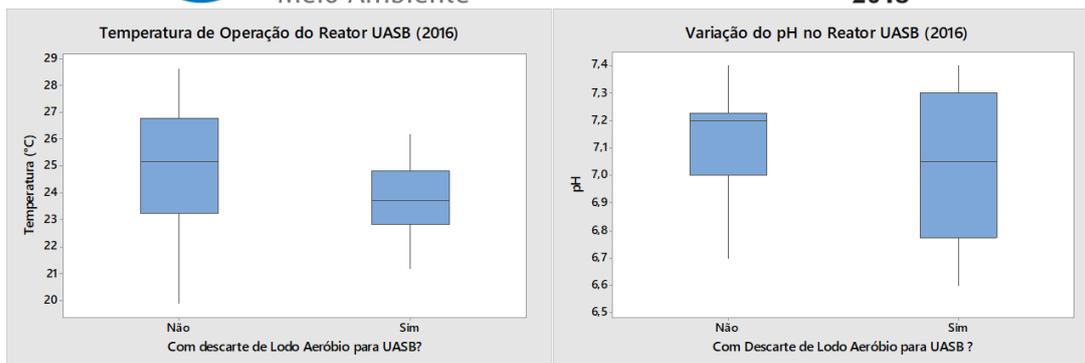


Figura 10 – Condições Ambientais de Operação do Reator UASB em 2016

A temperatura de operação dos Reatores UASB variou de 19,9 a 28,6 °C nos períodos sem recebimento de lodo aeróbio em excesso (50% dos dados concentrados entre 23,2 e 26,8 °C), e de 21,2 a 26,2 °C quando o esgoto afluente era misturado com excesso de lodo aeróbio (50 % dos dados entre 22,8 e 24,8 °C). Nessas faixas de temperatura, de acordo com Van Haandel & Letinga (1994), a temperatura não exerce papel tão importante na produção de biogás quando comparada com outros parâmetros, como a vazão de esgoto, DQO e pluviometria. Com relação ao pH, a figura 11 mostra uma maior dispersão do pH durante a alimentação do reator UASB com lodo aeróbio em excesso. Porém, a figura 11 mostra que o pH médio se manteve em ambas as condições próximo da condição neutra.

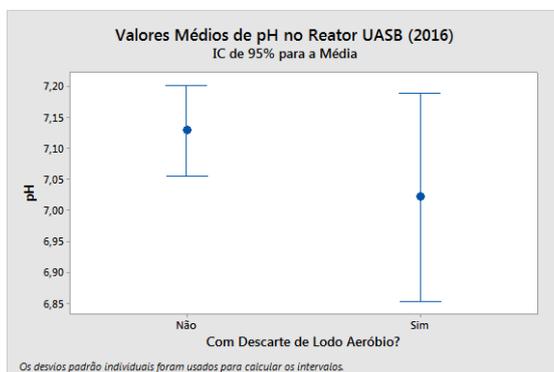


Figura 11 – Intervalo de Confiança para a Média do pH

As figuras a seguir apresentam as características do efluente produzido pelo reator UASB em função das condições operacionais da fase sólida durante o ano de 2016. Durante esse período, o descarte de lodo aeróbio no reator UASB, quando ocorria, era realizado de forma contínua, ou seja, 24 horas por dia.

Para visualizar o formato, a tendência central e a variabilidade da distribuição dos dados do conjunto amostral, encontram-se ilustrados na figura 12 a variação da DQO total no efluente, incluso os eventos discrepantes, e a concentração média da DQO total no efluente, junto com seu intervalo de confiança, já desconsiderando os eventos discrepantes.

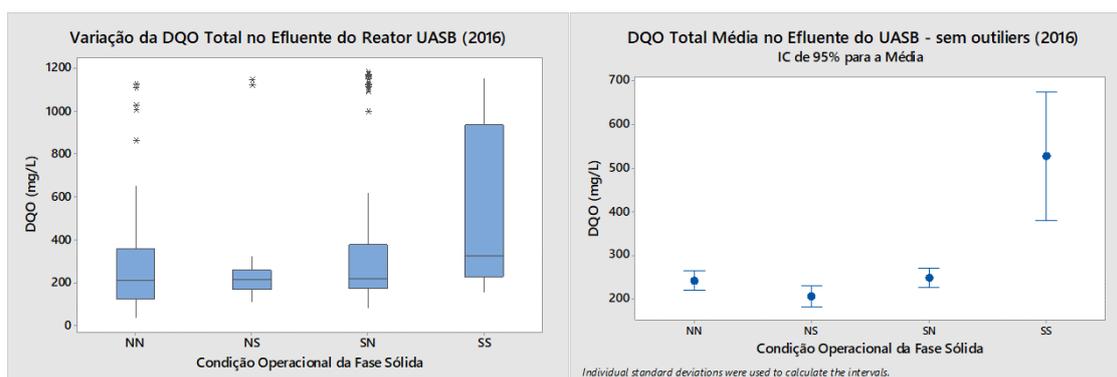


Figura 12 – Variação e Concentração Média da DQO Total no Efluente do UASB em 2016



O gráfico localizado a esquerda da figura 12 mostra que o melhor desempenho do reator se deu, em termos de variabilidade da DQO total efluente, na condição sem lançamento de lodo aeróbio de excesso e com remoção de excesso de lodo do reator UASB (condição NS). Nessa condição, a variação da DQO total efluente apresentou menor amplitude interquartil (90 mg/L), com 50% dos dados concentrados entre 172 e 262 mg/L. Observa-se que a variação dos dados centrais foi bastante semelhante entre as condições NN e SN, tendo apresentado amplitude interquartil, respectivamente de 234 mg/L e 206 mg/L. A concentração média de DQO total no efluente, excluído os eventos discrepantes, são bastante semelhantes entre as condições NN, NS e SN. Infere-se que a manutenção de 50% dos dados amostrados da condição SN na mesma ordem da condição NN se deu pela manutenção de um leito de lodo concentrado na zona de digestão do reator. Essa observação é reforçada ao se observar a variação dos dados de DQO total no efluente quando houve remoção voluntária de lodo anaeróbio do reator UASB e alimentação do reator com esgoto bruto contendo lodo aeróbio de excesso (condição SS). Nessa condição, a amplitude interquartil, que representa a dispersão de 50% dos dados centrais da amostra, foi de 705 mg/L, ou seja, mais de três vezes superior à condição SN. Assim, a princípio os resultados indicam que a remoção do lodo de fundo, mais concentrado, associado a alimentação simultânea de lodo aeróbio no reator UASB foi mais prejudicial a qualidade do efluente do que sua manutenção no reator, quando da alimentação desse reator com excesso de lodo aeróbio. O lodo anaeróbio, mais denso, parece ter sido responsável pela manutenção da qualidade do efluente, possivelmente devido à retenção do lodo aeróbio de excesso na zona de digestão. Como a operação de alimentação de lodo aeróbio de excesso no reator UASB pode expandir o leito de lodo, os eventos esporádicos com alta concentração de sólidos no efluente da condição SN podem representar períodos onde a manta de lodo atingiu a zona de decantação do reator UASB. Assim, torna-se fundamental que a operação de alimentação do reator UASB com lodo aeróbio de excesso seja condicionada a manutenção de um leito de lodo denso no fundo do reator, e ao monitoramento da expansão da manta de lodo. A remoção do excesso de lodo anaeróbio deve, obviamente, ser realizada, porém, de forma gerenciada e durante períodos sem alimentação de lodo aeróbio de excesso, e de preferência com monitoramento da altura da manta de lodo no reator.

Ainda na figura 12, representada no gráfico à direita da figura, observa-se uma tendência de aumento dos valores médios de DQO total no efluente quando da operação simultânea de descarte de lodo aeróbio para o reator UASB e remoção de lodo anaeróbio de fundo desse reator (condição SS).

A eficiência de remoção da fração não particulada da DQO, aqui denominada de DQO filtrada, correspondente a fração de DQO solúvel e coloidal, encontra-se apresentada na figura 13.

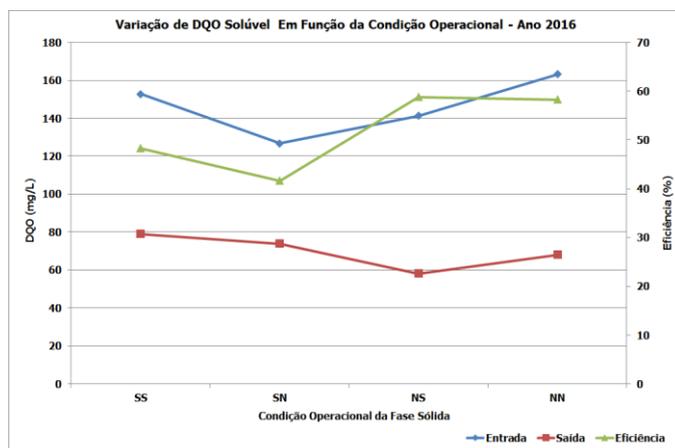


Figura 13 – DQO Filtrada e Eficiência de Remoção

Observa-se da figura 13 que durante o ano de 2016 houve em média uma redução de até 10% na eficiência de remoção de DQO filtrada quando o reator era alimentado com esgoto bruto misturado com lodo aeróbio de excesso. Apesar dessa pequena redução de eficiência, a DQO filtrada do efluente do reator UASB foi em torno de 80 mg/L, em média, 10 mg/L acima da condição de alimentação do reator UASB sem presença de lodo aeróbio de excesso no esgoto bruto afluente. Portanto, não houve impacto significativo no desempenho do reator UASB com relação à remoção de matéria orgânica solúvel quando o afluente era composto com excesso de lodo aeróbio.



A figura 14 apresenta a variação da concentração de sólidos no efluente do reator UASB, com todos os eventos observados, e a concentração média de SST no efluente, já desconsiderados os eventos discrepantes.

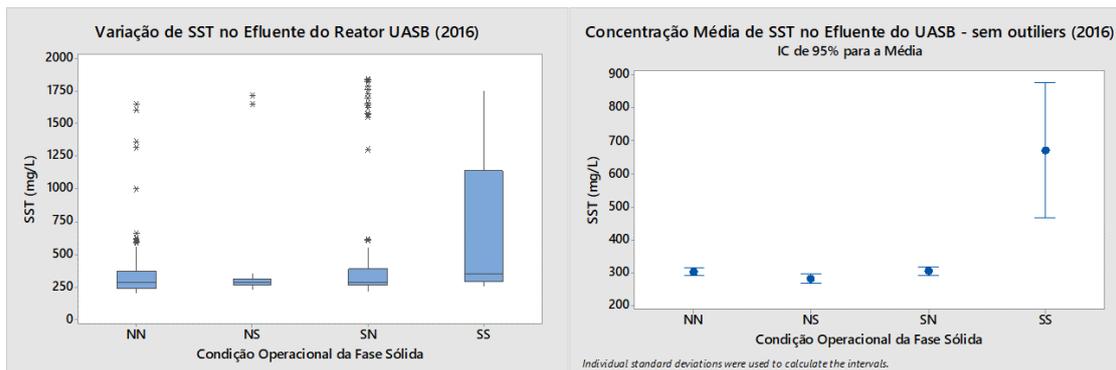


Figura 14 – Variação e Concentração Média de SST no Efluente do Reator UASB (2016)

Como estão diretamente correlacionados, a variação da concentração dos sólidos em suspensão totais foi semelhante à variação de DQO total no efluente do reator UASB. Assim como para DQO total no efluente, ocorreram eventos discrepantes ao conjunto amostral de dados nas condições NN, NS e SN. A amplitude interquartil foi menor na condição NS (50 mg/L). Na condição NN e SN, a amplitude interquartil foi, respectivamente, de 112 e 128 mg/L. A maior amplitude interquartil, assim como para a DQO total, se deu na condição SS, na ordem de 850 mg/L, ou seja, mais que seis vezes superior à condição SN.

A figura 15 apresenta a relação média entre a concentração de SSV e SST no efluente do reator ao longo do ano de 2016.

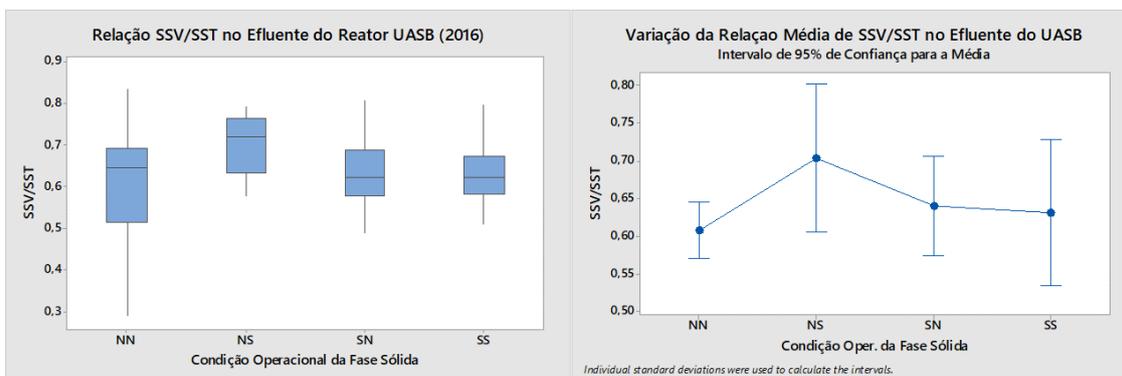


Figura 15 – Relação média de SSV/SST no Efluente do Reator UASB

A relação SSV/SST no efluente do reator UASB apresentou valores médios variando entre 0,60 e 0,70. Ao analisar o intervalo de confiança para a média de cada condição operacional no gráfico à direita da figura anterior, observa-se que há uma sobreposição entre os intervalos de todas as condições operacionais. Para confirmar que não há diferença significativa entre as relações médias de SSV/SST no efluente do reator UASB foi empregado o teste de comparação de Tukey, já que os dados de SSV/SST entre as diferentes condições operacionais apresentaram variâncias iguais. A figura 16 apresenta o resultado do teste comparando dois fatores simultaneamente com intervalos de confiança de 95%.

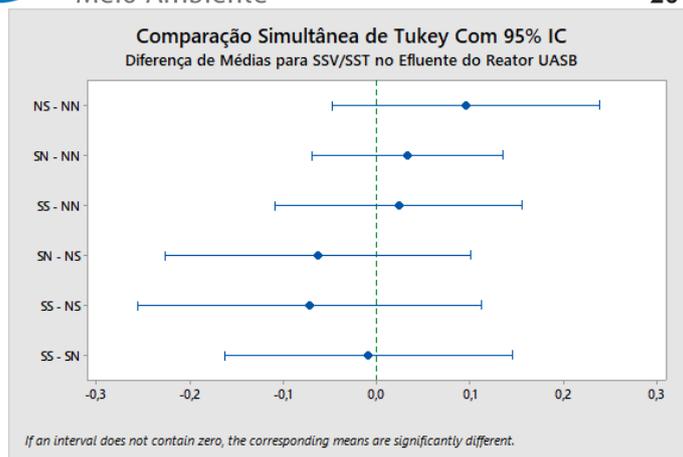


Figura 16 – Comparação de Tukey para SSV/SST no Efluente do Reator UASB (2016)

Observa-se da figura 16 que todos os intervalos de comparação cruzam o valor zero, logo, conclui-se que a variação da relação SSV/SST em todas as condições operacionais apresentam médias significativamente equivalentes para todas as condições operacionais. Esse resultado indica que a característica dos sólidos em suspensão perdidos com o efluente do reator era, em média, a mesma para todas as condições operacionais, o que difere do estudo de Silva & Van Haandel (2014), que observaram uma maior fração de sólidos fixos nos sólidos em suspensão dos reatores alimentados simultaneamente com esgoto bruto e excesso de lodo aeróbio. Os resultados da qualidade do efluente do reator UASB contendo períodos onde a alimentação de lodo aeróbio de excesso ao reator se deu durante o período de baixa vazão afluente à ETE encontram-se apresentados nos próximos tópicos.

Os tópicos anteriores apresentaram uma avaliação do impacto das condições operacionais da fase sólida na qualidade do efluente do reator UASB, em função do efeito combinado do descarte de lodo aeróbio no reator UASB e da remoção de excesso de lodo anaeróbio desse reator.

Outra forma de avaliar o desempenho do reator UASB é verificar o comportamento da produção de biogás em termos quantitativos e qualitativos.

A figura 17 apresenta a variação da produção volumétrica de biogás no reator UASB ao longo do ano de 2016.

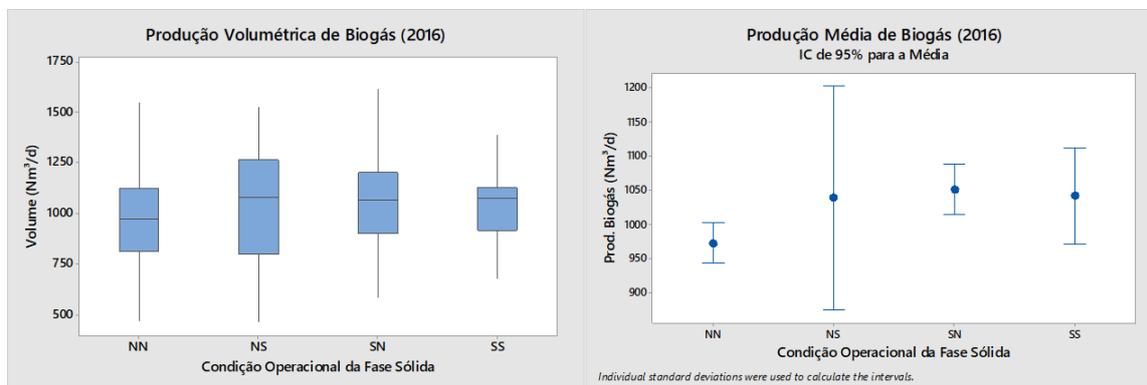


Figura 17 – Produção Volumétrica de Biogás

Observa-se na figura 17 que a produção média de biogás quando o afluente do reator continha lodo aeróbio de excesso foi apenas 8% superior à condição de alimentação do reator apenas com esgoto bruto.

A tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas da relação unitária de produção de biogás por metro cúbico de efluente tratado em 2016, já desconsiderados os eventos discrepantes de cada conjunto amostral.



Tabela 1 – Estatísticas Básicas Descritivas para Produção de Biogás em 2016

Condição Operac.	Tamanho Amostral	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Q ₁ – 1º quartil	Mediana	Q ₃ – 3º quartil	Máximo
		(NL.biogás/m ³ .efluente.tratado)						
NN	208	58	14	24	47	59	70	100
NS	15	55	15	25	41	55	68	80
SN	116	54	12	28	45	53	62	99
SS	26	50	10	32	43	50	55	71

Observa-se da tabela 1 que a relação média de produção de biogás por metro cúbico de efluente tratado foi aparentemente menor nas condições com recebimento de lodo aeróbio de excesso (SN e SS). A figura 18 apresenta a comparação simultânea de Tukey entre as condições operacionais para essa relação unitária.

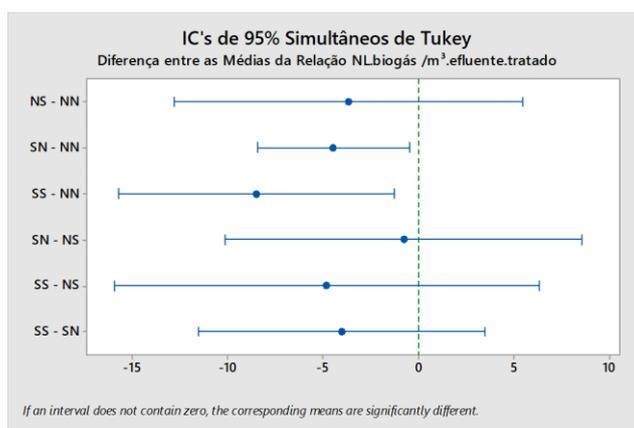


Figura 18– Comparação Simultânea de Tukey com IC de 95% para NL.Biogás/m³.efluente.tratado

Observa-se da figura 18 que de fato as médias da condição SN e SS diferem significativamente da condição NN. A média da relação unitária de produção de biogás por volume de efluente tratado, quando o sistema recebia esgoto com lodo aeróbio, foi de 8 a 14% inferior a condição NN. Como a vazão de lodo aeróbio variou de 10 a 20% da vazão afluyente ao reator UASB, infere-se que, a DQO presente nesse volume de lodo aeróbio praticamente não se converteu em metano no reator UASB, ou a parcela convertida em metano foi muito baixa em relação ao equivalente de DQO presente no excesso de lodo aeróbio.

Como a DQO presente no lodo aeróbio é computada na análise de DQO total do afluyente do UASB, o cálculo de DQO removida do sistema com base na DQO total afluyente e na DQO filtrada do efluente, utilizado para estimar a relação unitária de produção de biogás por massa de DQO removida pode apresentar um erro grosseiro. A tabela 2 apresenta a correlação entre a DQO removida e a produção de biogás no reator UASB para as diferentes condições operacionais do reator ao nível de significância de 5%. Assim, quando o valor 'p' é menor que o nível de significância, há correlação entre as variáveis. Para valor 'p' maior que o nível de significância não há correlação entre as variáveis.

Tabela 2 – Correlação Entre DQO Removida e Produção de Biogás (2016)

Condição Operacional	Valor 'p'	Coefficiente de Correlação de Pearson
NN	0,006	0,396
NS	0,161	0,651
SN	0,671	0,145
SS	0,201	0,608



Observa-se que não houve correlação entre as variáveis DQO removida e produção de biogás quando o afluente do reator UASB continha lodo aeróbio de excesso. Curiosamente, a relação NS também não apresentou correlação. Nessa condição, a remoção de excesso de lodo anaeróbio do sistema está associada a operação de desaguamento do lodo, ou seja, se há remoção de excesso de lodo do UASB, geralmente, está ocorrendo desaguamento na estação. A ausência de correlação pode ser explicada pelo retorno do centrado da centrífuga para a CDVI, que também gera um incremento de DQO, principalmente quando há uma má captura de sólidos na unidade de centrifugação, e que, possivelmente, não é facilmente biodegradável no reator UASB. A única condição que apresentou correlação entre as variáveis mencionadas foi à relação 'NN', ou seja, aquela cujo afluente é composto exclusivamente de esgoto bruto e que não sofre interferências das linhas de retorno de lodo e centrado da centrífuga. Para essa condição, o coeficiente de Pearson indicou uma correlação positiva, porém fraca entre essas variáveis (0,396), valor esse próximo ao observado por Cabral (2017), que foi na ordem de 0,313.

A tabela 3 apresenta as relações unitárias para a condição NN, já que foi a única condição a apresentar correlação para as variáveis relacionadas à carga orgânica.

Tabela 3 – Estatísticas Descritivas das Relações Unitárias para a Condição 'NN'

Relação Unitária	Tamanho Amostral	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Q ₁ – 1º quartil	Mediana	Q ₃ – 3º quartil	Máximo
NL.biogás/ m ³ .efluente.tra tado	208	58	14	24	47	59	70	100
NL.biogás/ Kg.DQO.remov. v.	116	101	54	31	61	91	128	269
NL.biogás/ hab.dia	208	12	5	4	8	11	14	31

As relações unitárias da condição NN quando comparadas com o modelo apresentado por Lobato (2011) indicaram que a produção de biogás na ETE 'E' encontra-se dentro do cenário de pior situação. Uma possível causa para a produção de biogás estar situada dentro do pior cenário de produção de biogás apresenta relação com o mecanismo utilizado para remover espuma do interior do separador trifásico. Esse mecanismo possui uma tubulação para jateamento de água no interior do separador, ou seja, a tubulação está diretamente conectada a campânula de captação do biogás, e quando fora de operação, se torna um ponto vulnerável para vazamento do biogás.

A figura 19 apresenta as estatísticas descritivas para a concentração de metano no biogás em função da condição operacional da fase sólida.

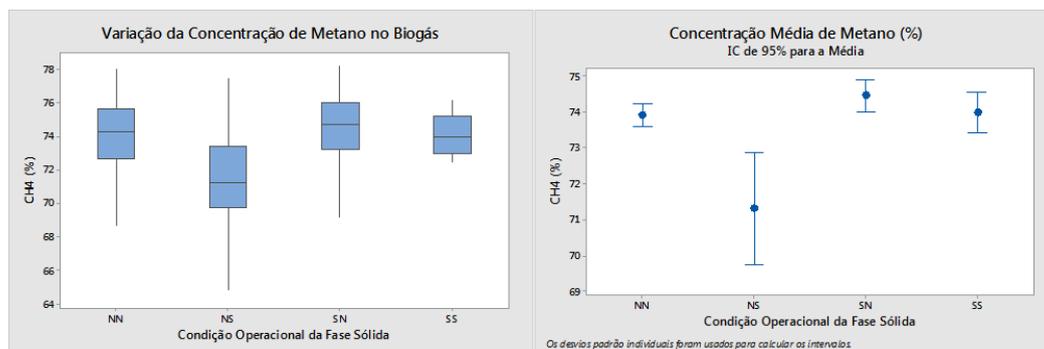


Figura 19 – Variação da Concentração de Metano no Biogás

Observa-se que não houve variação significativa de concentração de metano quando o reator UASB foi alimentado com esgoto bruto misturado com lodo aeróbio de excesso, tendo apresentado, exceto na condição NS, concentração média de 74%. Na condição SN, 50% dos dados variaram de 73 (1º quartil) a 76% (3º



quartil) com mediana em torno de 75%. Na condição SS, 50% dos dados variaram de 73 (1º quartil) a 75% (3º quartil) com mediana em torno de 74%. A condição NS foi a que apresentou maior variação e menor média (71%) dentre as condições operacionais do reator. A concentração média nas demais condições (NN, SN e SS) foi de 74 % de metano no biogás.

A tabela 4 apresenta a produção volumétrica de metano, considerando a concentração média e a produção média, mínima e máxima de biogás observada durante cada condição de operação do reator UASB.

Tabela 4 – Produção Volumétrica de Metano Recuperado no Biogás

Condição Operac.	Média (Nm ³ /dia)	Mínimo (Nm ³ /dia)	Máximo (Nm ³ /dia)
NN (CH ₄ .med=74%)	745	224	1319
NS (CH ₄ .med=71%)	609	329	1086
SN (CH ₄ .med=74%)	790	224	1.194
SS (CH ₄ .med=74%)	756	500	966

Fonte: Autor (2018)

Observar-se que a produção máxima se deu na condição NN, quando não havia remoção voluntária de lodo anaeróbio de fundo, porém, a maior média foi observada na condição SN.

A tabela 5 apresenta as relações unitárias para produção de metano observada no reator UASB em 2016, com base na produção volumétrica de biogás observada na condição NN e da concentração média de metano observada nessa condição.

Tabela 5 – Produção Volumétrica de Metano

Relação Unitária	Média	Mínimo	Máximo
NL.CH ₄ / m ³ .efluente.tratado	46	18	74
NL.CH ₄ / Kg.DQO.remov.	75	23	199
NL.CH ₄ / hab.dia	7	3	12

Fonte: Autor (2018)

A recuperação de metano junto com o biogás da ETE 'E' confirma a condição de pior cenário de produção de biogás, conforme modelo de Lobato (2011).

A figura 20 apresenta a variação, a média e o intervalo de confiança para a média da concentração de CO₂ no biogás do reator UASB.

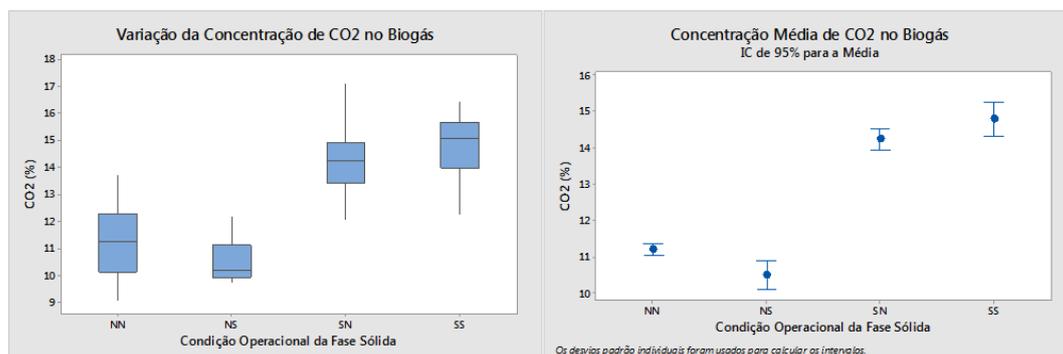




Figura 20 – Variação e Média da Concentração de Dióxido de Carbono (CO₂)

Observa-se da figura 20 que a concentração de CO₂ no biogás foi até 50 % maior quando o afluente do reator UASB continha parcela de excesso de lodo aeróbio, apresentando concentrações médias até 50% superiores aos períodos sem presença de lodo aeróbio no afluente.

A figura 21 apresenta a comparação simultânea de Tukey entre as concentrações médias de CO₂ obtidas no biogás da ETE 'E'.

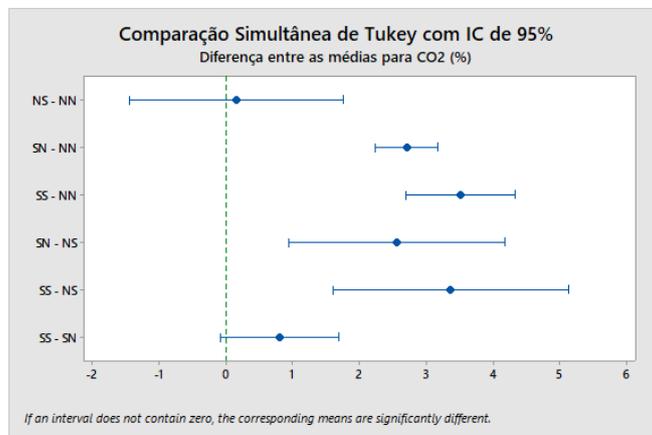


Figura 21 – Variação e Média da Concentração de Dióxido de Carbono (CO₂)

Observa-se da figura 21 que a concentração média de CO₂ no biogás é significativamente diferente entre as condições SN e NS, e SN e NN, assim como entre as condições SS e NS, e SS e NN, indicando que a alimentação do reator UASB com lodo aeróbio de excesso apresenta uma variação significativa na concentração de CO₂ no biogás.

A figura 22 apresenta a variação, a média e o intervalo de confiança para a concentração de H₂S no biogás.

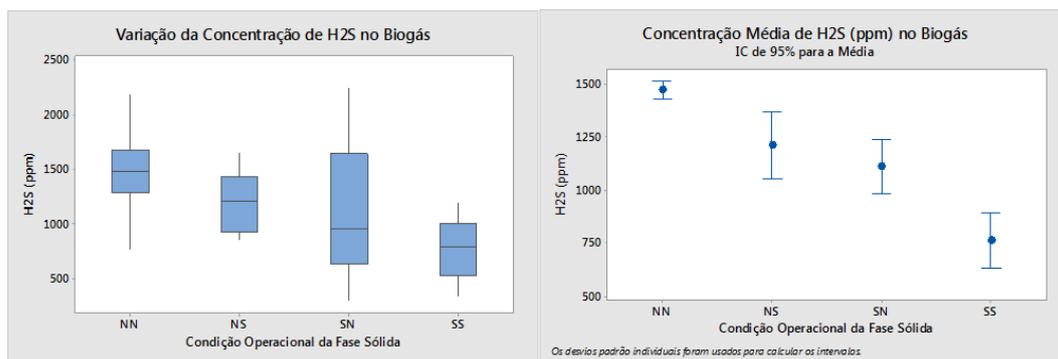


Figura 22 – Variação e Média da Concentração de Sulfeto de Hidrogênio (H₂S)

Observa-se que os resultados indicam uma tendência de redução da concentração de H₂S no biogás quando há remoção de excesso de lodo anaeróbio do reator UASB e quando há lodo aeróbio de excesso no afluente do reator UASB.

A figura 23 apresenta o teste de igualdade de variâncias entre as condições operacionais para concentração de H₂S.

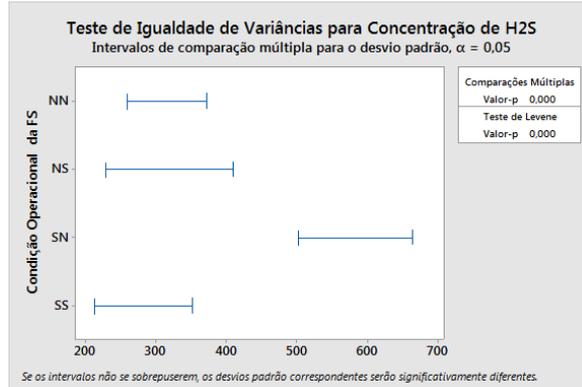


Figura 23 – Teste de Igualdade de Variâncias para Concentração de H₂S

Observa-se da figura 24 que o único intervalo que não se sobrepõe aos demais é o intervalo da condição SN, logo a variância da concentração de H₂S nessa condição é diferente das demais condições operacionais. Para confirmar se as diferenças estatísticas entre as médias são significativamente diferentes, foi realizado o teste de comparação simultânea entre dois fatores de Games-Howell. Esse teste, ao contrário do teste Tukey, é utilizado quando um dos fatores apresenta variância diferente dos demais. A figura 33 apresenta o resultado desse teste comparativo.

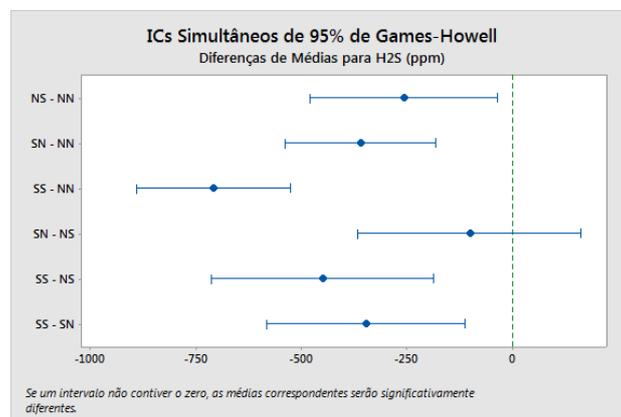


Figura 24 – Comparação Simultânea de Games-Howell

Observa-se da figura 25 que as médias são significativamente diferentes entre todas as condições, exceto entre a condição SN e NS. Logo, é possível afirmar que a concentração média de H₂S sofre influência da condição operacional da fase sólida, sendo que os resultados indicaram uma redução pela sobreposição de efeitos entre a alimentação do reator UASB com afluente contendo excesso de lodo aeróbio, e pela remoção de excesso de lodo anaeróbio.

Para visualizar a variação temporal dos resultados de H₂S, a figura 26 apresenta a dispersão dos resultados de H₂S e os dados de vazão de descarte de lodo aeróbio de excesso para o reator UASB.

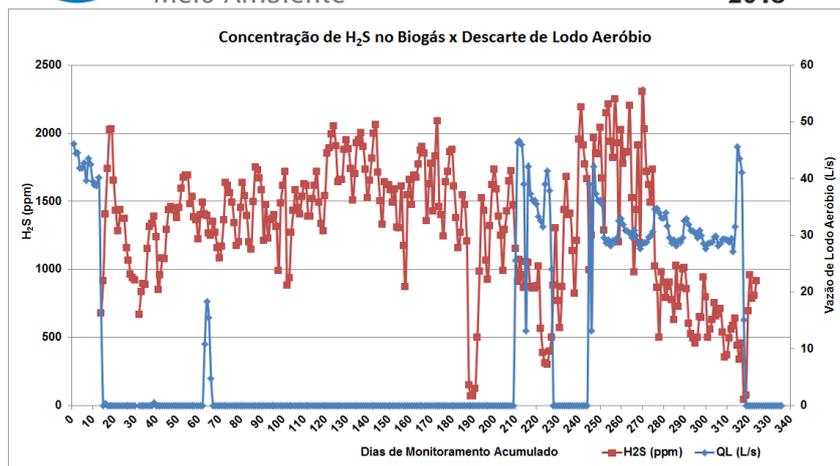


Figura 26 – Variação Temporal da Concentração de H₂S no Biogás x Descarte de Lodo Aeróbio

Observa-se da figura 26 que nos períodos sem lançamento de lodo aeróbio, a concentração de H₂S no biogás variou aproximadamente entre 1000 a 2000 ppm. Com um período contínuo de descarte de lodo aeróbio de excesso no reator UASB entre os dias 210 e 230, a concentração de H₂S foi reduzida para valores em torno de 500 a 1000 ppm. A partir do dia 230, sem o lançamento de lodo aeróbio, a concentração de H₂S volta a subir para valores entre 1000 e 2000 ppm aproximadamente. No dia 245, com o retorno do lançamento de lodo aeróbio no reator UASB, não houve uma redução imediata da concentração de H₂S, porém o comportamento observado anteriormente entre os dias 210 e 230 volta a ocorrer entre os dias 275 e 320.

A figura 27 apresenta um gráfico de efeitos principais para a concentração de sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono no biogás.

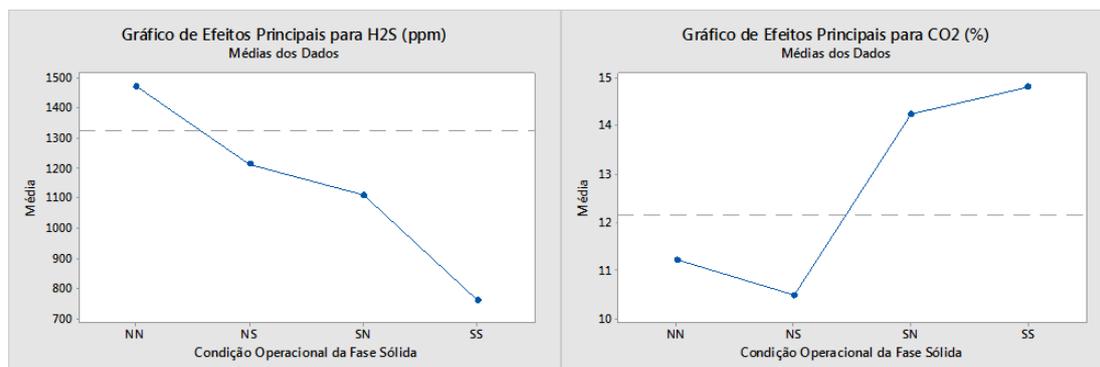


Figura 27 – Gráfico de Efeitos Principais para H₂S e CO₂

O gráfico de efeitos principais apresenta um resumo da influência das condições operacionais na composição do biogás. A linha tracejada representa a média global para o parâmetro em questão (H₂S e CO₂), considerando os resultados de todas as condições operacionais. Quanto maior a inclinação da linha entre as condições, maior a magnitude do efeito principal observado. Por exemplo, no gráfico de efeitos principais para concentração de H₂S no biogás, observa-se um efeito principal menos acentuado entre as condições NS e SN, e bastante acentuado entre a condição SN e SS.

Apesar de ter havido uma redução significativa na concentração de H₂S no biogás, houve um aumento na concentração de dióxido de carbono. Uma hipótese que poderia ser levantada para explicar a redução da concentração do H₂S no biogás seria uma possível elevação do pH no reator aeróbio quando da alimentação do UASB com afluente contendo lodo aeróbio de excesso, já que em pH ligeiramente acima da condição neutra, na faixa de 7,5 a 8,0, o sulfeto se manteria na maior parte dissolvido no efluente, na forma dissociada HS⁻. Porém, o pH do reator, apesar de uma leve tendência de redução, se manteve em média, significativamente equivalente a condição de alimentação sem presença de lodo aeróbio. Uma segunda hipótese seria a presença de oxigênio dissolvido no lodo aeróbio de excesso, o que provocaria, teoricamente, uma oxidação de parte do sulfeto presente no reator UASB, e consequentemente, menor emissão de gás sulfídrico com o biogás. Outra



hipótese, diz respeito a possível presença de nitrato no lodo aeróbio de excesso, já que o processo de lodos ativados é operado com alta idade do lodo, ou seja, com potencial para o desenvolvimento do processo de nitrificação. Como o nitrato é mais eletronegativo que o sulfato, ele apresenta maior potencial de atração de elétrons no processo de oxidação do composto orgânico biodegradável. Além disso, apesar de a fermentação acidogênica ser realizada por um grupo diversificado de microrganismos, onde a maioria é anaeróbio obrigatório, algumas espécies são facultativas e podem metabolizar o material orgânico pela via oxidativa (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994). Assim, poderia haver uma competição pelo substrato entre as bactérias desnitrificantes, metanogênicas e redutoras de sulfato. Com menos substrato disponível para as redutoras de sulfato, menos sulfato teria sido reduzido quando da presença de nitrato no meio.

Ao contrário do metano, o dióxido de carbono apresenta alta solubilidade no meio líquido. Uma hipótese para a elevação da concentração desse gás no biogás do reator UASB quando alimentado com lodo aeróbio de excesso poderia ser explicada também por uma possível presença de nitrato no lodo aeróbio de excesso, já que o CO_2 é um dos produtos do processo de desnitrificação heterotrófica. Outra hipótese a se considerar é a variação da composição do esgoto bruto afluente ao reator UASB quando da presença de lodo aeróbio, ou seja, um afluente com maior conteúdo de DQO particulada. Leitão et. al. (2006) relatou em seu trabalho uma possível ocorrência de acúmulo de ácidos orgânicos como propionato e butirato no reator, redução do valor de pH e alcalinidade, e alterações na produção e composição do biogás, especialmente com elevação do teor de H_2 e CO_2 no biogás, quando há mudanças bruscas na composição do esgoto afluente a tratar. Apesar de a variação do pH do reator UASB não ter sido significativa quando o afluente era composto com parcela de lodo aeróbio de excesso, houve uma tímida tendência de redução do pH, possivelmente associada a acumulação de ácido carbônico no meio líquido.

Apesar das altas concentrações de SST no RFA, o efluente da estação apresentou de forma geral uma boa qualidade ao longo do período estudado. A figura 28 apresenta a variação da concentração de SST e DQO total no efluente ao longo de 2016.

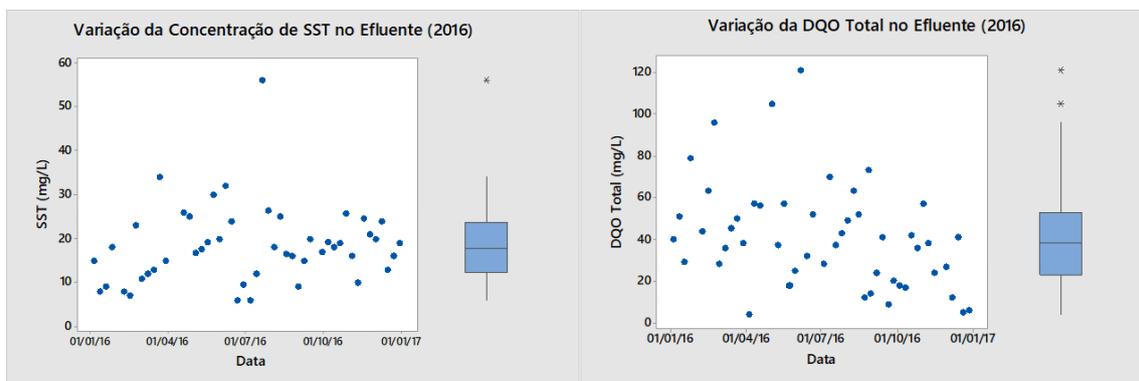


Figura 28 – Efluente da ETE.

Observa-se da figura 28 que a concentração de SST no efluente se manteve entre 6 e 34 mg/L, com 50 % dos dados centrais variando entre 12 e 24 mg/L. Foi observado um evento discrepante de 56 mg/L. Já a concentração de DQO total no efluente se situou entre 4 e 96 mg/L, com 50% dos dados entre 23 e 53 mg/L. Foram observados apenas dois eventos discrepantes, com concentrações acima de 100 mg/L de DQO total. Os bons resultados de sólidos em suspensão no efluente da estação são indicadores positivos da capacidade de retenção de sólidos dos módulos de decantação acelerada (decantadores lamelares) instalados nos compartimentos A e B dos reatores de fluxo alternado.

Com relação a remoção de nitrogênio, foram realizadas amostragens esporádicas ao longo do período estudado que indicaram uma nitrificação e desnitrificação instável. A figura 29 apresenta a variação da concentração de NTK, nitrogênio amoniacal e nitrato no afluente e efluente da estação, assim como a eficiência de desnitrificação.

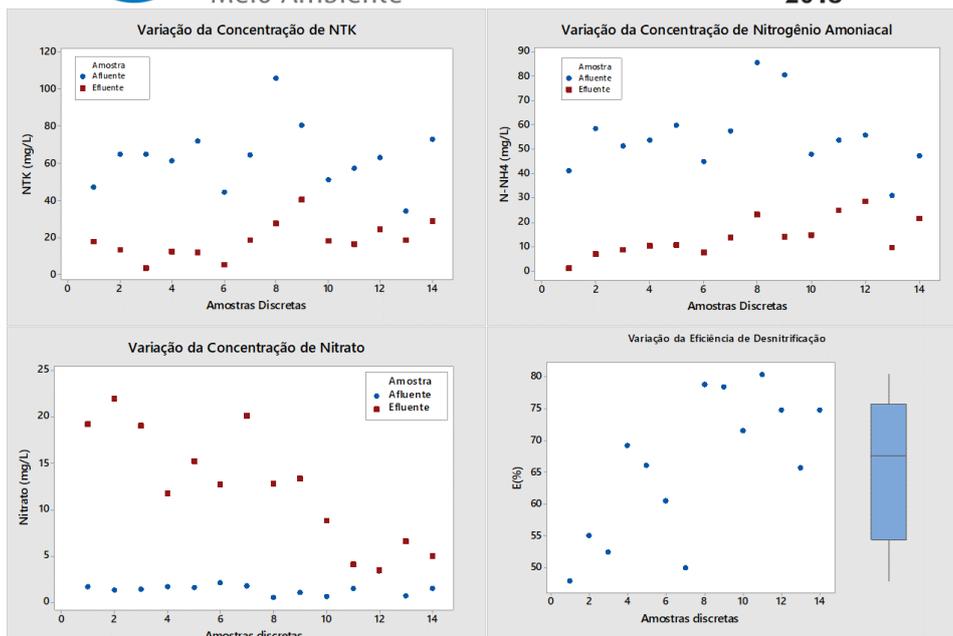


Figura 29 – Variação da Série Nitrogenada no Sistema de Tratamento.

Observa-se que a concentração de nitrato no efluente da ETE variou de 5 a 25 mg/L, e a concentração de nitrogênio amoniacal de 1 a 29 mg/L, indicando que tanto a nitrificação quanto a desnitrificação foi bastante variável. A eficiência de desnitrificação variou de pouco menos de 50 a 80%.

A concentração média de NTK no afluente foi de 63 mg/L, com intervalo de 95 % de confiança entre 53 e 74 mg/L. No efluente, a concentração de NTK foi de 18 mg/L, com intervalo de 95% de confiança de 12 a 24 mg/L. A concentração de nitrogênio amoniacal foi de 55 mg/L no afluente, com intervalo de 95% de confiança entre 46 e 63 mg/L. No efluente, a concentração de nitrogênio amoniacal foi de 14 mg/L, com intervalo de 95% de confiança entre 9 a 19 mg/L.

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES

Esse trabalho buscou avaliar o efeito da operação de descarte de lodo aeróbio no desempenho do reator UASB, na qualidade do seu efluente e do efluente final da estação. Em paralelo, foi verificado o efeito dessa operação nas características do biogás, e avaliados possíveis impactos dessa operação na unidade de pós-tratamento.

De modo geral, o efluente do reator UASB tende a uma piora na sua qualidade quando o afluente contém excesso de lodo aeróbio em excesso, especialmente em relação aos parâmetros DQO total e sólidos em suspensão. Porém, os resultados indicaram que a piora da qualidade do efluente é resultado de uma sobreposição de efeitos, relacionado a própria alimentação do reator UASB com lodo aeróbio em excesso, e a estratégia de remoção de lodo anaeróbio desse reator. A remoção de lodo anaeróbio em excesso, especialmente das camadas mais profundas, onde o lodo se apresenta mais concentrado, parece remover a barreira que manteria o lodo aeróbio, menos denso, na zona de digestão do reator UASB. Isso indica que a remoção do excesso de lodo anaeróbio deve ser realizada de forma controlada, de preferência com base no monitoramento da manta de lodo, de modo a evitar sua remoção excessiva, especialmente quando o reator é alimentado com excesso de lodo aeróbio.

Com relação à produção de biogás no reator, os resultados indicaram que a captação de biogás na ETE Várzea pode ser melhorada. Mesmo se a parcela de metano dissolvido fosse recuperada no biogás, a ETE ainda estaria dentro do pior cenário, segundo modelo proposto por Lobato (2010). Uma observação importante diz respeito a falta de correlação entre DQO removida e produção volumétrica de biogás quando o afluente do reator UASB é composto com lodo aeróbio de excesso ou com centrado da unidade de desaguamento da ETE. Nessas condições, as linhas de retorno podem conter parcela de DQO que não é facilmente biodegradável no reator UASB, e que conseqüentemente, não se converte em metano. Como o equivalente de DQO dessas linhas de retorno é computado na DQO total afluente, e não se converte a metano, por não ser facilmente



biodegradável, haverá um erro considerável se as relações unitárias de produção de biogás, que levam em consideração a carga orgânica afluyente, forem computadas nessas condições.

Outro aspecto interessante, é que a composição do biogás parece sofrer influência da alimentação do reator UASB com lodo aeróbio de excesso, especialmente em função das concentrações de CO_2 e H_2S . Ao passo que a concentração de CO_2 aumentou no biogás quando da presença de lodo aeróbio em excesso no afluyente do reator UASB, a concentração de H_2S reduziu pela metade. Esse é um aspecto importante para o dimensionamento de sistemas de purificação do biogás, por exemplo. Não foi possível, porém, identificar a causa da redução da concentração desse componente do biogás. Uma das hipóteses levantadas no estudo foi a presença de nitrato na linha de descarte de lodo aeróbio. Como o nitrato apresenta maior potencial de atração de elétrons no processo de respiração anaeróbia, pode ter havido uma competição pelo substrato entre bactérias anaeróbias facultativas e bactérias redutoras de enxofre.

Apesar da operação de descarte de lodo aeróbio não ter impactado negativamente a qualidade do efluente final da ETE, observou-se elevadas concentrações de sólidos em suspensão no reator aeróbio, muito acima das concentrações típicas observadas em sistemas de lodos ativados. Essas altas concentrações de sólidos em suspensão no reator aeróbio se deram pela sobreposição negativa de efeitos entre a baixa capacidade de remoção de excesso de lodo da estação e da ocorrência de eventos de perdas elevadas de sólidos do reator UASB. O principal efeito negativo do excesso de sólidos em suspensão no reator aeróbio é a redução da capacidade de transferência de oxigênio do sistema de aeração para o licor misto, o que fatalmente aumenta o consumo de energia elétrica, e conseqüentemente, o custo operacional da planta de tratamento. Como o custo com energia elétrica é um dos principais componentes do custo operacional de uma estação de tratamento, não pode ser negligenciado. Portanto, nessas condições, pode se tornar interessante a adoção de um processo intermediário de separação de sólidos do efluente anaeróbio, entre o reator UASB e a unidade de pós-tratamento, por exemplo, através de um sistema de clarificação de alta taxa, como os decantadores lamelares, de modo a reter sólidos em suspensão que por ventura escapem junto com o efluente do reator UASB, seja devido a uma má gestão da manta de lodo do reator, ou pelo arraste provocado por picos de vazão afluyente, especialmente durante eventos chuvosos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASSIM, J. P. Novos processos de remoção biológica de nitrogênio. In: Processos biológicos avançados para tratamento de efluentes e técnicas de biologia molecular para o estudo da diversidade microbiana. Capítulo 5. 171-230. Rio de Janeiro, 2011.
- CABRAL, C. B. G. Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2016.
- CABRAL, C. B. G., CHERNICHARO, C. A. L., HOFFMANN, H., NEVES, P. N. P., ROSENFELDT, S. Resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios. Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS. Ministério das Cidades, Brasília, 2017.
- CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. 380 páginas, 2ª edição, 2007.
- CHONG, S., KANTI, T., KAYAALP, A., & MING, H. The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment e A State-of-the-art review. Water Research, 46 (11), 3434–3470. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.066>. 2012.
- COMEAU, Y. Microbial Metabolism. In: Biological Wastewater Treatment – Principles, Modelling and Design. IWA Publishing. 2008.
- DWA-M 363. Origem, Tratamento e Utilização do Biogás. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef 2010.
- HEFFERNAN, B.; VAN LIER, J. B., VASHI, A.; VAN DER LUBBE, J.. Anaerobic Sewage Treatment using UASB Reactors: Engineering and Operational Aspects. <http://doi.org/10.1142/9781848165434>. 2010.
- LIU, Y., XU, H., SHOW, K., & TAY, J. Anaerobic granulation technology for wastewater treatment. World Journal of Microbiology & Biotechnology 18: 99–113, 2002.
- LOBATO, L. C. S. Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.
- METCALF & EDDY, Inc. (2013). Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos. Mcgraw-Hill Education; 5 Edition, P.2048. Versão traduzida, Porto Alegre, AMGH, 2016.



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

REARDON, R. D. (2005). Clarification Concepts for Treating Peak Wet Weather, 25–30. *Florida Water Resources Journal*.

S::CAN (Org.). Spectrometer probes. Disponível em: <<http://s-can.at/>>. Acesso em: 26 mar. 2018.

SILVA FILHO, J. A., VAN HAANDEL, A. C. Estabilização de lodo de pós-tratamento aeróbio na unidade de pré-tratamento anaeróbio, 86–103. *Revista DAE* n° 194. 2014.

SILVEIRA, B., CABRAL, C. B. G., CHERNICHARO, C. A. L., HOFFMANN, H., , ROSENFELDT, S., SUIDEDOS, C., PLATZER, C., SILVA, G., POSSETTI, G. R. C., MOREIRA, H. C., ADAMATTI, H. B., MIKI, M. K., MIKI, R. E., ARAÚJO, V. S. F., VALENTE, V. B., VILLANI, W. . Guia técnico de aproveitamento energético de biogas em estações de tratamento de esgotos. Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS. 2ª edição. Ministério das Cidades, Brasília, 2017.

SOUZA, C. L. Estudo das rotas de formação, transporte e consume dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgotos domésticos em reatores UASB. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010.

VAN HAANDEL, A. C., MARAIS, G. V. R (1999). *O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado: Teoria e aplicações para projetos e operações*. 1ª edição. Campina Grande.

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

VAN HAANDEL, A., SANTOS, S. L., CHAVES, S. R. M. Influência do projeto do separador de fases sobre o desempenho do reator UASB no tratamento de águas residuárias municipais. <http://doi.org/10.4322/dae.2014.153>. *Revista DAE* n° xxx. 2014.

VAN LIER, J. B., MAHMOUD, N., ZEEMAN, G. *Anaerobic Wastewater Treatment*. In: *Biological Wastewater Treatment – Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing, 2008.

VON SPERLING, M. E.; CHERNICHARO, C. A. L. *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. London: IWA Publishing, 2005. 1452 p.