



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL**

TAMIL SAKTHI SILVA SELVAM

**AVALIAÇÃO DE SISTEMA RBS DE DOIS ESTÁGIOS COM
AERAÇÃO INTERMITENTE ALIMENTADO POR ENERGIA SOLAR
EM REGIÃO TROPICAL**

**NATAL-RN
2020**

TAMIL SAKTHI SILVA SELVAM

**AVALIAÇÃO DE SISTEMA RBS DE DOIS ESTÁGIOS COM
AERAÇÃO INTERMITENTE ALIMENTADO POR ENERGIA SOLAR
EM REGIÃO TROPICAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos
Coorientador(a): Profa. Dra. Silvânia Lucas dos Santos

**NATAL-RN
2020**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Selvam, Tamil Sakthi Silva.

Avaliação de sistema RBS de dois estágios com aeração intermitente alimentado por energia solar em região tropical / Tamil Sakthi Silva Selvam. - 2020.
35f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal, 2020.

Orientador: Dr. Hélio Rodrigues dos Santos.

Coorientadora: Dra. Silvânia Lucas dos Santos.

1. Lodo ativado - Dissertação. 2. RBS de dois estágios - Dissertação. 3. Aeração intermitente - Dissertação. 4. Energia solar - Dissertação. 5. Clima quente - Dissertação. I. Santos, Hélio Rodrigues dos. II. Santos, Silvânia Lucas dos. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628

AGRADECIMENTOS

À minha família (Silvia, Pannir e Minashe). Pelo incentivo, pelo apoio e, acima de tudo, pelo amor. Por estar sempre presente e disposto a me ajudar. Por ser, acima de tudo, um exemplo que me dá direção.

Ao meu orientador, Prof. Hélio Rodrigues dos Santos, por acreditar na minha capacidade de realizar o trabalho, mesmo com todas as dificuldades no caminho. Por todo o conhecimento que me passou e me incentivou a buscar.

A Lukas, meu grande parceiro nesse trabalho. Pelos inúmeros dias juntos no laboratório, pela sua resiliência, e por me incluir nesse projeto como se fosse meu desde o início. Por ser um amigo que me apoiou quando precisei. Sem você, esse trabalho definitivamente não teria sido concluído.

Aos amigos do LARHISA, pelas reuniões na copa e pelos momentos de descontração, imprescindíveis para a conclusão do trabalho. Também aos amigos de fora. Pelas conversas que me faziam esquecer todos os problemas do mestrado. Pela companhia e pela atenção. Aos professores do PPgES, pelos ensinamentos e conhecimento que levo comigo, e aos funcionários do LARHISA, pelo auxílio durante esses dois anos. Em especial a Pedro Gustavo, secretário do programa, que nunca mediu esforços para me fornecer a ajuda que precisei.

À equipe da ETE do campus da UFRN (Iagê, José Wagner, Flaviane), pela disponibilização de equipamentos, ferramentas e por todo o suporte para a realização do experimento. Aos operadores da ETE, por todo o apoio durante a operação do piloto na ETE.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos durante o período do mestrado.

Ao Prof. Cícero Onofre de Andrade Neto (in memoriam), por me contagiar com sua paixão pela nossa área, pela ciência e pela nossa profissão. Dedico esse trabalho à sua memória.

RESUMO

Um sistema de lodo ativado do tipo reator de bateladas sequenciais (RBS) de dois estágios com aeração intermitente e alimentado por energia solar foi estudado, para avaliar seu desempenho na remoção de material orgânico (MO), nitrogênio e fósforo de esgotos domésticos em clima tropical. Na pesquisa, foi avaliada também a influência do tempo de aeração noturna na vida útil das baterias e na eficiência do sistema. O sistema foi submetido às vazões diárias afluentes de 3, 4,5 e 6 m³/dia, e posteriormente a uma redução do tempo de aeração diária de 360 para 300 minutos. Os resultados indicaram uma alta eficiência e estabilidade da ETE no tratamento de esgotos domésticos durante todo o experimento, atingindo eficiências médias de $93 \pm 2\%$, $86 \pm 4\%$ e $93 \pm 6\%$, na remoção de MO, nitrogênio e fósforo, respectivamente. A biomassa do sistema é robusta em relação à operação com longos períodos com baixa concentração de OD (sem aeração em 80% do tempo da batelada). No entanto, ficou evidenciada a existência de um limite na concentração de sólidos do sistema (4,3 gSST/L), acima do qual a sedimentação é prejudicada.

Palavras-chave: Lodo ativado; RBS de dois estágios; Energia solar; Aeração intermitente; clima quente.

ABSTRACT

Title: Performance evaluation of a solar self-sufficient two-stage RBS-AS system in hot climate regions.

A solar self-sufficient two-stage RBS-AS system submitted to long non-aerated periods (intermittent aeration) was studied to evaluate its performance in removing MO, nitrogen and phosphorus from domestic wastewater. The influence of aeration time on battery life was also evaluated. The system was subjected to daily inflows of 3, 4.5 and 6m³/day, and sludge ages of 32 ± 2 and 21 ± 2 days. The results indicated a high efficiency and stability of the system in the domestic wastewater treatment, reaching efficiencies of $93 \pm 2\%$, $86 \pm 4\%$ and $93 \pm 6\%$, in the removal of BOD, N and P, respectively. The biomass of the system is robust in relation to long-term operation with low DO concentration (without aeration for 80% of the batch time). However, the presence of a solids concentration limit (4.3 gSST / l), above which sedimentation is impaired, was evidenced. The durations of the aeration fases can be adjusted as a strategy to extend the life of the photovoltaic system's batteries.

Keywords: two-stage RBS; activated sludge; solar energy; Intermittent aeration; hot climate.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ETE EXPERIMENTAL.....	10
2.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	14
2.3. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	15
2.4. PROCEDIMENTOS PARA COLETAS E ANÁLISES.....	18
2.5. CURVAS DE OXIGÊNIO.....	20
2.6. TRATAMENTO ESTATÍSTICO	20
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.1. DESEMPENHO DO SISTEMA BIOLÓGICO.....	20
3.2. GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR	29
3.3. DESLIGAMENTO NOTURNO	31
4. CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

O sistema de Lodo Ativado (LA) é a tecnologia mais utilizada no tratamento biológico de águas residuárias domésticas e industriais, apresentando alta eficiência de remoção de Matéria Orgânica (MO), possibilidade de remoção de nutrientes e flexibilidade operacional (STAMATELATOU *et al.*, 2017). Este sistema apresenta diversas variantes, que podem ser subdivididas, com relação ao seu fluxo, em contínuo e em batelada (ou intermitente). Nesta variante, o Reator de Batelada Sequencial (RBS) incorpora todas as etapas de tratamento do sistema de lodo ativado em um único reator. Assim, diferentemente do sistema de fluxo contínuo, no RBS não há a necessidade de recirculação do lodo, pois a biomassa permanece dentro do reator, até o momento em que é descartada como lodo excedente (OBAJA *et al.*, 2003; HARTLEY, 2013).

O RBS possui operação cíclica, iniciando com seu enchimento, seguido por uma fase de reação, na qual podem ser intercaladas etapas com e sem aeração. Após esta etapa, a aeração é interrompida para que ocorra a sedimentação da biomassa, possibilitando a remoção do efluente tratado sobrenadante (VON SPERLING, 2014). Dessa forma, estes sistemas podem ser construídos de forma compacta e econômica, além de possibilitar uma elevada qualidade do efluente tratado em termos de DQO e nutrientes. Por esses motivos, diversas estações de LA com regime RBS têm sido utilizadas para o tratamento descentralizado de efluentes ao redor do mundo (WILDERER *et al.*, 2001; HUO, 2005; BARJENBRUCH; ERLER, 2005; STAMATELATOU *et al.*, 2017).

Nos últimos anos, as tecnologias dos sistemas RBS evoluíram continuamente, levando ao desenvolvimento de uma ampla variedade de sistemas para otimização dos processos de bioacumulação de fósforo, nitrificação e desnitrificação (DUTTA; SARKAR, 2015). Um desses sistemas é o RBS de dois estágios, em que as condições operacionais são controladas para que a nitrificação e a desnitrificação ocorram predominantemente em reatores separados (ZENG *et al.*, 2004; ZENG *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2018).

Neste caso, o primeiro reator é onde ocorre a desnitrificação – análogo a um sistema de remoção biológica de nitrogênio com pré-desnitrificação –, com o reator de desnitrificação (R1) tendo uma condição predominantemente anóxica e recebendo o esgoto afluente. Dessa forma, obtém-se também a vantagem da maior disponibilidade de compostos orgânicos biodegradáveis do afluente para a desnitrificação, o que aumenta a velocidade de remoção de nitrato (HARTLEY, 2013).

Para promover elevadas remoções tanto de nitrogênio quanto de fósforo, o regime de bateladas pode atuar com aeração intermitente (SATHO; MATOSO, 1994; SASAKI KOUSEI *et al.*, 1996; UGGETTI *et al.*, 2016). No sistema RBS de dois estágios atuando com aeração intermitente, interrupções na aeração são feitas de forma a alternar as condições, sequencialmente, de aeróbicas para anóxicas e anaeróbicas durante cada ciclo (DOAN; LOHI, 2009). Dessa forma, pode-se ter um dos reatores com maiores interrupções na aeração e prevalência de desnitrificação (anóxica) e liberação de fósforo (P) (anaeróbia), e outro reator com etapas aeradas maiores e prevalência dos processos de nitrificação e absorção de P.

A aeração intermitente pode ser utilizada, em sistemas de LA, como uma estratégia para reduzir custos operacionais mantendo a alta qualidade do efluente tratado (DOTRO *et al.*, 2011). De forma geral, a aeração é o principal contribuinte para o custo do tratamento de sistemas de LA, representando entre 25 e 45% das despesas operacionais e de manutenção da maioria das estações (TSAGARAKIS, 1999; SMITH; LIU, 2017).

Para reduzir essas despesas, o uso de sistemas Fotovoltaicos (FV) tem elevado potencial (HAN *et al.*, 2013). Em uma ETE alimentada por um sistema FV, o uso do regime de aeração intermitente pode ser ainda mais vantajoso. Isso ocorre quando é possível reduzir as etapas de aeração noturna da ETE, o que causa o aumento na vida útil das baterias do sistema FV.

Nestes sistemas, a energia utilizada para a aeração durante o dia é fornecida diretamente pelos painéis solares e, no período noturno, é fornecida pelo arranjo de baterias. Assim, todas as noites, as baterias usam a carga armazenada para manter a aeração noturna, com a profundidade dessa descarga variando em função, principalmente, da duração dessa etapa. Essa profundidade de descarga é o fator que mais diminui sua vida útil, de forma geral, para todos os tipos de baterias utilizadas em sistemas FV (RYDH; SANDÉN, 2005; HOPPMANN *et al.*, 2014; DHUNDHARA *et al.*, 2018). Por isso, o uso do regime de aeração intermitente com aeração noturna reduzida pode prolongar consideravelmente a vida útil dessas baterias.

No entanto, a redução de etapas aeradas do sistema promove, conseqüentemente, o aumento das etapas sem aeração. Vários estudos associam a utilização de longas etapas não aeradas com a diminuição da capacidade de sedimentação de sistemas de LA (GORONSZY, 1979; MARINS *et al.*, 2003; DOTRO *et al.*, 2011; SING *et al.*, 2018). De acordo com Van Haandel e Marais (1999), sistemas com etapas anóxicas maiores do que as

aeróbias apresentam uma predisposição para o intumescimento do lodo. Além disso, longos períodos com baixa concentração de Oxigênio Dissolvido (OD) tem o potencial de prejudicar o crescimento dos organismos nitrificantes, que possuem baixas velocidades de crescimento e estão entre os grupos mais sensíveis de bactérias do sistema de LA (WEON; LEE; KOOPMAN, 2004; SLIEKERS *et al.*, 2005; DOTRO *et al.*, 2011).

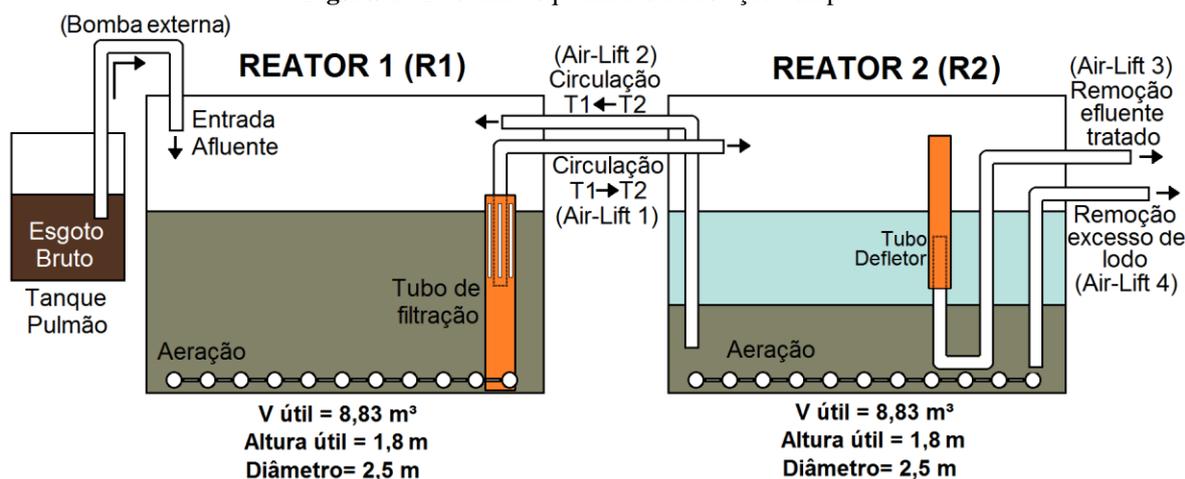
Diante disso, o principal objetivo do presente trabalho é avaliar o desempenho de um sistema RBS de dois estágios em regime de aeração intermitente e alimentado por energia solar, na remoção de MO, nitrogênio e fósforo de esgotos domésticos. Além disso, esta pesquisa também busca avaliar a influência da redução da aeração noturna na vida útil do conjunto de baterias.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ETE EXPERIMENTAL

A ETE experimental utilizada nesta pesquisa foi instalada no terreno da Estação de Tratamento de Esgoto do campus central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em Natal-RN, e foi alimentada com os esgotos produzidos no próprio campus, que têm características similares às de esgotos sanitários. A ETE consistiu de um sistema de lodo ativado em batelada sequencial (RBS) em escala piloto, composto por duas câmaras, com recirculação de licor misto entre elas. Os reatores funcionam de forma análoga a um sistema de remoção biológica de nitrogênio com pré-desnitrificação, com o primeiro reator (“Reator 1” ou R1) dedicado principalmente à desnitrificação e o segundo reator (“Reator 2” ou R2) dedicado à nitrificação (e à remoção da maior parte do material orgânico) (ver Figura 1).

Figura 1 - Desenho esquemático da estação compacta.



As principais características de projeto da ETE piloto encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais características dos sistemas da estação piloto.

Informações da estação	Características
Equivalente populacional de projeto	50 pessoas
Vazão diária	7.500 L/dia
Contribuição per capita de esgoto	150 L/pessoa.dia
Tempo de detenção hidráulico	56,5 horas

O esgoto bruto afluente ao sistema era armazenado inicialmente em um tanque de equalização (tanque pulmão), onde uma bomba submersa programada bombeava o afluente para o R1 no início de cada batelada.

O oxigênio era suprido por meio de sopradores responsáveis por bombear ar para difusores cilíndricos de membrana (Figura 2), responsáveis por distribuir bolhas finas uniformemente no fundo dos reatores. Cada reator dispunha de um soprador com vazão de 30 m³/h e potência de 1330 W, resultando em uma densidade de potência de 148 W/m³. Esse valor é elevado e provoca uma intensa agitação e aeração do licor misto no interior dos reatores.

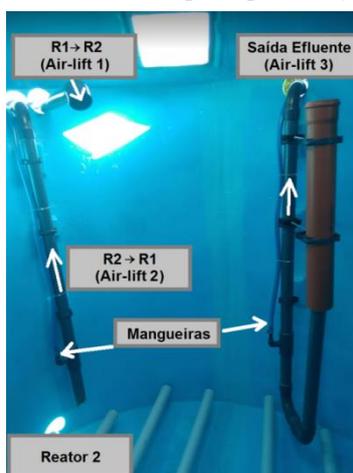
As etapas não aeradas dos dois reatores são realizadas sem um mecanismo de mistura, e toda a agitação do sistema é provocada pela aeração.

Figura 2 - Detalhe do sistema de aeração utilizado no fundo dos reatores da ETE.



As recirculações internas bombeavam o licor misto por um sistema *air-lift*. Esse mecanismo funciona com a utilização de tubos verticais parcialmente submersos nos reatores, ligados a um soprador de ar com vazão de 12 m³/h e potência de 500 W. Uma mangueira conecta o soprador até a extremidade inferior do tubo (Figura 3), por onde é introduzido ar comprimido, que entra em contato com o fluido presente no mesmo, formando uma mistura com densidade média menor que a do fluido circundante. Como esse mecanismo realiza a injeção de ar no fluido, ele também resulta na aeração da mistura transportada.

Figura 3 – Mangueiras e tubos do transporte por *air-lift* no interior do reator 2.



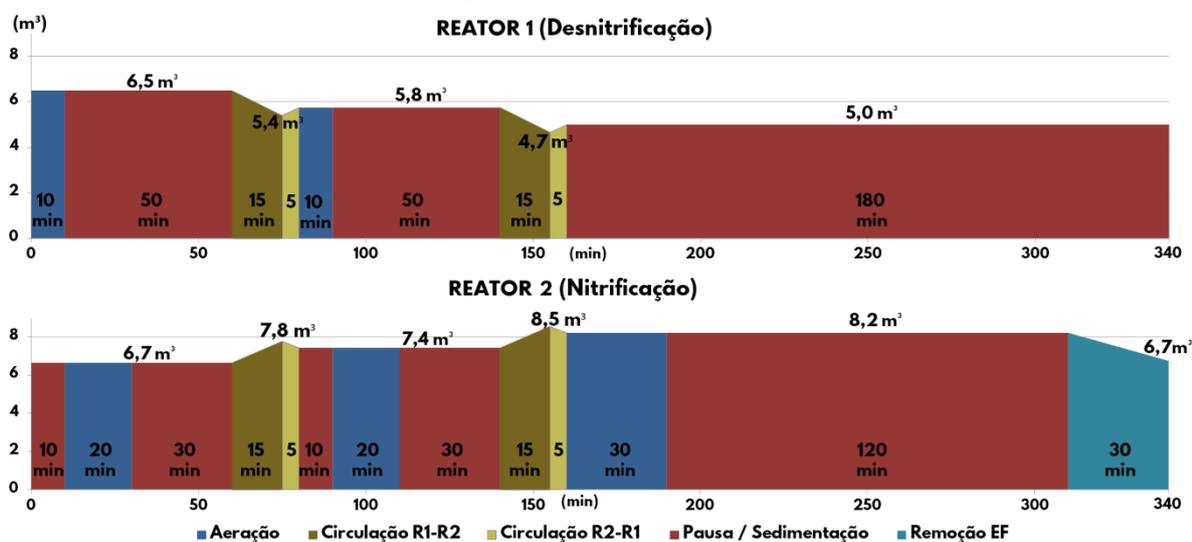
Há quatro sistemas de *air-lift* instalados nos reatores (Figura 1), onde em R1 existe apenas o sistema que movimenta licor misto do R1 para o R2 (*air-lift 1*). Este sistema de movimentação possui um tubo de filtração (Figura 1) que retém sólidos com mais de um centímetro de diâmetro. Já no segundo reator, existem os sistemas *air-lift* para remoção de efluente (*air-lift 3*), remoção do excesso de lodo (*air-lift 4*) e de retorno do R2 para o R1

(*air-lift 2*) (ver Figura 1). Na Figura 3, observa-se que o *Air-lift 3* de remoção de efluente possui um tubo defletor, com o objetivo de separar possíveis sólidos flutuantes do efluente tratado. Para que o bombeamento por emulsão de ar funcione junto com o defletor utilizado, é necessária a configuração em “U” adotada no *air-lift 3* (Figura 1).

A estação experimental possui uma unidade de controle responsável por automatizar o funcionamento de todas as operações da unidade piloto: bombeamento do afluente, controle dos ciclos de aeração e sistemas de *air-lift* (recirculações internas dos dois reatores, remoção do efluente e descarte do lodo).

A Figura 4 mostra a sequência e a duração de cada etapa de um ciclo de tratamento da estação, bem como a variação dos volumes dos reatores durante uma batelada de aproximadamente 340 min. O ciclo representado na figura inicia-se logo após a entrada do afluente no reator 1. O sistema permanece sem mistura durante os intervalos sem aeração (Pausa).

Figura 4 – Variação dos volumes operacionais nos reatores 1 e 2 durante uma batelada de 340 min.



Como o R1 recebe todo o esgoto afluente e possui etapas de aeração curtas em relação ao restante da batelada, há nele uma considerável disponibilidade de compostos orgânicos biodegradáveis do afluente para a liberação de P e para a desnitrificação.

Antes da circulação R2→R1, a etapa sem aeração do R1 começa com o esgotamento do nitrato residual disponível, e é seguido por um estado anaeróbio que favorece a liberação de fósforo (do interior das células). Após a circulação R2→R1, o nitrato transportado tende a desenvolver um ambiente anóxico na etapa não aerada do R1, favorecendo a

desnitrificação. Após o esgotamento do nitrato disponível, o reator passa para um estado anaeróbio, no qual ocorre a liberação de fósforo (do interior das células).

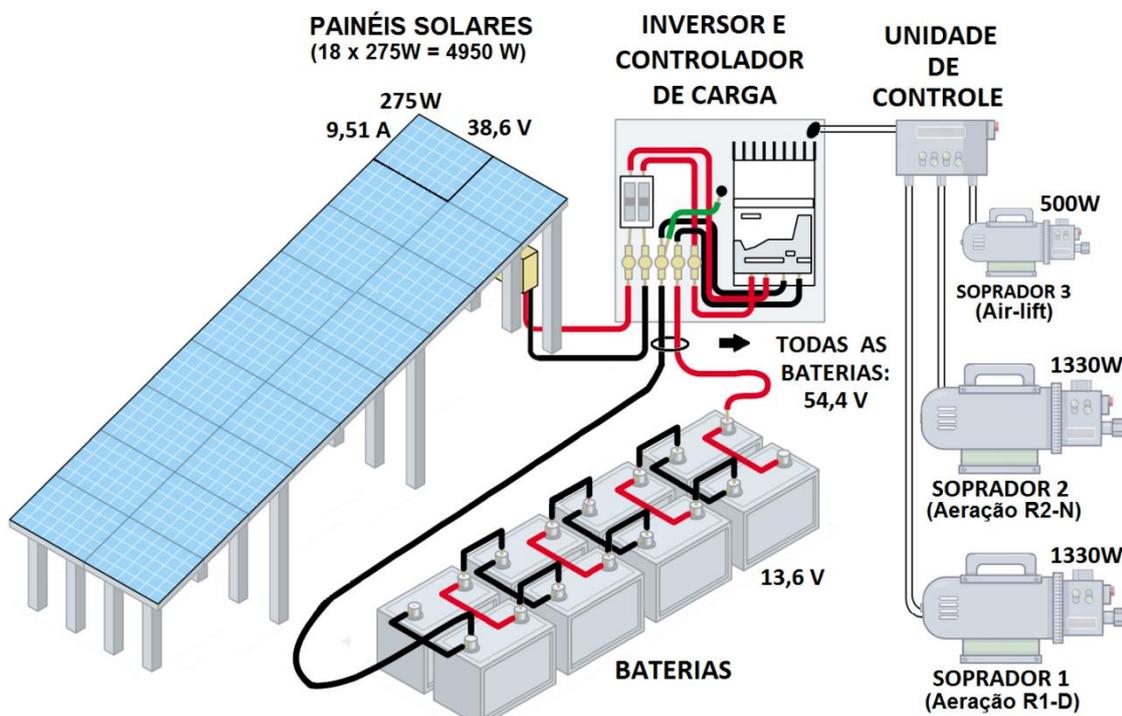
Já o R2, que recebe licor misto proveniente do primeiro reator (circulação R1→R2), é caracterizado por possuir maior tempo de aeração dentro do ciclo, o que favorece a ocorrência da nitrificação, da degradação de MO e da absorção de fósforo. Ainda no R2, ocorrem os processos de sedimentação, remoção de efluente tratado e retirada do lodo em excesso.

A remoção automática de excesso de lodo é realizada duas vezes por semana. Nesta, ocorre uma sedimentação de 2 horas no R2 e, em seguida, é realizado o bombeamento do lodo em excesso do R2. Durante esta etapa, a ETE permanecia inativa, não realizando aeração nem circulação nos reatores.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

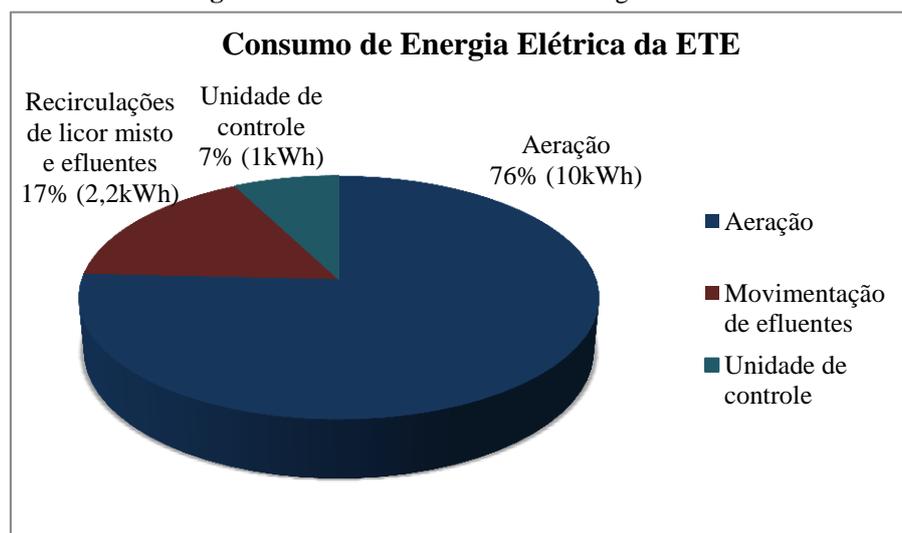
O sistema fotovoltaico (FV) instalado utilizava 18 painéis solares, com uma potência total instalada de 4950 W. Já para o armazenamento de energia foram utilizadas oito baterias de Chumbo-Ácido, com capacidade de armazenamento máxima de 21,12 kWh (Figura 5).

Figura 5 - Desenho esquemático das unidades que compõem o sistema fotovoltaico e os sopradores que são alimentadas por esse sistema.



As demandas energéticas da estação totalizam 13,2 kWh diários. Os consumos relativos à aeração (soprador 1 e 2), às recirculações por *air-lift* de licor misto e efluentes (soprador 3) e à unidade de controle, são de, respectivamente, 2,2 kWh (aeração R1), 7,8 kWh (aeração R2), 2,2 kWh e 1 kWh (Figura 6). O consumo da bomba de recalque de esgoto bruto não foi avaliado nesse estudo.

Figura 6 – Divisão do consumo de energia da ETE.



2.3. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa foi realizada em cinco fases experimentais. As três primeiras (F1, F2 e F3) foram conduzidas para estudar o efeito da vazão afluente diária na capacidade de remoção de MO e nutrientes da ETE funcionando com aeração intermitente (Figura 4). Ainda na Fase 3, foi realizada também uma redução na idade de lodo do sistema (ver Tabela 2).

As mudanças nos volumes e nos horários da entrada de afluente foram feitas por meio da reprogramação do temporizador que controlava a bomba de recalque de esgoto bruto. A idade do lodo foi controlada por meio de alterações na duração da etapa de remoção de excesso de lodo.

Tabela 2 – Delineamento experimental.

Fase	Nº de dias (datas)	Q _{diária} (m ³ /dia)	Nº de bateladas por dia	V _{batelada} (m ³ /batelada)	Relação A/M (kg.DQO/kg.SST.d)*	Idade de lodo (d)**	Interrupção noturna
F1	28 (20/08 a 16/09/19)	3	4	0,75	0,04 ± 0,01	31 ± 1	Não
F2	28 (17/09 a 14/10/19)	4,5	4	1,12	0,05 ± 0,01	33 ± 1	Não
F3	28 (15/10 a 11/11/19)	6	4	1,5	0,07 ± 0,02	22 ± 2	Não
F4	22 (12/11 a 03/12/19)	6	3	2	0,06 ± 0,01	21 ± 1	Sim
F5	51 (03/12 a 23/01/20)	6	3	2	-	-	Sim

Legenda: * A relação A/M foi calculada em termos de sólidos em suspensão totais (SST). ** A IL foi calculada com os dados obtidos de SST do licor misto e do descarte de lodo, desconsiderando a perda de sólidos com o descarte do efluente final.

O sistema é capaz de operar com o R1 recebendo afluente de forma contínua (sem necessidade de tanque pulmão), uma vez que as etapas de sedimentação, remoção de efluente tratado e remoção de excesso de lodo ocorrem apenas no R2. No entanto, neste experimento, a alimentação do sistema foi realizada de forma descontínua, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Distribuição diária das bateladas e da vazão afluente à ETE durante os experimentos.



Na fase experimental 4, buscou-se avaliar a influência da redução do tempo de aeração noturno na vida útil do conjunto de baterias e na eficiência do sistema. Para isso, a ETE foi operada com a mesma vazão diária da F3 (6 m³/dia), mas com a diminuição do volume de afluente tratado no período da noite (Figura 7). Com isso, o volume de afluente por batelada foi aumentado (de 1,5 m³ para 2 m³) e o número diário de bateladas diminuído (de 4 para 3) (Figura 7).

Como nesta fase não ocorria mais entrada de afluente à meia noite, no período entre 0h e 03h o sistema funcionava apenas com etapas curtas de aeração e recirculação. Entre 03h e 06h, o funcionamento era interrompido e o sistema mantido sem aeração ou movimentação de efluentes nos reatores. Às 6h, a ETE reiniciava e se dava início a uma nova batelada. Essa nova configuração resultou nas modificações do tempo total de aeração diária dos reatores resumidos na Tabela 3. Com os valores de profundidade de descarga do conjunto de baterias, foi possível estimar o aumento na vida útil deste conjunto gerado pela redução da aeração noturna.

Tabela 3 - Tempo total de aeração diária de ambos os reatores ao longo do experimento.

Fase experimental	Tempo de aeração diária R2 (min)	Tempo de aeração diária R1 (min)	Tempo de aeração total (R1+R2) (min)
F1	280	80	360
F2	280	80	360
F3	280	80	360
F4	230	70	300
F5	230	70	300

Com o objetivo de aumentar o período de avaliação do sistema fotovoltaico, a ETE operou na fase experimental 5 sob as mesmas condições da F4. No entanto, durante esta última fase não foram realizadas análises físico-químicas e nem foi monitorado nenhum parâmetro biológico, sendo acompanhado apenas os dados de desempenho do sistema fotovoltaico. Esse sistema foi a única fonte de alimentação de energia elétrica da ETE (exceto para a bomba de recalque de esgoto bruto) durante todas as fases experimentais, de modo que podemos avaliar sua adequabilidade no suprimento das demandas elétricas da ETE. Para isso, foram monitoradas as variáveis presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis do sistema FV monitoradas durante as fases experimentais.

Variáveis monitoradas
Energia produzida (kWh/dia)
Radiação média diária (kW/m ²)
Descarga diária das baterias (%)
Interrupções no sistema (descarga completa)

2.4. PROCEDIMENTOS PARA COLETAS E ANÁLISES

O sistema foi monitorado por meio de análises semanais de amostras do efluente tratado e do licor misto, e análises do esgoto bruto a cada duas semanas, a fim de avaliar a eficiência de tratamento ao longo do tempo. O esgoto bruto foi coletado durante o bombeamento do tanque de equalização para o R1. O licor misto foi coletado dentro dos reatores durante a fase de aeração (dois minutos após o início desta fase). A coleta do efluente tratado ocorria durante o bombeamento deste, por meio de uma torneira instalada na tubulação de saída.

As coletas eram efetuadas às terças-feiras, todas nos mesmos horários durante a primeira batelada do dia (manhã). As amostras eram fortuitas, coletadas e armazenadas em recipientes de polipropileno que eram rapidamente transportados até o laboratório onde eram feitas as análises. As frequências das análises que foram executadas em cada ponto de amostragem estão representadas na Tabela 5.

Na Tabela 6, estão especificadas as respectivas metodologias adotadas para analisar os parâmetros físico-químicos avaliados neste estudo, as quais seguiram, em sua maioria, o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2005). Algumas variáveis foram medidas *in loco*, como pH, OD, temperatura e sólidos sedimentáveis (Standard Methods - Método 2540 F). Como não foram realizadas análises de Sólidos Suspensos Voláteis (SSV), os valores de Idade de Lodo (IL) e relação A/M foram estimados utilizando os valores de SST.

Tabela 5 - Frequência das análises realizadas em cada ponto de amostragem durante as campanhas.

ANÁLISE	Efluente Final	Reator 1	Reator 2	Esgoto bruto
OD	-	D	D	-
Temperatura	S	D	D	SS
pH	S	S	S	SS
SST**	-	S	S	-
IVL	-	S	S	-
DQO*	S	-	-	SS
N _{total} *	S	-	-	SS
NH ₄ *	S	-	-	SS
NO ₃ *	S	-	-	SS
P _{total} *	S	-	-	SS

Legenda: D – análises diárias; S – análises semanais; SS – análises realizadas a cada duas semanas; * - Amostras não filtradas; ** As análises de SST do descarte de lodo eram realizadas a cada duas semanas.

Tabela 6 - Métodos analíticos das análises físico-químicas realizadas.

Parâmetro	Método	Referência
Nitrogênio Total	Método 10072	HACH
Fósforo Total	Método 10127	
Nitrogênio amoniacal	Método 10031	
NO ₃	Método 8171	
DQO total	Método 8165	
Sólidos (SST)	Método 2540 D	APHA, AWWA, WEF (2005)
IVL	Método 2710D	
Temperatura	Método 2550 B	
pH	Método 4500-H + B	
OD	Método 4500 - O G	

2.5. CURVAS DE OXIGÊNIO

Semanalmente, curvas de oxigênio dissolvido foram feitas nos dois reatores, com o auxílio de um sensor digital de OD. A sonda era colocada em cada reator antes da fase aerada, registrando a curva do aumento de oxigênio dissolvido durante a aeração e a curva do consumo de OD após o final da aeração (logo em seguida). Os valores eram registrados a cada 30 segundos, sendo acompanhando até 20 minutos após o fim da aeração ou até a concentração de OD no reator chegar a zero.

2.6. TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Os dados coletados foram analisados através de estatística descritiva. Além disso, também foi efetuada análise de variância (ANOVA *one-way*). Tais procedimentos foram realizados a fim de se avaliar a diferença estatística entre as etapas do experimento em determinado ponto de coleta, em relação a um parâmetro físicoquímico. Para tais análises, foi utilizado o software estatístico R.

O uso da análise de variância (ANOVA) nos dados de eficiência de remoção, que são valores percentuais, foi feito com os dados originais, e com os dados modificados pela transformação angular proposta por Zar (2009). Segundo o autor, porcentagens de 0 a 100% (ou proporções de 0 a 1) formam uma distribuição binomial, e não normal, sendo necessária a utilização de ferramenta de transformação dos dados. Assim, foi aplicada a transformação arcoseno, conforme sugerido pelo autor, da seguinte forma:

$$p' = \text{arcoseno}(\sqrt{p}),$$

em que a variável p representava os valores das porcentagens referentes às eficiências em análise e p' , os valores utilizados na análise de variância (ANOVA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. DESEMPENHO DO SISTEMA BIOLÓGICO

O afluente bruto que alimentou a estação apresentava características de esgoto predominantemente doméstico (VON SPERLING, 2014) (Tabela 7).

Tabela 7 – Concentração média e desvio padrão de DQO, N_{total} , NH_4^+ , NO_3^- , P_{total} e pH no afluente ao longo do período de operação do sistema (n° de amostras por fase = 2).

Étapas	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
DQO (mg/L)	647 ± 144	633 ± 45	645 ± 108	570 ± 24
N_{total} (mg/L)	49 ± 6	57 ± 15	61 ± 3	65 ± 3
NH_4^+ (mg/L)	48 ± 8	41 ± 2	46 ± 5	56 ± 1
NO_3^- (mg/L)	1,0 ± 0,7	1,2 ± 0,4	1,3 ± 0,6	1,5 ± 0,1
P_{total} (mg/L)	29,3 ± 18	29,4 ± 6	35,7 ± 9	22,9 ± 4
pH	6,6 ± 0,5	7,2 ± 0,1	6,8 ± 0,8	7,0 ± 0,2

Legenda: * N_{total} = NTK + Nitrito + Nitrato. ** P_{total} = $P_{orgânico}$ + $P_{inorgânico}$

O sistema apresentou alta eficiência de remoção de DQO, nitrogênio total e fósforo total ao longo de todo o período de operação (Figura 8 e Tabela 8). Estas remoções foram relativamente estáveis, visto que as análises de variância (ANOVA) indicaram que não houve diferença estatística ($p > 0,05$) entre as eficiências médias de remoção das etapas do estudo, para os três parâmetros.

Figura 8 – Eficiência média de remoção de DQO, N_{total} e P_{total} ao longo do período de operação do sistema.

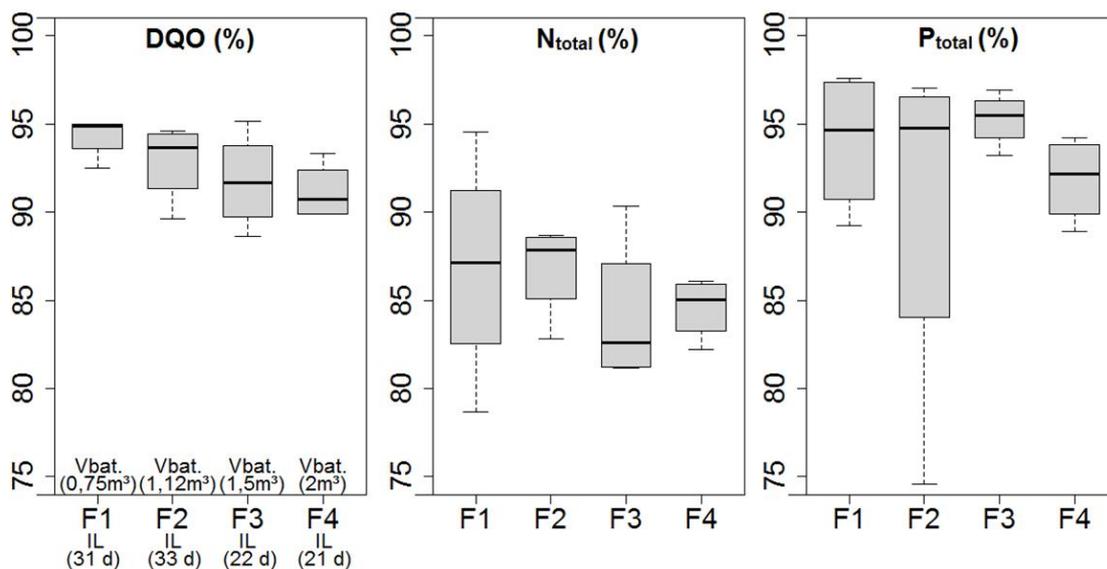


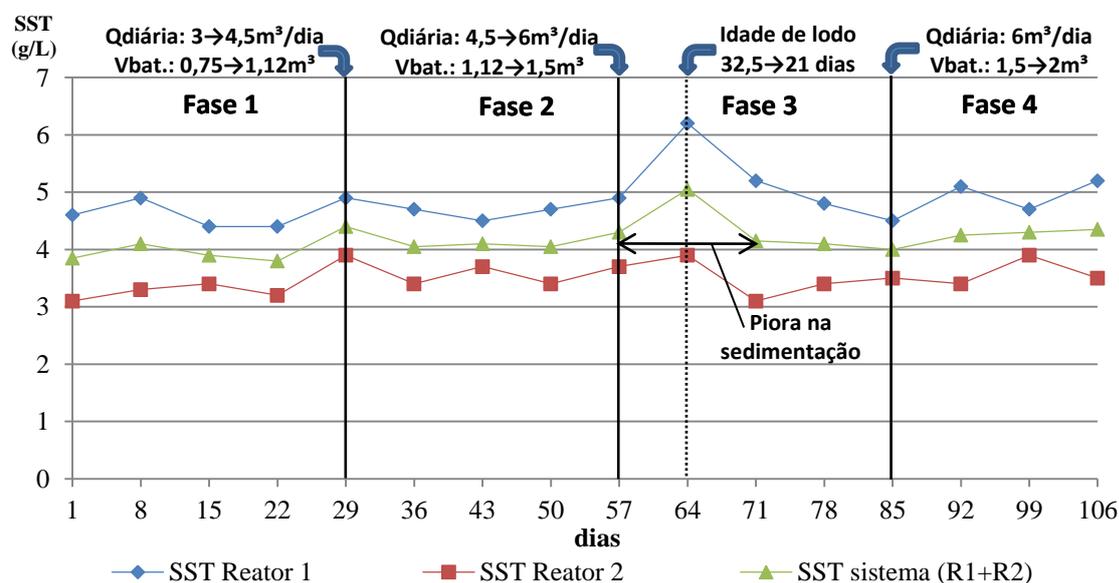
Tabela 8 – Concentração média e desvio padrão de DQO, N_{total} e P_{total} no efluente ao longo do período de operação do sistema (n° de amostras por fase = 4).

Fase experimental	DQO		N_{total}^*		P_{total}^{**}	
	Média \pm Desvio padrão (mg/L)	Eficiência média (%)	Média \pm Desvio padrão (mg/L)	Eficiência média (%)	Média \pm Desvio padrão (mg/L)	Eficiência média (%)
Fase 1 ($V_{bat} = 0,75m^3$) (IL= 31d)	36 ± 19	$94 \pm 1\%$	6 ± 3	$87 \pm 7\%$	$1 \pm 0,3$	$94 \pm 4\%$
Fase 2 ($V_{bat} = 1,12m^3$) IL= 33d	45 ± 16	$93 \pm 3\%$	8 ± 3	$87 \pm 3\%$	$3 \pm 3,7$	$90 \pm 11\%$
Fase 3 ($V_{bat} = 1,5m^3$) IL= 22d	52 ± 16	$92 \pm 2\%$	10 ± 3	$84 \pm 4\%$	$2 \pm 0,3$	$95 \pm 2\%$
Fase 4 ($V_{bat} = 2m^3$) IL= 21d	51 ± 9	$91 \pm 2\%$	10 ± 1	$85 \pm 2\%$	$2 \pm 0,3$	$92 \pm 2\%$

Portanto, as alterações na carga orgânica afluyente e na idade de lodo não prejudicaram o desempenho do sistema em relação à capacidade de remoção de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio.

A Figura 9 mostra os valores das concentrações de sólidos suspensos totais (SST) no licor misto de cada reator e a média dos valores de ambos os reatores durante as quatro primeiras fases experimentais. A Figura também indica os dias e as respectivas modificações na vazão afluyente diária e na idade de lodo realizadas no sistema.

Figura 9 – Concentração de SST em cada reator e a média das concentrações em R1 e R2 (SST sistema) ao longo da operação do sistema.



Após o segundo aumento da carga orgânica afluyente, realizada entre a F2 e a F3, ambas as concentrações de sólidos do R1 e R2 aumentaram em relação às Fases 1 e 2 (ver Tabela 9), atingindo os valores de 6,2 (R1) e 3,9 g/L (R2).

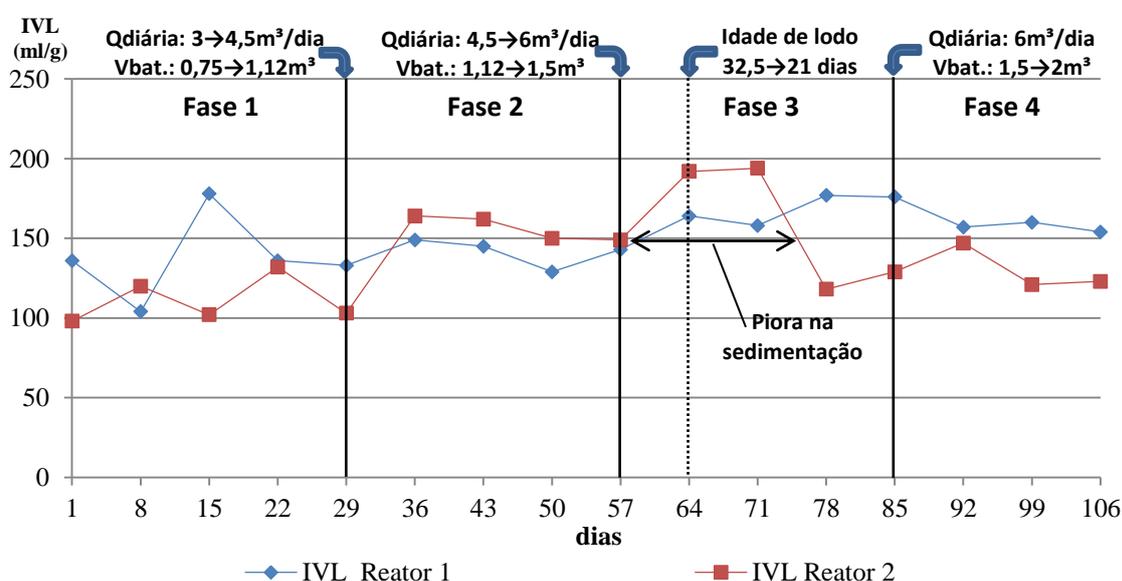
Tabela 9 – Concentração média de SST durante o período do experimento (nº de amostras por fase = 4).

Etapas	Concentração SST R1 (g/L)	Concentração SST R2 (g/L)	Concentração SST média do sistema (g/L)
Fase 1	4,6 ± 0,2	3,3 ± 0,1	3,9 ± 0,1
Fase 2	4,7 ± 0,2	3,6 ± 0,2	4,2 ± 0,2
Fase 3	5,3 ± 0,6	3,5 ± 0,4	4,4 ± 0,4
Fase 4	4,9 ± 0,3	3,6 ± 0,2	4,2 ± 0,2

Isso ocorreu, pois, segundo Henze *et al.* (2008), a concentração de lodo em um sistema de LA é função, principalmente, da carga diária de DQO e da Idade do Lodo. Assim, ao manter a idade de lodo do sistema fixa, o aumento na carga diária de matéria orgânica tende a gerar um aumento na concentração de lodo desse sistema.

No entanto, o aumento nas concentrações de SST observadas no início da F3 foram acompanhadas por uma piora na sedimentabilidade do sistema, evidenciada pelo aumento nos valores de IVL observados no início da F3 (Figura 10).

Figura 10 - Valores de IVL nos reatores ao longo da operação do sistema.



Uma semana após o início da F3, foi realizada a diminuição da idade do lodo, por meio do aumento do descarte de lodo (ver Tabela 10). Esta alteração foi acompanhada pela redução dos valores de SST em ambos os reatores (Figura 9). Esse comportamento era esperado, pois a diminuição da idade do lodo, sendo mantida constante a carga orgânica afluente, tende a reduzir a massa de lodo presente no sistema de LA (VAN HAANDEL; VAN DER LUBBE, 2012).

Tabela 10 – Descarte de lodo médio semanal ao longo do experimento (nº de amostras por fase = 4).

Etapas	Descarte semanal de lodo (kg/semana)
Fase 1	11,2
Fase 2	11,0
Fase 3	17,9
Fase 4	18,1

Duas semanas após a redução da IL, foi observada uma evolução no comportamento do sistema em termos de sedimentabilidade, com a respectiva diminuição nos valores de IVL (Figura 10).

O período em que ocorreram condições de sedimentabilidade críticas ($IVL > 150 \text{ ml/g}$ em ambos os reatores) foi o mesmo período em que o sistema operou com a maior concentração de sólidos (média de sólidos de ambos os reatores). Isso evidencia que, para esse sistema, há um limite para a concentração de biomassa que pode ser deixada se desenvolver, acima da qual a sedimentação é prejudicada. Para as condições deste experimento, isso ocorreu quando a concentração média dos sólidos do sistema (média dos reatores) foi superior a $4,2 \text{ g SST/L}$.

Esse limite está ligado às longas etapas não aeradas utilizadas no regime de aeração intermitente que, segundo Dotro *et al.* (2011), comumente tem um efeito negativo na capacidade de sedimentação de sistemas de LA. Nestas condições, de acordo com Van Haandel e Marais (1999), é comum que os sistemas apresentem problemas de sedimentabilidade como consequência de longas etapas anóxicas.

Segundo Van Haandel e Van der Lubbe (2012), em sistemas de LA submetidos à baixa concentração de OD e a uma baixa razão A/M, a redução da IL é uma estratégia válida objetivando a melhora da sedimentação do sistema. Além do efeito observado na

redução da concentração de sólidos no sistema, segundo os mesmos autores, a diminuição da IL pode ter um efeito positivo na sedimentabilidade do lodo por reduzir a demanda endógena de oxigênio. No entanto, os autores enfatizam que essa estratégia pode resultar em consequências indesejadas que devem ser investigadas, como uma possível diminuição da eficiência da nitrificação.

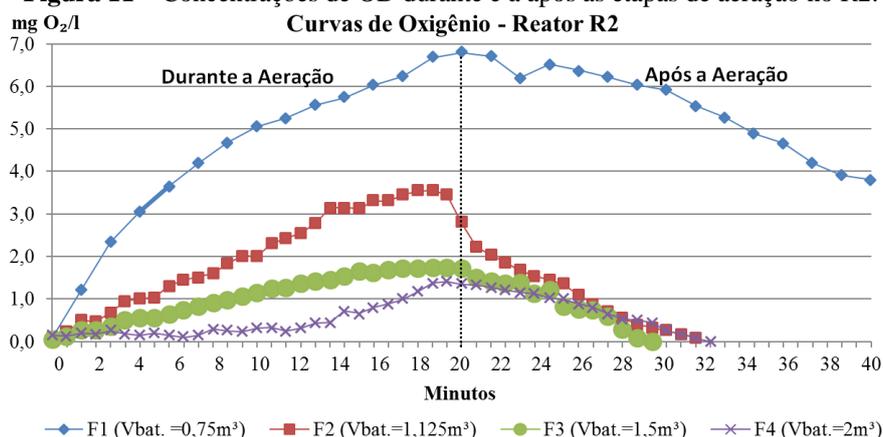
A biomassa do sistema permanecia, durante uma grande parcela do tempo, sem a presença de OD. Os dois reatores do sistema funcionavam com o regime de aeração intermitente e, portanto, apresentavam etapas aeradas intercaladas com etapas não aeradas (Figura 4). No entanto, as etapas de aeração dos reatores representavam uma parcela pequena da duração total da batelada, especialmente durante a F4, em que o sistema apresentava uma interrupção noturna no sistema. Como se observa na Tabela 11, ao longo de um dia de operação da ETE na F4, o R2 permanecia sob etapas não aeradas em mais de 84% do tempo, e o R1 em mais de 95% do tempo.

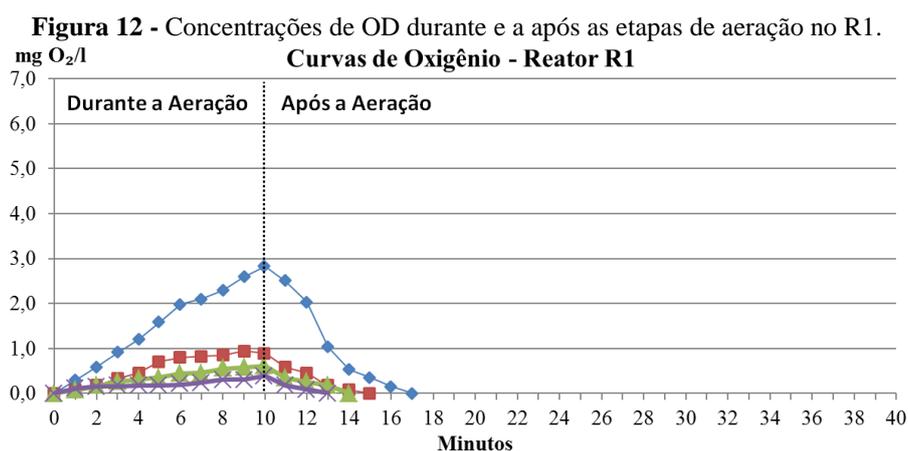
Tabela 11 - Tempo total de aeração diária de ambos os reatores ao longo do experimento.

Fase Experimental	R1		R2	
	Tempo de aeração diária (min)	Tempo sob aeração/tempo total	Tempo de aeração diária (min)	Tempo sob aeração/tempo total
F1	280	19,4%	80	5,6%
F2	280	19,4%	80	5,6%
F3	280	19,4%	80	5,6%
F4	230	16%	70	4,9%
F5	230	16%	70	4,9%

As curvas de oxigênio da Figura 11 e 12 mostram o comportamento da concentração de OD durante e após a primeira etapa de aeração da batelada nos reatores, para as quatro primeiras fases experimentais.

Figura 11 – Concentrações de OD durante e após as etapas de aeração no R2.



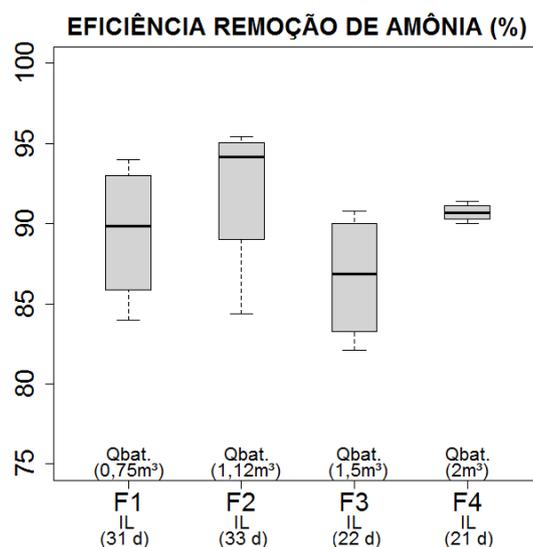


Com exceção da Fase 1, em que o consumo de OD nos reatores era menos intenso, a contração de OD nos reatores chegava a zero em menos de 10 minutos após o fim da etapa de aeração em ambos os reatores, e continuava neste estado até a próxima etapa aerada.

Diversos autores relacionam limitações de oxigênio ao baixo desenvolvimento de bactérias autotróficas, responsáveis pela nitrificação em reatores aeróbios (WEON; LEE; KOOPMAN, 2004; SLIEKERS *et al.*, 2005; Dotro *et al.*, 2011). A perda endógena de biomassa nitrificante ocorre tanto em condições aeróbias quanto na ausência de OD, enquanto o crescimento dessas bactérias, sendo aeróbias obrigatórias, ocorre apenas nas etapas aeróbicas de um sistema (HENZE *et al.*, 2008). Por isso, grandes etapas não aeradas tendem a prejudicar o desenvolvimento desta biomassa (Dotro *et al.*, 2011).

No entanto, os longos períodos sem a presença de OD não interferiram na capacidade de nitrificação do sistema, que manteve uma alta eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal durante todo o experimento (Figura 13).

Figura 13 – Eficiência de remoção de amônia ao longo do período de operação do sistema.



Uma razão para a elevada eficiência de remoção de amônia em R2 é a baixa carga orgânica que é transportada do R1 para o R2, o que ocasiona uma menor disponibilidade de substrato para as bactérias heterotróficas. Assim, ocorre uma limitação do crescimento destas no R2 e, como consequência, uma menor demanda de oxigênio. Isto é reforçado, p.ex., pelo fato da concentração de SST no R2 ser sempre inferior à do R1.

Alguns estudos aplicados à cinética de nitrificação mostram que, quando a carga orgânica afluyente ao reator de nitrificação é baixa, o crescimento das bactérias autotróficas pode superar o das heterotróficas (HUANG *et al.*, 2005; HUANG *et al.*, 2007).

Além do fornecimento de OD suficiente, a utilização de uma idade de lodo mínima é determinante para a ocorrência da nitrificação. A continuidade da alta remoção de nitrogênio amoniacal após a redução da IL (Figura 14 e Tabela 12) evidencia que a idade de lodo utilizada (21 dias) foi suficiente para o desenvolvimento dos organismos nitrificantes.

Figura 14 – Concentrações de nitrogênio total, amônia e nitrato no efluente e no afluyente da ETE.

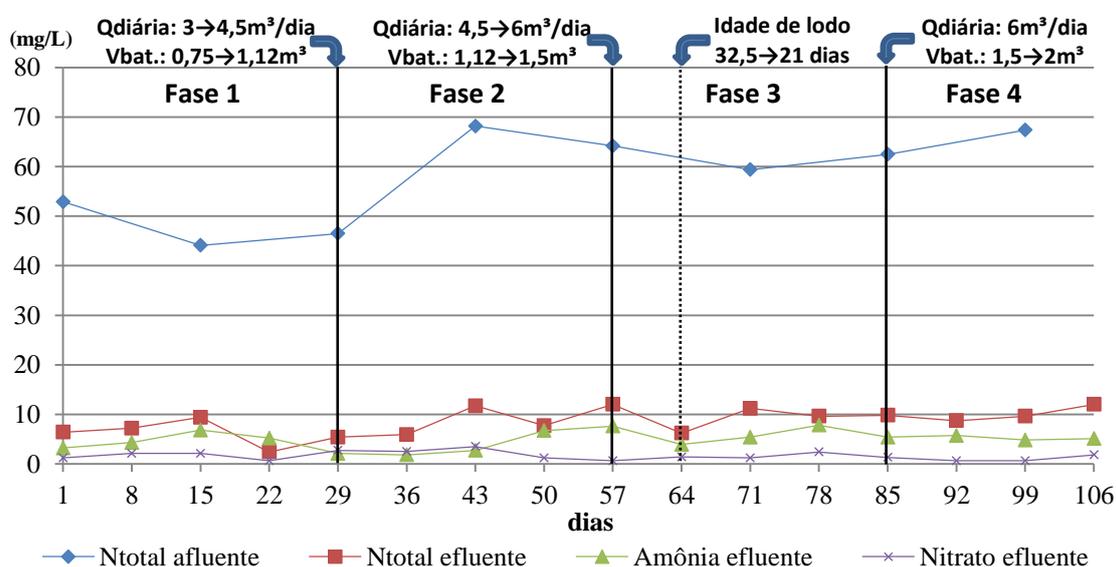


Tabela 12 – Concentração média e desvio padrão de N_{total} , NH_4^+ e NO_3^- no efluente ao longo do período de operação do sistema (n° de amostras por fase = 4).

Etapas	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
N_{total} (mg/L)	6,4 ± 2,9	7,7 ± 2,9	9,8 ± 2,6	10,0 ± 1,4
NH_4^+ (mg/L)	4,9 ± 1,5	3,3 ± 2,3	6,2 ± 1,9	5,3 ± 0,4
NO_3^- (mg/L)	1,5 ± 0,7	2,5 ± 1,0	1,4 ± 0,7	1,1 ± 0,6

Legenda: * N_{total} = NTK + Nitrito + Nitrato.

Os valores de pH em ambos os reatores sofreram poucas variações ao longo do período de operação do sistema, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Valor médio e desvio padrão de pH em ambos os reatores ao longo do período de operação do sistema (nº de amostras por fase = 4).

Etapas	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
pH Reator 1	6,8 ± 0,3	6,5 ± 0,3	7,1 ± 0,3	6,7 ± 0,5
pH Reator 2	7,5 ± 0,3	6,9 ± 0,5	6,8 ± 0,6	7,2 ± 0,2

Segundo Van Haandel e Marais (1999), a velocidade de crescimento das nitrificantes é fortemente influenciada pela temperatura. Assim, segundo os autores, é esperado que sistemas operados com temperaturas altas possuíssem boa nitrificação mesmo com baixos valores de IL (<5 d). A ETE em estudo operou com temperatura média diurna de $29,8 \pm 0,4$ C° no licor misto, valor considerado elevado (VAN HAANDEL; MARAIS, 1999).

O sistema também apresentou um desempenho positivo com relação à desnitrificação, como mostram as concentrações médias de nitrato no efluente (Tabela 12). Para a ocorrência deste processo, faz-se necessária a presença de nitrato e matéria orgânica, bem como a ausência de oxigênio. O R1, por receber o afluente bruto, fornece uma alta disponibilidade de DQO para a desnitrificação. Enquanto as recirculações de licor misto, provenientes do reator de nitrificação (R2), têm o objetivo de aumentar a disponibilidade de nitrato no R1. Além disso, como observado na Figura 12, a concentração de OD no reator decai rapidamente ao final das etapas de aeração, fazendo com que ocorra ausência de oxigênio neste reator durante grande parte da sua operação.

No regime de aeração intermitente, para a ocorrência da etapa de liberação do fósforo do interior das células em ambiente anaeróbio, é fundamental que ocorra a remoção de todo o nitrato (desnitrificação) presente neste reator para formação de uma zona anaeróbia. Dessa forma, as baixas concentrações de fósforo (Figura 8) e nitrato (Tabela 12) no efluente do sistema indicam que o regime de aeração intermitente foi eficaz na criação de uma fase anóxica seguida de uma fase anaeróbia, com ambas apresentando durações suficientes.

3.2. GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

A geração diária dos painéis conseguiu suprir o consumo da estação em 152 dos 157 dias de operação analisados. A Tabela 14 mostra os valores de irradiação média diária para os cinco dias em que a ETE sofreu interrupções.

Tabela 14 – Irradiações diárias e reduções percentuais em relação a irradiação média da fase para os cinco dias em que a ETE sofreu interrupções.

Dia	Irradiação diária (kW/m²)	Redução de em relação à irradiação diária média da fase
11 (30/08)	0,36	31%
19 (07/09)	0,34	35%
24 (12/09)	0,32	39%
45 (02/10)	0,37	30%
151 (17/01)	0,14	74%

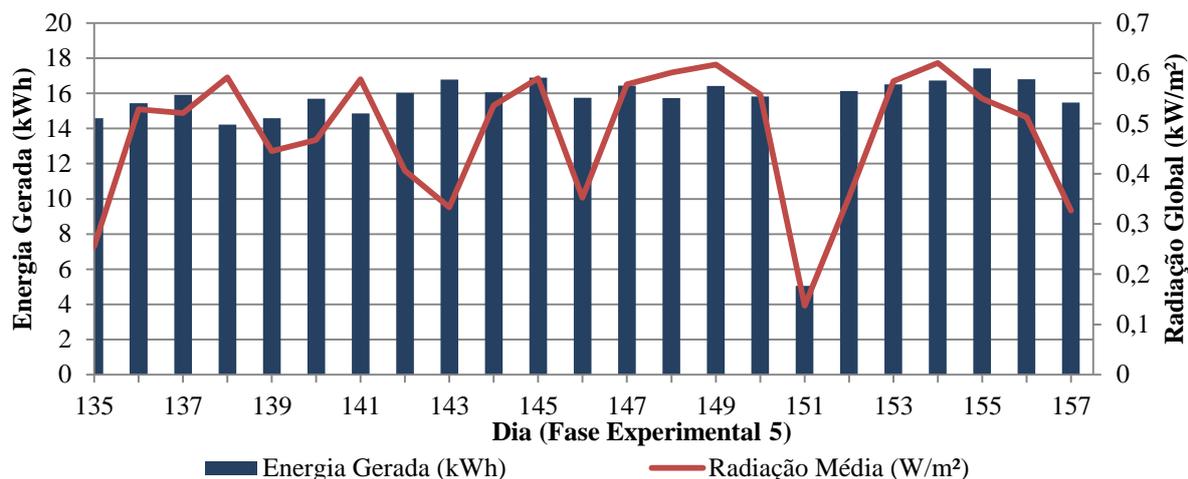
Os cinco dias em que a geração foi menor que a demanda da ETE, eram caracterizados como dias de baixa insolação diária em Natal, com reduções na radiação global diária média maiores do que 30% (Tabela 14). Isto reduziu a produção de energia pelos painéis solares e esgotou a carga armazenada nas baterias, por um período curto (3 horas). No entanto, nenhuma das interrupções causou alterações significativas na qualidade do efluente tratado.

A fase experimental 5 apresentou a menor irradiação diária média (Tabela 15). A Figura 15 mostra um comparativo entre a energia diária gerada pelo sistema fotovoltaico e os valores da radiação diária média em Natal/RN para o final desta fase.

Tabela 15 – Irradiação diária média das cinco fases experimentais (kW/m²).

Fase Experimental	Irradiação diária média da fase (kW/m²)
Fase 1	0,49 ± 0,5
Fase 2	0,54 ± 0,07
Fase 3	0,58 ± 0,04
Fase 4	0,58 ± 0,04
Fase 5	0,48 ± 0,1

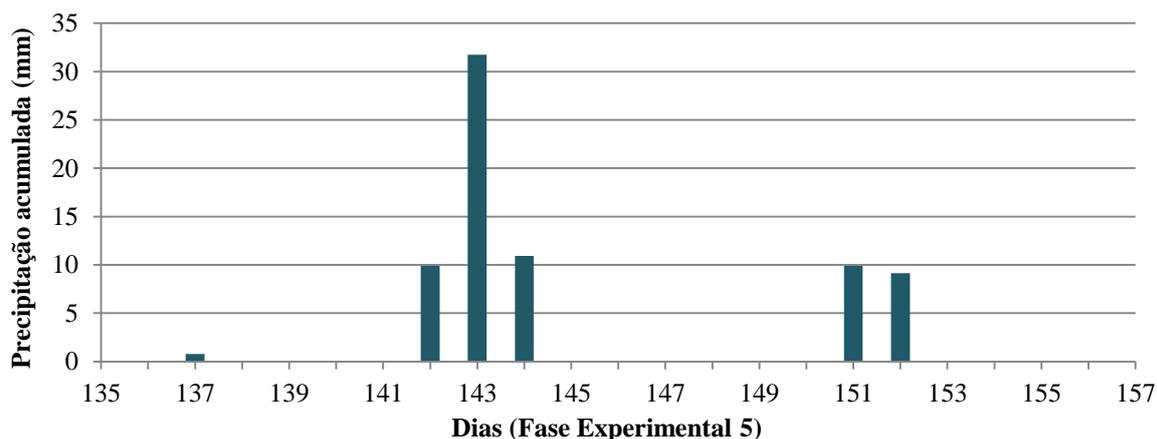
Figura 15 - Gráfico da energia diária gerada pelo sistema fotovoltaico e da radiação diária média em Natal/RN, entre os dias 135 (01/01/20) e 157 (23/01/20) do experimento.



Na Figura 15, é possível observar que a baixa energia diária produzida pelo sistema FV no dia 151 (5,1 kWh) está relacionada com a baixa radiação diária global (0,14 kW/m²) deste dia em Natal. No entanto, variações menos intensas nos valores de radiação global (dias 135, 134, 146 e 157) não foram suficientes para prejudicar a capacidade de produção de energia do sistema.

Comparando os gráficos das Figuras 15 e 16, percebe-se que no período de maior precipitação acumulada (dias 142, 143 e 144) não ocorreu diminuição no total de energia produzida. Isto demonstra que mesmo em dias de precipitações diárias consideráveis, os painéis solares foram capazes de captar de uma quantidade suficiente de radiação solar para manter a estação.

Figura 16 – Gráfico da precipitação diária acumulada em Natal/RN, entre 1(dia 135) e 23 (dia 157) de janeiro de 2020.



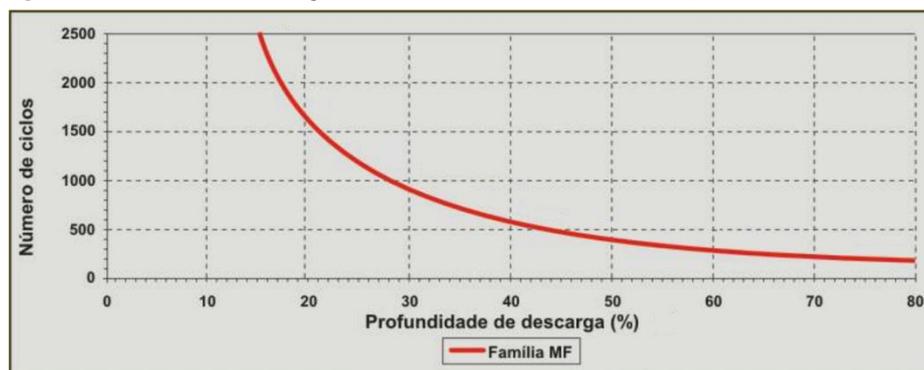
3.3. DESLIGAMENTO NOTURNO

Na fase experimental 4, a ETE foi operada com a mesma vazão afluyente diária da F3 (6 m³/dia), mas com a operação de uma batelada noturna a menos (Figura 7). Esse “desligamento” reduziu em 1/6, de 360 para 300 minutos, o tempo diário total de aeração do sistema (Tabela 4). Como observado nos resultados da Figura 8, as eficiências de remoção de MO e nutrientes não sofreram alterações significativas na F4, o que indica que a redução na aeração realizada não prejudicou o desempenho do sistema.

Já para avaliar efeito desta menor aeração na vida útil do arranjo de baterias, foi preciso considerar as profundidades de descarga que as baterias foram submetidas no experimento. Durante as fases F1, F2 e F3, a estação funcionava dependendo das baterias durante aproximadamente 16 horas por dia, o que representa uma demanda energética mínima de 8,8 kWh, da capacidade de carga total do sistema de baterias que é 21,2 kWh. Isso significa que, diariamente durante a noite, o sistema descarregava aproximadamente 42% da sua carga armazenada (profundidade de descarga).

De forma geral, para todos os tipos de baterias utilizadas em sistemas FV, os fatores que mais diminuem a vida útil delas são descargas mais profundas ou mais frequentes, e temperaturas elevadas de operação (HOPPMANN *et al.*, 2014; DHUNDHARA *et al.*, 2018; RYDH; SANDÉN, 2005). A forma como a vida útil das baterias utilizadas na ETE é afetada pela profundidade da descarga está ilustrada na Figura 17.

Figura 17 – Curva de descarga do modelo de baterias utilizado (MOURA 12MF220).



Fonte: MOURA (2017).

De acordo com a figura, a profundidade de descarga de 42% possibilita a execução de aproximadamente 500 ciclos, que resulta em uma vida útil máxima de cerca de um ano e seis meses. Como o sistema apresentou descargas maiores em dias nublados, inclusive com alguns ciclos de descarga total, a vida útil real do banco de baterias pode ter um valor bem menor.

Durante as fases 4 e 5, a redução na aeração aplicada no sistema reduziu a demanda energética de 8,8kWh para 7,15kWh. Nessas condições, a profundidade de descarga diária das baterias passou de 42% para 33,7%, que, segundo a Figura 17, aumenta o número aproximado de ciclos que a bateria resiste de 500 para 750. Isso indica um aumento na expectativa de vida do conjunto de baterias em 50%.

Esse aumento é muito significativo, principalmente ao se considerar as consequências para o sistema. Os custos com reposição das baterias são altos, e muitas vezes este processo apresentam dificuldades técnicas e logísticas (JUNG *et al.*, 2015). Além disso, as baterias que apresentam o melhor custo benefício atualmente para esse uso (baterias de chumbo-ácido) possuem um considerável risco de poluição ambiental tanto na produção quanto no descarte, por envolver componentes tóxicos e de difícil manejo (HOPPMANN *et al.*, 2014; DHUNDHARA *et al.*, 2018; RYDH; SANDÉN, 2005). Portanto, é imprescindível o uso de novas estratégias que aumentem a vida útil do arranjo de baterias. Dessa forma, percebe-se que a redução da aeração noturna visando à melhoria do desempenho do sistema de baterias é uma estratégia válida.

4. CONCLUSÕES

O sistema pesquisado apresenta alta eficiência na remoção matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, com eficiências médias de remoção de DQO, N total e P total de, respectivamente, $93 \pm 2\%$, $86 \pm 4\%$ e $93 \pm 6\%$. A remoção de MO e nutrientes do sistema é relativamente estável, de modo que alterações na vazão afluyente diária (3, 4,5 e $6\text{m}^3/\text{dia}$) são rapidamente amortecidas, sem provocar a diminuição na eficiência destes processos.

Altas concentrações de microrganismos resultam em uma baixa capacidade de sedimentação do lodo, podendo comprometer a qualidade do efluente final. Isso evidencia a existência de um limite na concentração de sólidos do sistema (R1+R2), acima da qual a sedimentação é prejudicada, que, no caso do presente estudo foi de $4,3 \text{ g SST/l}$. Esse limite está relacionado também aos longos períodos que o lodo do sistema fica sob condições de baixa concentração de OD.

Em casos de sedimentação deficiente por concentração de sólidos elevada no sistema, a redução da idade de lodo pode ser utilizada para melhorar a sedimentabilidade do lodo sem diminuir sua eficiência de remoção de MO e nutrientes. Isso ocorre, pois a diminuição da IL, sendo mantida constante a carga orgânica afluyente, tende a reduzir a massa de lodo presente no sistema de LA. A redução da IL realizada no experimento (de 32 ± 2 para 21 ± 2 dias) não diminuiu a capacidade de nitrificação do sistema.

A biomassa do sistema é robusta em relação à operação com longos períodos com baixa concentração de OD. O funcionamento com mais de 80% do tempo de ciclo sem aeração em ambos os reatores não comprometeu o desenvolvimento da biomassa autotrófica e, conseqüentemente, a remoção de nitrogênio amoniacal.

As durações das etapas de aeração noturna podem ser ajustadas como uma estratégia para prolongar vida útil do arranjo de baterias do sistema fotovoltaico.

REFERÊNCIAS

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22nd ed.**; APHA: Washington D.C.; AWWA: Denver, Colorado; WEF: Alexandria, Virginia. 2012.

AKINYELE, D.; LEVRON, Y. The Environmental Impact of Distributed Energy Resources (DERs) in Modern Electric Power Systems. **IEEE Smart Grid Newslett.** 2017.

ARTAN, N.; ORHON, D.. Mechanism and Design of Sequencing Batch Reactors for Nutrient Removal. **Water Intelligence Online**, [s.l.], v. 4, p.9781780402604-9781780402604, 30 dez. 2005. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/9781780402604>.

BARJENBRUCH, M. AND ERLER, C. A performance review of small German WSPs identifying improvement options. **Wat. Sci. Technol.**, 51(12), 43 – 49. 2005.

DOAN, H.; LOHI, A.. Intermittent Aeration in Biological Treatment of Wastewater. **American Journal Of Engineering And Applied Sciences**, [s.l.], v. 2, n. 2, p. 260-267, 1 fev. 2009.

DOTRO, G.; JEFFERSON, B.; JONES, M.; VALE, P.; CARTMELL, E.; STEPHENSON, T. A review of the impact and potential of intermittent aeration on continuous flow nitrifying activated sludge. **Environmental Technology**, [s.l.], v. 32, n. 15, p. 1685-1697, nov. 2011. Informa UK Limited.

DHUNDHARA, S., VERMA, Y. P., & WILLIAMS, A. Techno-economic analysis of the lithium-ion and lead-acid battery in microgrid systems. *Energy Conversion and Management*, 177, 122–142. 2018.

GORONSZY, M. C. Intermittent Operation of the Extended Aeration Process for Small Systems. **Water Pollution Control Federation**. Vol. 51, No. 2. pp. 274-287. Fev. 1979.

HAN, C., LIU, J., LIANG, H., GUO, X., & LI, L. An innovative integrated system utilizing solar energy as power for the treatment of decentralized wastewater. **Journal of Environmental Sciences**, 25(2), 274–279. doi:10.1016/s1001-0742(12)60034-5. 2013.

HARTLEY, Ken. *Tuning Biological Nutrient Removal Plants*. London: Iwa Publishing, 2013.

HENZE, M. **Biological Wastewater Treatment: principles, modelling and design**. London: Iwa, 2008.

HOPPMANN, J., VOLLAND, J., SCHMIDT, T., HOFFMANN, V. The Economic Viability of Battery Storage for Residential Solar Photovoltaic Systems - A Review and a Simulation Model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 39. 2014.

HUO, C.x.. SBR Performance with an Excessive Long Sludge Age. **Environmental Technology**, [s.l.], v. 26, n. 2, p. 199-210, fev. 2005.

INPE (BRASIL). Dados da estação climatológica/solarimétrica. In: Centro Regional do Nordeste – Laboratório de Variáveis Ambientais Tropicais. Natal, RN. 2020.

JUNG, J.; ZHANG, L.; ZHANG, J. Lead-Acid Battery Technologies: Fundamentals, Materials, and Applications, 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015.

MARAIS, G. R., EKAMA, G. A. The activated sludge process part I - steady state behaviour. **Water SA**, v. 2, n. 4, p. 164-200, 1976.

MOURA ACUMULADORES SA (Pernambuco). **Manual Técnico - Moura Clean Baterias Estacionárias**. Jaboatão dos Guararapes: Moura, 2016.

OBAJA, D; MACÉ, S; COSTA, J; SANS, C; MATA-ALVAREZ, J. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 87, n. 1, p. 103-111, mar. 2003.

RYDH, C. J., & SANDÉN, B. A. Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part II: Energy return factors and overall battery efficiencies. **Energy Conversion and Management**, 46(11-12), 1980–2000. 2005.

SCHLEYPEN, P.; MICHEL, I.; SIEWERT, H.E.. Sequencing batch reactors with continuous inflow for small communities in rural areas in Bavaria. **Wat. Sci. Technol.**, 35(1), 269 – 276. 1997.

SILVA Filho, Heraldo Antunes; VAN HAANDEL, Adrianus; MOTA, Lincoln Soares. Otimização da modelação de remoção de nitrogênio em sistemas de lodo ativado. **Revista Dae**, [s.l.], v. 66, n. 209, p.17-36, 2018. Editora Cubo Multimedia.

STAMATELATOU, K. *et al.* Novel biological processes for nutrient removal and energy recovery from wastewater. **Wastewater And Biosolids Management**, [S.L.], p. 27-42, 15 jun. 2017. International Water Association.

VAN HAANDEL,; EKAMA, G; MARAIS, G. The activated sludge process: single sludge denitrification. **Water Research**, [s.l.], v. 15, n. 10, p.1135-1152, 1981.

VAN HAANDEL, A.C; VAN DER LUBBE, J.G.M. **Handbook of Biological Wastewater Treatment: Design and Optimisation of Activated Sludge Systems**. Segunda. ed. London: IWA Publishing, 2012. ISBN 9781780400808.

VON SPERLING, M. (2014). **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol. 1. 4 ed. Belo Horizonte: UFMG. 472 p.

UGGETTI, Enrica; HUGHES-RILEY, Theodore; MORRIS, Robert H.; NEWTON, Michael I.; TRABI, Christophe L.; HAWES, Patrick; PUIGAGUT, Jaume; GARCÍA, Joan. Intermittent aeration to improve wastewater treatment efficiency in pilot-scale constructed wetland. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 559, p. 212-217, jul. 2016.

WILDERER, P.A., IRVINE, R.L. AND GORONSZY, M.C. Sequencing Batch Reactor Technology, Scientific and Technical Report No. 10, **IWA Publishing**, London, UK. 2001.

ZAR, J. H. Biostatistical Analysis. 5th ed.; Pearson Prentice Hall. 2009. 960 p.

ZENG, Wei; PENG, Yongzhen; WANG, Shuying. A Two-Stage SBR Process for Removal of Organic Substrate and Nitrogen via Nitrite-Type Nitrification–Denitrification. **Journal Of Environmental Science And Health, Part A**, [s.l.], v. 39, n. 8, p.2229-2239, 27 dez. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1081/ese-120039387>.

ZENG, Wei; PENG, Yongzhen; WANG, Shuying. Startup operation and process control of a two-stage sequencing batch reactor (TSSBR) for biological nitrogen removal via nitrite. **Desalination And Water Treatment**, [s.l.], v. 1, n. 1-3, p.318-325, jan. 2009. Informa UK Limited.