

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Francisco Markan Nobre de Souza Filho

**ANÁLISES OPERACIONAIS E ECONÔMICAS
DOS PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS POR
AERAÇÃO PROLONGADA E UASB SEGUIDO
POR BIOFILTRO EM CONCRETO ARMADO E
POLIÉSTER REFORÇADO EM FIBRA DE VIDRO
– ESTUDOS DE CASOS APLICADOS EM
ESGOTOS DOMÉSTICOS**

Trabalho de Graduação
2018

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Francisco Markan Nobre de Souza Filho

**ANÁLISES OPERACIONAIS E ECONÔMICAS
DOS PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS POR
AERAÇÃO PROLONGADA E UASB SEGUIDO
POR BIOFILTRO EM CONCRETO ARMADO E
POLIÉSTER REFORÇADO EM FIBRA DE
VIDRO – ESTUDOS DE CASOS APLICADOS EM
ESGOTOS DOMÉSTICOS**

Orientador

(Prof. PhD Ten Cel Eng) Marcio Antonio da Silva Pimentel (ITA)

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2018

seguido por biofiltro em concreto armado e poliéster reforçado em fibra de vidro – estudos de casos aplicados em esgotos domésticos. São José dos Campos, 2018. 69f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2018. Orientador: Prof. PhD Tem Cel Eng Marcio Antônio da Silva Pimentel.

1. ETE 2. Lodos Ativados Aeração Prolongada 3. UASB 4. Concreto Armado. 5. PRFV 6. Tratamento de Esgoto Doméstico II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. III. Análises operacionais e econômicas dos processos de lodos ativados por aeração prolongada e UASB seguido por biofiltro em concreto armado e poliéster reforçado em fibra de vidro – estudos de casos aplicados em esgotos domésticos

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FILHO, Francisco Markan Nobre de Souza. **Análises operacionais e econômicas dos processos de lodos ativados por aeração prolongada e UASB seguido por biofiltro em concreto armado e poliéster reforçado em fibra de vidro – estudos de casos aplicados em esgotos domésticos** 2018. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Francisco Markan Nobre de Souza Filho

TÍTULO DO TRABALHO: Análises operacionais e econômicas dos processos de lodos ativados por aeração prolongada e UASB seguido por biofiltro em concreto armado e poliéster reforçado em fibra de vidro – estudos de casos aplicados em esgotos domésticos

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2018

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Francisco Markan N. de S. Filho
Francisco Markan Nobre de Souza Filho
Rua H8A, 123, Campus CTA
12223-460, São José dos Campos - SP

AERAÇÃO PROLONGADA E CASO SEGURO POR BIOFILTRO EM CONCRETO ARMADO E POLIÉSTER REFORÇADO EM FIBRA DE VIDRO – ESTUDOS DE CASOS APLICADOS EM ESGOTOS DOMÉSTICOS

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Francisco Markan N. de S. Filho

Francisco Markan Nobre de Souza Filho

Autor

M A P

(Prof. PhD Ten Cel Eng) Marcio Antonio da Silva Pimentel (ITA)

Orientador

E L N

(Prof. Dr) Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 28 de novembro de 2018

**A minha família e meus colegas, que me
deram forças para prosseguir**

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, em especial à minha mãe Socorro, pois sem ela eu não teria forças e apoio para chegar até onde cheguei.

A meu pai, minhas irmãs e meu irmão, por sempre terem acreditado em mim, me amado e me apoiado nos momentos mais difíceis.

A todos os meus amigos da Civil 18, que mesmo com todas as dificuldades, conseguimos juntos cruzar a linha de chegada desse curso. Em especial a Rebeca, Marcos e Lorival, durante o projeto mais difícil e desgastante das nossas vidas.

Aos meus amigos da época de cursinho, Tadeu, Murillo, Cawai, Talita, Isabelle, Livia, Vitória, Samuel, Gedalias e a todos os amigos do AC, eterno grupo de amigos que esteve junto desde a época de Farias Brito, e que vão permanecer para sempre no meu coração.

Ao meu namorado Luis Gustavo, que esteve sempre do meu lado nessa reta final, me deu apoio incondicional nesse último semestre.

A todos os colégios em que estudei, Juvenal de Carvalho, Militar de Fortaleza e em especial ao Farias Brito, por ter me dado todo o suporte para conquistar os meus sonhos.

A todos os integrantes da AGITA, que me ajudaram a assumir minha homossexualidade, e tornaram a minha vida mais leve, feliz e plena.

A todos os cursinhos em que trabalhei, nesse ofício que é pouco valorizado, mas que me dá muito orgulho que é ser professor, que são: Casd Vestibulares, Casdinho, NP Vestibulares, Curso Vitória e em especial ao Kuadro, que me deu a oportunidade de além de ser professor, trabalhar como orientador pedagógico.

Agradeço ao orientador professor Ten Cel Marcio, por ter me guiado nessa reta final, mostrando o que deveria ser feito e por onde seguir no TG.

E a todos que acreditaram em mim. Essa conquista também é de vocês. Muito obrigado por todo o apoio.

"Se você tem uma laranja e troca com outra pessoa que tem uma laranja, cada um fica com uma laranja.
Mas se você tem uma ideia e troca com outra pessoa que tem uma ideia, cada um fica com *duas.*"
(Confúcio)

Resumo

Duas tecnologias são amplamente utilizadas no tratamento de efluentes domésticos: o sistema de lodos ativados convencional por aeração prolongada, que apresenta elevada eficiência na remoção da sua matéria orgânica e reduz as possibilidades de maus odores, insetos e vermes; e o sistema reator UASB (reator anaeróbio de fluxo ascendente) com biofiltro, que apresenta baixíssima produção de lodo e possibilidade do uso energético do biogás produzido.

Além disso, o material é outro fator de grande importância na escolha do projeto de uma ETE. Dois deles são amplamente utilizados: concreto armado, que geralmente apresenta um maior custo de implantação para a ETE, e PRFV (Poliéster reforçado em fibra de vidro), que pode apresentar maiores custos de manutenção devido a sua menor robustez.

O ponto de partida para o presente trabalho será os dados operacionais e de custos de 2 ETEs em operação, na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, que tratam esgoto doméstico, uma na tecnologia de lodos ativados por aeração prolongada feita em concreto armado (ETE Atacado CA), e outra em reator UASB seguido de biofiltro feita em PRFV (ETE Iparana PRFV). A partir disso, foram desenvolvidos 2 projetos, um em lodos ativados por aeração prolongada em PRFV, e outro reator UASB seguido de biofiltro em concreto armado, e dessa forma, foi feita uma análise operacional e de custos de 4 projetos para o tratamento de efluente doméstico, considerando as 2 tecnologias (lodos ativados convencional e reator UASB) e os 2 materiais (concreto armado e PRFV).

A análise das 4 ETEs considerou os custos de implantação, operação e manutenção de cada uma das estações, bem como a conversão para o metro cúbico de esgoto tratado e o Valor Presente Líquido (VPL). Verificou-se, após a análise, uma tendência moderna, o uso cada vez maior de estações do tipo reator UASB em fibra de vidro para ETEs compactas, como possuindo o menor custo e dando o maior retorno financeiro por metro cúbico de esgoto tratado.

Abstract

Two technologies are widely used in the treatment of domestic effluents: the conventional activated sludge system by prolonged aeration, which presents high efficiency in the removal of its organic matter and reduces the possibilities of bad odors, insects and worms; and the UASB reactor system (upflow anaerobic sludge blanket) with biofilter, which presents very low production of sludge and possibility of the energetic use of biogas produced.

In addition, the material is another factor of great importance in choosing the design of a STS. Two of them are widely used: reinforced concrete, which generally presents a higher implantation cost for STS, and PRFV (Polyester reinforced in fiberglass), which can present higher maintenance costs due to its less robustness.

The starting point for the present work will be the operational and cost data of two STSs in operation, in the city of Fortaleza, state of Ceará, which treat domestic sewage, one in the activated sludge technology made by reinforced concrete (STS Atacado CA), and another in a UASB reactor followed by a biofilter made in PRFV (STS Iparana PRFV). From this, two projects were developed, one in activated sludge by prolonged aeration in PRFV, and another UASB reactor followed by biofilter in reinforced concrete, and an operational and cost analysis of 4 projects for the treatment of effluent considering the two technologies (conventional activated sludge and UASB reactor) and the two materials (reinforced concrete and PRFV).

The analysis of the four ETEs considered the costs of implementation, operation and maintenance of each station, as well as the conversion to the cubic meter of treated sewage and the Net Present Value (NPV). After the analysis, there was a modern trend, the increasing use of UASB-type fiberglass reactor stations for compact ETEs, as having the lowest cost and giving the highest financial return per cubic meter of treated sewage.

Lista de Figuras

Figura 1 – Estrutura do floco de lodo ativado - Adaptado de (JORDÃO e PESSÔA, 1982). .	19
Figura 2 – Representação esquemática de um sistema de lodos ativados – Adaptado de (VON SPERLING, 2007).....	20
Figura 3 – Fluxograma do sistema de lodos ativados convencional – Adaptado de (VON SPERLING, 2007).....	23
Figura 4 – Fluxograma do sistema de lodos ativados com aeração prolongada – Adaptado de (VON SPERLING, 1996).....	24
Figura 5 – Fluxograma do sistema de lodos ativados com fluxo intermitente (Reatores Sequenciais em Batelada) – Adaptado de (MARCONI, 2001).....	25
Figura 6 – Fases de um ciclo em sistema de lodos ativados com fluxo intermitente (Reatores Sequenciais em Batelada) (JORDÃO e PESSOA, 2005).....	26
Figura 7 – Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios (CHERNICHARO, 2008).	31
Figura 8 – Esquema simplificado do reator em manta de lodo - Adaptado de (CHERNICHARO, 2008).....	32
Figura 9 – Esquema de um processo de um reator UASB (adaptado de CHERNICHARO, 2008)	33
Figura 10 – Estação elevatória de esgotos ETE Atacado CA.....	45
Figura 11 – Tanque de aeração com aerador superficial ETE Atacado CA.....	45
Figura 12 – Decantador secundário ETE Atacado CA.....	46
Figura 13 – Quadro CCM ETE Atacado CA.....	46
Figura 14 – Fluxograma ETE Atacado CA	47
Figura 15 – Reator UASB ETE Iparana PRFV	49

Figura 16 – Tanque de armazenamento de lodo ETE Iparana PRFV	49
Figura 17 – Fluxograma ETE Iparana PRFV	50

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificação de acordo com a idade de lodo (ou razão A/M).	22
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos sistemas anaeróbios de tratamento de efluentes.	30
Tabela 3 – Comparativo de resistência a tração e ruptura de materiais.	43
Tabela 4 – Custos de implantação (CAPEX) ETE Atacado CA.	52
Tabela 5 – Custos mensais de operação (OPEX) ETE Atacado CA.	53
Tabela 6 – Custos mensais de dosagem ETE Atacado CA.	54
Tabela 7 – Custo mensal de energia elétrica ETE Atacado CA.	54
Tabela 8 – Custos de implantação (CAPEX) ETE Iparana PRFV.	55
Tabela 9 – Custos mensais de operação (OPEX) ETE Iparana PRFV.	56
Tabela 10 – Custos mensais de dosagem ETE Iparana PRFV.	56
Tabela 11 – Custo mensal de energia elétrica ETE Iparana PRFV.	57
Tabela 12 – Custos de implantação (CAPEX) ETE Atacado PRFV.	58
Tabela 13 – Custos mensais de operação (OPEX) ETE Atacado PRFV.	59
Tabela 14 – Custos mensais de dosagem ETE Atacado PRFV.	59
Tabela 15 – Custo mensal de energia elétrica ETE Atacado PRFV.	60
Tabela 16 – Custos de implantação (CAPEX) ETE Iparana CA.	61
Tabela 17 – Custos mensais de operação (OPEX) ETE Iparana CA.	61
Tabela 18 – Custos mensais de dosagem ETE Iparana CA.	62

Tabela 19 – Custo mensal de energia elétrica ETE Iparana CA.	63
Tabela 20 – Comparação de custos por m ³ /hora de esgoto tratado das ETES.	64
Tabela 21 – Custos fixos e mensais por metro cúbico por hora de cada uma das ETES.	65
Tabela 22 – Cálculo do VPL por metro cúbico por hora de esgoto para cada uma das ETES.	65

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivo	17
1.3	Escopo.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Sistema de Lodos Ativados	19
2.1.1	Lodo Ativado.....	19
2.1.2	Sistema de Lodos Ativados com Fluxo Contínuo	19
2.1.3	Variantes de Processo do Sistema de Lodos Ativados	21
2.1.3.1	Sistema de Lodos Ativados Convencional (fluxo contínuo)	22
2.1.3.2	Sistema de Lodos Ativados com Aeração Prolongada (fluxo contínuo)	23
2.1.3.3	Sistema de Fluxo Intermitente (Reatores Sequenciais em Batelada)	25
2.1.4	Dimensionamento do Sistema de Lodos Ativados Aeração Prolongada	27
2.1.4.1	Cálculo do Volume do Reator	27
2.1.4.2	Recirculação do Lodo	28
2.1.4.3	Remoção do Lodo Excedente	28
2.1.5	Sistemas de Aeração.....	28
2.1.5.1	Biofiltros Aerados Submersos (BAS).....	29
2.2	Reatores Anaeróbios	30
2.2.1	Introdução a Tecnologia Anaeróbia	30
2.2.2	Reatores UASB	31
2.2.3	Critérios e Parâmetros de Projeto de um Reator UASB.....	33
2.2.3.1	Carga Orgânica Volumétrica	34
2.2.3.2	Carga Hidráulica Volumétrica e Tempo de Detenção Hidráulico.....	35
2.2.3.3	Carga Biológica (Relação Alimento/Microrganismo)	36
2.2.3.4	Velocidade Ascensional de Fluxo	37
2.2.3.5	Avaliação da Produção de Biogás	38
2.3	Materiais de Fabricação para Estações de Tratamento de Esgotos	40
2.3.1	Concreto Armado (CA)	40
2.3.2	Fibra de Vidro (PRFV).....	42
3	METODOLOGIA.....	44

3.1	Estação de Efluentes Atacado em Concreto Armado (ETE Atacado CA).....	44
3.1.1	Equipamentos e Sistemas	44
3.2	Estação de Efluentes Iparana em PRFV (ETE Iparana PRFV)	47
3.2.1	Equipamentos e Sistemas	48
3.3	Custos das ETES	50
3.3.1	Valor Presente Líquido (VPL).....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	Custos ETE Atacado CA.....	52
4.1.1	Custos de Implantação (CAPEX) ETE Atacado CA.....	52
4.1.2	Custos de Operação (OPEX) ETE Atacado CA.....	53
4.1.3	Custos de Dosagem ETE Atacado CA	53
4.1.4	Custos de Energia Elétrica ETE Atacado CA	54
4.2	Custos ETE Iparana PRFV	54
4.2.1	Custos de Implantação (CAPEX) ETE Iparana PRFV	55
4.2.2	Custos de Operação (OPEX) ETE Iparana PRFV.....	55
4.2.3	Custos de Dosagem ETE Iparana PRFV	56
4.2.4	Custos de Energia Elétrica ETE Iparana PRFV	57
4.3	Custos ETE Atacado PRFV.....	57
4.3.1	Custos de Implantação (CAPEX) ETE Atacado PRFV	57
4.3.2	Custos de Operação (OPEX) ETE Atacado PRFV	58
4.3.3	Custos de Dosagem ETE Atacado PRFV	59
4.3.4	Custos de Energia Elétrica ETE Atacado PRFV	60
4.4	Custos ETE Iparana CA	60
4.4.1	Custos de Implantação (CAPEX) ETE Iparana CA	60
4.4.2	Custos de Operação (OPEX) ETE Iparana CA	62
4.4.3	Custos de Dosagem ETE Iparana CA	62
4.4.4	Custos de Energia Elétrica ETE Iparana CA.....	63
4.5	Comparação de Custos e cálculo do VPL para as ETES	63
5	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1 Introdução

1.1 Motivação

O tratamento do esgoto doméstico e industrial é essencial para a saúde pública, qualidade de vida da população e preservação do meio ambiente. Dessa forma, é necessário que o esgoto oriundo da infraestrutura urbana seja corretamente tratado, de modo a atender à legislação ambiental local.

Adicionalmente, sabe-se que os custos de tratamento representam uma parcela significativa em um sistema de esgoto sanitário: o tratamento corresponde a 15% do custo total de um sistema de esgotamento sanitário, sendo o segundo maior custo, precedido apenas pelo de rede e ligação, de 74% (TSUTIYA, 1999). Dessa forma, faz-se necessário o estudo dos fatores intervenientes nos custos de implantação, operação e manutenção de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

No presente trabalho será feita uma análise de custos considerando dois fatores: tecnologia de tratamento adotada e material de fabricação da ETE. As duas tecnologias de tratamento utilizadas englobam tratamento biológico, que em geral produz um lodo de melhor qualidade e apresenta custos mais baixos quando comparado aos processos físico-químicos. Dentre os inúmeros processos de tratamento biológico, este trabalho optou por estudar o sistema de lodos ativados por aeração prolongada, de elevada eficiência na remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), e o sistema de reator anaeróbio de fluxo ascendente (Upflow Anaerobic Sludge Blanket - UASB) seguido de biofiltro aerado, que reduz consideravelmente a quantidade de lodo produzida e o consumo de energia. Ademais, o material também é um importante fator a ser considerado, pois pode gerar diferentes custos, tanto de implantação, como de manutenção para a ETE. Dois são amplamente utilizados no Brasil: concreto armado, historicamente utilizado como solução durável e econômica nas obras de engenharia civil, e o material compósito Polímero Reforçado de Fibra de Vidro – PRFV, um polímero formado a partir de filamentos de fibra de vidro unidos pela resina poliéster. O PRFV possui alta resistência à tração, à flexão e ao impacto, e ultimamente tem sido bastante empregado como solução estrutural.

Para efeito de comparação de custos de implantação, operação e manutenção, foram considerados quatro projetos, a partir da combinação das tecnologias (lodos ativados com aeração prolongada e reator UASB com biofiltro) e dos materiais (concreto armado e PRFV). Para uma comparação padrão, será considerado o custo por metro cúbico de esgoto tratado. Por fim, será feita uma análise do Valor Presente Líquido (VPL), a fim de avaliar o valor financeiro

de retorno de cada uma das estações, bem como verificar se a moldabilidade e os custos de fabricação do PRFV são melhor aplicados em ETEs do tipo lodos ativados aeração prolongada ou reator UASB.

1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é comparar a operação e os custos de 4 projetos de estações de tratamento de esgoto, considerando a combinação de duas tecnologias diferentes (lodos ativados com aeração prolongada e reator UASB com biofiltro) com dois tipos de materiais diferentes (concreto armado e PRFV) e fazer uma análise do retorno financeiro futuro, considerando o Valor Presente Líquido (VPL) de cada uma das ETEs.

Outros objetivos associados a esse trabalho são:

- Caracterizar as tecnologias de lodos ativados com aeração prolongada e de reator do tipo anaeróbio/aeróbio com biofiltro no tratamento de efluente doméstico, levantando vantagens e desvantagens técnicas e financeiras de cada uma.
- Verificar vantagens e desvantagens técnicas e financeiras de cada um dos materiais adotados na construção das ETEs (concreto armado e PRFV).
- Verificar se a moldabilidade e os custos de fabricação do PRFV são melhor aplicados em ETEs do tipo lodos ativados aeração prolongada ou reator UASB.

1.3 Escopo

O trabalho consistirá inicialmente na análise de dois projetos de ETEs existentes e em operação, que tratam efluente doméstico, uma delas com o tratamento por lodos ativados com aeração prolongada construída em setembro de 2008 em Caucaia, estado do Ceará, em concreto armado (ETE Atacado CA), e a outra com tratamento por reator UASB com biofiltro construída em agosto de 2011 em Caucaia, estado do Ceará, em PRFV (ETE Iparana PRFV). A partir desses projetos, serão desenvolvidos mais dois projetos equivalentes, considerando o mesmo tipo de tecnologia, o mesmo tipo de efluente, e a mesma vazão de cada um dos projetos iniciais, mas com materiais de fabricação diferentes, ou seja, um projeto em lodos ativados por aeração prolongada em PRFV, e outro em reator UASB seguido por biofiltro em concreto armado. Em seguida, será feito o levantamento dos custos de implantação, manutenção e operação de cada uma das estações, considerando a conversão por metro cúbico de esgoto tratado. Por fim, será calculado o Valor Presente Líquido (VPL) de cada uma das estações, a fim de se determinar o retorno financeiro a longo prazo de cada uma das estações, bem como se a moldabilidade e os

custos de fabricação associados ao PRFV são mais eficazes na tecnologia lodos ativados por aeração prolongada em PRFV ou em reator UASB.

O seguinte trabalho estará estruturado da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Introdução

Aqui se apresentou a motivação do estudo, sua importância e objetivo, uma breve descrição das atividades realizadas de definição do escopo do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo há uma breve revisão da literatura relacionada ao trabalho, caracterizando as tecnologias utilizadas no tratamento de efluentes domésticos (lodos ativados com aeração prolongada e reator UASB seguido de biofiltro) bem como dos materiais utilizados na construção das ETEs (concreto armado e PRFV), do cálculo de custos e do valor presente líquido (VPL) para projetos.

Capítulo 3 – Metodologia

Aqui se descreve a metodologia utilizada no desenvolvimento dos dois projetos (lodos ativados por aeração prolongada em PRFV e UASB seguido por biofiltro em concreto armado) e no cálculo dos custos operacionais e de implantação dos quatro processos de tratamento.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões

Nesse capítulo apresentam-se os resultados dos custos das ETEs e o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) de cada uma das estações, verificando qual das estações tem o maior retorno financeiro e discutindo os fatores intervenientes nos custos das ETEs.

Capítulo 5 - Conclusões

Aqui se apresentam as conclusões sobre os custos de cada uma das estações, verificando qual o tipo de tecnologia e qual material são mais viáveis financeiramente.

Capítulo 6 – Referências Bibliográficas

Nesse capítulo apresentam-se as fontes bibliográficas para a realização do trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Sistema de Lodos Ativados

O Sistema por lodos ativados é amplamente utilizado a nível mundial para tratamento de esgotos domésticos e industriais, quando se necessita de elevada qualidade do efluente tratado e há baixa disponibilidade de área para o tratamento. No entanto, esse sistema necessita de uma maior mecanização se comparado a outros sistemas de tratamento de esgoto, bem como uma operação mais sofisticada. Ademais, esse sistema consome mais eletricidade para aeração se comparados aos reatores anaeróbios seguidos de pós-tratamento. (VON SPERLING, 2007)

2.1.1 Lodo Ativado

Lodo ativado é o floco produzido num esgoto bruto ou decantado pelo crescimento de bactérias zoogleias ou outros organismos, na presença de oxigênio dissolvido, e acumulado em concentração suficiente graças ao retorno de outros flocos previamente formados (JORDÃO; PESSÔA, 1982). Os flocos biológicos de lodos ativados são constituídos por dois níveis de estrutura: microestrutura e macroestrutura. A microestrutura está associada aos processos de adesão microbiana e biofloculação, enquanto a macroestrutura constitui-se dos organismos filamentosos, os quais formam uma espécie de rede à qual as bactérias se aderem. A macroestrutura do floco, dessa forma, é formada quando a matriz de polissacarídeos é unida por protozoários e bactérias filamentosas, que formam a estrutura rígida do floco.



Figura 1 – Estrutura do floco de lodo ativado - Adaptado de (JORDÃO e PESSÔA, 1982).

Dentre os processos de lodos ativados, do ponto de vista hidráulico, prevalecem as unidades com fluxo contínuo em relação às de fluxo intermitente.

2.1.2 Sistema de Lodos Ativados com Fluxo Contínuo

As seguintes unidades são partes integrantes e essenciais de qualquer sistema de lodos ativados com fluxo contínuo (VON SPERLING, 2007):

- Tanque de aeração (reator);
- Tanque de decantação (decantador secundário);
- Linha de recirculação de lodo;
- Remoção do excesso de lodo.

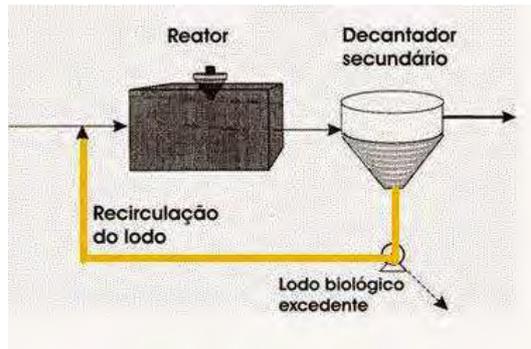


Figura 2 – Representação esquemática de um sistema de lodos ativados – Adaptado de (VON SPERLING, 2007).

As reações associadas à remoção da matéria orgânica e, sob certas condições relacionadas à oxidação de nitrogênio, ocorrem no reator biológico (também chamado tanque de aeração). A biomassa cresce devido ao substrato orgânico presente no esgoto que entra na estação. A sedimentação da biomassa, o que torna o efluente final mais claro, ocorre no decantador secundário. Parte do lodo que se deposita no fundo do decantador secundário volta para o reator (recirculação do lodo), para se obter uma maior concentração da biomassa do reator, que está associada à máxima eficiência do sistema. A outra parte de sólidos (lodo excedente) é retirada do sistema e dirigida ao sistema de tratamento do lodo excedente.

A biomassa é facilmente separada no decantador secundário devido a sua propriedade de floculação e decantação. Como citado anteriormente, isso ocorre devido a produção de uma matriz gelatinosa, que permite a união de bactérias, protozoários e outros microorganismos responsáveis pela remoção da matéria orgânica, em flocos macroscópicos. Os flocos são muito maiores que os microorganismos isolados, o que permite a sua sedimentação.

Como resultado da recirculação do lodo, a concentração de sólidos suspensos no tanque de aeração é muito elevada, permitindo, conseqüentemente, reduzir o tempo de detenção hidráulica e o volume. Portanto, no processo de lodos ativados, o tempo de detenção do líquido ou tempo de detenção hidráulica (θ_h) é pequeno, da ordem de horas, o que implica que o volume do tanque de aeração é muito reduzido. No entanto, os sólidos permanecem num período de tempo maior que o líquido, devido à recirculação. O tempo de detenção dos sólidos é chamado

de idade de lodo (θ_c), que é definida como a razão entre a massa de lodo biológico presente no reator e a massa de lodo biológico removido do sistema por unidade de tempo:

$$\theta_c = \frac{\text{massa de sólidos no sistema}}{\text{massa de sólidos retirada do sistema por unidade de tempo}} \quad (1)$$

O maior tempo de permanência dos sólidos no sistema (maior idade do lodo) que garante a maior eficiência dos sistemas de lodos ativados, desde que a biomassa tenha tempo suficiente para metabolizar toda a matéria orgânica do esgoto.

Outro parâmetro prático usado no sistema de lodos ativados é a razão alimento/microorganismos (A/M), que é definida como a carga de alimento ou substrato (DBO) necessária por dia por unidade de biomassa do reator (VON SPERLING, 2007). Como os microrganismos têm uma capacidade limitada de reduzir a DBO por unidade de tempo, uma elevada razão A/M (superior a 0,25) significa uma maior quantidade de matéria orgânica biodegradável disponível, resultando menor eficiência na remoção de substrato no efluente final. Por outro lado, uma baixa razão A/M (menor que 0,15) significa que a quantidade de substrato ofertada é menor, acentuando a competição da biomassa. Como consequência, a biomassa irá consumir praticamente toda a matéria orgânica do efluente, bem como o seu material orgânico celular, resultando em maior eficiência de remoção de matéria orgânica e na produção de lodo de menor quantidade e já digerido. Lodos de idade elevada estão associados à baixa razão A/M, e vice-versa. (VON SPERLING, 2007)

Devido ao fluxo contínuo de substrato (DBO proveniente do esgoto bruto) no tanque de aeração, os microrganismos se reproduzem continuamente. Se a quantidade de microrganismos crescesse indefinidamente, haveria uma quantidade excessiva de biomassa no tanque de aeração, dificultando a transferência de oxigênio para as células das bactérias. Dessa forma, o decantador secundário ficaria sobrecarregado, e os sólidos não se depositariam de forma satisfatória, diminuindo a qualidade do efluente final. Para manter o sistema em equilíbrio, é necessário remover a mesma quantidade de lodo que é produzida pela reprodução dos microrganismos. Esse é o lodo biológico excedente, que pode ser retirado diretamente do reator ou da linha de recirculação de lodo.

2.1.3 Variantes do Processo de Sistema de Lodos Ativados

As principais variações dos sistemas de lodos ativados de acordo com as características são (VON SPERLING, 2007):

De acordo com a idade de lodo (θ_c) (ou razão A/M):

- Lodos ativados convencional (baixa idade de lodo, alta razão A/M);
- Lodos ativados aeração prolongada (alta idade de lodo, baixa razão A/M).

A tabela 1 (VON SPERLING, 2007) apresenta a classificação de acordo com a idade do lodo (ou razão A/M):

Tabela 1 – Classificação de acordo com a idade de lodo (ou razão A/M)

Idade de lodo	Idade de lodo (dias)	Razão A/M	Classificação
Baixa	4 a 10	0,25 a 0,50	Convencional
Alta	18 a 30	0,07 a 0,15	Aeração Prolongada

Existe ainda a classificação quando a idade de lodo é muito baixa (menor que 4 dias), chamada de aeração modificada, que ocorre especialmente em regiões de clima quente, onde o volume do tanque de aeração teria que ser muito baixo, o que pode provocar instabilidades hidráulicas para o sistema.

De acordo com o fluxo, classificam-se os sistemas de lodos ativados em:(VON SPERLING, 2007)

- Fluxo contínuo;
- Fluxo intermitente (reatores sequenciais em batelada).

A classificação de acordo com a idade de lodo tanto é aplicável para sistemas de fluxo contínuo (esgoto entrando e saindo continuamente do tanque de aeração) como para fluxo intermitente ou de reatores sequenciais em batelada (entrada de esgoto apenas em cada ativação do reator de lodo). No entanto, em reatores de fluxo intermitente, o sistema por aeração prolongada é mais comum.

A seguir, apresenta-se a variante de lodos ativados convencional: a mais usual para grandes vazões.

2.1.3.1 Sistema de Lodos Ativados Convencional (fluxo contínuo)

Nesse sistema, utiliza-se um tanque de decantação primário (decantador primário), a fim de remover parte da matéria orgânica sedimentável antes de o esgoto entrar no reator, com o objetivo de economizar energia e reduzir o volume do tanque de aeração. Portanto, o sistema de lodos ativados convencional possui o tratamento primário como parte do fluxo. Na figura 3

(VON SPERLING, 2007), a parte superior corresponde ao tratamento da fase líquida (esgoto), enquanto a parte inferior corresponde ao tratamento da fase sólida (lodo).



Figura 3 – Fluxograma do sistema de lodos ativados convencional – Adaptado de (VON SPERLING, 2007).

No sistema de lodos ativados convencional, o tempo de detenção hidráulica é de 6 a 8 horas, enquanto a razão alimento/microorganismos está entre 0,25 e 0,50 quando a idade de lodo é de 4 a 10 dias. Com essa idade de lodo, a biomassa removida do sistema de excesso de lodo tem um alto nível de biodegradabilidade orgânica nas suas células, necessitando portanto de estabilização da matéria orgânica. (VON SPERLING, 2007).

A fim de obter maior eficiência de remoção da matéria orgânica, facilitar o tratamento da fase sólida, reduzir o decantador primário e o custo de implantação, a variante de lodos ativados por aeração prolongada é mais interessante. (VON SPERLING, 2007)

2.1.3.2 Sistema de Lodos Ativados com Aeração Prolongada (fluxo contínuo)

Caso a biomassa permaneça no sistema por um longo período, de 18 a 30 dias, e receba a mesma carga de DBO do esgoto bruto, haverá menos alimento disponível para os microorganismos (razão alimento/microorganismos de 0,07 a 0,15). A quantidade de biomassa é, dessa forma, maior que no sistema de lodos ativados convencional, bem como maior é o volume do reator aeróbio e o tempo de detenção hidráulica (de 16 a 24 horas). Dessa forma, haverá menos matéria orgânica por unidade de volume do tanque de aeração, e por unidade de biomassa no reator. Por consequência, para sobreviver, a bactéria começa a utilizar no processo o metabolismo endógeno, que faz parte das suas células. Essa matéria orgânica celular é transformada em dióxido de carbono e água após respiração, que é o processo de estabilização

da biomassa no tanque de aeração. Enquanto no sistema de lodos ativados convencional a estabilização do lodo é feita separadamente (nos digestores de lodo no estágio de tratamento de lodo), no sistema com aeração prolongada a digestão do lodo é feita conjuntamente no reator, em um ambiente aeróbico. O consumo extra de oxigênio para a estabilização do lodo (respiração endógena) é significativa e pode ser maior (VON SPERLING, 2007) que o consumo para a absorção da matéria orgânica do afluente (respiração exógena), contudo, a quantidade de lodo gerada é menor.

Como não há necessidade de estabilizar o excesso de lodo biológico, uma geração de outro tipo de lodo é evitada no sistema com aeração prolongada, uma vez que o lodo oriundo de decantador primário da variante de lodos ativados convencionais exigiria estabilização separada posterior. Por essa razão, os sistemas com aeração prolongada não possuem tanque de sedimentação primário. A Figura 4 (VON SPERLING, 2007) apresenta o fluxograma do sistema de aeração prolongada, com a simplificação de não apresentar tanque de sedimentação primário.



Figura 4 – Fluxograma do sistema de lodos ativados com aeração prolongada – Adaptado de (VON SPERLING, 1996)

A consequência dessa simplificação no sistema com aeração prolongada é o aumento do consumo de energia para aeração, pois o lodo é estabilizado aerobicamente no tanque de aeração. Por outro lado, a redução da disponibilidade de substrato e sua absorção praticamente total pela biomassa torna a variante com aeração prolongada um dos mais eficientes processos de tratamento de esgoto para remoção de DBO e reduz sensivelmente a remoção de lodo (VON SPERLING, 2007).

Entretanto, deve ser enfatizado que a eficiência de qualquer variante do processo de lodos ativados é intimamente associada com o desempenho do tanque de sedimentação secundário. Se há uma grande perda de sólidos no efluente final, haverá uma grande perda na qualidade do efluente, independente de uma boa performance do tanque de aeração na remoção da DBO (VON SPERLING, 2007).

2.1.3.2 Sistema de Fluxo Intermitente (Reatores Sequenciais em Batelada)

Os sistemas de lodos ativados descritos anteriormente são de fluxo contínuo com relação ao esgoto, isto é, o líquido está sempre entrando e saindo do reator. Essa é, no entanto, uma variação do sistema de operação com fluxo intermitente, também chamado de reatores sequenciais em batelada (MARCONI, 2001).

O princípio do processo de lodos ativados com operação intermitente consiste na incorporação de todas as unidades, processos e operações geralmente associados com o tratamento por lodos ativados tradicional, que são o decantador primário, oxidação biológica e decantador secundário, em um único tanque. Nesse tanque, esses processos e operações simplesmente se tornam sequenciais no tempo, e não são unidades separadas num sistema de fluxo contínuo (VON SPERLING, 2007).

O processo de lodos ativados com fluxo intermitente pode ser usado tanto nos modos convencionais como de aeração prolongada, embora o segundo seja mais comum, devido a sua operação mais simples. No modo com aeração prolongada, o tanque único também incorpora uma função de digestor de lodo (aeróbia). A Figura 5 apresenta o fluxograma do processo de lodos ativados com fluxo intermitente (VON SPERLING, 2007).

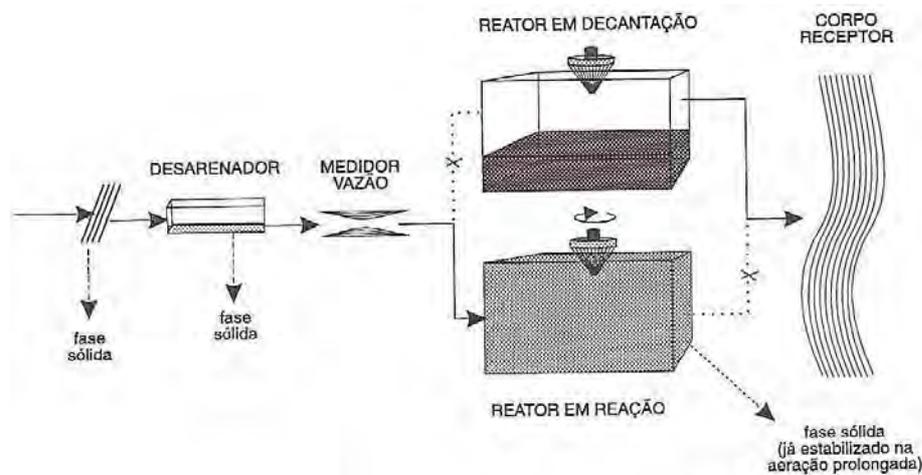


Figura 5 – Fluxograma do sistema de lodos ativados com fluxo intermitente (reatores sequenciais em batelada) – Adaptado de (MARCONI, 2001).

O processo consiste em um reator único de mistura completa, onde todos os estágios de tratamento ocorrem. Isso é obtido pelo estabelecimento de ciclos e fases operacionais, cada uma com uma duração definida. A biomassa permanece no reator durante todas as fases, eliminando a necessidade, dessa forma, de um tanque de decantação para separação. Um ciclo de tratamento normal é composto das seguintes fases (JORDÃO E PESSOA, 2005):

- Enchimento (entrada e sedimentação do esgoto bruto no Reator);
- Reação biológica (Aeração/mistura do líquido contido no reator);
- Sedimentação (sedimentação e separação de sólidos suspensos do esgoto tratado);
- Retirada (Remoção do esgoto tratado no reator);
- Repouso e retirada do lodo em excesso (Ajuste dos ciclos e remoção do excesso de lodo).

A Figura 6 (JORDÃO e PESSOA, 2005) mostra as cinco fases de um ciclo num reator sequencial em batelada.

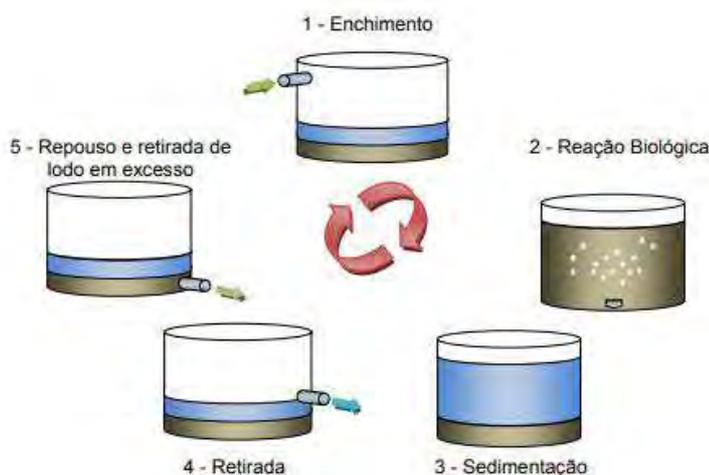


Figura 6 – Fases de um ciclo em sistema de lodos ativados com fluxo intermitente (reatores sequenciais em batelada) (JORDÃO e PESSOA, 2005).

A duração usual de cada fase e do ciclo completo pode ser alterada de acordo com as variações de fluxo do afluente, as necessidades de tratamento e as características do esgoto e da biomassa no sistema (MARCONI, 2001).

Em face ao escopo do trabalho e a larga aplicação do sistema de lodos ativados com aeração prolongada, apresenta-se a seguir o dimensionamento das principais unidades.

2.1.4 Dimensionamento do Sistema de Lodos Ativados com Aeração Prolongada

2.1.4.1 Cálculo do Volume do Reator

O volume do reator de um sistema de lodos ativados com aeração prolongada (VON SPERLING, 2007) é dado por:

$$V = \frac{Y \cdot \theta_C \cdot Q \cdot (S_0 - S)}{X_V \cdot (1 + K_d \cdot f_b \cdot \theta_C)}$$

Em que:

- Y = coeficiente de produção celular (massa de sólidos em suspensão voláteis produzidos por unidade de massa de DBO removida);
- K_d = coeficiente de respiração endógena (d^{-1});
- Q = vazão (m^3/s);
- S_0 = concentração de DBO no afluente (mg/L ou g/m^3);
- S = concentração de DBO no efluente (mg/L ou g/m^3);
- X_V = concentração de sólidos voláteis em suspensão, SSV (mg/L ou g/m^3);
- θ_C = tempo de residência celular ou tempo de detenção celular ou idade do lodo.

Sabe-se que o coeficiente de produção celular (Y) para sistemas de lodos ativados comumente está na faixa de 0,5 – 0,8 (g/g), e que ainda o coeficiente de respiração endógena (K_d) usualmente está na faixa de 0,06 a 0,10 $mg_{SSV}/mg_{SSV} \cdot dia$ (VON SPERLING, 2007).

O tempo de detenção celular (θ_C) é calculado por (VON SPERLING, 2007):

$$\theta_C = \frac{\text{massa de sólidos no sistema}}{\text{massa de sólidos retirada do sistema por unidade de tempo}}$$

No caso de não haver recirculação, tem-se que:

$$\theta_C = \theta_H$$

Em que θ_H é o tempo de detenção hidráulica. Por outro lado, com recirculação, o tempo de detenção celular é dado por (VON SPERLING, 2007):

$$\theta_C = \frac{X_V \cdot V}{Q_{ex} \cdot X_{VR}}$$

Em que:

- Q_{ex} = vazão de saída do lodo excedente (m^3/s);
- X_{VR} = concentração de sólidos voláteis em suspensão na recirculação (mg/L ou g/m^3).

2.1.4.2 Recirculação do Lodo

O objetivo principal da recirculação de lodo é manter uma alta concentração de sólidos no reator e uma idade de lodo que seja maior que o tempo de detenção hidráulica ($\theta_C > t$ ou $\theta_C > \theta_H$), estando intimamente relacionada com a qualidade do lodo sedimentado no decantador secundário (VON SPERLING, 2007). Dessa forma, quanto mais concentrado o lodo, menor a vazão de recirculação. Além disso, para lodos com maior concentração de sólidos em suspensão, melhor a sua decantabilidade e adensabilidade.

A razão de recirculação do lodo é dada por:

$$R = \frac{Q_R}{Q}$$

Em que:

- Q_R é a vazão de recirculação do lodo (m^3/s);
- Q é a vazão (m^3/s).

2.1.4.3 Remoção do Lodo Excedente

Como supracitado, a retirada do lodo excedente é importante para manter o equilíbrio do sistema, removendo a mesma quantidade de lodo produzida pela reprodução dos microorganismos. A vazão de remoção do lodo excedente no reator (sistema de controle hidráulico) é dada por (VON SPERLING, 2007):

$$Q_{ex} = \frac{V}{\theta_C}$$

Caso o lodo excedente seja removido na linha de recirculação, a vazão de remoção é dada por (VON SPERLING, 2007):

$$Q_{ex} = \frac{V}{\theta_C} \cdot \frac{X}{\bar{X}_R}$$

Uma observação importante é que a retirada na linha de recirculação implica numa menor vazão Q_{ex} , implicando numa vazão menor de esgoto a ser tratado. Por outro lado, no sistema de controle hidráulico, caso se deseje manter uma idade de lodo de 20 dias, de forma simplificada, basta retirar 1/20 (5%) do volume do reator por dia. (VON SPERLING, 2007)

2.1.5 Sistemas de Aeração

Para o tratamento adequado utilizando o sistema de lodos ativados com aeração prolongada, é necessário que oxigênio seja fornecido para satisfazer a oxidação branda da matéria carbonácea e a nitrificação (VON SPERLING, 2007). A oxidação da matéria

carbonácea é importante para fornecer energia para a síntese bacteriana, enquanto a nitrificação é necessária para a remoção biológica de nitrogênio nos efluentes.

Segundo a NBR 12209, no item 6.6.18 B, a massa de oxigênio disponibilizada para o processo de aeração deve ser criteriosamente calculada, devendo atender ao valor mínimo de duas vezes e meia a carga média de DBO aplicada ao tanque de aeração quando se tem nitrificação.

Outra tecnologia que tem crescido em aplicações na área de esgoto doméstico, especialmente como pós-tratamento de efluentes anaeróbios são os biofiltros aerados submersos.

2.1.5.1 Biofiltros Aerados Submersos (BAS)

Biofiltração consiste na utilização de um leito filtrante de material grosseiro, tais como pedras, escória de ferro, ardósia, material plástico, sobre os quais as águas residuárias são distribuídas formando filmes e limos, que floculam e oxidam a água residuária.

Os biofiltros aerados submersos devem ser precedidos de remoção de sólidos grosseiros e areia e de decantação primária ou de outra forma remoção de sólidos sedimentares. Além disso, a vazão de dimensionamento do BAS deve ser a vazão média do afluente à ETE. O material de enchimento no qual se forma o biofilme pode ser um recheio com superfície específica superior a $350 \text{ m}^2/\text{m}^3$, com altura útil igual ou superior a 1,6 m, com fluxo descendente ou ascendente, constituído de material inerte de origem sintética ou mineral, com tamanho de 2 a 6 mm. Os BAS requerem remoção do excesso de biomassa por contralavagem (ABNT NBR 12209:2011).

Além disso, a aeração no BAS deve ser distribuída de maneira uniforme, a uma taxa mínima de $30 \text{ N.m}^3 \text{ ar/kg DBO}$ aplicada, e as operações de lavagem do BAS devem ser realizadas com um intervalo máximo entre lavagens de 24h e uma taxa hidráulica de lavagem superior a $600 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. O lodo resultante das operações de lavagem deve ser devidamente tratado (ABNT NBR 12209:2011).

A seguir, apresentam-se os principais aspectos teóricos relativos aos processos anaeróbios.

2.2 Reatores Anaeróbios

2.2.1 Introdução à Tecnologia Anaeróbia

Os sistemas anaeróbios de tratamento de esgoto domésticos são cada vez mais aplicados a nível mundial, especialmente nos países de clima quente como o Brasil, devido a vantagens como o baixo custo, simplicidade operacional e baixa produção de sólidos (CHERNICHARO; 2008). A Tabela 2 (CHERNICHARO; 2008) mostra as vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios, se comparados aos processos aeróbios, como o de lodos ativados.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos sistemas anaeróbios de tratamento de efluentes

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Baixa produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes inferior a que ocorre nos processos aeróbios; • Baixo consumo de energia, geralmente associado a uma elevatória de chegada. Isso faz com que o Sistema tenha custos operacionais muito baixos; • Baixa demanda de área; • Baixos custos de implantação, da ordem de R\$ 20 a R\$ 40 per capita; • Produção do metano, um gás combustível de elevado teor calorífico; • Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses; • Tolerância a elevadas cargas orgânicas; • Aplicabilidade em pequena e grande escala; • Menor demanda de nutrientes. 	<ul style="list-style-type: none"> • As bactérias anaeróbias são suscetíveis à inibição por um grande número de compostos; • A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de sementeira adaptado; • Alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária; • A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser estudadas; • Possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis; • Possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável; • Remoção insatisfatória de nitrogênio, fósforo e patógenos.

Nos sistemas aeróbios, a degradação biológica ocorre em cerca de 40 a 50%, com a formação em consequência de CO_2 . Verifica-se uma enorme incorporação da matéria orgânica, como massa microbiana (cerca de 50 a 60%), que se constitui mais adiante no lodo excedente do sistema. O material orgânico não-convertido em gás carbônico, ou em biomassa, deixa o reator como material não degradado (5 a 10%) (CHERNICHARO, 2008).

Por outro lado, nos sistemas anaeróbios, a maior parte do material orgânico biodegradável presente no despejo é convertido em biogás (cerca de 70 a 90%), que é removido na fase líquida e deixa o reator na fase gasosa. Apenas uma pequena parcela do material orgânico se converte em biomassa microbiana (cerca de 5 a 15%), constituindo-se no lodo excedente ao sistema. Além da pequena quantidade de lodo produzida, o lodo excedente apresenta-se, via de regra, mais concentrado e com melhores características de desidratação. O material não convertido em biogás ou biomassa (10 a 30%), deixa o reator como material não biodegradado (CHERNICHARO, 2008). A Figura 7 apresenta um comparativo da conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios.

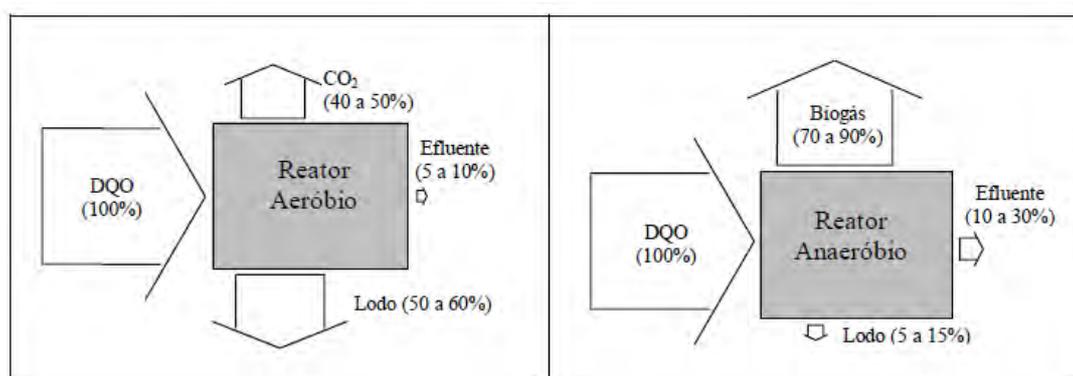


Figura 7 – Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios (CHERNICHARO, 2008)

2.2.2 Reatores UASB

O processo utilizado pelos reatores de manta de lodo, ou reatores UASB (do inglês Uptown Anaerobic Sludge Blanket), ou reatores RAFA (reatores anaeróbios de fluxo ascendente) visam a segregação de sólidos, líquidos e gases. É um reator de fluxo ascendente de efluentes sanitários através de um leito de lodo concentrado e de alta atividade, idealizado e bastante utilizado na Holanda. Os sólidos se apresentam variando desde muito densos, com partículas granulares de alto poder de sedimentação localizados próximos ao fundo (leito de lodo), até um lodo menos concentrado, que se encontra na parte superior (manta de lodo). (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.; GIORDANO, G, 2014)

A Figura 8 apresenta esquematicamente um reator em manta de lodo.



Figura 8 – Esquema simplificado do reator em manta de lodo - Adaptado de (CHERNICHARO, 2008)

A mistura do sistema é provocada pelo fluxo ascendente do esgoto e das bolhas de gás. No reator tem-se, então, em todas as zonas de reação descritas, a estabilização da matéria orgânica. A entrada do esgoto se dá pelo fundo, e a saída por meio de um decantador interno, instalado na parte superior. A sedimentação das partículas ocorre por um sistema de segregação de gases e sólidos existente abaixo do decantador, que as separa da manta de lodo, encaminhando-as para a câmara de digestão ao invés de enviá-las para fora do sistema. (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014)

Uma das características principais para o sucesso do funcionamento do reator é a formação de uma biomassa que tenha uma intensa atividade, podendo ser desenvolvida na forma de flocos ou mesmo granular. (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994)

Outra característica importante no processo é a obrigatoriedade da segregação de gases e sólidos, que ocorre na parte superior da unidade, através de dispositivo para este fim. A finalidade desta ação é a separação dos gases existentes na mistura líquida, criando-se no extremo superior do reator uma área favorável e destinada a sedimentação. (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014)

A ação dos microorganismos anaeróbios é utilizada para a digestão da matéria orgânica existente nos efluentes sanitários. De forma assemelhada ao que se processa na fossa séptica, o sistema conjugado, utiliza-se de uma única unidade em seu interior, onde se processam os fenômenos de decantação das águas e a digestão anaeróbia do substrato orgânico. (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994)

Além disso, nos reatores UASB há maior contato entre o substrato e a biomassa, o que permite aumentar a eficiência na remoção de DBO (de 80 a 90 %) em volumes e áreas menores se comparados com a fossa séptica (de 40 a 60%) (VERSIANI, 2005)

O tratamento preliminar, usual em todos os processos, também antecede o UASB, submetendo os efluentes sanitários ao gradeamento e à desarenação. Logo após, os efluentes sanitários são encaminhados à parte inferior do reator anaeróbico de fluxo ascendente, quando ocorre a distribuição homogênea no fundo da unidade, conforme mostrado esquematicamente na Figura 9.

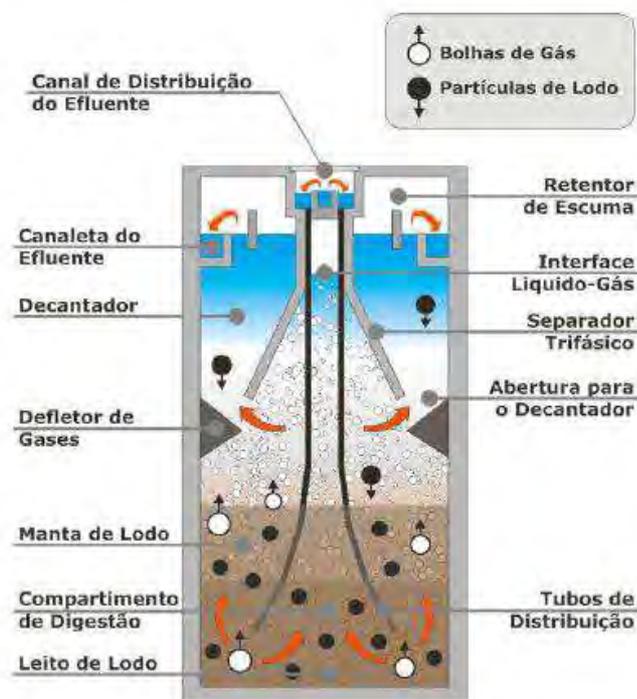


Figura 9 – Esquema de um processo de um Reator UASB (adaptado de CHERNICHARO, 2008)

2.2.3 Critérios e Parâmetros de Projeto de um Reator UASB

A geração de uma manta de lodo com elevada atividade biológica, bem como a manutenção de suas características, são de grande relevância para que se garanta uma excelente sedimentação do lodo gerado. Para tanto, algumas medidas de ordem conceitual e operacional devem ser realizadas. (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014)

A remoção eficiente de sólidos inorgânicos sedimentáveis (SIS), como areias, silte, argila, antes da descarga de esgoto em sistemas de tratamento é de vital importância para a estabilidade operacional. Sem a retenção previa de sólidos inorgânicos sedimentáveis, estes se

acumulariam e em pouco tempo ocupariam grande parte do seu volume. (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994)

A remoção de sólidos grosseiros sempre deve anteceder os reatores UASB, uma vez que a digestão anaeróbia só é viável após um pré-tratamento para reter sólidos grosseiros como panos, garrafas, fraldas, etc. (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994) A não inserção de pré-tratamento poderá acarretar entupimentos nas tubulações de distribuição dos vertedouros.

Os reatores UASB têm como principais parâmetros o controle dos tempos de detenção dos sólidos e hidráulico, as cargas volumétricas orgânicas e hidráulicas, bem como a velocidade ascensional. (VERSIANI, 2005) Além disso, deverá ocorrer uma avaliação do potencial de geração do biogás produzido pelo reator.

2.2.3.1 Carga Orgânica Volumétrica

É a quantidade de matéria orgânica (massa) aplicada diretamente no reator por unidade de volume. (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014)

$$COV = \frac{Q \times S}{V} \quad (2)$$

Onde:

- COV = carga orgânica volumétrica (kgDQO/m³.dia);
- Q = vazão (m³/dia);
- S = concentração do substrato afluente (kgDQO/m³);
- V = volume total do reator (m³);

Apesar de serem adotadas no projeto de estações de tratamento do tipo UASB cargas orgânicas inferiores a 15 kgDQO/m³.dia, cargas mais elevadas, da ordem de 45 kgDQO/m³.dia já foram aplicadas com sucesso. (CHERNICHARO, 2008)

O volume do reator pode ser calculado com a fórmula (3), desde que se tenha conhecimento dos seguintes parâmetros: vazão, concentração do esgoto afluente e uma carga orgânica volumétrica admitida. (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014)

$$V = \frac{Q \times S}{COV} \quad (3)$$

Para efluentes sanitários de baixa concentração, a carga orgânica é quase sempre inferior a 2,50 – 3,00 kgDQO/m³, tendo em vista o volume total do reator e a consideração de que o seu

dimensionamento é realizado pela carga hidráulica volumétrica. (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014)

2.2.3.2 Carga Hidráulica Volumétrica e Tempo de Detenção Hidráulico

A carga hidráulica volumétrica é tida como o volume de esgotos introduzidos diariamente no reator por unidade do seu volume (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014). Ela equivale ao inverso do tempo de detenção hidráulica, que vale:

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

Onde:

- TDH = tempo de detenção hidráulica (dias);
- V = volume do reator (m³);
- Q = vazão (m³/dia).

Assim, a carga hidráulica volumétrica (CHV), expressa em m³/m³.dia, é dada por:

$$CHV = \frac{Q}{V} \quad (5)$$

Ou, de outra forma:

$$CHV = \frac{1}{TDH} \quad (6)$$

Estudos e análises apontam que a carga hidráulica volumétrica não deve exceder o valor de 5,0 m³/m³.dia, correspondendo a um tempo de detenção hidráulico mínimo de 4,80 horas (CAMPOS, 1999)

Já valores superiores de carga hidráulica ou inferiores em tempo de detenção hidráulica, podem acarretar nos seguintes inconvenientes: (CHERNICHARO, 2008)

- Perda excessiva de biomassa do sistema;
- Redução do tempo de residência celular (idade do lodo) e conseqüente diminuição no grau de estabilização dos sólidos;
- Possibilidade de falha do sistema, uma vez que o tempo de permanência da biomassa no sistema pode ser inferior ao seu tempo de crescimento.

O tempo de detenção hidráulica (TDH) é relevante por ter relação direta com a velocidade do processo de digestão anaerobia, que está conexo com o tamanho da unidade de

tratamento. Relacionado a uma temperatura de 20°C, este parâmetro pode variar de 6 a 16 horas. (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014)

Para os efluentes com temperatura em torno de 20°C, adota-se para a vazão média um tempo de detenção em torno de 8 a 10 horas. Para a vazão máxima, deve-se adotar um tempo superior a 4 horas, sendo que para os picos de vazão máxima, o tempo não deve exceder de 4 a 6 horas. (CHERNICHARO, 2008)

Assim, conhecendo-se a vazão dos esgotos afluentes e o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), pode-se calcular o volume do reator:

$$V = Q \times TDH \quad (7)$$

2.2.3.3 Carga Biológica (Relação Alimento/Microorganismo)

A carga de lodo refere-se à quantidade, em massa, de matéria orgânica aplicada diariamente ao reator, por unidade de biomassa presente no mesmo (CHERNICHARO, 2008). A carga biológica, dessa forma, vale:

$$CB = \frac{Q \times S}{M} \quad (8)$$

Onde:

- CB = carga biológica (kgDQO/kgSVTD);
- Q = vazão (m³/dia);
- S = concentração do substrato afluente (kgDQO/m³);
- M = massa de micro-organismos presentes no reator (kgSVT/m³).

As cargas biológicas para início do processo de tratamento, em função das características dos efluentes a serem tratados, são indicadas pela bibliografia especializada como sendo da ordem de 0,05 a 0,15 kgDQO/kgSVT.dia. Considerando o desempenho do sistema, estas cargas devem ser elevadas gradativamente. Já durante o regime permanente e dependendo das características do esgoto, a carga biológica poderá alcançar valores em torno de 2,0 kgDQO/kgSVT.dia. (CHERNICHARO, 2008)

Na avaliação da massa de microorganismos presentes do reator (kgSVT/m³), discute-se quanto ao valor do volume a ser utilizado para o cálculo de taxa. Diferentemente do processo aeróbio, onde o volume considerado é o próprio reator onde ocorre o processo biológico; no processo anaeróbio, os valores de volume utilizados são totais, incluindo a zona de decantação. (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014)

2.2.3.4 Velocidade Ascensional do Fluxo

Calcula-se a velocidade de ascensão do fluxo pela razão entre a vazão afluyente e a seção transversal do reator, como a seguir. (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014)

$$v = \frac{Q}{A} \quad (9)$$

Em que:

- v = velocidade ascensional do fluxo ou velocidade ascensional (m/h);
- Q = vazão (m³/h);
- A = área da seção transversal do reator (m²/h).

Ademais, a relação entre a velocidade ascensional do fluxo, a altura do reator H (m) e o tempo de detenção hidráulica é dada por: (COSTA, E.S.; BARBOSA FILHO, O.;GIORDANO, G, 2014)

$$v = \frac{Q \times H}{V} = \frac{H}{TDH} \quad (10)$$

Sabe-se que o tipo de lodo existente e as cargas aplicadas interferem na velocidade máxima do reator. Para unidades com lodo do tipo floculento e com cargas orgânicas de até 5,0 a 6,0 kgDQO/m³.dia, tem-se as velocidades médias na faixa de 0,50 a 0,70 m/h, com tolerância de picos eventuais no período de 2 a 4 horas, com velocidades entre 1,5 e 2,0 m/h. Para lodos do tipo granular, as velocidades ascensionais podem atingir valores bem maiores, podendo atingir 10 m/h. (CHERNICHARO, 2008)

As velocidades ascensionais para projetos de reatores UASB estão apresentadas a seguir (CAMPOS, 1999):

- Vazão Média: de 0,5 a 0,7 m/h;
- Vazão Máxima: de 0,9 a 1,1 m/h;
- Picos Temporários: < 1,5 m/h.

Comparando-se esses dados com a Equação (10) e com os tempos de detenção típicos, observa-se que a profundidade dos reatores devem estar no intervalo de 3,00 m a 6,00 m, quando se trata efluentes domésticos com velocidades ascensionais e tempos de detenção hidráulica comuns em projetos, ou seja, velocidade inferior a 1,00 m/h de vazão média e tempo de

detenção hidráulica entre 6 e 10 horas, para temperaturas variando entre 20 e 26°C.(CAMPOS, 1999)

2.2.3.5 Avaliação da Produção de Biogás

O esquema de conversão de DQO total em um reator anaeróbio é dividido em (CHERNICHARO, 2008)

- DQO_{CH_4} (parcela de DQO convertida em gás metano);
- DQO_{cel} (parcela de DQO utilizada para crescimento celular);
- DQO_{ret} (parcela da DQO não convertida, mantida no lodo do reator);
- DQO_{efl} (parcela da DQO não convertida, perdida no efluente, como sólido em suspensão e substâncias orgânicas não-biodegradáveis);

A avaliação da produção de biogás pode ser feita a partir da estimativa da carga de DQO afluente ao reator que é convertida em gás metano (CHERNICHARO, 2008), conforme a equação a seguir:

$$DQO_{rem} = Q \times (S_o - S) \quad (11)$$

Onde:

- DQO_{rem} é a carga de DQO reduzida no reator (kgDQO/dia);
- Q é a vazão do esgoto afluente;
- S_o é a concentração de DQO afluente (kgDQO/m³);
- S é a concentração de DQO efluente (kgDQO/m³).

Sabe-se, ainda, que a DQO reduzida é constituída de outras 3 parcelas:

$$DQO_{rem} = DQO_{CH_4} + DQO_{cel} + DQO_{ret} \quad (12)$$

É difícil estimar as parcelas DQO_{cel} e DQO_{ret} , pois dependem de uma série de fatores relativos às características do despejo e ao sistema de tratamento. Com respeito ao balanço de DQO em reatores anaeróbios, podem ser destacados fatores que influenciam fortemente as rotas de conversão de DQO no sistema (CHERNICHARO, 2008):

- Concentração de despejo com relação aos sólidos biodegradáveis;
- Concentração relativa ao despejo, em termos de carboidratos, proteínas e lipídeos;
- Concentração relativa ao despejo, em termos de DQO particulada e DQO recirculante;

- Condições ambientais do reator (pH, alcalinidade, temperatura, etc).

Ao considerar tratamento de esgotos domésticos em regiões tropicais, pode-se avaliar conjuntamente as parcelas DQO_{cel} e DQO_{ret} pela produção de sólidos esperada no sistema, segundo as equações (CHERNICHARO, 2008):

$$P_{lodo} = DQO_{cel} + DQO_{ret} \quad (13)$$

Em que:

- P_{lodo} = produção de sólidos no sistema (kgDQO_{lodo}/dia);

$$P_{lodo} = Y_{obs} \times DQO_{apl} \quad (14)$$

Onde:

- Y_{obs} = coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (kgDQO_{lodo}/kgDQO_{apl});
- DQO_{apl} = carga de DQO aplicada ao sistema (kgDQO/dia);

$$DQO_{CH_4} = Q \times (S_o - S) - Y_{obs} \times Q \times S_o \quad (15)$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (16)$$

Em que:

- Q_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m³/dia);
- $K(t)$ = fator de correção para a temperatura operacional do reator (kgDQO/m³);

$$K(t) = \frac{P \times K}{R \times (273+T)} \quad (17)$$

Em que:

- P = pressão atmosférica;
- K = DQO correspondente a um mol de CH₄ (64g DQO/mol);
- R = constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.K);
- T = temperatura operacional do reator (°C);

Para o caso de tratamento de esgotos domésticos, os teores de metano estão na faixa de 70 a 80%. A partir da equação (16), ou seja, a produção de metano teórica se pode estimar a produção total de biogás (CHERNICHARO, 2008).

A seguir, apresentam-se os principais materiais usados em estações de tratamento de esgoto.

2.3 Materiais de Fabricação para Estações de Tratamento de Esgoto

2.3.1 Concreto Armado (CA)

Grande parte das unidades do sistema de tratamento de esgotos no Brasil e no mundo são fabricadas em concreto armado. No Brasil, o projeto estrutural de qualquer edificação em concreto é regido pelas prescrições da NBR 6118 – Projeto de Estruturas em Concreto – que estabelece os requisitos básicos exigíveis para estruturas em concreto simples, armado e protendido, de uma maneira genérica, não entrando no mérito do tipo de utilização final da edificação. (CALIXTO, J.; CHAVES, R., 2013). Para ambientes quimicamente agressivos e estações de tratamento de água e esgoto, é considerada a classe de agressividade IV para o concreto armado nas prescrições na NBR 6118, afirmando que:

- O risco de deterioração da estrutura é elevado (Tabela 6.1 da NBR 6118);
- A relação água/cimento em massa no concreto é menor ou igual a 0,45 (Tabela 7.1 da NBR 6118)
- O cobrimento nominal é de 45 mm para lajes e de 50 mm para vigas, pilares e elementos estruturais em contato com o solo.

Portanto, existe ainda uma grande lacuna, na normalização brasileira, já que não há uma norma específica para os projetos de estruturas de concreto para obras ditas hidráulicas e de saneamento. (CALIXTO, J.; CHAVES, R., 2013) Tal fato acaba por induzir alguns projetistas a adotarem valores não-apropriados a estes tipos de estruturas, como:

- Limite máximo de abertura de fissuras de flexão;
- Cobrimentos de armadura;
- Resistência mínima do concreto;
- Armadura de retração;
- Espessura mínima das paredes de reservatórios;
- Taxa mínima/máxima de armadura;

Vale ressaltar que o American Concrete Institute (ACI) já possui uma especificação própria para execução de obras de saneamento denominada “ACI 350 – Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures”. A justificativa para a sua existência é que, em relação à edifícios usuais, as estruturas de obras de saneamento estão sujeitas a carregamentos diferenciados, condições mais severas de exposição e critérios mais restritivos para a situação de serviço (CALIXTO, J.; CHAVES, R., 2013). Pode-se citar como exemplos: no capítulo 4 da ACI 350, requisitos de durabilidade específicos para o concreto utilizado em obras de saneamento; no capítulo 6 da ACI 350, regras específicas para tubos embutidos nas

estruturas de concreto, juntas de construção e em movimento; e no capítulo 9, requisitos específicos de resistência e de serviço de estruturas de concreto para saneamento.

Ademais, apesar da grande evolução na tecnologia de concreto armado aplicada às diferentes obras estruturais, os sistemas de tratamento de esgoto são cada vez mais agressivos e podem colocar em risco à operação e durabilidade das estruturas de saneamento. Hoje em dia a utilização de sistemas de impermeabilização e proteção se faz necessária, tanto em estruturas novas, para aumentar a sua durabilidade, como em estruturas existentes, pois a tecnologia de concreto empregada no passado não atende mais aos atuais requerimentos (PINTO, J., TAKAGI, E., 2014). Além disso, a durabilidade está associada ao mínimo de manutenção. Toda interrupção em uma unidade de operação é acompanhada de custos elevados e transtornos para os clientes. Portanto, a normalização específica para estruturas de concreto em saneamento não é só uma necessidade dos projetistas, mas também de (CALIXTO, J.; CHAVES, R., 2013):

- Construtores;
- Fornecedores de equipamentos;
- Fiscalização;
- Concessionárias e/ou proprietários dos empreendimentos;
- Operadores;
- Manutenção;
- Agencias de fomentos de recursos;

A vida útil de uma ETE em concreto armado é variável, e depende de inúmeros fatores intervenientes já citados. Segundo a ACI 350-01, que trata quando todas as condições relevantes de carga são consideradas, provendo condições adequadas de segurança e serviço, a expectativa de vida do concreto estrutural utilizado na fabricação de estações de tratamento de esgoto deve ser no mínimo de 50 a 60 anos. Alguns componentes da estrutura da ETE, como materiais de juntas, têm uma expectativa de vida mais curta, ou requerem manutenção ou substituição. Ademais, o tamanho dos elementos e a quantidade de reforço devem ser selecionados com base nos limites de largura de fissuras de serviço e nos limites de tensão para promover uma longa vida útil. No Brasil, segundo a ABNT NBR 15575, a Vida Útil de Projeto (VUP) mínima para estruturas de concreto deve ser igual ou superior a 50 anos, que é usualmente a vida útil utilizada para ETEs, devido à alta agressividade à qual o material está submetido.

2.3.2 Fibra de Vidro (PRFV)

O PRFV (Poliéster Reforçado em Fibra de Vidro) é uma das formas mais utilizadas de compósitos na construção civil. São compostos com uma fase contínua polimérica -

normalmente em resina Poliéster ou Epóxi, que são materiais termofixos, de alta resistência - reforçada com fibras de vidro, agregadas à resina após um processo de cura. O resultado é um plástico flexível, podendo ser feitos de moldes com as formas mais complexas, apresentando leveza e durabilidade (MESQUITA, 2008).

Como atrativo, as resinas e as fibras apresentam baixo peso. Sua resistência química permite a aplicação em ambientes agressivos, como é o caso de estações de tratamento de esgotos, além de tanques com produtos químicos, além de apresentarem boa resistência mecânica, variável com as diversas combinações que podem ser realizadas entre as resinas e o material de reforço (MESQUITA, 2008).

Para o PRFV poder ser utilizado como elemento estrutural, a resina utilizada na fabricação deve ser tecnicamente especificada para a situação de uso, resistir ao ataque de agentes agressivos, no caso os provenientes do esgoto sanitário e do seu tratamento. O procedimento ASTM D581 estabelece como devem ser feitos os testes de resistência das resinas poliéster (CORSAN, 2011).

Outras vantagens de estruturas feitas em compósitos de PRFV, se comparada com estruturas de Concreto Armado, é a sua maior resistência a ambientes corrosivos, como é o caso das estações de tratamento de esgotos, e do maior tempo de vida útil, em anos. Estima-se que estruturas em PRFV podem ter uma vida útil de até 80 anos (MESQUITA, 2008). As estruturas em PRFV também dispensam a necessidade de impermeabilização, frequente fonte de problemas em estruturas de concreto armado.

A Tabela 3 (JUSHI, 2012) apresenta o comparativo de resistência à tração e ruptura, de outros diferentes materiais utilizados na construção civil e na indústria. Os compósitos Vidro-S e Vidro-E são os principais compósitos em PRFV utilizados.

Tabela 3 – Comparativo de Resistência à Tração e Ruptura dos Materiais (JUSHI, 2012)

Material	Resistência à Tração (10^3 psi)	Resistência à Ruptura (%)
Alumínio	20	0,2
Aço	60	0,16
Fibra de Carbono	530	1,4
Aramida	525	2,8
Vidro-S	625	5
Vidro-E	500	4,8

Algumas desvantagens estão associadas ao PRFV, como a radiação solar e a inflamabilidade. Materiais compósitos constituídos de fibra de vidro e matriz estão sujeitos às falhas por delaminação, perda de aderência das fibras e matriz, ruptura da matriz ou ruptura das fibras. Existem alguns critérios que descrevem matematicamente em que condições um material compósito pode vir a falhar. Além disso, a exposição intensa à radiação solar, ao calor e maior inflamabilidade são fatores que aceleram esses processos de falha. (J.C.PIRES, B.F.OLIVEIRA, 2010)

3 Metodologia

Este trabalho terá como base dados coletados de duas estações de tratamento de esgoto doméstico existentes, utilizando tecnologias (lodos ativados com aeração prolongada em concreto armado e reator UASB seguido de biofilme em PRFV). Uma delas, ETE Atacado em concreto armado (ETE Atacado CA), foi construída em setembro de 2008 no município de Caucaia, estado do Ceará, e a outra com tratamento por reator UASB com biofiltro, foi construída em agosto de 2011 também na cidade de Caucaia, estado do Ceará, em PRFV (ETE Iparana PRFV). Em seguida, para efeito de comparação de custos, serão desenvolvidos outros dois projetos de ETE em paralelo (lodos ativados aeração prolongada em PRFV e reator UASB seguido de biofilme em concreto armado). Os valores de implantação, operação e manutenção de cada uma das quatro estações serão apresentados em valor presente líquido para efeito de comparação.

3.1 Estação de Tratamento de Efluentes Atacado em Concreto Armado (ETE Atacado CA)

A ETE Atacado em concreto armado (ETE Atacado CA) localiza-se na Cidade do Atacado, no município de Caucaia, região metropolitana de Fortaleza. A Cidade do Atacado é um projeto idealizado para ser um dos maiores e mais modernos polos atacadistas da América Latina, sendo preparado para dar todas as condições de crescimento e fortalecimento do comércio atacadista do estado do Ceará. O objetivo do empreendimento é abrir caminho para a instalação de Centros de Distribuição de empresas locais, nacionais e internacionais. A ETE Atacado CA, portanto, é utilizada para tratamento de efluentes domésticos provenientes dos centros de distribuição e do comércio atacadista instalado na Cidade do Atacado.

Os dados operacionais médios para a ETE Atacado CA são:

- Vazão: 5,0 m³/h;
- DBO de entrada: 300,00 mg/L;
- DBO de saída: 14,61 mg/L;
- Eficiência de remoção de DBO: 95,13%;
- Produção de lodo: 120 kg lodo/dia.

Os valores de vazão e DBO de entrada foram estimados como os de projeto da ETE, enquanto os de DBO de saída e produção de lodo foram medidos, utilizando-se uma média de 6 meses consecutivos de medição.

3.1.1 Equipamentos e Sistemas

A ETE Atacado CA é composta dos seguintes equipamentos/sistemas:

- 1) EEE – Estação elevatória de esgotos
Composição: Sistema de desarenação, calha parshall, grade e poço de sucção com 02 bombas submersíveis, barrilhete de manobra e sistema de troller elétrico (Talha);
- 2) Tanque de aeração com 02 aeradores flutuantes;
- 3) Tanque decantador com 01 bomba de retorno e remoção de lodo;
- 4) Tanque de recalque de lodo;
- 5) Leito de secagem;
- 6) Tanque de contato com bomba dosadora;
- 7) Tanques de efluente tratado (02 unidades);
- 8) Sistema de recalque de efluente tratado com 01 bomba de recalque;
- 9) Aquário artesanal;
- 10) Casa de comando com quadro CCM (Centro de Comando de Motores).

Nas Figuras 10 a 13 a seguir, são detalhadas algumas estruturas da ETE Atacado CA.



Figura 10 – Estação elevatória de esgotos
ETE Atacado CA



Figura 11 – Tanque de aeração com aerador superficial ETE Atacado CA



Figura 12 – Decantador secundário
ETE Atacado CA



Figura 13 – Quadro CCM ETE Atacado
CA

O fluxograma a seguir (Figura 14) sintetiza os processos existentes na ETE Atacado CA.

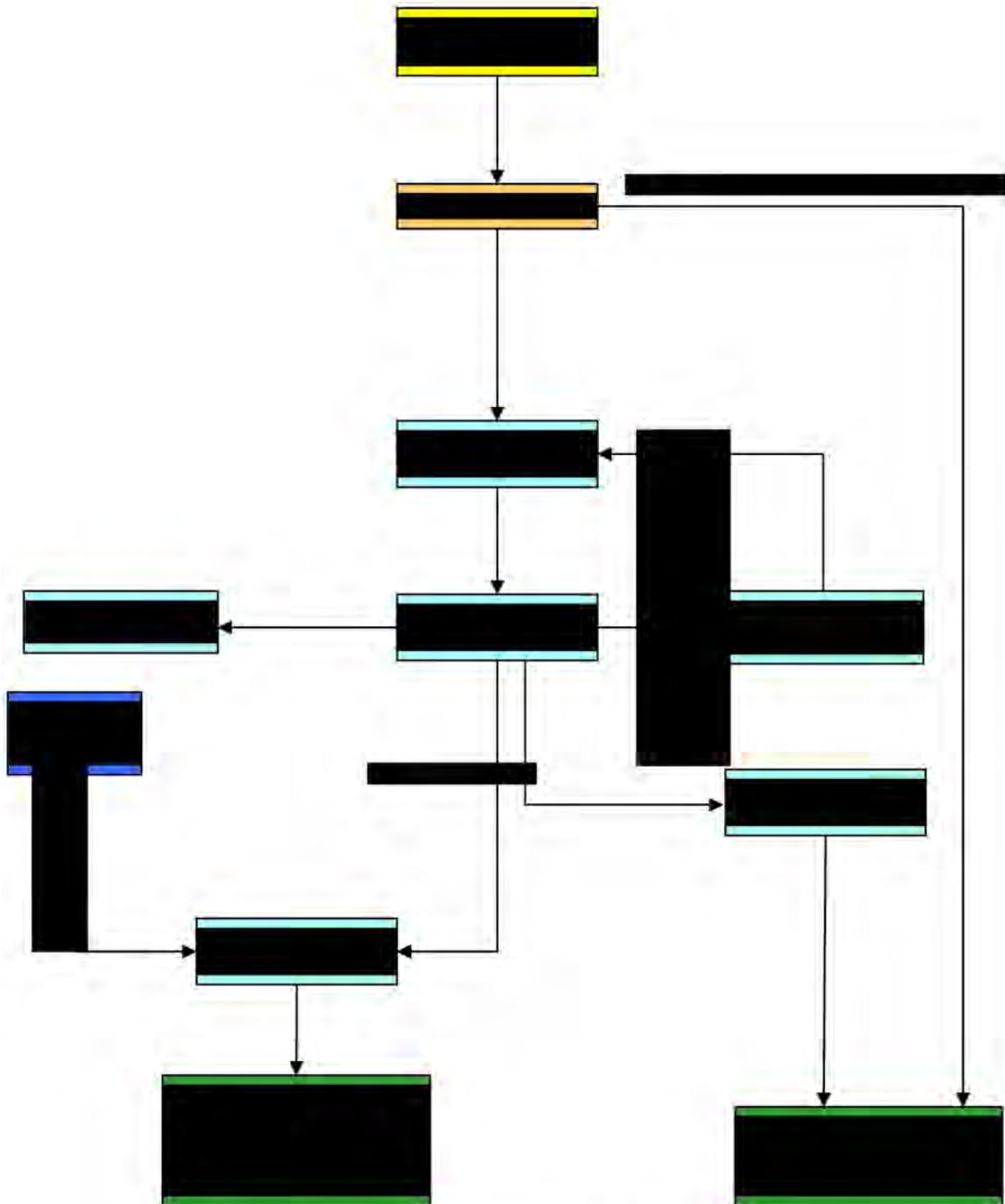


Figura 14 – Fluxograma ETE Atacado CA

3.2 Estação de Tratamento de Efluentes Iparana em PRFV (ETE Iparana PRFV)

A ETE Iparana PRFV está localizada em um Hotel Ecológico na Praia de Iparana, a 14 km do Centro de Fortaleza/CE. É um empreendimento que oferece 150 acomodações, entre luxuosos apartamentos, chalés aconchegantes e casas acolhedoras, sendo ainda um espaço para eventos – com ou sem hospedagem – no salão multifuncional, no auditório, nas salas de vídeo

ou de reuniões, com todos os espaços climatizados e equipamentos necessários. A ETE Iparana PRFV, desta forma, é utilizada para tratamento de efluentes domésticos das instalações do Hotel Ecológico.

Os dados operacionais médios para a ETE Iparana PRFV são:

- Vazão: 6,0 m³/h;
- DBO de entrada: 300,00 mg/L
- DBO de saída: 39,33 mg/L
- Eficiência na remoção de DBO: 86,89 %
- Produção de lodo: 25 kg lodo/dia

Os valores de vazão e DBO de entrada foram estimados como os de projeto da ETE, enquanto os de DBO de saída e produção de lodo foram medidos, utilizando-se uma média de 6 meses consecutivos de medição.

3.2.1 Equipamentos e Sistemas

O sistema utilizado para tratamento do esgoto proveniente do Hotel Ecológico é do tipo Reator UASB seguido de pós-tratamento com biofilme. Resumidamente, o Sistema de tratamento será composto por:

- 1) Tratamento preliminar: caixa de areia, gradeamento e drenagem de materiais grosseiros;
- 2) Estação elevatória de esgoto bruto;
- 3) Caixa elevada de drenagem de areia;
- 4) Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente do tipo Manta de Lodo (UASB);
- 5) Filtro Submerso Aerado com decantador lamelar incorporado e retorno de lodo;
- 6) Tanque de armazenamento e adensamento de lodo;
- 7) Filtro prensa de desague de lodo;
- 8) Tanque de contato para desinfecção química (cloração);
- 9) Sistema de desinfecção química (cloração).

As Figuras 15 e 16 apresentam as estruturas físicas presentes na ETE Iparana PRFV.



Figura 15 – Reator UASB ETE Iparana
PRFV



Figura 16 – Tanque de armazenamento de
lodo ETE Iparana PRFV

O fluxograma (Figura 17) a seguir sintetiza os processos de tratamento presentes na ETE Iparana PRFV.

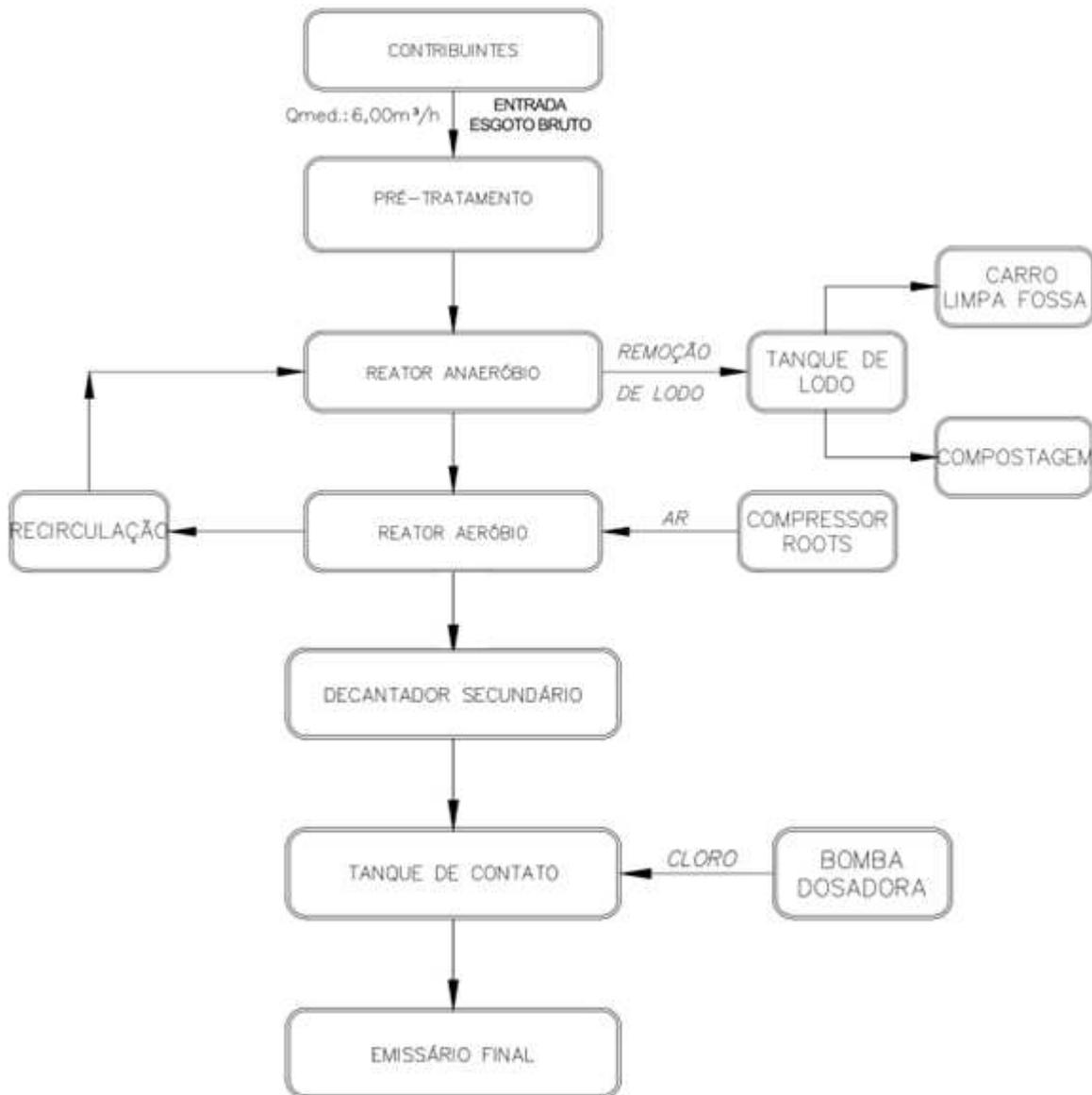


Figura 17 – Fluxograma ETE Iparana PRFV

3.3 Custos das ETEs

Para efeito de comparação entre custos das ETEs, a planilha de cálculo utilizada considerou, para as quatro estações, os seguintes custos:

- Custo de Implantação (CAPEX);
- Custo de Operação (OPEX);
- Custo de Dosagem;
- Custo de Energia Elétrica.

Os custos para as ETEs Atacado CA e Iparana PRFV são conhecidos a partir do projeto original e de relatórios mensais de revisão. Para a ETE Atacado PRFV, considerou-se o mesmo projeto da ETE Atacado CA com a fabricação dos tanques em PRFV, e para a ETE Iparana CA

considerou-se um projeto de uma ETE para uma grande vazão (de 360 m³/hora), e parametrizou-se o custo para uma ETE de vazão 6,0 m³/hora, semelhante a ETE Iparana PRFV.

Será retornado, para efeito de comparação entre elas, o Valor Presente Líquido (VPL), a fim de verificar o retorno futuro de cada investimento.

3.3.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O método do valor presente líquido (VPL) tem o objetivo de determinar um valor em um instante inicial, a partir de um fluxo de caixa formado a partir de uma série de receitas e despesas (HIRSCHFELD, 2000). Para um período determinado, considerando uma taxa anual de juros, o valor presente líquido (VPL) é dado por: (VON SPERLING, 2007):

$$VPLA = A \frac{(i+1)^n - 1}{i(i+1)^n} \quad (18)$$

Em que:

- VPLA é o valor presente líquido anual em um fluxo de caixa (R\$);
- A é o custo anual considerado para o empreendimento (R\$/ano)
- n é número de períodos envolvidos em cada elemento da série de receitas e dispêndios do fluxo de caixa (no caso, o número de anos da série);
- i: taxa de juros comparativa anual, em %;

Para o cálculo do valor presente líquido (VPL), serão somados os custos de implantação (I) com o valor Presente líquido anual (VPLA).

$$VPL = I + VPLA \quad (19)$$

O empreendimento que retornar o menor VPL é o mais recomendado (VON SPERLING, 2007), pois é aquele que minimiza custos de implantação e anuais de operação e manutenção, dosagem e energia elétrica.

4 Resultados e Discussões

A seguir apresentam-se os custos para as quatro estações de tratamento de efluentes existentes (ETE Atacado CA, ETE Iparana PRFV, ETE Atacado PRFV, ETE Iparana CA). Será dividido o valor de cada um dos custos pela vazão média, em m³/hora, de cada uma das estações.

4.1 Custos ETE Atacado CA

Como já supracitado, serão considerados para efeito de custos: custo de implantação (CAPEX), custo de operação (OPEX), custo de dosagem e custo de energia elétrica.

4.1.1 Custos de Implantação (CAPEX) ETE Atacado CA

A Tabela 4 apresenta os custos de implantação para a ETE Atacado CA.

Tabela 4 – Custos de implantação (CAPEX) ETE Atacado CA

Código		Quant.	Preço unit	Preço total
1	MATERIAIS/EQUIPAMENTOS			
1.1	AERADORES FLUTUANTES 7,5 CV	2,00	16.000,00	32.000,00
1.2	BOMBAS ELEVATÓRIA 1,5CV	2,00	3.450,00	6.900,00
1.3	PEDESTAL BOMBAS EM FOfo	2,00	1.600,00	3.200,00
1.4	TUBULAÇÕES FoFo	1,00	35.000,00	35.000,00
1.5	BOMBAS DE RECALQUE 3CV	2,00	2.600,00	5.200,00
1.6	BOMBAS DE RECIRCULAÇÃO	2,00	3.650,00	7.300,00
1.7	VÁLVULAS E ACESSÓRIOS	1,00	11.450,00	11.450,00
1.8	KIT DOSAGEM DE CLORO KPDS	1,00	2.450,00	2.450,00
1.9	QUADRO DE COMANDO E AUTOMAÇÃO	1,00	25.000,00	25.000,00
1.10	ACESSÓRIOS EM FIBRA CALHA E CONTENTORES	1,00	4.385,00	4.385,00
	TOTAL DO ITEM 1			132.885,00
2	SERVIÇOS			
2.1	CONSTRUÇÃO TANQUES E ELEVATÓRIA	1,00	230.000,00	230.000,00
2.2	CONSTRUÇÃO POÇOS E CAIXAS DE PASSAGEM	1,00	19.350,00	19.350,00
2.3	MONTAGEM EQUIPAMENTOS	1,00	29.650,00	29.650,00
2.4	CONTRUÇÃO LEITO DE SECAGEM	1,00	16.980,00	16.980,00
2.5	CONSTRUÇÃO CASA DE COMANDO E INFRA ESTRUTURA	1,00	38.750,00	38.750,00
	TOTAL DO ITEM 2			334.730,00
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	TOTAL GERAL	-	-	467.615,00
-	Vazão (m³/hora)	-	-	5,0
-	TOTAL GERAL POR m³/hora			93.523,00

Vale salientar, pela Tabela 4, que o custo total de implantação da ETE Atacado CA é de R\$ 467.615,00, sendo R\$ 132.885,00 custos de materiais e equipamentos e R\$ 334.730,00 custos de serviços para implantação.

Dividindo o custo total de implantação pela vazão de 5,0 m³/hora, obtém-se um custo total de implantação em m³/hora de R\$ 93.523,00.

4.1.2 Custos Mensais de Operação (OPEX) ETE Atacado CA

A despeito dos custos mensais de operação (OPEX), a Tabela 5 apresenta detalhadamente os custos, referentes a serviços de operação e manutenção de máquinas.

Tabela 5 – Custos de operação (OPEX) ETE Atacado CA

Código		Quant.	Preço unit	Preço total
1	SERVIÇOS			
1.1	OPERADORES	2,00	2.350,00	4.700,00
1.2	SERVIÇOS REMOÇÃO DE LODOS	1,00	2.500,00	2.500,00
1.3	INSUMOS E EPI	2,00	685,00	1.370,00
	TOTAL DO ITEM 1			8.570,00
2	MANUTENÇÕES			
2.1	BOMBEIRO E ELETRICISTA	1,00	850,00	850,00
2.2	PEÇAS DE REPOSIÇÃO(VERBA)	1,00	1.650,00	1.650,00
	TOTAL DO ITEM 2			2.500,00
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	TOTAL GERAL	-	-	11.070,00
-	Vazão (m³/hora)			5,0
-	TOTAL GERAL POR m³/hora			2.214,00

O custo mensal de operação (OPEX) é de R\$ 11.070,00, sendo R\$ 8.570,00 referentes a serviços de operação e R\$ 2.500,00 referentes a manutenções.

Considerando a vazão média da ETE de 5,0 m³/hora, o custo mensal de operação por m³/hora é de R\$ 2.214,00

4.1.3 Custos Mensais de Dosagem ETE Atacado CA

A Tabela 6 é referente aos custos mensais de dosagem da ETE Atacado CA.

Tabela 6 – Custos mensais de dosagem ETE Atacado CA

PRODUTO	CONC. (%)	DOSAG. (PPM)	Q(m ³ /h)	q (L/h)	REGIME TRABALHO		CUSTO PRODUTO – mensal	
					(H/DIA)	(DIA/MÊS)	(R\$/L ou kg)	TOTAL(R\$)
COLORO	10	7	5	4,20	10	30	R\$ 10,00	R\$ 1.050,00
TOTAL(R\$)								R\$ 1.050,00
VAZÃO (em m ³ /hora)								5,0
TOTAL POR m ³ /hora								R\$ 210,00

O custo mensal referente à dosagem se refere à dosagem de cloro, que é de R\$ 1.050,00 por mês. Considerando uma vazão média de 5,0 m³/hora, obtemos um custo de dosagem por R\$ 210,00 por m³/hora.

4.1.4 Custos Mensais de Energia Elétrica ETE Atacado CA

A seguir, apresenta-se na Tabela 7 o custo mensal referente à energia elétrica. O custo do kWh de energia utilizado para efeito de cálculo foi de R\$ 0,77.

Tabela 7 – Custo mensal de energia elétrica ETE Atacado CA

PRODUTO	CONSUMO KWh/h	REGIME TRABALHO		TOTAL(R\$)
		(h/DIA)	(DIA/MÊS)	
BOMBA ELEVATÓRIA DE ESGOTO BRUTO-PILOTO + RESERVA	4,00	6	30	R\$ 554,40
BOMBA ELEVATÓRIA DE RECIRCULAÇÃO PILOTO+ RESERVA	4,00	6	30	R\$ 554,40
BOMBA DE 3CV - RECALQUE - EFLUENTE TRATADO	8,00	6	30	R\$ 1.108,80
AERADORES FLUTUANTES	20,00	12	30	R\$ 5.544,00
DOSADORA 37W = 0,037W	0,10	6	30	R\$ 14,14
TOTAL(R\$)				R\$ 7.775,74
VAZÃO (em m ³ /hora)				5,0
TOTAL(R\$) POR m ³ /hora				R\$ 1.555,15

Conforme apresentado na Tabela 7, o custo mensal referente ao consumo de energia elétrica é igual a R\$ 7.775,74. Dividindo pela vazão de 5,0 m³/hora de esgoto tratado, obtemos um custo por m³/hora de R\$ 1.555,15.

4.2 Custos ETE Iparana PRFV

A seguir, apresentam-se os mesmos custos para a ETE Iparana PRFV.

4.2.1 Custos de Implantação (CAPEX) ETE Iparana PRFV

A Tabela 8 apresenta os custos de implantação (CAPEX) para a ETE Iparana PRFV

Tabela 8 – Custos de implantação (CAPEX) ETE Iparana PRFV

Código		Quant.	Preço unit	Preço total
1	MATERIAIS/EQUIPAMENTOS			
1.1	REATOR ANAERÓBIO UASB	2,00	80.000,00	160.000,00
1.2	REATOR AERÓBIO BFSA	2,00	75.000,00	150.000,00
1.3	COMPRESSORES ROOTS 5 CV	2,00	16.000,00	32.000,00
1.4	BOMBAS ELEVATÓRIA 1,5CV	2,00	3.450,00	6.900,00
1.5	BOMBAS DE RECALQUE 3CV	1,00	2.600,00	2.600,00
1.6	CAIXA DE AREIA ELEVADA	1,00	6.500,00	6.500,00
1.7	TANQUE DE CONTATO	1,00	2.600,00	2.600,00
1.8	FILTRO PRENSA	1,00	8.750,00	8.750,00
1.9	Bomba dosadora eletromagnética – 3L/h 10 bar EX0310	1,00	900,00	900,00
1.10	QUADRO DE COMANDO E AUTOMAÇÃO	1,00	16.500,00	16.500,00
1.11	SISTEMA DE RETENÇÃO DE BIOMÍDIA EM AÇO INOX	1,00	1.350,00	1.350,00
1.12	FILTRO DE POLIMENTOP EFLUENTE	1,00	8.750,00	8.750,00
	TOTAL DO ITEM 1			396.850,00
2	SERVIÇOS			
2.1	CONSTRUÇÃO BASE DE ASSENTAMENTO ETE	1,00	12.650,00	12.650,00
2.2	CONSTRUÇÃO POÇOS E CAIXAS DE PASSAGEM	1,00	8.500,00	8.500,00
2.3	MONTAGEM EQUIPAMENTOS	1,00	15.600,00	15.600,00
2.4	CONSTRUÇÃO MURO	1,00	12.000,00	12.000,00
	TOTAL DO ITEM 2			48.750,00
-	-	-	-	-
-	TOTAL GERAL	-	-	445.600,00
-	Vazão (m³/hora)			6,0
-	TOTAL GERAL POR m³/hora			74.266,67

Vale ressaltar que, pela tabela 8, que o custo total de implantação da ETE Iparana PRFV é de R\$ 445.600,00, sendo R\$ 396.850,00 custos de materiais e equipamentos e R\$ 48.750,00 custos de serviços para implantação.

Dividindo-se o custo total de implantação pela vazão de 6,0 m³/hora, obtém-se um custo total de implantação em m³/hora de R\$ 74.266,67

4.2.2 Custos Mensais de Operação (OPEX) ETE Iparana PRFV

Com relação aos custos mensais de operação (OPEX), a Tabela 9 apresenta detalhadamente os custos, referentes a serviços de operação e manutenção de máquinas.

Tabela 9 – Custos de operação (OPEX) ETE Iparana PRFV

Código		Quant.	Preço unit	Preço total
1	SERVIÇOS			
1.1	OPERADORES	2,00	2.350,00	4.700,00
1.2	SERVIÇOS REMOÇÃO DE LODOS	1,00	1.800,00	1.800,00
1.3	INSUMOS E EPI	1,00	685,00	685,00
	TOTAL DO ITEM 1			7.185,00
2	MANUTENÇÕES			
2.1	BOMBEIRO E ELETRICISTA	1,00	600,00	600,00
2.2	PEÇAS DE REPOSIÇÃO(VERBA)	1,00	1.300,00	1.300,00
	TOTAL DO ITEM 2			1.900,00
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	TOTAL GERAL	-	-	9.085,00
-	Vazão (m³/hora)			5,0
-	TOTAL GERAL POR m³/hora			1.514,17

O custo mensal de operação (OPEX) é de R\$ 9.085,00, sendo R\$ 7.185,00 referentes a serviços de operação e R\$ 1.900,00 referentes a manutenções.

Considerando a vazão média de 6,0 m³/hora de esgoto tratado, o custo mensal de operação por m³/hora é de R\$ 1.514,17.

4.2.3 Custos Mensais de Dosagem ETE Iparana PRFV

A Tabela 10 refere-se aos custos mensais de dosagem para a ETE Iparana PRFV.

Tabela 10 – Custos mensais de dosagem ETE Iparana PRFV

PRODUTO	CONC. (%)	DOSAG. (PPM)	Q(m³/h)	q (L/h)	REGIME TRABALHO		CUSTO PRODUTO – mensal	
					(H/DIA)	(DIA/MÊS)	(R\$/L ou kg)	TOTAL(R\$)
COLORO	10	7	6	4,20	10	30	R\$ 10,00	R\$ 1.260,00
					TOTAL(R\$)			R\$ 1.260,00
					VAZÃO (em m³/hora)			6,0
					TOTAL POR m³/hora			R\$ 210,00

Os custos mensais de dosagem para a estação Iparana PRFV é igual a R\$ 1.260,00. Dividindo-se o custo mensal de dosagem pela vazão média de 6,0 m³/hora, obtém-se um custo mensal de dosagem por m³/hora igual a R\$ 210,00.

4.2.4 Custos de Energia Elétrica ETE Iparana PRFV

Apresenta-se, a seguir, na Tabela 11, o custo mensal referente à energia elétrica. O custo do kWh de energia utilizado para efeito de cálculo foi de R\$ 0,77.

Tabela 11 – Custo mensal de energia elétrica ETE Iparana PRFV

PRODUTO	QUANT. UNID	CONSUMO KWh/h	REGIME TRABALHO		TOTAL(R\$)
			(h/DIA)	(DIA/MÊS)	
BOMBA ELEVATÓRIA DE ESGOTO BRUTO- PILOTO + RESERVA	2	4,00	6	30	R\$ 554,40
BOMBA DE 2CV - RECALQUE - EFLUENTE TRATADO	1	2,67	6	30	R\$ 369,60
COMPRESSORES ROOTS	2	13,33	12	30	R\$ 3.696,00
DOSADORA 37W = 0,037W	2	0,10	6	30	R\$ 14,14
		TOTAL(R\$)			R\$ 4.634,14
		VAZÃO (em m ³ /hora)			6,0
		TOTAL(R\$) POR m ³ /hora			R\$ 772,36

O custo mensal de energia elétrica da ETE Iparana PRFV é, portanto, de R\$ 4.634,14. Dividindo-se pela vazão média de 6,0 m³/hora, obtém-se um custo mensal de energia elétrica por m³/hora de R\$ 772,36.

4.3 Custos ETE Atacado PRFV

A seguir, trazemos os custos para a ETE Atacado PRFV, feita na tecnologia lodos ativados com aeração prolongada e em fibra de vidro (PRFV).

4.3.1 Custos de Implantação (CAPEX) ETE Atacado PRFV

Na Tabela 12 apresentam-se os custos para a ETE Atacado PRFV.

Tabela 12 – Custos de implantação (CAPEX) ETE Atacado PRFV

Código		Quant.	Preço unit	Preço total
1	MATERIAIS/EQUIPAMENTOS			
1.1	AERADORES FLUTUANTES 7,5 CV	2,00	16.000,00	32.000,00
1.2	BOMBAS ELEVATÓRIA 1,5CV	2,00	3.450,00	6.900,00
1.3	PEDESTAL BOMBAS EM FOfo	2,00	1.600,00	3.200,00
1.4	TUBULAÇÕES FoFo	1,00	35.000,00	35.000,00
1.5	BOMBAS DE RECALQUE 3CV	2,00	2.600,00	5.200,00
1.6	BOMBAS DE RECIRCULAÇÃO	2,00	3.650,00	7.300,00
1.7	VÁLVULAS E ACESSÓRIOS	1,00	11.450,00	11.450,00
1.8	KIT DOSAGEM DE CLORO KPDS	1,00	2.450,00	2.450,00
1.9	QUADRO DE COMANDO E AUTOMAÇÃO	1,00	25.000,00	25.000,00
1.10	ACESSÓRIOS EM FIBRA CALHA E CONTENTORES	1,00	4.385,00	4.385,00
	TOTAL DO ITEM 1			132.885,00
2	SERVIÇOS			
2.1	CONSTRUÇÃO TANQUES E ELEVATÓRIA	1,00	281.500,00	281.500,00
2.2	CONSTRUÇÃO POÇOS E CAIXAS DE PASSAGEM	1,00	19.350,00	19.350,00
2.3	MONTAGEM EQUIPAMENTOS	1,00	29.650,00	29.650,00
2.4	CONTRUÇÃO LEITO DE SECAGEM	1,00	16.980,00	16.980,00
2.5	CONSTRUÇÃO CASA DE COMANDO E INFRA ESTRUTURA	1,00	38.750,00	38.750,00
	TOTAL DO ITEM 2			386.230,00
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
	TOTAL GERAL			519.115,00
-	Vazão (m³/hora)			5,0
-	TOTAL GERAL POR m³/hora			103.823,00

O aumento de custo na implantação da ETE Atacado PRFV, se comparada com a ETE Atacado CA, é de 11% (de R\$ 93.523,00 para R\$ 103.823,00), que se dá pelas condições do terreno e maior custo de fabricação, portanto, do tanque de fibra.

Como a tecnologia e a vazão adotadas, os outros custos (de operação, de dosagem e de energia elétrica) permanecem os mesmos de comparados com a ETE Atacado CA.

4.3.2 Custos Mensais de Operação (OPEX) ETE Atacado PRFV

A Tabela 13 apresenta detalhadamente os custos, referentes a serviços de operação e manutenção de máquinas.

Tabela 13 – Custos mensais de operação (OPEX) ETE Atacado PRFV

Código		Quant.	Preço unit	Preço total
1	SERVIÇOS			
1.1	OPERADORES	2,00	2.350,00	4.700,00
1.2	SERVIÇOS REMOÇÃO DE LODOS	1,00	2.500,00	2.500,00
1.3	INSUMOS E EPI	2,00	685,00	1.370,00
	TOTAL DO ITEM 1			8.570,00
2	MANUTENÇÕES			
2.1	BOMBEIRO E ELETRICISTA	1,00	850,00	850,00
2.2	PEÇAS DE REPOSIÇÃO(VERBA)	1,00	1.650,00	1.650,00
	TOTAL DO ITEM 2			2.500,00
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
-	TOTAL GERAL	-	-	11.070,00
-	Vazão (m³/hora)			5,0
-	TOTAL GERAL POR m³/hora			2.214,00

O Custo mensal de operação (OPEX) é de R\$ 11.070,00, sendo R\$ 8.570,00 referentes a serviços de operação e R\$ 2.500,00 referentes a manutenções.

Considerando a vazão média da ETE de 5,0 m³/hora, o custo mensal de operação por m³/hora é de R\$ 2.214,00.

4.3.3 Custos Mensais de Dosagem ETE Atacado PRFV

A seguir, na Tabela 14 referente aos custos mensais de dosagem da ETE Atacado PRFV.

Tabela 14 – Custos mensais de dosagem ETE Atacado PRFV

PRODUTO	CONC. (%)	DOSAG. (PPM)	Q(m³/h)	q (L/h)	REGIME TRABALHO		CUSTO PRODUTO – mensal	
					(H/DIA)	(DIA/MÊS)	(R\$/L ou kg)	TOTAL(R\$)
COLORO	10	7	5	4,20	10	30	R\$ 10,00	R\$ 1.050,00
								TOTAL(R\$)
								R\$ 1.050,00
								VAZÃO (em m³/hora)
								5,0
								TOTAL POR m³/hora
								R\$ 210,00

O custo mensal referente a dosagem é de R\$ 1.050,00 por mês. Considerando uma vazão média de 5,0 m³/hora, obtemos um custo de dosagem por R\$ 210,00 por m³/hora.

4.3.4 Custos Mensais de Energia Elétrica ETE Atacado PRFV

Apresenta-se, na Tabela 15, o custo mensal referente à energia elétrica. O custo do kWh de energia utilizado para efeito de cálculo foi de R\$ 0,77.

Tabela 15 – Custo mensal de energia elétrica ETE Atacado PRFV

PRODUTO	CONSUMO KWh/h	REGIME TRABALHO		TOTAL(R\$)
		(h/DIA)	(DIA/MÊS)	
BOMBA ELEVATÓRIA DE ESGOTO BRUTO-PILOTO + RESERVA	4,00	6	30	R\$ 554,40
BOMBA ELEVATÓRIA DE RECIRCULAÇÃO PILOTO+ RESERVA	4,00	6	30	R\$ 554,40
BOMBA DE 3CV - RECALQUE - EFLUENTE TRATADO	8,00	6	30	R\$ 1.108,80
AERADORES FLUTUANTES	20,00	12	30	R\$ 5.544,00
DOSADORA 37W = 0,037W	0,10	6	30	R\$ 14,14
	TOTAL(R\$)			R\$ 7.775,74
	VAZÃO (em m ³ /hora)			5,0
	TOTAL(R\$) POR m ³ /hora			R\$ 1.555,15

Conforme apresentado na Tabela 7, o custo mensal referente ao consumo de energia elétrica é igual a R\$ 7.775,74. Dividindo pela vazão de 5,0 m³/hora de esgoto tratado, obtemos um custo por m³/hora de R\$ 1.555,15.

4.4 Custos ETE Iparana CA

Como a ETE Iparana é uma ETE de pequeno porte, de vazão de tratamento de efluentes de 6 m³/hora, é inviável a construção de uma ETE do tipo reator UASB em concreto armado nessas condições. Para tanto, determinou-se o custo de uma estação reator UASB e concreto armado, com vazão de 360 m³/hora (ou 100 L/s), já que são comuns estações desse tipo (GEHLING, 2010), e parametrizou-se para a vazão de 6,0 m³/hora.

Tem-se a seguir, os custos parametrizados para a ETE Iparana CA.

4.4.1 Custos de Implantação (CAPEX) ETE Iparana CA

A seguir, na Tabela 16, apresentam-se os custos parametrizados para a ETE Iparana CA.

Tabela 16 – Custos de implantação (CAPEX) ETE Iparana CA

Código		Preço total
1	MATERIAIS/EQUIPAMENTOS	
1.1	REATOR ANAERÓBIO UASB	192.000,00
1.2	REATOR AERÓBIO BFSA	180.000,00
1.3	COMPRESSORES ROOTS 5 CV	38.400,00
1.4	BOMBAS ELEVATÓRIA 1,5CV	8.280,00
1.5	BOMBAS DE RECALQUE 3CV	3.120,00
1.6	CAIXA DE AREIA ELEVADA	7.800,00
1.7	TANQUE DE CONTATO	3.120,00
1.8	FILTRO PRENSA	10.500,00
1.9	Bomba dosadora eletromagnética – 3L/h 10 bar EX0310	1080,00
1.10	QUADRO DE COMANDO E AUTOMAÇÃO	19.800,00
1.11	SISTEMA DE RETENÇÃO DE BIOMÍDIA EM AÇO INOX	1.620,00
1.12	FILTRO DE POLIMENTOP EFLUENTE	10.500,00
	TOTAL DO ITEM 1	476.220,00
2	SERVIÇOS	
2.1	CONSTRUÇÃO BASE DE ASSENTAMENTO ETE	15.180,00
2.2	CONSTRUÇÃO POÇOS E CAIXAS DE PASSAGEM	10.200,00
2.3	MONTAGEM EQUIPAMENTOS	18.720,00
2.4	CONSTRUÇÃO MURO	14.400,00
	TOTAL DO ITEM 2	58.500,00
-	-	-
-	TOTAL GERAL	534.720,00
	Vazão (m³/hora)	6,0
	TOTAL GERAL POR m³/hora	89.120,00

Vale ressaltar que o custo total de implantação para a ETE SESC Iparana CA é de R\$ 534.720,00, sendo aproximadamente 20% maior que para a mesma ETE em fibra de vidro (PRFV), o que se explica pela dificuldade em criar formas para fabricação dos tanques do reator UASB em concreto armado, se comparadas com PRFV.

O custo por m³/hora de esgoto tratado é de R\$ 89.120,00.

4.4.2 Custos Mensais de Operação (OPEX) ETE Iparana CA

A Tabela 17 apresenta os custos mensais parametrizados de operação (OPEX) para a ETE Iparana CA.

Tabela 17 – Custos de Operação (OPEX) ETE Iparana CA

Código		Preço total
1	SERVIÇOS	
1.1	OPERADORES	5.640,00
1.2	SERVIÇOS REMOÇÃO DE LODOS	2.160,00
1.3	INSUMOS E EPI	822,00
	TOTAL DO ITEM 1	8.622,00
2	MANUTENÇÕES	
2.1	BOMBEIRO E ELETRICISTA	720,00
2.2	PEÇAS DE REPOSIÇÃO(VERBA)	1560,00
	TOTAL DO ITEM 2	2.280,00
-	-	-
-	-	-
-	TOTAL GERAL	10.902,00
	Vazão (m³/hora)	6,0
	TOTAL GERAL (por m³/hora)	1.817,00

Vale ressaltar que, face a dificuldade construtiva de ETES do tipo reator UASB em Concreto Armado, o custo mensal de operação da ETE Iparana CA é de R\$ 10.902,00, 20% mais alto se comparada com a mesma ETE fabricada em Fibra de Vidro (PRFV). O custo de operação por m³/hora para a ETE é de R\$ 1.817,00.

4.4.3 Custos Mensais de Dosagem ETE Iparana CA

A seguir, na Tabela 18, apresentam-se os custos mensais parametrizados de dosagem da ETE Iparana CA.

Tabela 18 – Custos mensais de dosagem ETE Iparana CA

PRODUTO	CONC. (%)	DOSAG. (PPM)	Q(m³/h)	q (L/h)	REGIME TRABALHO		CUSTO PRODUTO – mensal	
					(H/DIA)	(DIA/MÊS)	(R\$/L ou kg)	TOTAL(R\$)
COLORO	10	7	6	4,20	10	30	R\$ 10,00	R\$ 1.260,00
					TOTAL(R\$)			R\$ 1.260,00
					VAZÃO (m³/hora)			6,0
					TOTAL (R\$) por m³/hora			R\$ 210,00

Os custos mensais de dosagem, conforme a Tabela 18, tanto para a ETE Iparana CA quanto feita em Fibra de Vidro (PRFV), são de R\$ 1.260,00, sendo R\$ 210,00 o custo por m³/hora de esgoto tratado.

4.4.4 Custos Mensais de Energia Elétrica ETE Iparana CA

Conforme a Tabela 19 a seguir, apresentam-se os custos mensais parametrizados de energia elétrica para a ETE Iparana CA. O custo do kWh de energia utilizado para efeito de cálculo foi de R\$ 0,77.

Tabela 19 – Custo mensal de energia elétrica ETE Iparana CA

PRODUTO	QUANT UNID	CONSUMO KWh/h	REGIME TRABALHO		TOTAL(R\$)
			(h/DIA)	(DIA/MÊS)	
BOMBA ELEVATÓRIA DE ESGOTO BRUTO- PILOTO + RESERVA	4	4	6	30	R\$ 1.108,80
BOMBA DE 2CV - RECALQUE - EFLUENTE TRATADO	2	2,67	6	30	R\$ 739,20
COMPRESSORES ROOTS	4	13,33	12	30	R\$ 7.392,00
DOSADORA 37W = 0,037W	4	0,1	6	30	R\$ 28,28
			TOTAL(R\$)		R\$ 9.268,28
			VAZÃO (m ³ /hora)		6,0
			TOTAL(R\$) por m ³ /hora		R\$ 1.544,78

O custo mensal de energia elétrica para a ETE SESC Iparana em concreto armado é de R\$ 9.268,28, muito maior que para a fabricada em fibra de vidro (PRFV), que é de R\$4.634,14, o que evidencia mais uma vez a dificuldade de construção da ETE reator UASB em concreto armado de pequeno porte. O custo mensal de energia elétrica por m³/hora para a ETE Iparana CA é de R\$ 1.544,78.

4.5 Comparação de Custos e Cálculo do VPL para as ETES

A Tabela 20, a seguir, apresenta os custos de implantação (CAPEX), de operação (OPEX), de dosagem e de energia elétrica para cada uma das quatro ETES, por m³/hora de esgoto tratado.

Tabela 20 – Comparação de custos por m³/hora de esgoto tratado das ETEs

	Atacado CA	Iparana PRFV	Atacado PRFV	Iparana CA
Implantação (CAPEX)	R\$ 93.523,00	R\$ 74.266,67	R\$ 103.823,00	R\$ 89.120,00
Operação (OPEX)	R\$ 2.214,00	R\$ 1.514,17	R\$ 2.214,00	R\$ 1.817,00
Dosagem	R\$ 210,00	R\$ 210,00	R\$ 210,00	R\$ 210,00
Energia Elétrica	R\$ 1.555,15	R\$ 772,36	R\$ 1.555,15	R\$ 1.544,78

Da Tabela 20, verifica-se que a ETE Iparana PRFV possui o menor custo de implantação (CAPEX), pois a tecnologia utilizada (Reator UASB), além no material utilizado (PRFV) permitem fazer ETEs compactas, em uma pequena área de implantação e de baixo custo. Nota-se, ainda, que a mesma ETE possui o menor custo de operação (OPEX) e de energia elétrica, o que era esperado para uma ETE do tipo reator UASB, uma vez que a menor mecanização se comparada com uma ETE do tipo lodos ativados com aeração prolongada reduz custos de operação e o consumo de energia elétrica.

Nota-se ainda, da Tabela 20, que a ETE Iparana CA possui mais altos custos de implantação (CAPEX), de operação (OPEX) e de consumo de energia elétrica se comparados com a ETE Iparana PRFV, o que é explicado pelo alto custo de fabricação de formas para pequenas estações do tipo reator UASB em concreto armado. A tecnologia do PRFV, pela melhor moldabilidade, facilita a fabricação de ETEs de pequeno porte compactas.

Ainda é notável, da Tabela 20, que o custo de implantação (CAPEX) de uma ETE do tipo lodos ativados com aeração prolongada aumenta quando feita em PRFV se comparada com o concreto armado, devido a dificuldades de implantação do tanque de PRFV de grandes dimensões com o terreno do que o concreto armado, por ser um compósito mais moderno. O custo da fibra acaba se sobressaindo nesse caso.

A Tabela 21 a seguir resume dois tipos de custos por metro cúbico por hora para as ETEs: custo fixo, de implantação, e custo mensal, ao considerar a somatória dos custos de operação, dosagem e energia elétrica.

Tabela 21 – Custos fixos e mensais por metro cúbico por hora de cada uma das ETEs

	Atacado CA	Iparana PRFV	Atacado PRFV	Iparana CA
Fixo (Implantação)	R\$ 93.523,00	R\$ 74.266,67	R\$ 103.823,00	R\$ 89.120,00
Mensal	R\$ 3.979,15	R\$ 2.496,53	R\$ 3.979,15	R\$ 3.571,78

A fim de quantificar a rentabilidade de cada um dos empreendimentos, na Tabela 22, a seguir, são apresentados os cálculos do valor presente líquido (VPL). Para tanto, calculou-se inicialmente o VPLA, conforme dado na Equação (19) para um período de 20 anos, a uma taxa de juros anual de 5%, somando-se ao custo fixo de implantação (I).

Tabela 22 – Cálculo do VPL por metro cúbico por hora de esgoto para cada uma das ETEs

	Atacado CA	Iparana PRFV	Atacado PRFV	Iparana CA
Fixo (I)	R\$ 93.523,00	R\$ 74.266,67	R\$ 103.823,00	R\$ 89.120,00
Mensal	R\$ 3.979,15	R\$ 2.496,53	R\$ 3.979,15	R\$ 3.571,78
Anual (A)	R\$ 47.749,80	R\$ 29.958,36	R\$ 47.749,80	R\$ 42.861,36
VPLA	R\$ 595.068,05	R\$ 373.347,38	R\$ 595.068,05	R\$ 534.147,28
VPL (I + VPLA)	R\$ 688.591,05	R\$ 447.614,05	R\$ 698.891,05	R\$ 623.267,28

O cálculo do VPL para um período de 20 anos evidencia a vantagem da fabricação de ETEs de pequeno porte do tipo reator UASB, especialmente em PRFV (Fibra de Vidro), devido ao seu menor valor presente líquido, devido aos menores custos. A fabricação de reatores UASB em concreto armado são mais recomendáveis para ETEs de grande porte, dada a difícil fabricação de formas de reatores UASB de concreto de pequeno porte. Além disso, o cálculo evidencia que ETEs do tipo lodos ativados com aeração prolongada devem ser preferencialmente fabricadas em concreto armado, devido aos menores custos para fabricação dos tanques de concreto se comparados com o de PRFV.

5 Conclusão

Através do estudo de caso realizado sobre diferentes tecnologias utilizadas para estações de tratamento de esgoto (lodos ativados com aeração prolongada e reator UASB), em diferentes materiais de fabricação (concreto armado e fibra de vidro – PRFV), foi possível, através da determinação detalhada dos custos de implantação (CAPEX), de operação (OPEX), de dosagem e de energia elétrica, verificar, a partir da conversão em valor presente líquido (VPL) a rentabilidade de cada um dos investimentos.

O estudo corroborou uma tendência moderna de fabricação de ETEs de pequeno porte: o uso cada vez maior de estações compactas do tipo reator UASB seguido de pós-tratamento para o tratamento de efluentes domésticos em PRFV, uma vez que possui uma eficiência próxima à de outras tecnologias, como do tipo lodos ativados com aeração prolongada, e pode ser instalada em pequenas áreas, reduzindo-se custos de implantação, além de uma menor necessidade de mecanização e menor produção de lodo, o que reduz custos operacionais e de consumo de energia elétrica.

Além disso, deve-se mencionar a dificuldade de se encontrar literatura nacional específica com relação aos materiais de fabricação das ETEs, tanto de concreto armado quanto para fibra de vidro, especificamente voltadas para obras de saneamento. A norma NBR 6118, que trata de obras estruturais de Concreto Armado, traz de forma genérica, mas não trata de forma específica normas para obras de saneamento, o que é necessário, dado que o esgoto bruto é agressivo quimicamente e necessita de uma tratativa especial. Ademais, para o PRFV, por ser uma nova tecnologia, precisa ser demonstrada a qualidade do material a fim de ser aplicado na fabricação de ETEs.

Sugerem-se três outros estudos de caso: realizar o mesmo estudo de caso para ETEs de grande porte, comparando-se os diferentes custos para ETEs que possuem grandes vazões; realizar o mesmo estudo de comparação de custos para outras tecnologias de tratamento de esgoto e de outros materiais, a fim de verificar se existem outras tendências tecnológicas e de materiais com o respeito a custos, respeitando as eficiências das ETEs. Por fim, cabe-se realizar um estudo sobre a durabilidade de materiais aplicados a fabricação de ETEs, como Concreto Armado, PRFV, Aço Galvanizado, dentre outros, fazendo uma comparação de custo-benefício de aplicação desses materiais na fabricação de ETEs.

Referências

- TSUTIYA, Milton e ALEM SOBRINHO, Pedro. **Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário**. São Paulo, Escola Politécnica da USP. 2ª Edição. 1999. JORDÃO e PESSOA, 1982
- VON SPERLING, M. 2007. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol. 4, 3a . edição, DESA, Ed. UFMG.
- MARCONI, Rodrigo G. **Definição do ciclo operacional de um reator sequencial em batelada aeróbio (SBR) para tratamento de esgoto sanitário**. Dissertação – Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 2001
- JORDÃO, Eduardo P. e PESSÔA, Constantino A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: ABES, 932p. 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 2011.
- CHERINCHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2008. 380p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v.5).
- COSTA, E. S., BARBOSA FILHO, O., & GIORDANO, G. (2014). **Reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB): uma abordagem concisa**. Rio de Janeiro, RJ: FEN/Uerj, 2014.
- VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos**. Campina Grande: Epgraf, 1994.
- METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3. ed. Singapore: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1991. 1334 p.
- VERSIANI, B. M.; JORDÃO, E. P.; VOLSCHAN Jr., I.; DEZOTTI, M. W. C.; AZEVEDO, J. P. S. **Fatores intervenientes no desempenho de um reator UASB submetido a diferentes condições operacionais**. Campo Grande, MS. Rio de Janeiro: ABES, 2005.
- CAMPOS, J. R. **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

JUCHEN, C. R. **Tratamento anaeróbio**. In: Tratamento de resíduos líquidos. Medianeira: 2001, cap. 4, p. 47- 61.

CALIXTO, J.; CHAVES, R., **Estruturas de concreto para obras de saneamento: a necessidade de normalização específica**. Revista Concreto & Construções, Ano XXXIV, 2013

PINTO, J., TAKAGI, E., **Sistemas de Impermeabilização e proteção para obras de saneamento**. Disponível em <<http://www.casadagua.com/wpcontent/uploads/2014/02/Artigo-Revista-Concreto-e-Construcoes.pdf>>, Revista Concreto & Construções, 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Estruturas de Concreto Armado - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014

ACI 350-01. **Code requirements for environmental engineering concrete structures**. American Concrete Institute, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais. Rio de Janeiro, 2013

MESQUITA, FAUSTO NOGUEIRA DE ALMEIDA **Simulação do Comportamento Mecânico de Tubos em PRFV Submetidos à Pressão Hidrostática** [Distrito Federal] 2008. xvi, 108p., 210 x 297mm. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

CORSAN. **Diretrizes para implantação de estações de tratamento de esgoto fabricadas em material compósito – PRFV – Poliester reforçado com fibra de vidro**. Companhia Riograndense de Saneamento, 2011.

JUSHI. **Fibras de Vidro – Características e Desempenho Para Materiais Compósitos**. Jushi Group (BZ) Sinosia Compósitos Materiais LTDA, 2012

J.C.PIRES, B.F.OLIVEIRA. **Modelagem e Simulação Virtual de Pá para Aerogerador de pequeno porte**. Design e tecnologia, 2010, UFRGS – Porto Alegre

HIRSCHFELD, H. **Engenharia econômica e análise de custos**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 1992. 456 p.

HORNGREN, C. T.; FOSTER G. ; DATAR S. M. **Contabilidade de custos**. Tradução por José Luiz Paravato. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A , 2000. 717 p

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 19 de novembro de 2018	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-058/2018	4. N° DE PÁGINAS 69
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análises operacionais e econômicas dos processos de lodos ativados por aeração prolongada e UASB seguido por biofiltro em concreto armado e poliéster reforçado em fibra de vidro – estudos de casos aplicados em esgotos domésticos			
6. AUTOR(ES): Francisco Markan Nobre de Souza Filho			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. ETE 2. Lodos Ativados Aeração Prolongada 3. UASB 4. Concreto Armado. 5. PRFV 6. Tratamento de Esgoto Doméstico			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Solicite preenchimento dos campos 2, 3 e 9 - envie este formulário para o e-mail doc.pt			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador(es): Prof. PhD Tem Cel Eng Márcio Antonio da Silva Pimentel; Publicado em 2018.			
11. RESUMO: Duas tecnologias são amplamente utilizadas no tratamento de efluentes domésticos: o sistema de lodos ativados convencional por aeração prolongada, que apresenta elevada eficiência na remoção da sua matéria orgânica e reduz as possibilidades de maus odores, insetos e vermes; e o sistema reator UASB (reator anaeróbico de fluxo ascendente) com biofiltro, que apresenta baixíssima produção de lodo e possibilidade do uso energético do biogás produzido. Além disso, o material é outro fator de grande importância na escolha do projeto de uma ETE. Dois deles são amplamente utilizados: concreto armado, que geralmente apresenta um maior custo de implantação para a ETE, e PRFV (Poliéster reforçado em fibra de vidro), que pode apresentar maiores custos de manutenção devido a sua menor robustez. O ponto de partida para o presente trabalho será os dados operacionais e de custos de 2 ETEs em operação, na cidade de Fortaleza, estado do Ceará, que tratam esgoto doméstico, uma na tecnologia de lodos ativados por aeração prolongada feita em concreto armado (ETE Atacado CA), e outra em reator UASB seguido de biofiltro feita em PRFV (ETE Iparana PRFV). A partir disso, foram desenvolvidos 2 projetos, um em lodos ativados por aeração prolongada em PRFV, e outro reator UASB seguido de biofiltro em concreto armado, e dessa forma, foi feita uma análise operacional e de custos de 4 projetos para o tratamento de efluente doméstico, considerando as 2 tecnologias (lodos ativados convencional e reator UASB) e os 2 materiais (concreto armado e PRFV). A análise das 4 ETEs considerou os custos de implantação, operação e manutenção de cada uma das estações, bem como a conversão para o metro cúbico de esgoto tratado e o Valor Presente Líquido (VPL). Verificou-se, após a análise, uma tendência moderna, o uso cada vez maior de estações do tipo reator UASB em fibra de vidro para ETEs compactas, como possuindo o menor custo e dando o maior retorno financeiro por metro cúbico de esgoto tratado.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			