



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

**DIMENSIONAMENTO, ANÁLISE E COMPARAÇÃO DA VIABILIDADE  
ECONÔMICA DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS  
UTILIZANDO OS PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL E  
AERAÇÃO PROLONGADA**

**Carolina Saraiva Peleteiro**

**Maria Lívia Real de Almeida**

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Isaac Volschan Jr.

Rio de Janeiro

Março de 2014

DIMENSIONAMENTO, ANÁLISE E COMPARAÇÃO DA VIABILIDADE  
ECONÔMICA DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS  
UTILIZANDO OS PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL E  
AERAÇÃO PROLONGADA

Carolina Saraiva Peleteiro

Maria Lívia Real de Almeida

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinada por:

---

Prof. Isaac Volschan Junior, D.Sc

---

Prof<sup>a</sup>. Iene Christie Figueiredo, D.Sc

---

Prof<sup>a</sup>. Magali Christe Cammarota, D.Sc

Rio de Janeiro

Março de 2014

Peleteiro, Carolina Saraiva  
Almeida, Maria Livia Real de  
Dimensionamento, Análise e  
Comparação da Viabilidade Econômica de uma Estação  
de Tratamento de Esgotos Utilizando os Processos de  
Lodos Ativados Convencional e Aeração Prolongada /  
Carolina Saraiva Peleteiro e Maria Livia Real de Almeida.  
– Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2014.

XI, 100p.: il.; 29,7.

Orientador: Isaac Volschan Junior

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica /  
Curso de Engenharia Ambiental, 2014.

Referências bibliográficas: p. 82-83.

1. Tratamento de Esgotos 2. Lodos Ativados  
3. Comparação Econômica. I. Volschan Junior, Isaac.  
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola  
Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental.  
III. Dimensionamento, Análise e Comparação da  
Viabilidade Econômica de uma Estação de Tratamento  
de Esgotos Utilizando os Processos de Lodos Ativados  
Convencional e Aeração Prolongada.

*"A essência do conhecimento consiste em aplicá-lo, uma vez possuído."*

*- Confúcio*

## **Agradecimentos**

Ao nosso orientador, professor Isaac Volschan Jr, por toda a disposição em nos ajudar, pela dedicação com que nos orientou, por toda a experiência e conhecimento que nos passou.

A todos os professores da UFRJ que compartilharam os seus conhecimentos conosco, dando-nos o embasamento necessário para nos tornarmos engenheiras.

A Coralina (Ecosan), Antonio Carlos (Panamericana), Andréa Campos (Ciclus), Ernani (EMOP) e Carlos Rico (Pieralisi), pela ajuda inestimável que prestaram na elaboração desse trabalho.

### **Carolina**

A Deus por ter me iluminado durante a toda minha vida e que me deu força para chegar até aqui.

A minha família por todo o carinho e atenção. Em especial, meus pais, Ruy e Célia, meu irmão, Felipe, meu avô, José, e minha madrinha, Aurélia, que durante toda a minha vida acadêmica me apoiaram e acreditaram no meu potencial, sempre me dando forças para superar as dificuldades.

Aos amigos. Àqueles que fiz na faculdade, em especial, Aline, Bruna, Gabriela, Hugo, Lea, Maria Alice e Renata, por todos os momentos em que me fizeram rir, por todos os momentos que me apoiaram nas adversidades. Àqueles que fiz durante a minha vida, em especial, Caio, Carolina, Daniel, Felipe, Natália e Paula por sempre incentivarem e apoiarem a minha vida acadêmica. Obrigado a todos pela amizade sincera e eterna.

A minha dupla, Maria Lívia, agradeço a amizade que construímos durante esse trabalho, todo o companheirismo e troca de conhecimentos.

### **Maria Lívia**

À minha família, em especial meus pais, Joaquim e Míriam, e meu irmão Thiago. Vocês são a minha maior inspiração. Sem o seu apoio, o seu carinho e a sua força nos momentos mais difíceis, seria impossível chegar onde eu cheguei.

Ao F. pela motivação necessária para que eu fosse em frente.

Aos amigos que encararam comigo essa jornada na faculdade. Aos amigos que estiveram sempre presentes, sempre dispostos a me apoiar e sempre capazes de me fazer rir quando eu mais precisava. Às meninas, Mieka, Pamela, Silje, Laís e as Julianas, que me acompanharam até o fim.

À Elizabeth, melhor do mundo, que, mesmo longe, está sempre por perto.

À minha dupla Carolina, com quem dividi todas as dificuldades e as recompensas na elaboração desse trabalho, pela amizade e cumplicidade.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Dimensionamento, Análise e Comparação da Viabilidade Econômica de uma Estação de Tratamento de Esgotos utilizando os Processos de Lodos Ativados Convencional e Aeração Prolongada

Carolina Saraiva Peleteiro

Maria Lívia Real de Almeida

Março / 2014

Orientador: Isaac Volschan Junior

Curso: Engenharia Ambiental

O tratamento de esgotos ainda é um grande desafio no Brasil e o processo de lodos ativados é uma tecnologia que tem recebido crescente atenção devido ao seu alto desempenho. Este trabalho consiste na comparação entre os custos de implantação e operação das variantes convencional e aeração prolongada do processo de lodos ativados. O objetivo principal é verificar qual processo apresenta a melhor relação custo-benefício para a construção de uma Estação de Tratamento de Esgoto.

Foi feito um levantamento bibliográfico e dos requisitos técnicos para o projeto de uma ETE e, a partir disso, dimensionou-se uma ETE hipotética para as duas variantes. Em seguida, fez-se uma avaliação econômica das duas alternativas, considerando os custos de capital (CAPEX) e custos de operação e manutenção (OPEX). Dentre os custos de capital, foram abordados o custo com a construção civil das unidades (concreto armado) e o custo com a aquisição dos equipamentos. Em relação aos custos de operação, abordou-se o custo com produtos químicos (polieletrólitos), consumo de energia elétrica, transporte e destinação final do lodo. Custos considerados similares para as duas concepções não foram contabilizados.

Os resultados obtidos mostram que o CAPEX foi maior para o processo com lodos ativados convencional. Entretanto, o OPEX foi maior para o processo de aeração prolongada. Sendo assim, combinando os custos de implantação com os custos de operação trazidos ao valor presente, percebe-se que o custo global do sistema de aeração prolongada é superior ao do sistema de lodos ativados convencional, o que torna o processo de lodos ativados convencional mais vantajoso.

*Palavras-chave:* Tratamento de Esgotos; Lodos ativados convencional; Aeração prolongada; Comparação econômica.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

Dimensioning, Evaluation and Comparison of the Economic Feasibility of a Wastewater Treatment Plant by Conventional Activated Sludge and Extended Aeration Processes

Carolina Saraiva Peleteiro

Maria Livia Real de Almeida

March / 2014

Advisor: Isaac Volschan Junior

Course: Environmental Engineering

Wastewater treatment is still a major challenge in Brazil and the activated sludge process is a technology that has received increasing attention due to its high performance. This study consists in the comparison of implementation and operation costs for the conventional and extended aeration variants of the activated sludge process. The main objective is to determine which process has the best cost-benefit ratio for the construction of a Wastewater Treatment Plant.

Extensive research was performed on the literature and technical requirements for the dimensioning of a WWTP and, based on that a hypothetical WWTP was dimensioned using both processes. Subsequently, an economic evaluation of the two alternatives was performed, considering the capital costs (CAPEX) and operating and maintenance costs (OPEX). Among the capital costs, we addressed the construction of the units (concrete) and the cost of acquiring equipment. Regarding operating costs, the cost addressed were chemicals consumption (polyelectrolytes), energy consumption, and transportation and disposal of sludge. Costs considered similar for the two conceptions were not counted.

Results show that CAPEX were higher for the conventional active sludge process. However, the OPEX were higher for the extended aeration process. Thus, combining capital costs and operating costs discounted to present value, it is shown that the overall cost of the extended aeration process is higher than the cost of the conventional activated sludge process, which makes the conventional system the most advantageous option between the two of them.

*Keywords:* Wastewater treatment; Conventional activated sludge; Extended aeration; Economic comparison.

# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
<b>3. CONCEPÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS POR LODOS ATIVADOS .....</b>	<b>4</b>
3.1. TRATAMENTO PRELIMINAR .....	4
3.2. TRATAMENTO PRIMÁRIO.....	5
3.3. TRATAMENTO SECUNDÁRIO: LODOS ATIVADOS .....	7
3.3.1. Sistema de lodos ativados convencional .....	11
3.3.2. Sistema de lodos ativados com aeração prolongada .....	12
3.3.3. Decantação secundária.....	15
3.4. TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO .....	17
3.4.1. Adensamento do lodo .....	17
3.4.2. Estabilização do lodo .....	18
3.4.3. Desaguamento do lodo .....	20
3.4.4. Disposição final do lodo .....	21
3.4.5. Balanço de Massa .....	22
<b>4. DIMENSIONAMENTO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DE MARALINA .....</b>	<b>23</b>
4.1. DADOS DE PROJETO .....	23
4.2. DIMENSIONAMENTO DA ETE PARA O SISTEMA DE LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL .....	26
4.2.1. Decantador Primário .....	27
4.2.2. Tanque de aeração .....	32
4.2.3. Decantador Secundário.....	39
4.2.4. Adensador .....	41
4.2.5. Digestor .....	44
4.2.6. Centrífuga.....	48
4.3. DIMENSIONAMENTO DA ETE PARA O SISTEMA DE LODOS ATIVADOS COM AERAÇÃO PROLONGADA .....	50
4.3.1. Tanque de aeração .....	51
4.3.2. Decantador Secundário.....	56
4.3.3. Adensador .....	58
4.3.4. Centrífuga.....	60
<b>5. AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO DA ETE.....</b>	<b>62</b>
5.1. COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS .....	62
5.1.1. Custo de implantação.....	62
5.1.2. Custo de operação e manutenção .....	64

5.2.	SISTEMA DE LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL .....	67
5.2.1.	<i>Custos de implantação</i> .....	67
5.2.2.	<i>Custos de operação</i> .....	70
5.3.	SISTEMA DE LODOS ATIVADOS DE AERAÇÃO PROLONGADA .....	73
5.3.1.	<i>Custos de implantação</i> .....	73
5.2.2.	<i>Custos de operação</i> .....	74
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>78</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXO 1 – FLUXOGRAMA DA ETE DIMENSIONADA PARA LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL .....</b>	<b>84</b>
	<b>ANEXO 2 – FLUXOGRAMA DA ETE DIMENSIONADA PARA O SISTEMA DE AERAÇÃO PROLONGADA.....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXO 3 – BALANÇO DE MASSA DAS CONCEPÇÕES DA ETE DE MARALINA .....</b>	<b>86</b>
A.	LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL .....	86
B.	AERAÇÃO PROLONGADA .....	88
	<b>ANEXO 4 – LAYOUT DAS CONCEPÇÕES DA ETE DE MARALINA.....</b>	<b>90</b>
A.	LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL .....	90
B.	AERAÇÃO PROLONGADA.....	91
	<b>ANEXO 5 – CROQUIS DAS UNIDADES DE TRATAMENTO .....</b>	<b>92</b>
A.	LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL .....	92
	<i>Decantador primário</i> .....	92
	<i>Tanque de aeração</i> .....	93
	<i>Decantador secundário</i> .....	94
	<i>Adensador</i> .....	95
	<i>Digestor</i> .....	96
	<i>Tanque pulmão</i> .....	97
B.	AERAÇÃO PROLONGADA .....	98
	<i>Tanque de aeração</i> .....	98
	<i>Decantador secundário</i> .....	99
	<i>Adensador</i> .....	100

## Lista de Tabelas

Quadro 1: Classificação dos sistemas de lodos ativados em função da idade do lodo. .....	10
Quadro 2: Parâmetros aplicáveis às variações do processo de lodos ativados.....	11
Quadro 3: Comparação entre variantes dos sistemas de lodos ativados. ....	13
Quadro 4: Taxas de aplicação hidráulica e de sólidos para decantadores secundários. .....	16
Quadro 5: Resumo das dimensões obtidas para ambas as variantes de lodos ativados. .....	61
Quadro 6: Custo unitário de aquisição dos removedores de lodo. ....	63
Quadro 7: Custo unitário de aquisição dos aeradores superficiais. ....	63
Quadro 8: Custo unitário de aquisição dos equipamentos para os adensadores por gravidade.....	64
Quadro 9: Custo unitário de aquisição das centrífugas. ....	64
Quadro 10: Tarifas de alta tensão / média tensão - Estrutura Horossazonal Azul.....	66
Quadro 11: Tarifas de energia elétrica ponderadas. ....	67
Quadro 12: Dimensões das unidades do sistema de lodos ativados convencional. ....	68
Quadro 13: Volume de concreto armado necessário para a construção das unidades do sistema de lodos ativados convencional. ....	68
Quadro 14: Comparação entre as opções de aeradores para o sistema de lodos ativados convencional.....	69
Quadro 15: Custo de aquisição dos equipamentos para o sistema de lodos ativados convencional.....	69
Quadro 16: Custos totais de implantação para o sistema de lodos ativados convencional.....	69
Quadro 17: Custo total com produtos químicos para o sistema de lodos ativados convencional.....	70
Quadro 18: Consumo de energia elétrica de cada unidade do sistema de lodos ativados convencional.....	71
Quadro 19: Custo total com energia elétrica no sistema de lodos ativados convencional.....	71
Quadro 20: Custo total com transporte e disposição final do lodo no sistema de lodos ativados convencional.....	71
Quadro 21: Custos anuais de operação para o sistema de lodos ativados convencionais.....	72
Quadro 22: Custos totais do sistema de lodos ativados convencional. ....	72

Quadro 23: Dimensões das unidades do sistema de aeração prolongada.....	73
Quadro 24: Volume de concreto armado necessário para a construção das unidades do sistema de aeração prolongada. ....	73
Quadro 25: Comparação entre as opções de aeradores para o sistema de aeração prolongada.....	74
Quadro 26: Custo de aquisição dos equipamentos para o sistema de aeração prolongada.....	74
Quadro 27: Custos totais de implantação para o sistema de aeração prolongada. ....	74
Quadro 28: Custo total com produtos químicos para o sistema de aeração prolongada. ....	75
Quadro 29: Custos anuais de operação para o sistema de aeração prolongada. ....	75
Quadro 30: Consumo de energia elétrica de cada unidade do sistema de aeração prolongada.....	76
Quadro 31: Custo total com energia elétrica no sistema de aeração prolongada.....	76
Quadro 32: Custo total com transporte e disposição final do lodo no sistema de aeração prolongada. ....	76
Quadro 33: Custos totais do sistema de aeração prolongada. ....	77
Quadro 34: Comparação entre os custos das concepções. ....	78
Quadro 35: Comparação da eficiência das concepções. ....	79
Quadro 36: Área ocupada pelas duas concepções.....	80

## Lista de Figuras

Figura 1: Desenho esquemático de uma ETE com sistema de lodos ativados convencional.....	12
Figura 2: Desenho esquemático de uma ETE com aeração prolongada.....	13
Figura 3: Fluxograma das unidades a serem dimensionadas para o sistema de lodos ativados convencional.....	27
Figura 4: Fluxograma das unidades a serem dimensionadas para o sistema de aeração prolongada.....	50



## 1. Introdução

De acordo com dados do IBGE, apenas 45,7% dos domicílios brasileiros são atendidos por rede coletora de esgoto (IBGE, 2011). No que diz respeito ao tratamento do esgoto coletado, verifica-se uma enorme disparidade entre os municípios em função do seu tamanho. Em 2008, embora apenas 28,5% dos municípios brasileiros possuíssem sistemas de tratamento de esgoto, o volume total de esgoto tratado representava 68,8% de todo o esgoto coletado no país. Em municípios com população superior a 1 milhão de habitantes, a relação entre o esgoto tratado e o esgoto coletado era superior a 90% (IBGE, 2008). Assim, percebe-se que é necessário investir mais no tratamento de esgotos em municípios de pequeno e médio porte.

Uma opção de tratamento que vem recebendo muita atenção atualmente é o tratamento biológico por lodos ativados. Este sistema é amplamente utilizado em situações em que se faz necessária uma elevada qualidade do efluente com reduzida necessidade de área. No entanto, vale ressaltar que o sistema de lodos ativados se caracteriza por um índice de mecanização mais elevado que outras opções de tratamento biológico, o que implica em uma operação mais delicada, necessitando de alto grau de controle sobre o processo; e em maiores custos de operação, em especial quanto ao consumo de energia elétrica.

Existem diversas variantes do processo de lodos ativados. Usualmente, classificam-se os sistemas de lodos ativados em função da idade do lodo, sendo os sistemas de lodos ativados convencionais e de aeração prolongada os mais comuns.

Neste trabalho, procurou-se avaliar técnica e economicamente as duas principais variantes de lodos ativados. Para isso, considerou-se o caso do município hipotético de Maralina, município de médio porte e com pouca infraestrutura de saneamento, em situação similar a diversos municípios brasileiros.

Nota-se nos últimos anos uma tendência de desconcentração dos investimentos industriais no Brasil, com a migração de indústrias para cidades médias ao invés das tradicionais metrópoles (PACHECO, 1999). O município de Maralina vem sendo contemplado com o aumento dos investimentos, com a previsão da instalação de polos industriais e um porto na região. Assim, espera-se um significativo aumento populacional na região, o que torna os investimentos em saneamento ainda mais prementes.

Algumas particularidades do município de Maralina tornam a aplicação da tecnologia de lodos ativados particularmente vantajosa. A cidade está localizada ao fundo de uma baía já saturada de esgoto sem tratamento lançado pelos municípios vizinhos, o que significa que o efluente a ser lançado na baía deve ter uma excelente qualidade de modo a não comprometer ainda mais a qualidade do corpo d'água. Foi disponibilizada pela Prefeitura uma área para a construção da ETE, porém esta área não é muito grande, portanto a solução encontrada deve ser econômica em seus requisitos de área. Além disso, existe a previsão de instalação de uma usina termelétrica na região, assim a disponibilidade de energia elétrica não é uma preocupação.

Com este trabalho espera-se contribuir para o entendimento da tecnologia de lodos ativados para o tratamento de esgotos domésticos e sua aplicabilidade nas condições brasileiras.

## **2. Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é comparar economicamente duas variantes do processo de lodos ativados, nominalmente, o processo de lodos ativados convencional e o processo de aeração prolongada. Busca-se determinar a opção de tratamento com a melhor relação custo-benefício dentre as variantes de lodos ativados.

Para tanto, o trabalho se focará nos seguintes objetivos específicos:

1. Levantamento bibliográfico e de requisitos técnicos para o projeto de uma Estação de Tratamento de Esgotos;
2. Dimensionamento de duas concepções para a Estação de Tratamento de Esgotos da cidade hipotética de Maralina empregando o sistema de lodos ativados convencional e o sistema de aeração prolongada;
3. Avaliação econômica das duas alternativas, considerando custos de capital e custos de operação e manutenção;
4. Comparação da viabilidade técnica e econômica das duas variantes do processo de lodos ativados.

### **3. Concepção de uma Estação de Tratamento de Esgotos por Lodos Ativados**

De acordo com a Norma ABNT NBR 9.648/1986, esgoto sanitário é todo despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária. Ainda de acordo com essa norma, esgoto doméstico é o despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas (ABNT, 1986).

Os esgotos domésticos são compostos por aproximadamente 99,9% água. Os 0,1% restantes incluem sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos. No entanto, é justamente a presença desses 0,1% de contaminantes que torna necessário o tratamento do esgoto (VON SPERLING, 2005).

O tratamento dos esgotos é classificado em níveis de acordo com o tipo de poluente que se deseja remover. O tratamento preliminar é utilizado para remover sólidos em suspensão grosseiros. O tratamento primário visa a remoção de sólidos sedimentáveis por meio de processos físico-químicos. O tratamento secundário procura remover matéria orgânica por meio de processos biológicos. Por fim, o tratamento terciário tem por objetivo a remoção de poluentes específicos ou não suficientemente removidos no tratamento secundário. A definição do nível de tratamento necessário para uma Estação de Tratamento depende de legislação específica que estabeleça os padrões de qualidade para o efluente e para o corpo receptor.

Os lodos ativados são um sistema de tratamento secundário de esgotos que vem recebendo muita atenção devido à sua aplicabilidade em situações em que seja necessário obter uma alta qualidade do efluente com menor demanda de área para a implantação da estação. Neste trabalho, será abordada a concepção de uma Estação de Tratamento de Esgotos de nível secundário utilizando duas variantes do processo de lodos ativados.

#### **3.1. Tratamento preliminar**

O tratamento preliminar dos esgotos objetiva a remoção de sólidos grosseiros e areia por meio de operações físicas de forma a pré-condicionar o esgoto bruto para facilitar os processos de tratamento seguintes.

Os sólidos grosseiros são materiais de maiores dimensões, provenientes principalmente do uso inadequado das instalações prediais, dos coletores públicos e demais componentes do sistema de esgotamento sanitário (JORDÃO e PESSÔA, 2011). Sua remoção tem por objetivo proteger os dispositivos de transporte do esgoto, como bombas, tubulações, transportadores e peças especiais; proteger as unidades de tratamento subsequentes; e proteger os corpos d'água receptores (VON SPERLING, 2005).

A remoção dos sólidos grosseiros é feita usualmente por unidades de grades de barras, que retém o material de dimensões maiores que o espaçamento entre as barras. A remoção do material retido nas barras pode ser manual ou mecanizada (VON SPERLING, 2005). Podem também ser usadas peneiras rotativas, estáticas ou trituradores, embora a utilização destes últimos ainda seja muito discutida, uma vez que não removem estes sólidos, apenas os transformam para a sua remoção em outro dispositivo a jusante (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

Já a areia contida no esgoto é composta essencialmente de material mineral, como areia, pedrisco, silte, escória e cascalho, embora possa conter também pequena quantidade de matéria orgânica degradável. A remoção da areia tem por finalidades evitar a abrasão nos equipamentos e tubulações; reduzir a possibilidade de obstruções em unidades da ETE como tubulações, tanques, orifícios, sifões, etc.; e facilitar o transporte das fases líquida e sólida do esgoto ao longo das unidades de tratamento (VON SPERLING, 2005).

A remoção da areia é feita em unidades chamadas de caixa de areia ou desarenador. A remoção ocorre pelo mecanismo da sedimentação discreta, uma vez que os grãos de areia, por suas maiores dimensões e densidade, tendem a sedimentar rapidamente, enquanto a matéria orgânica, mais leve, permanece em suspensão e segue para as unidades de tratamento posteriores. Os desarenadores podem ter diferentes formatos, e podem ser aerados ou sem aeração, sendo os desarenadores sem aeração mais comuns. A retirada do material sedimentado pode ser manual ou mecanizada (VON SPERLING, 2005).

### **3.2. Tratamento primário**

O objetivo principal dessa etapa é a remoção dos sólidos em suspensão sedimentáveis e sólidos flutuantes. Nessa operação unitária, as partículas em suspensão, compostas tanto por sólidos orgânicos como por sólidos inorgânicos,

sedimentam através da ação da gravidade, de forma que não possam ser suspensas pela erosão da água (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

A unidade em que se realiza esta etapa do tratamento é chamada decantador primário. Estes recebem os esgotos vindos das unidades de tratamento preliminar livres dos sólidos grosseiros e areia. Os decantadores podem ser circulares ou retangulares. Neste trabalho, adotaram-se decantadores circulares pois mais utilizados tanto para o tratamento primário quanto para o tratamento secundário (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

Os esgotos fluem em baixa velocidade através do centro do decantador, permitindo que os sólidos em suspensão, cuja densidade é maior do que a do líquido circundante, sedimentem gradualmente no fundo. Nesta etapa ocorre a sedimentação floculenta, ou seja, as partículas floculam na medida em que sedimentam, formando aglomerados de diferentes formas, tamanhos e pesos. Com isso, a velocidade de decantação aumenta em relação ao tempo (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

A massa de sólidos decantada é denominada lodo primário bruto. Esse lodo é retirado através de uma única tubulação em decantadores de pequenas dimensões; ou através de raspadores mecânicos e bombas em decantadores maiores (VON SPERLING, 2005). Nos decantadores de maiores dimensões, o lodo acumulado no fundo é encaminhado para um poço de acumulação, que contorna a própria tubulação de entrada do esgoto afluyente. Atualmente, adota-se um poço de maior capacidade, a fim de proporcionar um efeito de adensamento do lodo na própria unidade de forma que ele atinja um teor de sólidos entre 3 e 5% antes de ser encaminhado para a fase de tratamento do lodo (JORDÃO e PESSÔA, 2011). A Norma ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) recomenda que esse poço não seja muito grande. As paredes laterais devem ser bem inclinadas, com relação vertical: horizontal superior a 1,5:1,0, e a dimensão horizontal inferior de no mínimo 0,60 metros.

Além disso, materiais flutuantes, como óleos e graxas, são coletados e removidos dos decantadores através de raspadores superficiais e encaminhados para posterior tratamento (VON SPERLING, 2005).

Grande parte destes sólidos em suspensão removidos é constituída por matéria orgânica em suspensão. Por isso, a remoção desses sólidos garante uma redução inicial da carga de DBO que é encaminhada para o tratamento secundário, onde a remoção da matéria orgânica é mais efetiva (VON SPERLING, 2005).

De acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), a eficiência de remoção dos sólidos em suspensão é da ordem de 40 a 60% e a remoção de DBO é da ordem de 25 a 35%. Vale ressaltar que, ainda de acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), essa eficiência de remoção está relacionada diretamente com a capacidade do decantador em permitir que os sólidos contidos nos esgotos sedimentem de forma adequada, ou seja, sem que haja perturbação ou arraste destes sólidos antes de sua remoção.

### **3.3. Tratamento secundário: Lodos ativados**

De acordo com VON SPERLING (2012), esse sistema é utilizado, em escala mundial, para o tratamento de despejos domésticos e industriais em situações em que são necessárias uma elevada qualidade do efluente a ser lançado em um corpo receptor e reduzidos requisitos de área. O sistema de lodos ativados, sob certas condições, permite também a remoção biológica de nitrogênio e fósforo.

As unidades que compõem esse sistema são: o tanque de aeração, o decantador secundário e a recirculação de lodo. No tanque de aeração ocorre a remoção da matéria carbonácea, podendo ocorrer também a remoção de matéria nitrogenada (VON SPERLING, 2012). Os microrganismos presentes no esgoto decompõem o substrato (matéria orgânica) e se desenvolvem. O esgoto é transferido, então ao decantador secundário, onde ocorre a sedimentação dessa biomassa, permitindo que o efluente saia clarificado. Parte do lodo sedimentado é recirculado para o tanque de aeração, já que esse lodo acumulado é constituído, em sua maior parte, por microrganismos ainda ativos (“lodo ativado”) do ponto de vista da assimilação do substrato. Com esse retorno de lodo, a concentração de biomassa no tanque de aeração aumenta, permitindo um aumento no consumo da matéria orgânica. Essa recirculação garante a eficiência do sistema, pois, com esse aumento da biomassa, o tempo de permanência dos microrganismos passa a ser suficiente para que quase a totalidade da matéria orgânica dos esgotos seja metabolizada, resultando em maior quantidade de DBO removida (VON SPERLING, 2012)

Sendo assim, essa fase de lodos ativados consiste, basicamente, na remoção de matéria orgânica (substrato) por microrganismos aeróbios que degradam esse substrato e se reproduzem (crescimento bacteriano –  $\Delta X_1$ ). No entanto, como as bactérias permanecem no sistema de lodos ativados por alguns dias, devido ao sistema de recirculação de lodos, passa a atuar também a etapa de respiração endógena. Essa etapa consiste no decaimento bacteriano ( $\Delta X_2$ ), já que à medida que

começa a faltar alimento (substrato), as bactérias metabolizam o seu próprio material celular, o que provoca a sua destruição. Portanto, de acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), temos a seguinte equação para produção líquida de lodos:

$$\Delta X = \Delta X_1 - \Delta X_2$$

Onde:

$$\Delta X_1 = Y \times (S_0 - S_e) \times Q$$

$$\Delta X_2 = k_d \times X_{av} \times V$$

Sendo: Y: coeficiente de produção celular, ou seja, massa de sólidos em suspensão voláteis produzidos por unidade de massa de DBO removida;

$S_0$ : concentração de DBO no esgoto afluyente ao tanque de aeração;

$S_e$ : concentração de DBO solúvel no esgoto efluente do tanque de aeração, considerada igual à concentração dentro do próprio tanque no caso de reatores de mistura completa;

Q: vazão de esgotos afluyente ao tanque.

E:  $k_d$ : coeficiente de respiração endógena, fração de microrganismos que é oxidada na respiração endógena por unidade de tempo;

$X_{av}$ : concentração de SSV no tanque de aeração;

V: volume do tanque de aeração.

Portanto:

$$\Delta X = Y \times (S_0 - S_e) \times Q - k_d \times X_{av} \times V$$

Pode-se alternativamente indicar a produção líquida de lodos através da expressão:

$$\Delta X = Y_{obs} \times (S_0 - S_e) \times Q$$

Onde:  $Y_{obs}$  é o coeficiente de produção celular ajustado para compensar a parcela de perda pela respiração endógena.

A partir disso, pode-se estabelecer a seguinte relação entre Y e  $Y_{obs}$ :

$$\Delta X = Y(S_0 - S_e) \times Q - k_d \times X_{av} \times V = Y_{obs} \times (S_0 - S_e) \times Q$$

Logo, tem-se:

$$Y_{obs} = Y - k_d \cdot \frac{X_{av} \cdot V}{(S_0 - S_e) \cdot Q}$$

De acordo com (JORDÃO e PESSÔA, 2011), tem-se que:

$$X_{av} = \frac{\theta_c \times Y \times Q \times (S_0 - S_e)}{V \times (1 + k_d \times \theta_c)}$$

Logo, fazendo a substituição de  $X_{av}$  na equação de  $Y_{obs}$ , tem-se:

$$Y_{obs} = \frac{Y}{(1 + k_d \times \theta_c)}$$

Onde:  $\theta_c$  = idade do lodo

A concentração de células microbianas (biomassa) é, normalmente, expressa em termos de sólidos em suspensão (SS). Contudo, nem toda a massa de sólidos em suspensão participa da conversão de substratos. Por isso, esse sólidos em suspensão são divididos em uma fração inorgânica (fixa - SSF) e uma fração orgânica (volátil – SSV). A biomassa é frequentemente expressa em SSV (VON SPERLING, 2012).

No entanto, nem todos os sólidos em suspensão são biodegradáveis. Por isso, esses sólidos são divididos novamente em uma fração não biodegradável ( $SSV_{nb}$ ), que é resultado da respiração endógena, e uma fração biodegradável ( $SSV_b$ ), ou seja, capaz de ser degradada pelos microrganismos (VON SPERLING, 2012). A relação entre  $SSV_b/SSV$  corresponde ao  $f_b$  (fator de carga), que é expresso pela equação abaixo:

$$f_b = \frac{f'_b}{1 + (1 - f'_b) \cdot k_d \cdot \theta_c}$$

Onde:  $f_b$  = fração biodegradável dos SSV gerados nos sistema ( $X_b/X_v$ ) em função da idade do lodo ( $\theta_c$ )

$f'_b$  = fração biodegradável dos SSV imediatamente após a sua geração no sistema, ou seja,  $\theta_c = 0$ . Tal valor é tipicamente igual a 0,8 (80%) (VON SPERLING, 2012).

Devido à recirculação do lodo, o tempo de permanência desses sólidos voláteis no tanque de aeração aumenta, o que provoca a redução de  $f_b$ . Sendo assim, esse valor influencia a produção de lodo. Por isso, ele é introduzido na equação do  $Y_{obs}$ , formando a equação abaixo:

$$Y_{obs} = \frac{Y}{(1 + f_b \cdot k_d \cdot \theta_c)}$$

O tempo de permanência dos sólidos no sistema (tempo de residência celular) é denominado de idade do lodo ( $\Theta_c$ ). Para manter o equilíbrio do sistema, é necessário que se retire, aproximadamente, a mesma quantidade de biomassa que é produzida durante a degradação do substrato. Essa retirada corresponde ao lodo biológico excedente, que deve ser tratado posteriormente (VON SPERLING, 2012).

Embora os sólidos separados e concentrados no decantador secundário retornem para o tanque de aeração, proporcionando uma maior permanência dos sólidos no processo, o volume de líquido que entra e que sai do tanque não sofre variação quantitativa, apesar da retirada do lodo excedente, já que esta, no cômputo geral, é considerada desprezível (VON SPERLING, 2012). Por isso, diferencia-se o tempo de retenção hidráulica (TRH) do tempo de residência celular ( $\Theta_c$ ). Logo, tem-se:

$$TRH = \frac{V}{Q_{\text{afluente ao tanque de aeração}}}$$

$$\theta_c = \frac{V}{Q_{\text{descarte do lodo}}}$$

As classificações mais usuais para o sistema de lodos ativados, em função da idade do lodo, são apresentadas no Quadro 1 a seguir:

**Quadro 1: Classificação dos sistemas de lodos ativados em função da idade do lodo.**

Idade do lodo	Carga de DBO aplicada por unidade de volume	Faixa de idade do lodo	Denominação usual
<b>Reduzidíssima</b>	Altíssima	Inferior a 3 dias	Aeração modificada
<b>Reduzida</b>	Alta	4 a 10 dias	Lodos ativados convencional
<b>Intermediária</b>	Intermediária	11 a 17 dias	-
<b>Elevada</b>	Baixa	18 a 30 dias	Aeração prolongada

Fonte: (VON SPERLING, 2012)

Neste trabalho, serão abordadas as variantes de lodos ativados convencional e aeração prolongada. O Quadro 2 a seguir resume as principais diferenças entre os parâmetros aplicáveis às duas variantes.

**Quadro 2: Parâmetros aplicáveis às variações do processo de lodos ativados.**

Parâmetro	Lodos ativados convencional	Aeração prolongada
Remoção DBO (%)	85 – 95	90 – 95
Tempo de retenção (h)	4 – 8	16 – 36
SSTA (mg/l)	1500 – 4000	3000 – 6000
Idade do lodo (dias)	4 – 15	20 – 30
A/M (kgDBO/kgSSVTA)	0,2 – 0,4	0,05 – 0,15
Carga volumétrica (kgDBO/m <sup>3</sup> TA)	0,3 – 0,6	0,05 – 0,4
Qr/Q (%)	25 – 50	100 – 300

Fonte: Adaptado de Jordão (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

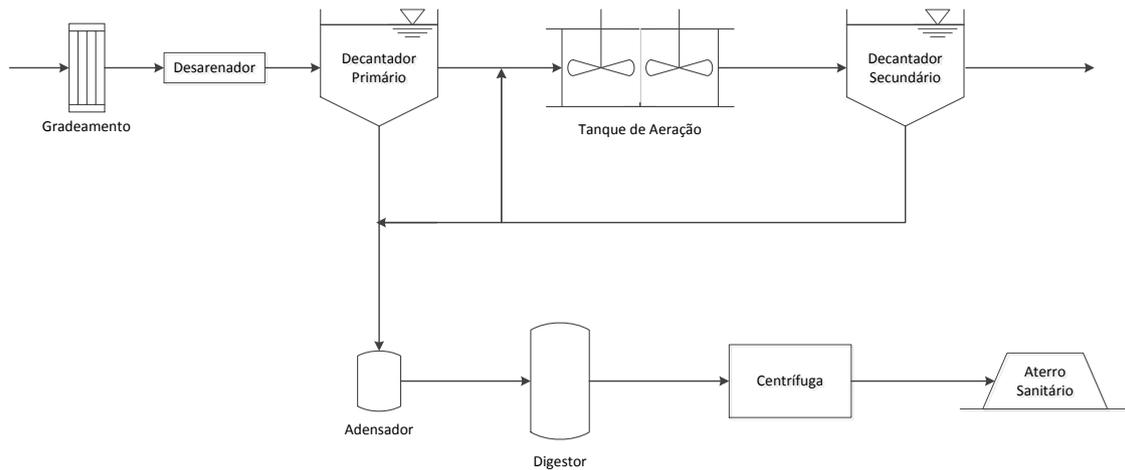
### 3.3.1. Sistema de lodos ativados convencional

Nos sistemas de lodos ativados convencionais, a idade do lodo varia entre 4 a 15 dias e o tempo de retenção hidráulica no tanque se mantém em torno de 4 a 8 horas, atingindo uma remoção de DBO da ordem de 85 a 95% (JORDÃO e PESSÔA, 2011). Com essa idade do lodo, a biomassa retirada no lodo excedente ainda não está estabilizada, pois ainda contém um elevado teor de matéria orgânica em suas células. Esta estabilização ocorre nos digestores de lodo (VON SPERLING, 2012).

Além disso, de acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), a relação alimento/microrganismo (A/M) é da ordem de 0,2 a 0,4 kg DBO/ kg SSVTA (sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração). VON SPERLING (2012) defende que uma elevada relação A/M, representando uma maior carga de DBO fornecida a um valor unitário de biomassa, apresenta uma menor eficiência na assimilação do substrato (matéria orgânica). No entanto, requer um menor volume para o tanque de aeração e, portanto, uma menor área para a construção do tanque de aeração.

Por apresentar uma idade de lodo baixa, esse sistema demanda também uma menor quantidade de oxigênio do que a aeração prolongada, o que implica em um menor custo de energia. No entanto, ela gera uma maior quantidade de lodo, que precisa ser tratado antes de ser encaminhado para o destino final.

A configuração esquemática de uma ETE operando com esse sistema está representada na Figura 1 a seguir:



**Figura 1: Desenho esquemático de uma ETE com sistema de lodos ativados convencional.**

**Fonte: Elaboração própria.**

### **3.3.2. Sistema de lodos ativados com aeração prolongada**

O sistema de lodos ativados com aeração prolongada é caracterizado pelo maior tempo de permanência da biomassa no sistema, da ordem de 18 a 30 dias. Como a quantidade de biomassa no reator (em kg SSVT) é maior que no sistema de lodos ativados convencional, o volume do reator aeróbio deve ser também mais elevado, e o tempo de retenção hidráulica varia em torno de 16 a 24h (VON SPERLING, 2012).

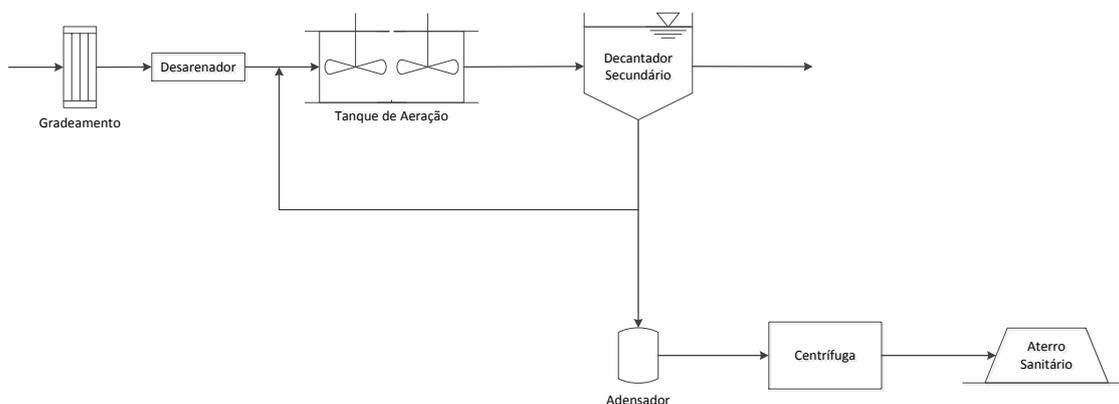
Uma vez que há menor quantidade de matéria orgânica por unidade de volume do tanque de aeração e também por unidade de biomassa do reator, os microrganismos são obrigados a utilizar de forma mais intensa nos seus processos metabólicos a matéria orgânica biodegradável que compõe suas células. Assim, já ocorre a estabilização da biomassa de forma aeróbia no próprio tanque de aeração.

Já que não é necessário estabilizar o lodo biológico excedente do sistema de aeração prolongada, deve-se evitar, nas demais etapas do tratamento, gerar lodo que necessite de posterior estabilização. Assim, não se utilizam decantadores primários antes dos sistemas de aeração prolongada, simplificando o fluxograma do processo: não há decantadores primários nem unidades de digestão do lodo (VON SPERLING, 2012).

A estabilização do lodo em condições aeróbias no reator requer um consumo adicional de oxigênio significativo, podendo inclusive ser maior que o consumo para metabolizar o material orgânico do afluente (VON SPERLING, 2012). Assim, os sistemas de aeração prolongada têm um maior gasto de energia para a aeração. Por outro lado, a baixa disponibilidade de alimento faz com que este seja praticamente assimilado por

completo, o que torna a aeração prolongada a variante de lodos ativados mais eficiente na remoção de DBO, removendo por volta de 90 a 95% da DBO afluente (VON SPERLING, 2012).

A configuração esquemática de uma ETE operando com esse sistema está representada na Figura 2 abaixo:



**Figura 2: Desenho esquemático de uma ETE com aeração prolongada.**

**Fonte: Elaboração própria.**

O Quadro 3 abaixo apresenta uma comparação resumida entre as diversas características operacionais dos sistemas de lodos ativados convencional e aeração prolongada.

**Quadro 3: Comparação entre variantes dos sistemas de lodos ativados.**

Item	Lodos ativados convencional	Aeração prolongada
<b>Decantação primária</b>	Presente	Ausente
<b>DBO solúvel efluente</b>	Baixa Praticamente desprezível	Bastante baixa Praticamente desprezível
<b>DBO em suspensão efluente</b>	Depende da sedimentabilidade do lodo e do desempenho do decantador secundário.  Caso não haja desnitrificação no reator, esta pode ocorrer no decantador secundário, causando ascensão e perda de lodo.  Decantador secundário sujeito a	Depende da sedimentabilidade do lodo e do desempenho do decantador secundário.  A maior carga de sólidos afluente ao decantador secundário exige dimensionamento mais conservador da unidade.  Caso não haja desnitrificação no reator, esta pode ocorrer no decantador secundário, causando ascensão e perda de lodo.

**Quadro 3: Comparação entre variantes dos sistemas de lodos ativados.**

Item	Lodos ativados convencional	Aeração prolongada
	problemas com bactérias filamentosas e outras deterioradoras da sedimentabilidade.	Decantador secundário sujeito a problemas com bactérias filamentosas e outras deterioradoras da sedimentabilidade.
<b>Nitrificação</b>	Bastante provável, mas sujeita a instabilidade na faixa inferior da idade do lodo, especialmente em baixas temperaturas.	Totalmente consistente, a menos que haja problemas ambientais específicos (ex: tóxicos, falta de OD)
<b>Volume do reator aeróbio</b>	Reduzido (tempos de retenção hidráulica da ordem de 6 a 8h).	Elevado (tempos de retenção hidráulica da ordem de 16 a 24h)
<b>Área dos decantadores secundários</b>	Reduzida	Elevada, devido à maior carga de sólidos e às características de sedimentabilidade do lodo.
<b>Requisitos de oxigênio</b>	Reduzido, devido à menor respiração pela biomassa e à remoção de DBO na decantação primária.	Elevado, por incluir o consumo de oxigênio pela respiração da grande quantidade de biomassa presente e pela inexistência de decantação primária.
<b>Requisitos energéticos</b>	Reduzido, devido ao baixo consumo de oxigênio.	Elevado, devido ao elevado consumo de oxigênio.
<b>Produção de lodo</b>	Elevada, porém diminui com o uso da digestão anaeróbia.	Razoável.
<b>Digestão do lodo</b>	Necessária. Estabilização do lodo no reator é baixa e insuficiente para encaminhamento à secagem natural (geração de maus odores).	Desnecessária. Estabilização do lodo ocorre no reator.
<b>Desidratabilidade do lodo</b>	Boa desidratabilidade	Desidratabilidade inferior.
<b>Estabilidade do processo</b>	Maior suscetibilidade a descargas tóxicas	Elevada
<b>Simplicidade operacional</b>	Reduzida	Maior, por não incluir as unidades de decantação primária e por ser um sistema mais robusto e estável.

Fonte: Adaptado de Von Sperling (VON SPERLING, 2012)

### 3.3.3. Decantação secundária

A decantação secundária exerce um papel fundamental no processo de lodos ativados, sendo responsável pela separação dos sólidos em suspensão presentes no reator; pelo adensamento desses sólidos no fundo do decantador, permitindo o retorno do lodo com concentração mais elevada de sólidos; e, em menor escala, pelo armazenamento dos sólidos em suspensão no decantador, complementando o armazenamento realizado no reator.

Em geral, os decantadores secundários são a última etapa do sistema de tratamento da fase líquida do esgoto, e, portanto, sua eficiência vai ditar a qualidade do efluente final em termos de sólidos em suspensão, DBO e mesmo nutrientes. Como as características de sedimentabilidade e adensabilidade do lodo estão relacionadas à estrutura do floco formado no reator, o projeto e controle operacional dessas duas unidades devem ser analisados em conjunto (VON SPERLING, 2012).

Os decantadores secundários diferem dos decantadores primários pelo tipo de sedimentação que ocorre no tanque. Enquanto a decantação primária é essencialmente floculenta, na decantação secundária ocorre a sedimentação zonal. A elevada concentração de sólidos forma um manto que sedimenta como uma massa única de partículas, ou seja, as partículas tendem a se manter em uma posição fixa em relação às partículas vizinhas. Pode-se observar uma interface bastante nítida entre a fase sólida e a fase líquida; e o nível da interface se move para baixo com a decantação da manta de lodo (VON SPERLING, 2012).

Os decantadores secundários podem ser retangulares de fluxo horizontal ou circulares de alimentação central. Ambos os tanques necessitam de remoção contínua do lodo através de raspadores ou sucção de fundo de forma a evitar a expansão da camada de lodo sedimentado. De acordo com VON SPERLING (2012), os decantadores circulares permitem uma retirada contínua do lodo mais fácil, além de terem maior vantagem estrutural devido ao efeito anelar. Os decantadores retangulares, por sua vez, tem a vantagem da economia de área, devido à ausência de áreas mortas entre os tanques, e permitem que se utilizem paredes comuns entre os tanques adjacentes. Ambos os formatos são amplamente utilizados.

O principal aspecto no projeto do decantador é o cálculo da sua área superficial por meio de dois parâmetros: a taxa de aplicação hidráulica (TAH), que corresponde à razão entre a vazão afluente à estação e a área superficial dos decantadores; e a taxa

de aplicação de sólidos (TASST), que corresponde à razão entre a carga de sólidos aplicada e a área superficial dos decantadores. Sendo assim:

$$TAH = \frac{Q}{A}$$

$$TASST = (Q + Q_r) \times \frac{X}{A}$$

A taxa de aplicação hidráulica se relaciona apenas à vazão afluyente à estação (Q), e não à vazão total afluyente ao decantador (Q + Q<sub>r</sub>), pois apenas esta vazão Q possui uma componente ascendente, saindo pelos vertedores. A vazão de recirculação Q<sub>r</sub> tem direção descendente e sai pelo fundo do decantador. Já para a taxa de aplicação de sólidos, é importante que a carga total de sólidos aplicada ao decantador não ultrapasse o fluxo limite de sólidos. Por isso, considera-se a carga realmente afluyente ao decantador, ou seja, (Q + Q<sub>r</sub>).X (VON SPERLING, 2012).

Os valores máximos recomendados pela Norma ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) para taxas de aplicação hidráulica e de sólidos estão sintetizados no Quadro 4 a seguir.

**Quadro 4: Taxas de aplicação hidráulica e de sólidos para decantadores secundários.**

Sistema		Taxa de aplicação hidráulica máxima (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d)	Taxa de aplicação de sólidos máxima (kgSST/m <sup>2</sup> .d)
<b>Lodos ativados convencional</b>	Idade do lodo < 18 dias	28	144
	A/M > 0,15 kgDBO/kgSSVTA.d		
<b>Lodos ativados convencional com remoção adicional de fósforo por adição de produto químico</b>	Idade do lodo < 18 dias	20	144
	A/M > 0,15 kgDBO/kgSSVTA.d		
<b>Aeração prolongada</b>	Idade do lodo > 18 dias A/M < 0,15 kgDBO/kgSSVTA.d	16	120

Fonte: Elaboração própria a partir de ABNT NBR 12.209 (ABNT, 2011).

### **3.4. Tratamento e disposição final do lodo**

Essa etapa corresponde ao tratamento da fase sólida do esgoto, formada pelo lodo gerado no decantador primário, denominado de lodo primário, e o lodo gerado no decantador secundário, denominado de lodo secundário.

#### **3.4.1. Adensamento do lodo**

A finalidade do adensamento do lodo é o aumento da concentração, através da remoção parcial da água nele contida, de forma a reduzir o volume de lodo a ser processado e, conseqüentemente, os custos de implantação e operação das unidades de digestão e secagem (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

As unidades usadas para a concentração de sólidos de lodos primários, de lodos secundários e lodos digeridos, proveniente de digestores, são conhecidas por adensadores. Apresentam como vantagens a possibilidade de misturar diferentes tipos de lodo, equalização da vazão e clarificação do líquido removido (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

De acordo com VON SPERLING (2005), os principais processos utilizados para promover o adensamento do lodo são: adensadores por gravidade, flotadores por ar dissolvido, centrífugas e prensas desaguadoras. Como neste trabalho será considerado o uso de adensador por gravidade, este será mais explorado.

As formas do tanque e os equipamentos de remoção de lodo são semelhantes aos decantadores primários, sendo adaptados de acordo com suas finalidades. A profundidade lateral deve estar entre 3 e 4 metros. Entretanto, a inclinação do fundo é maior do que nos decantadores, da ordem de 2:12 ou 3:12. Na verdade, deseja-se evitar unidades grandes demais, onde o tempo de retenção muito elevado possa trazer problemas de formação de gases e arraste de lodo (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

A quantidade de lodo retida na operação de adensamento é representada pela capacidade de recuperação de sólidos, ou "captura de sólidos". Nos adensadores por gravidade, a captura de sólidos varia entre 85 e 95% e nos flotadores por ar dissolvido pode ultrapassar 95%. O líquido separado nos adensadores retorna à entrada da estação de tratamento (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

### 3.4.2. Estabilização do lodo

De acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), o objetivo da estabilização é a conversão parcial da matéria biodegradável em líquidos, sólidos dissolvidos, subprodutos gasosos; podendo haver alguma destruição de microrganismos patogênicos, além de promover a redução dos sólidos secos do lodo.

Três diferentes processos podem ser empregados para a estabilização do lodo: estabilização química, estabilização térmica e estabilização biológica. Na primeira, a estabilização é atingida mediante a oxidação química da matéria orgânica, através da adição de produtos químicos. Na segunda, ocorre a estabilização a partir da ação do calor sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados. Por último, na estabilização biológica utilizam-se microrganismos para promover a estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica (VON SPERLING, 2005).

A estabilização biológica pode ser subdividida em digestão anaeróbia e digestão aeróbia. A principal diferença entre os dois processos é a presença de oxigênio: na digestão anaeróbia o processo ocorre na ausência de oxigênio enquanto que na digestão aeróbia o processo ocorre na presença de oxigênio. A digestão anaeróbia é mais comumente utilizada devido à sua robustez e alta eficiência (VON SPERLING, 2005).

Como a digestão do lodo na ETE de Maralina será feita por meio de digestão anaeróbia, esse processo será mais detalhado.

Além da estabilização do lodo, a digestão anaeróbia também pode apresentar outras funções, como: reduzir o volume de lodo através dos fenômenos de liquefação, gaseificação e adensamento; dotar o lodo de características favoráveis à redução de umidade, através dos processos de separação sólido-líquido; e permitir a sua utilização, quando estabilizado convenientemente, como fonte de húmus ou condicionador de solo para fins agrícolas ou de recuperação de solos degradados (JORDÃO e PESSÔA, 2011). Além disso, o lodo digerido por este processo apresenta um baixo potencial para a geração de odores (VON SPERLING, 2005).

O lodo digerido segue no tratamento da fase sólida para a última unidade, que corresponde ao desaguamento do lodo. Essa última etapa é necessária pois o lodo digerido ainda possui um alto teor de umidade, devido ao processo de liquefação ocorrido durante a digestão; o que faz com que o teor de sólidos no lodo digerido seja

menor que no lodo adensado afluente (JORDÃO e PESSÔA, 2011). A parte líquida, ou seja, o sobrenadante é encaminhado para o início da ETE para ser tratado.

De acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), os digestores são, geralmente, constituídos de câmaras de concreto e podem ser classificados de acordo com vários parâmetros. Em função da forma, eles podem ser cilíndricos, prismáticos de seção retangular ou ovais. Além disso, podem ter cobertura ou não, sendo que os cobertos podem ter tampa fixa ou móvel. Pode-se realizar homogeneização do lodo pela recirculação de lodo ou do gás produzido ou por agitadores mecânicos, sendo que existem projetos que optam por não homogeneizar o lodo durante a digestão. Em relação à temperatura, pode haver aquecimento ou não, caracterizando uma digestão termofílica ou uma digestão mesofílica, respectivamente. Em função dos estágios, a digestão pode ocorrer em simples estágio, com apenas um digestor, ou em múltiplos estágios, com dois ou mais digestores. Finalmente, os digestores podem ser de baixa carga, quando a carga de sólidos voláteis aplicadas é baixa, ou de alta carga, quando ocorre o inverso.

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) recomenda que a digestão anaeróbia deve ser preferencialmente processada em um único estágio seguida por um tanque pulmão, com o objetivo de estocagem, adensamento e separação do sobrenadante, podendo, em consequência ser aberto. No entanto, para estações com vazão média afluente superior a 250 L/s, a norma recomenda que sejam utilizados mais de um digestor e ressalta que o tanque pulmão pode servir para mais de um digestor.

A eficiência da digestão costuma ser medida através de um indicador de redução de sólidos voláteis (SV), sendo a redução de 50% de SV o valor almejado (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

No digestor anaeróbio, a degradação dos sólidos suspensos voláteis pelas bactérias, e arqueas metanogênicas, origina a produção de biogás, composto principalmente por gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ). De acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), a composição desse gás é de, aproximadamente, 65 a 70%  $\text{CH}_4$  e de 25 a 30% de  $\text{CO}_2$ . Como o biogás possui um alto poder calorífico (em média 22.400 kJ/m<sup>3</sup> - METCALF e EDDY, 2003 *apud* JORDÃO e PESSÔA, 2011), ele pode ser reaproveitado para gerar energia elétrica. No entanto, ele deve passar por uma fase de purificação, que corresponde à remoção de umidade, enxofre e siloxano (WERF, 2011). Após essa purificação, esse biogás pode ser usado para acionar motores a combustão interna ou turbinas a gás e, portanto, gerar energia elétrica. Essa energia pode ser usada na própria ETE e, se houver excedente, poderá ser vendida para a concessionária local.

Vale ressaltar que existem Estações de Tratamento de Esgotos que não promovem a recuperação desse biogás. O biogás gerado é queimado em flares, com o objetivo de transformar o metano em gás carbônico, já que o potencial de aquecimento do metano é 21 vezes maior do que o gás carbônico para um horizonte de tempo de 100 anos (IPCC, 2007). Sendo assim, em relação ao efeito estufa o gás carbônico é menos nocivo do que o metano.

### **3.4.3.Desaguamento do lodo**

O material resultante dos processos de estabilização do lodo ainda possui um alto teor de umidade, em torno de 96% (JORDÃO e PESSÔA, 2011), sendo necessária a sua desidratação de forma a facilitar o seu transporte para o local de destinação final.

O grau de umidade desejado para o lodo após o processo de desaguamento deve ser selecionado em função das características dos lodos produzidos nas diferentes fases de tratamento e manuseio; do processo de redução da umidade do lodo; e do local de destino final do lodo.

São várias as tecnologias de remoção da umidade do lodo, entre elas: leitos de secagem; lagoas de lodo; filtro prensa; filtro de esteiras; centrífugas; tubos flexíveis geotêxteis; secagem térmica e incineração. Neste estudo focaremos no desaguamento do lodo por centrífugas, uma vez que esta foi a tecnologia selecionada para a ETE de Maralina.

Esta é uma tecnologia que tem se desenvolvido muito devido à evolução dos equipamentos e materiais, à facilidade de operação e à boa eficiência, obtendo uma torta seca com cerca de 25 a 35% de sólidos (65 a 75% de umidade) e captura de sólidos superior a 98 e até 99%.

Assim como os demais processos de desidratação do lodo, as centrífugas requerem um pré-condicionamento do lodo, através da adição de polieletrólitos, que promovem a floculação, melhoram a clarificação e as características do escoamento da parte sólida. A dosagem do polímero e o tipo mais indicado são determinados a partir das características do lodo a se tratar, influenciando diretamente o teor de sólidos na torta e a recuperação de sólidos da parte líquida. Caso o polímero utilizado não seja o mais adequado, a fase líquida separada pode apresentar elevada concentração de sólidos e DBO (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

Entre as vantagens da utilização de centrífugas para o desaguamento do lodo, destaca-se que sua operação pode ser contínua, durante um período diário pré-determinado; e os polieletrólitos utilizados como condicionantes do lodo para sua secagem são de simples manuseio e aplicação, e não aumentam a massa de lodo como ocorre com a incorporação de cal e floculantes necessários para outras tecnologias como o filtro prensa. Além disso, as centrífugas ocupam uma área pequena em relação a outras tecnologias (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

O principal parâmetro no dimensionamento das centrífugas é sua capacidade hidráulica de transporte do lodo úmido. Assim, deve-se conhecer a vazão afluyente e seu teor de sólidos, ou a massa de sólidos, bem como o período de operação previsto para a máquina.

#### **3.4.4. Disposição final do lodo**

O destino final do lodo gerado nas estações de tratamento é um aspecto de fundamental importância no seu projeto, e sua escolha se baseia em aspectos relativos ao condicionamento e estabilização do lodo gerado, grau de desidratação, formas de transporte disponíveis, possibilidades de reuso do lodo, eventuais impactos e riscos ambientais, e aspectos econômicos da destinação final.

Entre as diversas possíveis soluções para a destinação do lodo, podem-se destacar o envio para aterros sanitários; a incineração; usos agrícolas diversos; reuso industrial como agregado para a construção civil e incorporação na fabricação de cimento e produtos cerâmicos; e lançamento no oceano (JORDÃO e PESSÔA, 2011). Cada opção vai requerer diferentes formas de pré-condicionamento do lodo, e apresentam vantagens e desvantagens de acordo com as características próprias da região em que se localiza a estação de tratamento.

A forma mais comum de destinação do lodo no Brasil tem sido a sua co-disposição em aterros sanitários juntamente com o lixo urbano (JORDÃO e PESSÔA, 2011). É uma solução prática e econômica, porém exige que o teor de sólidos do lodo disposto seja ao menos 30%; pois lodos com teores de sólidos inferiores a este valor dificultam ou mesmo impedem a compactação e o trabalho das máquinas sobre o aterro (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

A principal vantagem da disposição de lodos em aterros sanitários é o baixo custo da técnica. No entanto, a implantação de aterros requer a disponibilização de grandes áreas, com características especiais do solo para garantir a sua impermeabilização.

Além disso, existe a questão ambiental da produção de gases e percolado em aterros que necessitam de tratamento, e a dificuldade da reintegração da área após a sua desativação (VON SPERLING, 2005). Vantagens e desvantagens devem ser pesadas antes de se optar pela disposição do lodo em aterros.

Outro aspecto importante a se considerar é o transporte do lodo até o seu ponto de disposição final. Este transporte pode ser feito por rodovias, ferrovias, barcaças ou dutos. O transporte rodoviário por caminhões apresenta a vantagem da maior flexibilidade nas operações de carga e descarga do lodo, porém o custo pode ser elevado para grandes volumes de lodo. O transporte ferroviário é indicado quando é necessário transportar o lodo a grandes distâncias, estando, no entanto, condicionado à existência de uma ferrovia que conecte os pontos de geração e de disposição do lodo. O transporte aquaviário por barcaças é mais utilizado nos casos em que o lodo é lançado diretamente no mar, sendo mais indicado para volumes menores, quando a construção de tubulações submarinas se torna muito onerosa. O transporte por dutos requer grandes investimentos de capital, porém costuma ter um menor custo operacional, sendo indicado para grandes volumes de lodo (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

#### **3.4.5. Balanço de Massa**

O Balanço de Massa considera o aspecto dinâmico das vazões encaminhadas às diversas unidades da ETE, com a visão da ETE como um todo, e o interrelacionamento entre suas diversas unidades (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

É usual realizar o dimensionamento das unidades que compõem a ETE a partir da vazão e concentração de sólidos e DBO afluentes à ETE. No entanto, a vazão total a ser tratada pela ETE é composta pela vazão afluyente mais as vazões de recirculação, que retornam ao início da estação. Essa vazão de recirculação é composta pelo sobrenadante de adensadores e digestores e a fase líquida de flotores e unidades de secagem de lodo, e podem apresentar concentrações de sólidos e DBO superiores às do esgoto afluyente, resultando em uma massa de sólidos e matéria orgânica diferentes das inicialmente previstas (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

Cada uma das recirculações que geram vazão e massa deve ser levada em conta no cálculo do Balanço de Massa da ETE até o ponto em que o acréscimo resultante da última recirculação considerada possa ser admitido como desprezível (JORDÃO e PESSÔA, 2011). Por isso é necessário realizar o Balanço de Massa para a ETE dimensionada.

## **4. Dimensionamento da Estação de Tratamento de Esgotos de Maralina**

Este capítulo contempla o memorial descritivo relativo ao dimensionamento das unidades que compõem as duas rotas de tratamento estudadas.

O dimensionamento da ETE será feito com base nas recomendações da Norma ABNT NBR 12.209/2011, que trata da elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Para parâmetros que não estejam especificados na Norma, serão utilizados valores médios registrados na literatura sobre o assunto.

As unidades dimensionadas para o sistema de lodos ativados convencional serão:

- Decantador primário;
- Tanque de aeração;
- Decantador secundário;
- Adensador do lodo;
- Digestor; e
- Centrífuga.

Já no sistema de aeração prolongada serão consideradas as unidades:

- Tanque de aeração;
- Decantador secundário;
- Adensador do lodo; e
- Centrífuga.

Vale ressaltar que, uma vez que o objetivo do estudo é a comparação da viabilidade econômica entre as duas concepções para a ETE, não serão dimensionadas unidades similares entre as duas concepções, como o tratamento preliminar, elevatórias e tubulações de transporte do esgoto, uma vez que sua contribuição para os custos totais da ETE serão similares nos dois casos.

### **4.1. Dados de projeto**

Para fins de estudo e comparação do dimensionamento de duas ETE's, e com base nas taxas de crescimento populacional de municípios do mesmo porte que Maralina,

adotou-se uma população prevista de 200.000 habitantes no fim da vida útil do projeto, considerada 30 anos.

Inicialmente, de acordo com a Norma ABNT NBR 12.209/1992 (ABNT, 1992), o dimensionamento das unidades de tratamento de uma ETE deve ser feito com base nos seguintes parâmetros:

- As vazões afluentes máxima e média;
- A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO);
- Sólidos em suspensão totais (SST).

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011) adiciona novos parâmetros como nitrogênio total kjeldahl (NTK), fósforo total (P), coliformes termotolerantes (C Ter) e temperatura. Contudo, como não serão considerados nesse trabalho nem a nitrificação e nem a remoção de fósforo, esses parâmetros não serão considerados. Quanto aos coliformes termotolerantes, a Norma não indica nenhuma faixa de valores para serem usados na ausência de determinação experimental. Quanto à temperatura, considerou-se que a temperatura média no município de Maralina é de 25°C.

A partir disso, calcula-se a vazão média de esgotos gerados de acordo com a Equação (1):

$$Q_{\text{média}} = \text{população} \cdot \text{QPC} \cdot R \quad (1)$$

Onde: QPC: consumo per capita de água. Adotou-se o valor de 200 L/hab.d, por ser um valor padrão usado no dimensionamento quando não se tem dados de campo.

R: coeficiente de retorno, ou seja, é a porcentagem do consumo de água que é transformada em esgoto. Adotou-se o valor usual de 0,8 (VON SPERLING, 2005).

Logo, tem-se:

$$Q_{\text{média}} = 200.000 \text{ hab} \times 200 \text{ L/hab.d} \times 0,8$$

$$Q_{\text{média}} = 32.000.000 \text{ L/d} = 32.000 \text{ m}^3/\text{d}$$

Como um dia tem 86.400 segundos, tem-se:

$$Q_{\text{média}} = 370 \text{ L/s}$$

Logo, pode-se calcular a vazão máxima afluyente. Esta vazão é calculada a partir da seguinte Equação 2:

$$Q_{\text{máxima}} = (Q_{\text{média}} \times k) + Q_{\text{infiltração}} \quad (2)$$

Onde: k: coeficiente de pico e

$Q_{\text{infiltração}}$ : vazão de infiltração.

A vazão de infiltração pode ser calculada a partir da extensão da rede de esgoto e de um coeficiente de infiltração, conforme a Equação (3) abaixo.

$$Q_{\text{infiltração}} = \text{extensão da rede de esgoto} \times \text{coeficiente de infiltração} \quad (3)$$

De acordo com VON SPERLING (2005), a extensão da rede de esgoto de uma cidade de porte médio varia de 2,0 a 3,0 m/hab. Nesse estudo, adotou-se o valor médio de 2,5 m/hab. Sendo assim, para a população em questão, tem-se uma extensão de 500 km. Além disso, é necessário saber o valor do coeficiente de infiltração. De acordo com a Norma ABNT NBR 9.649/1986 (ABNT, 1986), esse valor varia entre 0,05 e 1,0 L/s.km. Adotou-se nesse estudo, o valor médio de 0,5 L/s.km. Logo, tem-se:

$$Q_{\text{infiltração}} = 500 \text{ km} \times 0,5 \text{ L/s.km}$$

$$Q_{\text{infiltração}} = 250 \text{ L/s}$$

Para calcular o coeficiente de pico k, será adotada a fórmula proposta pela Norma ABNT NBR 9.649/1986:

$$k = k_1 \times k_2$$

Onde  $k_1$  corresponde ao coeficiente do dia de maior consumo e  $k_2$  à hora de maior consumo. Usualmente, adota-se  $k_1 = 1,2$  e  $k_2 = 1,5$ . Sendo assim, tem-se  $k = 1,8$ .

Logo, a vazão máxima afluyente é:

$$Q_{\text{máxima}} = (370 \text{ L/s} \times 1,8) + 250 \text{ L/s}$$

$$Q_{\text{máxima}} = 917 \text{ L/s} = 79.200 \text{ m}^3/\text{d}$$

A vazão média afluyente à estação, denominada vazão média de projeto, é composta pela vazão média de esgotos gerada e pela vazão de infiltração.

$$Q_{\text{projeto}} = Q_{\text{média}} + Q_{\text{infiltração}} \quad (4)$$

$$Q_{\text{projeto}} = 370 \text{ L/s} + 250 \text{ L/s}$$

$$Q_{\text{projeto}} = 620 \text{ L/s} = 53600 \text{ m}^3/\text{d}$$

Também são parâmetros essenciais para o dimensionamento a carga de DBO e de SST afluentes à estação. De acordo com a norma ABNT NBR 12.209/2011, na ausência da determinação experimental destes parâmetros, podem ser usados os valores de 60g de DBO<sub>5</sub>/hab.d, 120g de DQO/hab.d e 70g de SST/hab.d. Como esse estudo é em função de uma população fictícia, serão adotados os valores dessa norma. Sendo assim, tem-se:

$$\text{Carga DBO}_5 = 60 \frac{\text{g}}{\text{hab.d}} \times 200.000 \text{ hab}$$

$$\text{Carga DBO}_5 = 12.000 \text{ kg/d}$$

$$\text{Carga DQO} = 120 \frac{\text{g}}{\text{hab.d}} \times 200.000 \text{ hab}$$

$$\text{Carga DQO} = 24.000 \text{ kg/d}$$

$$\text{Carga SST} = 70 \frac{\text{g}}{\text{hab.d}} \times 200.000 \text{ hab}$$

$$\text{Carga SST} = 14.000 \text{ kg/d}$$

A partir dos parâmetros básicos calculados, pode-se começar a dimensionar as duas concepções para a ETE.

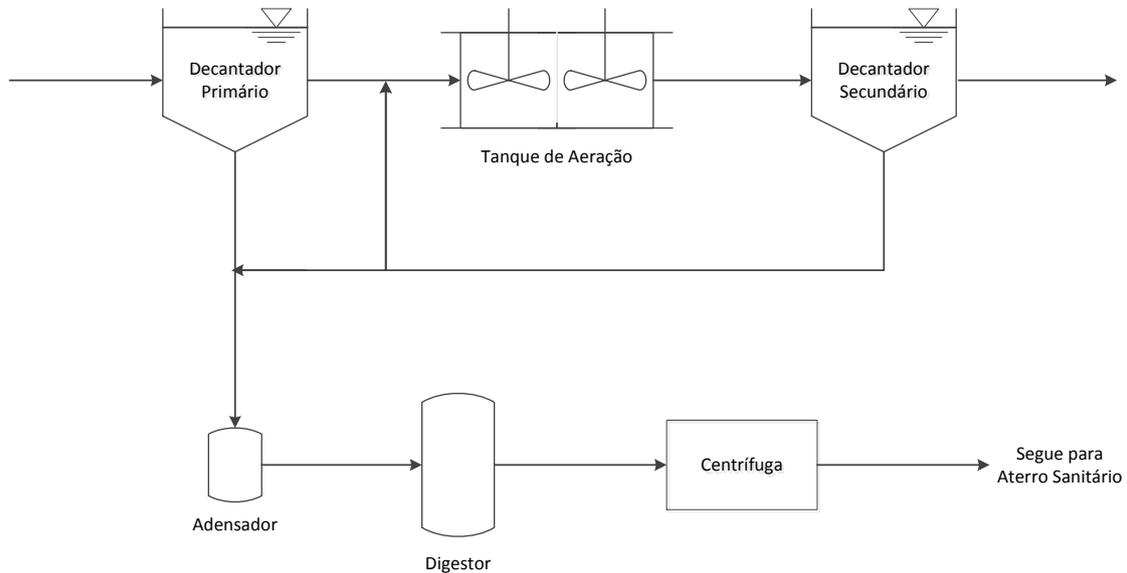
## **4.2. Dimensionamento da ETE para o Sistema de lodos ativados convencional**

No dimensionamento do sistema de lodos ativados convencional, serão consideradas as seguintes unidades:

- Decantador primário;
- Tanque de aeração;
- Decantador secundário;
- Adensador do lodo;

- Digestor; e
- Centrífuga.

A concepção da ETE pelo sistema de lodos ativados convencional está ilustrada na Figura 3 a seguir.



**Figura 3: Fluxograma das unidades a serem dimensionadas para o sistema de lodos ativados convencional.**

O Fluxograma completo para esta concepção encontra-se no Anexo 1 e o Balanço de Massa encontra-se no Anexo 3. O Layout para esta estação encontra-se no Anexo 4. Os croquis das unidades dimensionadas encontram-se no Anexo 5.

#### 4.2.1. Decantador Primário

A primeira unidade a ser dimensionada é o decantador primário. A Norma ABNT NBR 12.209/2011 estipula que a vazão afluyente a essa unidade é a vazão máxima horária, que difere da vazão máxima afluyente à estação por considerar apenas o coeficiente de pico  $k_2$ , relativo à hora de maior consumo. A Norma recomenda o uso desse parâmetro para garantir a segurança do decantador, que deve ser capaz de receber e armazenar a vazão produzida durante o momento de pico, ou seja, as horas de maior consumo, regularizando a vazão que seguirá para a próxima unidade. A vazão máxima horária é apresentada na Equação 5.

$$Q_{\text{máxima horária}} = Q_{\text{projeto}} \times k_2 \quad (5)$$

$$Q_{\text{máxima horária}} = 620 \text{ L/s} \times 1,5$$

$$Q_{\text{máxima horária}} = 930 \text{ L/s} = 80.400 \text{ m}^3/\text{d}$$

Além disso, a norma recomenda que para ETE's com vazão de dimensionamento superior a 250 L/s sejam utilizados mais de um decantador primário. Serão utilizados 3 decantadores de forma a garantir o atendimento aos padrões estabelecidos pela Norma. A partir disso, de acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), é fundamental que a distribuição seja feita de forma homogênea entre os decantadores. Por isso, será construída uma caixa de distribuição da vazão com 3 câmaras, a fim de dividir igualmente a vazão afluyente entre os 3 decantadores primários. Sendo assim, a vazão afluyente a cada decantador será de:

$$Q_{\text{máxima afluyente a cada decantador}} = \frac{80400 \text{ m}^3/\text{d}}{3} = 26800 \text{ m}^3/\text{d} = 310 \text{ L/s}$$

De acordo com a Norma ABNT 12.209/2011, a taxa de escoamento superficial no decantador primário quando este preceder o processo de lodo ativado deve ser de 90 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Logo, tem-se:

$$TAH = 90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

A partir disso, é possível calcular a área superficial de cada decantador, que é:

$$A = \frac{Q_{\text{máxima horária afluyente a cada decantador}}}{TAH} \quad (6)$$

$$A = \frac{26800 \text{ m}^3/\text{d}}{90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}} = 298 \text{ m}^2$$

Sendo assim, pode-se calcular o diâmetro resultante de cada decantador:

$$A = \pi \times R^2 \quad (7)$$

Obtemos assim um raio que pode ser aproximado para 10m, de forma que o diâmetro seja 20m. Assim, a área real de cada decantador será:

$$A_{\text{real}} = 314,16 \text{ m}^2$$

A profundidade lateral (H) adotada será de 4 m e a borda livre adotada será de 0,30 m. A inclinação de fundo adotada será de 1:12, o que proporciona uma altura do centro ao pé da parede fundo (h) igual a 0,83 m de acordo com a fórmula abaixo:

$$h = \frac{R}{12} = \frac{10}{12} = 0,83 \text{ m}$$

A partir desses valores, pode-se encontrar o volume do tanque a partir da fórmula abaixo:

$$V = (\text{Área da base} \times H) + \left(\frac{1}{3} \times \text{Área da base} \times h\right) \quad (8)$$

$$V = 1.361 \text{ m}^3$$

Já o volume útil do decantador corresponde apenas a parte cilíndrica, excluindo o poço de acumulação de lodo. Então, tem-se:

$$V_{\text{útil}} = (\text{Área da base} \times H) \quad (9)$$

$$V_{\text{útil}} = 1.257 \text{ m}^3$$

É necessário verificar se o tempo de retenção médio e máximo de cada decantador atendem aos requisitos da Norma ABNT NBR 12.209/2011.

O tempo de retenção médio é dado por:

$$T_{\text{médio}} = \frac{V_{\text{útil}}}{(Q_{\text{média}}/3)} \quad (10)$$

$$T_{\text{médio}} = \frac{1.257 \text{ m}^3}{17.867 \text{ m}^3/\text{d}}$$

$$T_{\text{médio}} = 0,07\text{d} = 1,69 \text{ h}$$

Já o tempo de retenção máximo é dado por:

$$T_{\text{máximo}} = \frac{V_{\text{útil}}}{(Q_{\text{máxima}}/3)} \quad (11)$$

$$T_{\text{máximo}} = \frac{1.257 \text{ m}^3}{26.400 \text{ m}^3/\text{d}}$$

$$T_{\text{máximo}} = 0,048 \text{ d} = 1,14 \text{ h}$$

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 exige que o tempo de retenção médio seja igual ou inferior a 3 horas. Já o tempo de retenção máximo deve ser maior que 1 hora. De acordo com os valores calculados acima, a norma é atendida.

É necessário também verificar se taxa de escoamento no vertedor de saída, em cada decantador, corresponde ao exigido pela norma. Então, tem-se:

$$q = \frac{(Q_{\text{máxima}}/3)}{\pi \times D} \quad (12)$$

$$q = \frac{26400 \text{ m}^3/\text{d}}{\pi \times 20 \text{ m}} = 420,17 \text{ m}^3/\text{d.m}$$

De acordo com a Norma ABNT NBR 12.209/2011, essa taxa tem que ser menor que 500 m<sup>3</sup>/d.m. Logo, a norma é atendida. Vale ressaltar que a escolha do uso de 3 decantadores foi adotada com o intuito de atender esse parâmetro, pois cálculos anteriores mostraram que o uso de apenas 1 ou 2 decantadores não atenderia o que a norma recomenda para esse parâmetro.

A carga total de DBO e SST é dividida igualmente entre os três decantadores, de forma que a concentração afluente a cada um deles seja idêntica. No entanto, é importante ressaltar que a concentração de DBO e SST se referem à vazão de projeto, e não à vazão máxima horária, pois a carga de DBO e SST citadas se referem a uma média diária e não ao valor gerado no horário de pico. A carga relativa ao horário de pico seria superior à carga média calculada pela recomendação da Norma. Como a carga de DBO afluente total é de 12.000 kg/d e a carga de SST afluente total é de 14.000 kg/d, tem-se:

$$\text{Concentração de DBO}_5 \text{ afluente} = \frac{\text{Carga DBO}_5}{Q_{\text{média}}} \quad (13)$$

$$\text{DBO}_5 = \frac{12.000 \text{ kg/d}}{53.600 \text{ m}^3/\text{d}} = 224 \text{ mg/L}$$

$$\text{Concentração de SST afluente} = \frac{\text{Carga SST}}{Q_{\text{média}}} \quad (14)$$

$$\text{SST} = \frac{14.000 \text{ kg/d}}{53.600 \text{ m}^3/\text{d}} = 261 \text{ mg/L}$$

Os valores encontrados através das Equações (13) e (14) são compatíveis com as faixas de valores médios encontrados na literatura. De acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), a concentração usual de DBO no esgoto está em torno de 200 mg/L enquanto a concentração de SST está em torno de 230 mg/L.

A seguir calcula-se a quantidade de lodo a ser descartado a partir da remoção do SST. De acordo com Jordão, a eficiência de remoção de SST ( $\eta_{SST}$ ) típica em decantadores primários é de 50%. O teor de sólidos típico (TS) do lodo primário resultante é de 4%. A massa de lodo removido em cada decantador é calculada a partir da vazão média afluyente a cada decantador, a concentração de SST afluyente e a eficiência de remoção de SST, conforme a seguinte fórmula:

$$M_{SST \text{ removida por decantador}} = \left( \frac{Q_{m\acute{e}dia}}{3} \right) \times [SST] \times \eta_{SST} \quad (15)$$

Portanto, tem-se:

$$M_{SST \text{ removida por decantador}} = 26.400 \text{ m}^3/\text{d} \times 261 \text{ mg/l} \times 0,5 = 3.445 \text{ kg/d}$$

Considerando os três decantadores primários, a massa total de lodo removido é de:

$$M_{SST} = 3 \times 3445,2 \text{ kg/d} = 10336 \text{ kg/d}$$

A partir disso, é possível calcular a vazão de lodo a ser coletada em cada decantador, para um teor de sólidos (TS) de 4%:

$$Q_{lodo} = \frac{M}{\rho \times \gamma \times TS} \quad (16)$$

$$Q_{lodo} = \frac{3.445 \text{ kg/d}}{1 \times 1.000 \text{ kg/m}^3 \times 0,04} = 86 \text{ m}^3/\text{d}$$

Logo, o volume de lodo retirado dos três decantadores será de:

$$Q_{lodo \text{ total}} = 3 \times 86 \text{ m}^3/\text{d} = 258 \text{ m}^3/\text{d}$$

É possível calcular também a concentração de DBO e SST que seguirá para a próxima unidade da ETE. Sabendo-se que a concentração da DBO<sub>afluyente</sub> a cada decantador é de 149 mg/L e a eficiência de remoção de DBO é de 30% e que a concentração de SST<sub>afluyente</sub> a cada decantador é de 174 mg/L e eficiência de remoção de SST é de 50%, tem-se que:

$$DBO_{\text{efluente}} = DBO_{\text{afluyente}} - DBO_{\text{removida}} \quad (17)$$

$$\text{DBO}_{\text{efluente}} = 157 \text{ mg/L}$$

E:

$$\text{SST}_{\text{efluente}} = \text{SST}_{\text{afluente}} - \text{SST}_{\text{removida}} \quad (18)$$

$$\text{SST}_{\text{efluente}} = 131 \text{ mg/L}$$

#### 4.2.2. Tanque de aeração

A Norma ABNT NBRT 12.209/2011 prescreve que a vazão de dimensionamento para o processo de lodos ativados deve ser a vazão de projeto afluyente à estação. Ainda de acordo com essa Norma, quando a vazão da ETE é superior a 100 L/s, é recomendado que sejam implantadas mais de uma linha de reator biológico operando em paralelo. Nesta concepção, será utilizado um tanque de aeração para cada decantador primário, totalizando três tanques de aeração. Assim, tem-se:

$$Q_{\text{afluente}} = 17.867 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{DBO}_{\text{afluente}} = S_0 = 157 \text{ mg/L}$$

$$\text{SST}_{\text{afluente}} = X_0 = 88,38 \text{ mg/L}$$

O dimensionamento dos tanques de aeração parte do cálculo da produção esperada de lodo, conforme apresentado no capítulo 2. Para isso, é necessário calcular o valor de  $Y_{\text{obs}}$ , dado por:

$$Y_{\text{obs}} = \frac{Y}{(1+f_b \times k_d \times \theta_c)} \quad (19)$$

Onde:

$$f_b = \frac{f_b'}{1+(1-f_b') \times k_d \times \theta_c} \quad (20)$$

De acordo com VON SPERLING (2012),  $k_d$  varia entre 0,06 e 0,10 mgSSV/mgSSV.d enquanto  $Y$  varia de 0,4 a 0,8 gSSV/gDBO removida, sendo a faixa de 0,5 a 0,7 g/g mais comum. Adotou-se nesses cálculos  $k_d = 0,06 \text{ d}^{-1}$  e  $Y = 0,55 \text{ g/g}$ . Também é usual adotar  $f_b' = 80\%$ . Assim, sendo  $\theta_c = 10$  dias, tem-se:

$$f_b = \frac{0,8}{1 + (1 - 0,8) \times 0,06 \times 10} = 0,71 \text{ g DBO/g SST}$$

Portanto:

$$Y_{\text{obs}} = \frac{0,55}{1 + (0,06 \text{ d}^{-1} \times 0,71 \times 10 \text{ d})} = 0,39$$

De acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), a concentração típica de DBO<sub>5</sub> e SST no efluente do tanque de aeração varia entre 20 e 30 mg/L. Adota-se que nesse sistema a concentração efluente esperada tanto de DBO quanto de SST será de 20 mg/L. Portanto, tem-se:

$$\text{DBO}_{\text{efluente}} = S_e = 20 \text{ mg/L}$$

$$\text{SST}_{\text{efluente}} = X_e = 20 \text{ mg/L}$$

Conforme explicado no capítulo 2, sabe-se que S<sub>e</sub> é DBO solúvel no efluente. O fator de carga (f<sub>b</sub>), conforme calculado anteriormente, é de 0,71 g DBO/gSST. Logo, tem-se:

$$\text{DBO}_{\text{efluente}} = \text{DBO}_{\text{particulada}} + \text{DBO}_{\text{solúvel}} \quad (21)$$

$$\text{DBO}_{\text{particulada}} = \text{SST}_{\text{efluente}} \times f_b \quad (22)$$

$$\text{DBO}_{\text{particulada}} = 20 \text{ mgSST/L} \times 0,71 \text{ gDBO/gSST} = 14 \text{ mgDBO/L}$$

$$\text{DBO}_{\text{solúvel}} = 20 - 14 = 6 \text{ mgDBO/L}$$

$$\text{Remoção de DBO}_{\text{solúvel}} = \frac{157 - 6}{157} = 96\%$$

$$\text{Remoção de DBO}_{\text{total}} = \frac{157 - 20}{157} = 87\%$$

Portanto, a eficiência de remoção de DBO<sub>solúvel</sub> é de 96% e a de remoção de DBO<sub>total</sub> é de 87%. JORDÃO e PESSÔA (2011) citam que a remoção de DBO<sub>total</sub> está entre 85 e 95%. Sendo assim, essa remoção está dentro da faixa de remoção esperada.

De acordo com VON SPERLING (2012), a relação entre SSV/SST em sistemas de lodos ativados convencionais está em torno de 0,70 a 0,85 gSSV/gSST. Adotando o valor de 0,75 gSSV/gSST, podemos calcular a produção de lodo esperada:

A produção de lodo esperada é calculada pela seguinte fórmula:

$$\Delta X_{\text{por tanque de aeração}} = Y_{\text{obs}} \times (S_0 - S_e) \times Q \quad (23)$$

$$\Delta X = 0,39 \times (157 \text{ mg/l} - 6 \text{ mg/l}) \times 17.867 \text{ m}^3/\text{d} = 1.039 \text{ kg SSV/d}$$

$$\Delta X_T = \frac{1.039 \text{ kg SSV/d}}{0,75 \text{ g SSV/g SST}} = 1.386 \text{ kg SST/d}$$

Assim, é possível calcular a vazão de lodo a ser descartado por dia por cada decantador pela Equação (16). Considera-se o teor de sólidos (TS) de 0,8%, densidade ( $\gamma$ ) igual a 1 e a massa específica  $\rho$  igual a 1000 kg/m<sup>3</sup>. Logo, tem-se:

$$Q_{\text{lodo}} = \frac{1.386 \text{ kg SST/d}}{0,008 \times 1 \times 1.000 \text{ kg/m}^3}$$

$$Q_{\text{lodo}} = 173 \text{ m}^3/\text{d}$$

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 recomenda que a concentração de sólidos em suspensão no interior do reator esteja compreendida no intervalo de 1.500 a 4.500 mg/L. Adotou-se que a concentração de sólidos no reator ( $X_a$ ) para esta ETE será de  $X_a = 3.000 \text{ mg/L}$ . Como mencionado, nos tanques de aeração convencionais, a concentração de sólidos em suspensão voláteis ( $X_{av}$ ) corresponde a 75% de  $X_a$  (VON SPERLING, 2012).

A partir disso, calcula-se o volume necessário para o tanque de aeração, através da Equação (24):

$$V_{\text{tanque}} = \frac{\theta_C \times Y \times Q (S_0 - S_e)}{X_{av} \times (1 + k_d \times f_b \times \theta_C)} \quad (24)$$

$$V = \frac{10 \text{ d}^{-1} \times 0,55 \times 17.867 \text{ m}^3/\text{d} (157 - 6) \text{ mg/l}}{(3.000 \times 0,75) \text{ mg/l} (1 + 0,06 \times 0,71 \times 10 \text{ d}^{-1})}$$

$$V = 4619 \text{ m}^3$$

Adotando uma altura de 4 metros, tem-se uma área da base igual a aproximadamente 1.155 m<sup>2</sup>. A relação de comprimento/largura do tanque de aeração deve ser aproximadamente 3:1. Sendo assim, adota-se que o comprimento do tanque será de 60 metros e a largura será de 20 metros. Com isso, temos um novo valor para o volume do tanque de 4.800 m<sup>3</sup>.

A partir disso, calcula-se o tempo de retenção hidráulico através da fórmula:

$$\mathbf{TRH} = \frac{V_{\text{tanque}}}{Q} \quad (25)$$

$$TRH = \frac{4.800 \text{ m}^3}{17.867 \text{ m}^3/\text{d}} = 0,27 \text{ d} = 6,45 \text{ h}$$

JORDÃO e PESSÔA (2011) recomendam que o tempo de retenção no tanque de aeração esteja entre 4 e 8h, portanto o tempo de retenção encontrado está dentro da faixa recomendada.

Também é possível calcular a relação alimento/micro-organismo (A/M) existente, a partir da fórmula a seguir:

$$\mathbf{A/M} = \frac{Q(S_0 - S_e)}{X_{av} \times V_{\text{tanque}}} \quad (26)$$

$$A/M = \frac{17.867 \text{ m}^3/\text{d} \times (157 - 6) \text{ mg/l}}{(3.000 \times 0,75) \text{ mg/l} \times 4.800 \text{ m}^3}$$

$$A/M = 0,25 \text{ kgDBO/kgSST.d}$$

De acordo com a Norma ABNT NBR 12.209/2011 (ABNT, 2011), a relação A/M em sistemas de lodos ativados convencional deve estar na faixa de 0,20 a 0,70 kgDBO/kgSST.d. Como se pode ver, o valor dessa relação é atendido.

Além disso, esta Norma recomenda que a vazão de recirculação do lodo dos decantadores secundários para os tanques de aeração seja tal que a concentração de sólidos no lodo recirculado não ultrapasse 10.000 mg/L (ABNT, 2011). Adotando a concentração de sólidos no lodo recirculado ( $X_u$ ) como  $X_u = 8.000 \text{ mg/L}$ , pode-se calcular a vazão de recirculação requerida pela seguinte fórmula:

$$\mathbf{r} = \frac{X_a}{X_u - X_a} \quad (27)$$

$$r = \frac{3.000 \text{ mg/L}}{8.000 \text{ mg/L} - 3.000 \text{ mg/L}} = 60\%$$

Com base nesses parâmetros, é possível calcular a produção do lodo em função do volume do tanque, através da Equação (28):

$$\Delta X = \frac{X_a \times V_{\text{tanque}}}{\theta_c} \quad (28)$$

$$\Delta X = \frac{3.000 \text{ mg/l} \times 4.800 \text{ m}^3}{10 \text{ d}}$$

$$\Delta X = 1440 \text{ kg}^{\text{SSTA}}/\text{d}$$

Pode-se calcular o consumo de oxigênio (medido em kgO<sub>2</sub>/d) em função da quantidade de DBO removida do efluente e a taxa de respiração endógena dos microrganismos:

$$M_{O_2} = a'(S_0 - S_e) \times Q + b' \times X_{av} \times V_{\text{tanque}} \quad (29)$$

Onde: a' = quantidade de oxigênio necessária para oxidação da matéria orgânica pelo metabolismo dos microrganismos;

b' = quantidade de oxigênio utilizado por dia (em kg) por kg de lodo no tanque de aeração (SSVTA) para a fase de respiração endógena.

De acordo com JORDÃO E PESSÔA (2011), os valores de a' e b' já são amplamente conhecidos para o esgoto doméstico, estando a' em torno de 0,52 e b' de 0,12 d<sup>-1</sup>. Assim, temos:

$$M_{O_2} = 0,52 \times (157 - 6) \text{ mg/L} \times 17.867 \text{ m}^3/\text{d} + 0,12 \text{ d}^{-1} \times 2.250 \text{ mg/L} \times 4.800 \text{ m}^3$$

$$M_{O_2} = 2.700 \text{ kg O}_2/\text{d}$$

Contudo, a Norma ABNT NBR 12.209/2011 recomenda que a massa de oxigênio a ser disponibilizada para o processo seja, no mínimo, uma vez e meia a carga de DBO aplicada ao tanque de aeração quando não se tem nitrificação. A carga de DBO pode ser calculada pela Equação (30):

$$M_{\text{DBO}} = Q \times S_0 \quad (30)$$

$$M_{\text{DBO}} = 17.867 \text{ m}^3/\text{d} \times 157 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

$$M_{\text{DBO}} = 2.800 \text{ kg/d}$$

Assim, a massa de oxigênio fornecida deve ser no mínimo:

$$MO_2 = 1,5 \times M_{DBO} \quad (31)$$

$$MO_2 = 4.200 \text{ kg } O_2/d$$

Como o valor exigido pela norma é maior do que o valor calculado em função do metabolismo dos microrganismos, adota-se o valor de  $MO_2$  obtido pelo método da norma. Por isso:

$$MO_2 = 4.200 \text{ kg } O_2/d = 175 \text{ kg } O_2/h$$

Será adotado um sistema de aeração mecânica superficial. A capacidade de transferência de oxigênio proporcionada pelo equipamento é informada pelo próprio fabricante do equipamento. No entanto, é importante ressaltar que a capacidade nominal informada pelo fabricante ( $N_0$ ) é testada em laboratório, em condições que podem ser bastante diferentes das condições reais da aplicação em campo. Assim, é necessário calcular a transferência real de oxigênio proporcionada pelo equipamento nas condições de campo ( $N$ ). a relação entre  $N$  e  $N_0$  é dada por:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{C_{sw} - C_L}{9,02} \times \alpha \times 1,02^{(T-20^\circ C)} \quad (32)$$

Onde:  $C_{sw}$  = concentração de saturação de oxigênio dissolvido no esgoto no tanque de aeração;

$C_L$  = concentração de oxigênio no tanque de aeração;

$\alpha$  = fator de correção que depende do esgoto a ser tratado;

$T$  = temperatura ambiente.

De acordo com séries históricas de temperatura em Maralina, a temperatura média no município é de aproximadamente  $25^\circ C$ . De acordo com a Norma ABNT NBR 12.209/2011,  $C_L$  deve ser no mínimo  $1,5 \text{ mg/L}$ . JORDÃO e PESSÔA (2011) citam que o fator  $\alpha$  para esgotos domésticos varia entre  $0,8$  e  $0,9$ . Adotou-se no trabalho o valor médio de  $0,85$ . Além disso, JORDÃO e PESSÔA (2011) indicam que:

$$C_{sw} \approx 0,95 \times C_s$$

Sendo  $C_s (25^\circ C) = 8,18 \text{ mg/L}$  (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

Sendo assim, tem-se:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{(0,95 \times 8,18) - 1,5}{9,02} \times 0,85 \times 1,02^{(25-20^\circ\text{C})}$$

$$\frac{N}{N_0} = 0,65$$

Com isso, é possível calcular a transferência real de oxigênio para os tanques de aeração. Após uma busca por aeradores que atendessem às necessidades do projeto, selecionaram-se os aeradores mecânicos superficiais de baixa rotação HB 210-30 e HB 230-50 da empresa ECOSAN. A empresa informa que a capacidade de oxigenação nominal ( $N_0$ ) de ambos os aeradores é de 1,8 kg  $O_2$ /cv.h. Sendo assim, tem-se:

$$N = 0,65 \times N_0$$

$$N = 0,65 \times 1,8 \text{ kg } O_2/\text{cv.h}$$

$$N = 1,17 \text{ kg } O_2/\text{cv.h}$$

De acordo com cálculos anteriores, tem-se que:

$$MO_2 = 4.200 \text{ kg } O_2/\text{d} = 175 \text{ kg } O_2/\text{h}$$

Assim, é possível calcular a potência total para o sistema de aeração:

$$P_{\text{total}} = \frac{MO_2}{N} \quad (33)$$

$$P_{\text{total}} = 149 \text{ cv}$$

De acordo com a Norma ABNT NBR 12.209/2011, para vazões afluentes maiores que 50 L/s, deve-se ter, pelo menos, 3 aeradores. Sendo assim, e após consulta ao catálogo de aeradores da empresa ECOSAN, chegou-se a duas opções de configuração para os aeradores: 5 aeradores de motor 30 cv, que fornecem uma potência total de 150 cv; ou 3 aeradores de motor 50 cv, fornecendo a mesma potência total. Ambas as opções atendem à potência requerida pelo sistema, a escolha dependerá apenas do custo, que será abordado no próximo capítulo.

### 4.2.3. Decantador Secundário

A última unidade no tratamento da fase líquida é o decantador secundário. Como nessa ETE existem 3 tanques de aeração, serão necessários 3 decantadores secundários, um para cada tanque.

O principal parâmetro a ser dimensionado é a área superficial do decantador. De acordo com a Norma ABNT NBR 12.209/2011, para o sistema de lodos ativados convencional, com idade do lodo ( $\Theta_c$ ) inferior a 18 dias ou relação A/M superior a 0,15 kgDBO/kgSST.d, a taxa de aplicação hidráulica (TAH) deve ser igual ou inferior a 28 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Vale ressaltar que a vazão afluyente ao decantador secundário é igual à vazão efluente do tanque de aeração, que por sua vez é igual à vazão afluyente ao tanque de aeração. Portanto, a partir da Equação (6), tem-se:

$$A = \frac{17.867 \text{ m}^3/\text{d}}{28 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}}$$
$$A = 638 \text{ m}^2$$

Com isso, é possível calcular o diâmetro resultante a partir da Equação (7).

$$R = 14,25 \approx 15 \text{ m} \rightarrow D = 30 \text{ m}$$

A área superficial real correspondente ao diâmetro de 30m será:

$$A_{\text{real}} = 707 \text{ m}^2$$

Para esta área superficial, a taxa de aplicação hidráulica será 25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, atendendo ao que é recomendado na norma.

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 estabelece também que a taxa de aplicação de sólidos deve ser igual ou inferior a 144 kg/m<sup>2</sup>.d para sistemas de lodos ativados convencionais. Esta taxa é dada pela relação entre a massa de sólidos afluyente ao decantador e sua área superficial, ou seja:

$$\mathbf{TASST} = \frac{\mathbf{M_{SST}}}{\mathbf{A}} \quad (34)$$

Onde:  $\mathbf{M_{SST}} = (\mathbf{Q} + \mathbf{Q_r}) \times \mathbf{X}$

Temos que:

$$M_{SST} = (17.867 + 10.720) \text{ m}^3/\text{d} \times 3.000 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3 = 85.760 \text{ kg}/\text{d}$$

Logo:

$$TASST = \frac{85.760 \text{ kg}/\text{d}}{707 \text{ m}^2} = 121 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$$

Portanto, o valor calculado atende a norma.

O tempo de retenção hidráulico pode ser calculado pela Equação (25), considerando apenas o volume útil do decantador, que corresponde à sua parte cilíndrica. Adotando a altura do decantador igual a 4 metros, o volume útil pode ser calculado através da Equação (9):

$$V_{\text{útil}} = 707 \times 4 = 2.827 \text{ m}^3$$

A vazão média afluyente a cada decantador secundário é de 17.867 m<sup>3</sup>/d. Logo, tem-se:

$$TRH = \frac{2.827 \text{ m}^3}{17.867 \text{ m}^3/\text{d}} = 0,16 \text{ d} = 3,8 \text{ h}$$

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 estabelece que o tempo de retenção hidráulico relativo à vazão média deve ser igual ou superior a 1,5h. Este requisito, portanto, também é atendido.

Por fim, a Norma ABNT NBR 12.209/2011 estabelece também que a taxa de escoamento através do vertedor de saída do decantador tem que ser menor ou igual a 290 m<sup>3</sup>/d.m. Essa taxa é calculada a partir da fórmula:

$$q = \frac{Q_{\text{média}}}{\pi \times D} \quad (35)$$

$$q = \frac{17.867 \text{ m}^3/\text{d}}{\pi \times 30 \text{ m}} = 190 \text{ m}^3/\text{d.m}$$

Portanto, a Norma ABNT NBR 12.209/2011 é atendida.

#### 4.2.4. Adensador

Uma vez dimensionadas todas as unidades do tratamento da fase líquida do esgoto, passa-se ao dimensionamento das unidades de tratamento da fase sólida. A primeira dessas unidades é o adensador. Nesta concepção da ETE, o adensado recebe um lodo misto, composto pelo lodo primário, removido dos 3 decantadores primários, e pelo lodo secundário, removido dos 3 decantadores secundários. Como explicado anteriormente, assumiu-se uma relação SSV/SST igual a 75%, portanto tem-se:

- Lodo primário:

$$Q_1 = 3 \times 86 \text{ m}^3/\text{d} = 258 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{SST} = 3 \times 3.445 \text{ kg}/\text{d} = 10.336 \text{ kg}/\text{d}$$

$$\text{SSV} = 0,75 \times 10.336 \text{ kg}/\text{d} = 7752 \text{ kg}/\text{d}$$

$$\text{TS} = 4\%$$

- Lodo secundário:

$$Q_2 = 3 \times 173 \text{ m}^3/\text{d} = 519 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{SST} = 3 \times 1.386 \text{ kg}/\text{d} = 4.157 \text{ kg}/\text{d}$$

$$\text{SSV} = 0,75 \times 4.157 = 3.117 \text{ kg}/\text{d}$$

$$\text{TS} = 0,8\%$$

A vazão do lodo misto será então:

$$Q_{\text{misto}} = Q_1 + Q_2 = 778 \text{ m}^3/\text{d}$$

E a carga de sólidos afluente ao adensador:

$$M_{\text{SST}} = 10.336 + 4.157 = 14.493 \text{ kg}/\text{d}$$

Podemos calcular então o teor de sólidos do lodo misto pela Equação a seguir:

$$TS = \frac{M_{SST}}{Q \times \gamma \times \rho} \quad (36)$$

$$TS = \frac{14.493 \text{ kg/d}}{778 \text{ m}^3/\text{d} \times 1 \times 1.000 \text{ kg/m}^3} = 1.83\%$$

De acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), o teor de sólidos do lodo misto afluente usualmente varia entre 0,5 e 1,5%. O valor encontrado está um pouco acima da faixa citada.

Conforme já mencionado, não é recomendável que os adensadores tenham grandes dimensões. Por isso, serão adotados 2 adensadores. Sendo assim, tem-se que:

$$Q_{\text{afluente a cada adensador}} = \frac{778 \text{ m}^3/\text{d}}{2} = 389 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$SST_{\text{afluente a cada adensador}} = \frac{14.493 \text{ kg/d}}{2} = 7.246 \text{ kg/d}$$

$$SSV_{\text{afluente a cada adensador}} = 0,75 \times 7.246 \text{ kg/d} = 5.435 \text{ kg/d}$$

De acordo com a Norma ABNT NBR 12.209/2011, a máxima taxa de aplicação de sólidos permissível para adensadores que recebem lodos mistos provenientes do tratamento primário e do sistema de lodos ativados é de 50 kg SS/m<sup>2</sup>.d Logo, pode-se calcular a área necessária para cada adensador pela Equação (34):

$$A = \frac{7.246 \text{ kg/d}}{50 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}}$$

$$A = 145 \text{ m}^2$$

Pode-se então calcular o diâmetro de cada adensador:

$$R = 6,79 \text{ m} \approx 7 \text{ m} \rightarrow D = 14 \text{ m}$$

Considerando o diâmetro de 14 m, temos a área real:

$$A_{\text{real}} = 154 \text{ m}^2$$

Considerando que o adensador terá uma altura de 4,5 m, é possível calcular o volume do adensador. Portanto, tem-se:

$$V = 154 \times 4,5 = 693 \text{ m}^3$$

Quanto à taxa de aplicação hidráulica (TAH), a Norma ABNT NBR 12.209/2011 exige que essa taxa esteja entre 6 e 12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Pela Equação (6), tem-se:

$$TAH = \frac{389 \text{ m}^3/\text{d}}{154 \text{ m}^2} = 2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$$

Como essa taxa está muito abaixo da exigida, deve-se adicionar “água de diluição” para satisfazer a taxa mínima de 6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Logo, tem-se:

$$Q_{\text{diluição}} = (6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d} \times A) - Q_{\text{afluente ao adensador}} \quad (37)$$

$$Q_{\text{diluição}} = (6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d} \times 154 \text{ m}^2) - (389 \text{ m}^3/\text{d})$$

$$Q_{\text{diluição}} = 535 \text{ m}^3/\text{d}$$

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 recomenda que o tempo de retenção hidráulico não ultrapasse 24h. Para calcular o tempo de retenção hidráulico, temos:

$$TRH = \frac{V}{(Q_{\text{afluente}} + Q_{\text{diluição}})} \quad (38)$$

$$Q_{\text{total}} = 389 \text{ m}^3/\text{d} + 535 \text{ m}^3/\text{d} = 924 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$TRH = \frac{693 \text{ m}^3}{924 \text{ m}^3/\text{d}}$$

$$TRH = 0,75 \text{ d} = 18 \text{ h}$$

Portanto, o adensador dimensionado atende a este requisito.

Pode-se determinar, então, a vazão de lodo e a quantidade de sólidos suspensos totais (SST) que seguirá para a próxima unidade, o digestor anaeróbico. Esse cálculo é feito por meio do balanço de massa. Sabe-se que a vazão do lodo misto total é de 778 m<sup>3</sup>/d. A massa de SST afluente é de 14.493 kg/d e de SSV é de 10.870 kg/d. Durante o adensamento, haverá uma captura de sólidos de 85%, e o teor de sólidos no lodo adensado será de 5%. Sendo assim, a massa de SST capturada (M'<sub>SST</sub>) é dada por:

$$M'_{SST} = 0,85 \times M_{SST} \quad (39)$$

$$M'_{SST} = 0,85 \times 14.493 \text{ kg/d}$$

$$M'_{SST} = 12.319 \text{ kg/d}$$

$$M'_{SSV} = 0,75 \times M'_{SST} \quad (40)$$

$$M'_{SSV} = 9.239 \text{ kg/d}$$

Sendo assim, a vazão de lodo adensado que segue para o digestor é calculada pela Equação (16):

$$Q = \frac{12.319 \text{ kg/d}}{1 \times 1.000 \text{ kg/m}^3 \times 0,05}$$

$$Q = 246 \text{ m}^3/\text{d}$$

#### 4.2.5. Digestor

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 recomenda que, para ETE's com vazão média afluyente superior a 250 l/s, seja utilizado mais de um digestor. Sendo assim, serão utilizados nesta concepção 2 digestores anaeróbios, de estágio único com um tanque pulmão, que receberão lodo misto. Os digestores serão homogeneizados, porém não disporão de aquecimento, mantendo a temperatura em torno de 25°C.

Essas condições caracterizam uma digestão convencional, ou de baixa taxa. Portanto, de acordo com a Norma ABNT NBR 12.209/2011, o tempo de digestão deverá ser maior do que 30 dias, enquanto a taxa de aplicação de SSV deverá estar situada na faixa de 0,5 a 1,2 kg SSV/m<sup>3</sup>.d. Sendo assim, tem-se:

$$Q_{\text{afluyente à digestão}} = Q_{\text{lodo misto adensado}} = 246 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$SST_{\text{afluyente à digestão}} = SST_{\text{lodo misto adensado}} = 12.319 \text{ kg SST/d}$$

$$SSV_{\text{afluente à digestão}} = SSV_{\text{lodo misto adensado}} = 9.239 \text{ kg SSV/d}$$

Como serão utilizados 2 digestores, tem-se que:

$$Q_{\text{afluente a cada digestor}} = \frac{246 \text{ m}^3/\text{d}}{2} = 123 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$SST_{\text{afluente a cada digestor}} = \frac{12.319 \text{ kg SST/d}}{2} = 6.159 \text{ kg SST/d}$$

$$SSV_{\text{afluente a cada digestor}} = \frac{9.239 \text{ kg SSV/d}}{2} = 4.620 \text{ kg SSV/d}$$

Adotando a taxa de sólidos aplicada de 1,2 kg SSV/m<sup>3</sup>.d, obtém-se o volume útil de cada digestor:

$$V_{\text{útil de cada digestor}} = \frac{SSV_{\text{afluente}}}{TASSV} \quad (41)$$

$$V_{\text{útil}} = \frac{4.620 \text{ kg SSV/d}}{1,2 \text{ kg SSV/m}^3 \cdot \text{d}}$$

$$V_{\text{útil}} = 3.850 \text{ m}^3$$

Adota-se que a altura (h) de cada digestor é de 20 metros (JORDÃO e PESSÔA, 2011). Sendo assim, pode-se calcular o diâmetro de cada digestor pela Equação (9):

$$A = \frac{3.850 \text{ m}^3}{20 \text{ m}} = 192 \text{ m}^2$$

$$R = 7,82 \rightarrow R \approx 8 \text{ m} \quad \text{e} \quad D = 16 \text{ m}$$

$$A_{\text{real}} = 201 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{útil real}} = 4.021 \text{ m}^3$$

É possível também calcular pela Equação (25) o tempo de retenção de cada digestor.

$$\text{TRH} = \frac{4.021 \text{ m}^3}{123 \text{ m}^3/\text{d}} = 32 \text{ d}$$

De acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), a eficiência da digestão anaeróbia costuma ser medida através da redução de sólidos voláteis (SV). Geralmente, essa redução é de 50% de SV. Logo, tem-se no lodo digerido:

$$\text{SSV}_{\text{lodo digerido}} = 0,5 \times \text{SSV}_{\text{afluente a cada digestor}} \quad (42)$$

$$\text{SSV}_{\text{lodo digerido}} = 2.310 \text{ kg/d}$$

$$\text{SSF (sólidos suspensos fixos)} = \text{SST} - \text{SSV} \quad (43)$$

$$\text{SSF}_{\text{lodo digerido}} = \text{SSF}_{\text{afluente}} = 1.540 \text{ kg/d}$$

$$\text{SST}_{\text{lodo digerido de cada digestor}} = \text{SSV}_{\text{lodo digerido}} + \text{SSF}_{\text{lodo digerido}} \quad (44)$$

$$\text{SST}_{\text{lodo digerido de cada digestor}} = 3.850 \text{ kg/d}$$

Assim, é possível calcular a vazão de lodo digerido que seguirá para a próxima, e última, unidade da ETE, a desidratação do lodo. De acordo com JORDÃO e PESSÔA (2011), o teor de sólidos (TS) no lodo digerido é da ordem de 3 a 5%. Adotando o valor médio, TS = 4%, tem-se pela Equação (16):

$$Q = \frac{3.850 \text{ kg/d}}{1 \times 1.000 \text{ kg/m}^3 \times 0,04}$$

$$Q_{\text{lodo digerido de cada digestor}} = 96 \text{ m}^3/\text{d}$$

Como são 2 digestores, a vazão efluente total é a soma da vazão efluente de cada digestor. Por isso, tem-se que:

$$Q_{\text{lodo digerido total}} = 2 \times 96 = 192 \text{ m}^3/\text{d}$$

Pode-se então calcular as dimensões do tanque pulmão. Como exposto no capítulo 2, a função desse tanque é estocagem e adensamento. Sendo assim, ele tem que armazenar todo o lodo produzido no digestor até que este possa ser processado na

centrífuga. A média de tempo de operação de uma centrífuga é de 8 horas por dia. Sendo assim, o tanque pulmão teria que armazenar todo o lodo produzido nas 16 horas restantes. Por segurança, adiciona-se um coeficiente de segurança de 20% para o caso de falha da centrífuga, resultando assim em uma capacidade de armazenamento correspondente ao volume de lodo produzido em 18 horas. Vale ressaltar que a Norma recomenda que o tempo de retenção desse tanque seja de pelo menos 12 horas.

Tem-se que:

$$Q_{\text{lodo digerido}} = 192 \text{ m}^3/\text{d} = 8 \text{ m}^3/\text{h}$$

O volume do tanque pulmão será:

$$V_{\text{tanque pulmão}} = Q_{\text{lodo digerido}} \times t_{\text{armazenamento}} \quad (45)$$

$$V_{\text{tanque pulmão}} = 8 \text{ m}^3/\text{h} \times 18 \text{ h} = 144 \text{ m}^3$$

Adotando uma altura de 4 metros, tem-se:

$$A = \frac{V_{\text{tanque}}}{h} = \frac{144 \text{ m}^3}{4 \text{ m}} = 36 \text{ m}^2$$

$$R = 3,38 \rightarrow R \approx 3,5 \text{ m} \quad \text{e} \quad D = 7 \text{ m}$$

$$A_{\text{real}} = 28 \text{ m}^2$$

No digestor anaeróbio, à medida que ocorre a redução dos sólidos suspensos voláteis através da degradação pelas bactérias e arqueas metanogênicas, ocorre a produção de biogás, que é um gás composto principalmente por gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>).

A produção do biogás pode ser estimada a partir de dois indicadores (JORDÃO e PESSÔA, 2011):

- Com base na produção de litros por habitante por dia, de acordo com o tipo de lodo afluente ao digestor. Esse valor varia de 15 a 20 L/hab.d para lodo primário e de 25 a 30 L/hab.d para lodo misto (primário + secundário);
- Com base na produção de gás por kg de sólidos voláteis (SV) destruído, que é da ordem de 0,8 a 1,1 m<sup>3</sup> por kg de SV destruído para digestor que recebe lodo misto.

Considerando que a vazão média de projeto ( $Q_{\text{média projeto}}$ ) é de 620 L/s, que corresponde a 53.600 m<sup>3</sup>/d; que a população que a ETE atenderá é de 200.000 habitantes; e que a carga de SSV afluente ao digestor é de 9.239 kg/d, pode-se estimar a produção de gás pelos dois indicadores:

1º) Considerando que a produção seja de 25 L/hab.dia, já que o lodo afluente é misto. Temos:

$$V_{\text{gás}} = 0,025 \text{ m}^3/\text{hab} \cdot \text{d} \times 200.000 \text{ hab}$$

$$V_{\text{gás}} = 5.000 \text{ m}^3$$

2º) Adotando o valor de 0,90 m<sup>3</sup> de produção gás por kg SSV destruído, já que esse é um valor intermediário na faixa de produção citada pela literatura. Portanto:

$$\text{SSV}_{\text{destruído}} = 0,5 \times 9.239 \text{ kg/d}$$

$$\text{SSV}_{\text{destruído}} = 4620 \text{ kg/d}$$

$$V_{\text{gás}} = 0,90 \text{ m}^3/\text{kg SSV} \times 4.620 \text{ kg SSV}$$

$$V_{\text{gás}} = 4.158 \text{ m}^3/\text{d}$$

Os cálculos com base na geração de biogás por massa de SV destruídos são considerados mais confiáveis e devem ser priorizados nos cálculos de balanço energético, enquanto os cálculos com base em dados populacionais devem ser usados apenas como estimativas iniciais (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

O biogás produzido na ETE de Maralina será queimado em flares de forma a evitar a emissão dos gases estufa (CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>), representando, assim, uma redução do impacto ambiental global da ETE.

#### 4.2.6. Centrífuga

O lodo proveniente do digestor anaeróbico apresenta-se estabilizado, porém ainda contém um alto teor de umidade, sendo necessária a sua desidratação. Na ETE de Maralina, será adotado um processo de desidratação mecanizada através do uso de uma centrífuga.

A vazão de lodo afluyente a essa etapa de desaguamento do lodo é a vazão efluente dos digestores de lodo, ou seja, 192 m<sup>3</sup>/d. Considerando que a centrífuga opera durante 8 h/dia, o que corresponde a uma jornada de trabalho do funcionário responsável pela sua operação, tem-se que:

$$\text{Capacidade total da centrífuga} = \frac{Q_{\text{lodo digerido}}}{\text{Tempo de operação}} \quad (46)$$

$$\text{Capacidade total da centrífuga} = \frac{192 \text{ m}^3/\text{d}}{8 \text{ h}/\text{d}}$$

$$\text{Capacidade total da centrífuga} = 24 \text{ m}^3/\text{h}$$

Considerando que o coeficiente de segurança (pico) é de 1,15, tem-se que:

$$\text{Capacidade total da centrífuga} = 24 \text{ m}^3/\text{h} \times 1,15 = 28 \text{ m}^3/\text{h}$$

Como foi discutido anteriormente, serão empregados polímeros para condicionar o lodo e facilitar seu desaguamento. Considerando o uso de polieletrólitos na razão de 6 kg por tonelada de lodo afluyente à centrífuga (JORDÃO e PESSÔA, 2011), tem-se que:

- Massa de lodo afluyente à centrífuga (SST lodo digerido):

$$7,7 \text{ ton SST}/\text{d}$$

- Uso diário de polieletrólitos:

$$6 \text{ kg polímero}/\text{ton SST} \times 7,7 \text{ ton SST}/\text{d} = 46 \text{ kg}/\text{d}$$

Sendo assim, o uso total de polieletrólitos será de aproximadamente 46 kg/d.

Considerando que o teor de sólidos esperado na torta é de 30%, pode-se calcular o volume da torta que sairá da centrífuga. A massa específica da mistura do lodo com polieletrólitos é maior que a massa específica do lodo puro, estando em torno de 1060 kg/m<sup>3</sup>. Sendo assim, tem-se pela Equação (16):

$$Q = \frac{7.700 \text{ kg}/\text{d}}{1060 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 1 \times 0,30}$$

$$Q = 24 \text{ m}^3/\text{d}$$

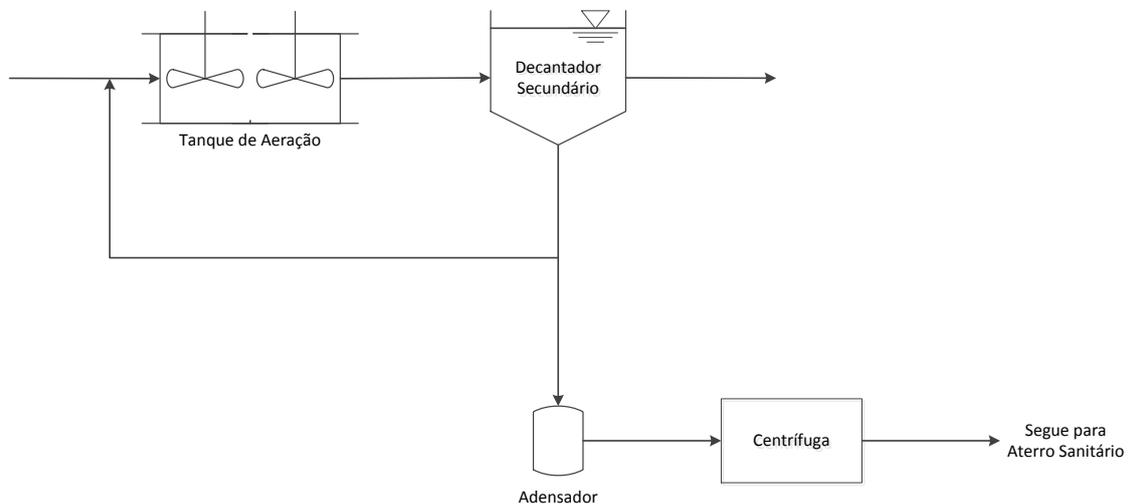
Portanto, a quantidade de lodo que seguirá para o destino final será 24 m<sup>3</sup>/d. A destinação final desse lodo é o aterro sanitário CTR Maralina, localizado a 15km de distância da ETE.

### 4.3. Dimensionamento da ETE para o Sistema de lodos ativados com aeração prolongada

No dimensionamento do sistema de aeração prolongada, serão consideradas as seguintes unidades:

- Tanque de aeração;
- Decantador secundário;
- Adensador do lodo; e
- Centrífuga.

A concepção da ETE pelo sistema de lodos ativados convencional está ilustrada na Figura 4 a seguir.



**Figura 4: Fluxograma das unidades a serem dimensionadas para o sistema de aeração prolongada.**

O Fluxograma completo para esta concepção encontra-se no Anexo 2 e o Balanço de Massa encontra-se no Anexo 3. O Layout para esta estação encontra-se no Anexo 4. Os croquis das unidades dimensionadas encontram-se no Anexo 5.

### 4.3.1. Tanque de aeração

Em estações de tratamento que empregam o sistema de lodos ativados por aeração prolongada, é usual dispensar o tratamento primário como forma de evitar a geração de lodo não estabilizado que necessite de digestão. Assim, o esgoto bruto é enviado diretamente ao tanque de aeração do processo de lodos ativados.

A Norma ABNT NBRT 12.209/2011 prescreve que a vazão de dimensionamento para o processo de lodos ativados deve ser a vazão média afluente à estação. Ainda de acordo com essa Norma, quando a vazão da ETE é superior a 100 L/s, é recomendado que sejam implantadas mais de uma linha de reator biológico operando em paralelo. Como a vazão afluente à ETE de Maralina é de 53.600 m<sup>3</sup>/d, foi definido que o sistema de lodos ativados terá 4 módulos, ou seja, 4 tanques de aeração operando em paralelo, de forma a atender os parâmetros especificados na Norma. Logo, a vazão afluente a cada tanque será de 13.400 m<sup>3</sup>/d.

A carga total de DBO afluente é de 12.000 kg/d, dividida igualmente entre os quatro módulos, de forma que a concentração afluente a cada um deles seja idêntica. Assim, de acordo com a Equação (13), tem-se:

$$DBO_{\text{afluente}} = S_0 = \frac{12.000 \text{ kg/d}}{53.600 \text{ m}^3/\text{d}} = 224 \text{ mg/L}$$

Inicia-se o dimensionamento dos tanques de aeração pelo cálculo da produção esperada de lodo, através do cálculo do valor de  $Y_{\text{obs}}$  e  $f_b$  conforme explicado anteriormente.

Para os parâmetros  $f_b'$ ,  $k_d$  e  $Y$ , serão utilizados os mesmos valores adotados para o sistema de lodos ativados convencionais, ou seja,  $f_b' = 0,8$ ;  $k_d = 0,06 \text{ d}^{-1}$ ; e  $Y = 0,55 \text{ g/g}$ . Já a idade do lodo foi definida como  $\Theta_c = 30$  dias. Assim, temos, de acordo com a Equação (20):

$$f_b = \frac{0,8}{1 + (1 - 0,8) \times 0,06 \times 30} = 0,59 \text{ g DBO/g SST}$$

E portanto, pela Equação (19):

$$Y_{\text{obs}} = \frac{0,55 \text{ g/g}}{1 + (0,06 \text{ d}^{-1} \times 0,59 \times 30 \text{ d})} = 0,20 \text{ g/g}$$

Da mesma forma que no sistema convencional, adota-se que a concentração desejada tanto de DBO quanto de SST no efluente será de 20 mg/L. Portanto, tem-se:

$$\text{DBO}_{\text{efluente}} = S_e = 20 \text{ mg/L}$$

$$\text{SST}_{\text{efluente}} = X_e = 20 \text{ mg/L}$$

Sendo  $S_e$  a DBO solúvel no efluente, e considerando o fator de carga ( $f_b$ ), calculado anteriormente, de 0,59 g DBO/g SST, tem-se, através das Equações (21) e (22):

$$\text{DBO}_{\text{particulada}} = 20 \text{ mgSST/L} \times 0,59 \text{ gDBO/gSST} = 12 \text{ mgDBO/L}$$

$$\text{DBO}_{\text{solúvel}} = 20 - 12 = 8 \text{ mgDBO/L}$$

$$\text{Remoção de DBO}_{\text{solúvel}} = \frac{224 - 8}{224} = 96\%$$

$$\text{Remoção de DBO}_{\text{total}} = \frac{224 - 20}{224} = 91\%$$

Portanto, a eficiência de remoção de  $\text{DBO}_{\text{solúvel}}$  é de 96% e a de remoção de  $\text{DBO}_{\text{total}}$  é de 91%. JORDÃO e PESSÔA (2011) citam que a remoção de  $\text{DBO}_{\text{total}}$  está entre 90 e 95%. Portanto, essa remoção está dentro da faixa esperada.

De acordo com VON SPERLING (2012), a relação entre SSV/SST em sistemas de aeração prolongada está em torno de 0,60 a 0,75 g SSV/gSST. Adotando 0,65 gSSV/gSST, podemos calcular a produção de lodo esperada pela Equação (23):

$$\Delta X = 0,20 \times (224 \text{ mg/l} - 8 \text{ mg/l}) \times 13.400 \text{ m}^3/\text{d} = 568 \text{ kg SSV/d}$$

$$\Delta X_T = \frac{568 \text{ kg SSV/d}}{0,65 \text{ g SSV/g SST}} = 874 \text{ kg SST/d}$$

Assim, é possível calcular pela Equação (16) também a vazão de lodo produzida, considerando o teor de sólidos (TS) de 0,8%, densidade ( $\gamma$ ) igual a 1 e a massa específica  $\rho$  igual a 1.000 kg/m<sup>3</sup>.

$$Q = \frac{874 \text{ kgSST/d}}{0,008 \times 1 \times 1.000 \text{ kg/m}^3}$$

$$Q = 109 \text{ m}^3/\text{d}$$

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 recomenda que a concentração de sólidos em suspensão no interior do reator esteja compreendida no intervalo de 3.000 a 6.000 mg/L. Adotou-se que a concentração de sólidos no reator ( $X_a$ ) para esta ETE será de  $X_a = 4.000 \text{ mg/L}$ . Como mencionado, nos tanques de aeração prolongada, a concentração de sólidos em suspensão voláteis ( $X_{av}$ ) corresponde a 65% de  $X_a$  (VON SPERLING, 2012).

A partir disso, calcula-se o volume necessário para o tanque de aeração, através da Equação (24):

$$V = \frac{30 \text{ d}^{-1} \times 0,55 \times 13.400 \text{ m}^3/\text{d} \times (224 - 8) \text{ mg/l}}{(4.000 \times 0,65) \text{ mg/l} \times (1 + 0,06 \times 0,59 \times 30 \text{ d}^{-1})}$$

$$V = 8.907 \text{ m}^3$$

Adotando uma altura de 4 metros, tem-se uma área da base igual a  $2.227 \text{ m}^2$ . A relação de comprimento/largura do tanque de aeração deve ser aproximadamente 3:1. Sendo assim, adota-se que o comprimento do tanque será de 86 metros e a largura será de 26 metros. Com isso, o volume real do tanque será  $8.944 \text{ m}^3$ .

A partir disso, calcula-se o tempo de retenção hidráulico pela Equação (25):

$$\text{TRH} = \frac{8.944 \text{ m}^3}{13.400 \text{ m}^3/\text{d}}$$

$$\text{TRH} = 0,67 \text{ d} = 16\text{h}$$

JORDÃO e PESSÔA (2011) recomendam que o tempo de retenção no tanque de aeração esteja entre 16 e 36h, portanto o tempo de retenção encontrado está dentro da faixa recomendada.

Também é possível calcular a relação alimento/micro-organismo (A/M) existente, a partir da Equação (26):

$$A/M = \frac{13.400 \text{ m}^3/\text{d} \times (224 - 8) \text{ mg DBO}/\text{L}}{(4.000 \times 0,65) \text{ mg SSV}/\text{L} \times 8.944 \text{ m}^3}$$

$$A/M = 0,12 \text{ kgDBO}/\text{kgSSVT. d}$$

Para sistemas de aeração prolongada, a Norma ABNT NBR 12.209/2011 estabelece que o valor da relação A/M deve ser menor ou igual 0,15 kgDBO/kgSSV.d. Como podemos ver, o valor dessa relação é atendido.

Adotando-se a concentração de sólidos no reator  $X_e = 4.000 \text{ mg/L}$  e a concentração de sólidos no lodo recirculado  $X_u = 8.000 \text{ mg/L}$ , obtemos a vazão de recirculação pela Equação (27):

$$r = \frac{4.000 \text{ mg}/\text{L}}{(8.000 - 4.000) \text{ mg}/\text{L}} = 100\%$$

A produção do lodo é então calculada em função do volume do tanque pela Equação (28):

$$\Delta X = \frac{4000 \text{ mg}/\text{l} \times 8.944 \text{ m}^3}{30 \text{ d}}$$

$$\Delta X = 1.193 \text{ kg SSTA}/\text{d}$$

Pode-se calcular o consumo de oxigênio (medido em  $\text{kg O}_2 / \text{d}$ ) em função da quantidade de DBO removida do efluente e a taxa de respiração endógena dos microrganismos, através da Equação (29):

$$M_{O_2} = 0,52 \times (224 - 8) \text{ mg}/\text{L} \times 13.400 \text{ m}^3/\text{d} + 0,12 \text{ d}^{-1} \times 2.600 \text{ mg}/\text{L} \times 8.944 \text{ m}^3$$

$$M_{O_2} = 10.089 \text{ kg O}_2/\text{d}$$

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 recomenda que a massa de oxigênio a ser disponibilizada para o processo seja, no mínimo, uma vez e meia a carga de DBO aplicada ao tanque de aeração quando não se tem nitrificação. A carga de DBO pode ser calculada pela Equação (30):

$$M_{DBO} = 13.400 \text{ m}^3/\text{d} \times 224 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$M_{DBO} = 3.000 \text{ kg/d}$$

Assim, de acordo com a Equação (31), a massa de oxigênio fornecida deve ser, no mínimo:

$$MO_2 = 4.500 \text{ kg O}_2/\text{d}$$

Como o valor obtido pela fórmula citada por JORDÃO e PESSÔA (2011) é maior do que o exigido pela Norma, adota-se o maior valor de  $MO_2$ , calculado pela fórmula em função do metabolismo dos microrganismos. Por isso:

$$MO_2 = 10.089 \text{ kg O}_2/\text{d} = 420 \text{ kg O}_2/\text{h}$$

Será adotado um sistema de aeração mecânica superficial similar ao sistema adotado no projeto de lodos ativados convencional. Considerando as mesmas condições adotadas anteriormente, foi determinado que a relação entre capacidade de transferência real e a capacidade de transferência nominal de oxigênio será:

$$\frac{N}{N_0} = 0,65$$

Com isso, é possível calcular a transferência real de oxigênio para os tanques de aeração. Após uma busca por aeradores que atendessem às necessidades do projeto, selecionaram-se os aeradores mecânicos superficiais de baixa rotação HB 210-30 e HB 230-50 da empresa ECOSAN. A empresa informa que a capacidade de oxigenação nominal ( $N_0$ ) de ambos os aeradores é de 1,8 kg  $O_2$ /cv.h. Sendo assim, tem-se:

$$N = 0,65 \times N_0$$

$$N = 0,65 \times 1,8 \text{ kg O}_2/\text{cv.h}$$

$$N = 1,17 \text{ kg O}_2/\text{cv.h}$$

De acordo com cálculos anteriores, tem-se que:

$$MO = 10.089 \text{ kg O}_2/\text{d} = 420 \text{ kg O}_2/\text{h}$$

Assim, é possível calcular a potência total para o sistema de aeração pela Equação (33):

$$P_{\text{total}} = 358 \text{ cv}$$

De acordo com a Norma ABNT NBR 12.209/2011, para vazões afluentes maiores que 50 L/s, deve-se ter, pelo menos, 3 aeradores. Sendo assim, e após consulta ao catálogo de aeradores da empresa ECOSAN, chegou-se a duas opções de configuração para os aeradores: 12 aeradores de motor 30 cv, que fornecem uma potência total de 360 cv; ou 8 aeradores de motor 50 cv, fornecendo uma potência total de 400cv. Ambas as opções atendem à potência requerida pelo sistema, a escolha dependerá apenas do custo, que será abordado no próximo capítulo.

#### 4.3.2. Decantador Secundário

A unidade seguinte ao tanque de aeração é o decantador secundário. Como a ETE foi concebida com 4 tanques de aeração, serão necessários 4 decantadores secundários, um para cada tanque.

O principal parâmetro a ser dimensionado é a área superficial do decantador. De acordo com a Norma ABNT NBR 12.209/2011, para o sistema de aeração prolongada, com idade do lodo ( $\Theta_c$ ) superior a 18 dias ou relação A/M inferior a 0,15 kgBDO/kgSST.d, a taxa de aplicação hidráulica (TAH) deve ser igual ou inferior a 16 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Vale ressaltar que a vazão afluente ao decantador secundário é igual à vazão efluente do tanque de aeração, que por sua vez é igual à vazão afluente ao tanque de aeração. Portanto, pela Equação (6), tem-se:

$$A = \frac{13.400 \text{ m}^3/\text{d}}{16 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}}$$

$$A = 838 \text{ m}^2$$

O diâmetro resultante será, então:

$$R = 16,33 \approx 17 \text{ m} \rightarrow D = 34 \text{ m}$$

A área superficial real correspondente ao diâmetro de 34m será:

$$A_{\text{real}} = 908 \text{ m}^2$$

Para esta área superficial, a taxa de aplicação hidráulica será 14,76 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, atendendo ao que é recomendado na norma.

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 estabelece também que a taxa de aplicação de sólidos deve ser igual ou inferior a 120 kg/m<sup>2</sup>.d para sistemas de aeração prolongada. Esta taxa é dada pela Equação (34):

$$M_{SST} = (13.400 + 13.400) \text{ m}^3/\text{d} \times 4.000 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3 = 107.200 \text{ kg}/\text{d}$$

$$TASST = \frac{107.200 \text{ kg}/\text{d}}{908 \text{ m}^2} = 118 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$$

Portanto, o valor calculado atende a norma.

O tempo de retenção hidráulico pode ser calculado pela Equação (25), considerando apenas o volume útil do decantador, que corresponde à sua parte cilíndrica. Adotando a altura do decantador igual a 4 metros, o volume útil pode ser calculado através da Equação (9):

$$V_{\text{útil}} = 908 \times 4 = 3632 \text{ m}^3$$

A vazão média afluente a cada tanque de aeração é de 13.400 m<sup>3</sup>/d. Logo, tem-se:

$$TRH = \frac{3.632 \text{ m}^3}{13.400 \text{ m}^3/\text{d}} = 0,27 \text{ d} = 6,5\text{h}$$

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 estabelece que o tempo de retenção hidráulico relativo à vazão média deve ser igual ou superior a 1,5h. Este requisito, portanto, também é atendido.

Por fim, a Norma ABNT NBR 12.209/2011 estabelece também que a taxa de escoamento através do vertedor de saída do decantador tem que ser menor ou igual a 290 m<sup>3</sup>/d.m. Essa taxa é calculada a partir da Equação (35):

$$q = \frac{13.400 \text{ m}^3/\text{d}}{\pi \times 34 \text{ m}} = 125 \text{ m}^3/\text{d.m}$$

Portanto, a Norma da ABNT NBR 12.209/2011 é atendida.

### 4.3.3. Adensador

Uma vez dimensionadas todas as unidades do tratamento da fase líquida do esgoto, passa-se ao dimensionamento das unidades de tratamento da fase sólida. A primeira dessas unidades é o adensador. Nesta concepção da ETE, um único adensador recebe o lodo proveniente dos 4 decantadores secundários. Portanto, a vazão de lodo afluente ao decantador corresponde à soma das vazões de lodo efluentes de cada decantador secundário. Logo, tem-se:

$$Q_{\text{afluente ao adensador}} = 4 \times 109 \text{ m}^3 = 436 \text{ m}^3/\text{d}$$

A massa de lodo que será encaminhada para o adensador também corresponde à soma da massa de lodo que sai de cada decantador. Logo, tem-se:

$$M_{\text{SST afluente ao adensador}} = 4 \times 873 \text{ kg}/\text{d} = 3.492 \text{ kg}/\text{d}$$

Considerando que a relação SST/SSV é igual a 65%, tem-se:

$$M_{\text{SSV}} = 0,65 \times 3.493 \text{ kg}/\text{d} = 2.270 \text{ kg}/\text{d}$$

De acordo a Norma da ABNT NBR 12.209/2011, a máxima taxa de aplicação de sólidos (TASST) permissível para adensadores que recebem lodos biológicos provenientes unicamente do sistema de lodos ativados é 30 kg SST/m<sup>2</sup>.d. Logo, é possível calcular a área do adensador pela Equação (34):

$$A = \frac{3.493 \text{ kg SST}/\text{d}}{30 \text{ kg SST}/\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

$$A = 116 \text{ m}^2$$

Pode-se então calcular o diâmetro do adensador:

$$R = 6,1 \text{ m} \approx 7 \text{ m} \rightarrow D = 14 \text{ m}$$

Considerando o diâmetro de 14m, temos a área real:

$$A_{\text{real}} = 154 \text{ m}^2$$

Resultando em uma taxa de aplicação de sólidos TASST = 22,69 kg SST/m<sup>2</sup>.d.

Considerando que o adensador terá uma altura de 4,5 m, é possível calcular o volume do adensador. Portanto, tem-se:

$$V = 154 \times 4,5 = 693 \text{ m}^3$$

Quanto à taxa de aplicação hidráulica (TAH), a Norma ABNT NBR 12.209/2011 exige que essa taxa esteja entre 4 e 8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Nas condições atuais, pela Equação (6), tem-se:

$$TAH = \frac{436 \text{ m}^3/\text{d}}{154 \text{ m}^2} = 2,84 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

Como essa taxa está muito abaixo da exigida, deve-se adicionar “água de diluição” para satisfazer uma taxa de 6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Logo, pela Equação (37), tem-se:

$$Q_{\text{diluição}} = (6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d} \times 154 \text{ m}^2) - 436 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_{\text{diluição}} = 487 \text{ m}^3/\text{d}$$

A Norma ABNT NBR 12.209/2011 recomenda que o tempo de retenção hidráulico não ultrapasse 24h. Calcula-se o tempo de retenção hidráulico pela Equação (38):

$$TRH = \frac{693 \text{ m}^3}{(436 + 487) \text{ m}^3/\text{d}}$$

$$TRH = 0,78 \text{ d} = 18,67 \text{ h}$$

Portanto, o adensador dimensionado atende a este requisito

Pode-se determinar, então, a vazão de lodo e a quantidade de sólidos suspensos totais (SST) que seguirá para a próxima unidade, a centrífuga. Este cálculo é feito por meio do balanço de massa. A massa de SST afluyente é de 3492 kg/d e de SSV é de 2270 kg/d. Durante o adensamento, haverá uma captura de sólidos de 85%, e o teor de sólidos do lodo secundário adensado varia entre 2 e 3% (JORDÃO e PESSÔA, 2011). Adotou-se o valor médio TS = 2,5%. Sendo assim, tem-se pelas Equações (39) e (40):

$$M'_{\text{SST}} = 2969 \text{ kg}/\text{d}$$

$$M_{\text{SSV}'} = 1930 \text{ kg}/\text{d}$$

Sendo assim, a vazão de lodo secundário adensado que segue para a centrífuga é calculada pela Equação (16):

$$Q = \frac{2969 \text{ kg/d}}{1 \times 1.000 \text{ kg/m}^3 \times 0,025}$$

$$Q = 119 \text{ m}^3/\text{d}$$

A partir disso, pode-se dimensionar a centrífuga.

#### 4.3.4. Centrífuga

Sabe-se, a partir de cálculos anteriores, que a vazão de lodo afluyente a essa etapa de desaguamento do lodo é de 119 m<sup>3</sup>/d. Considerando que o período de operação da centrífuga é 8h/dia, calcula-se a capacidade da centrífuga pela Equação (46):

$$\text{Capacidade total da centrífuga} = \frac{119 \text{ m}^3/\text{d}}{8 \text{ h/d}}$$

$$\text{Capacidade total da centrífuga} = 14,85 \text{ m}^3/\text{h}$$

Considerando que o coeficiente de segurança (pico) é de 1,15, tem-se que:

$$\text{Capacidade total da centrífuga} = 14,85 \text{ m}^3/\text{h} \times 1,15 = 17 \text{ m}^3/\text{h}$$

Como foi discutido anteriormente, serão empregados polímeros para condicionar o lodo e facilitar seu desaguamento. Considerando o uso de polieletrólitos na razão de 6 kg por tonelada de lodo afluyente à centrífuga, tem-se que:

- Massa de lodo afluyente à centrífuga (SST lodo digerido):

$$2,97 \text{ ton SST/d}$$

- Uso diário de polieletrólitos:

$$6 \text{ kg polímero/ton SST} \times 2,97 \text{ ton SST/d} = 18 \text{ kg/d}$$

Considerando que o teor de sólidos esperado na torta é de 30%, pode-se calcular a vazão da torta que saíra da centrífuga. A massa específica da mistura do lodo com

polieletrólitos é maior que a massa específica do lodo puro, estando em torno de 1060 kg/m<sup>3</sup>. Pela Equação (16), tem-se:

$$Q = \frac{2.969 \text{ kg/d}}{1060 \text{ kg/m}^3 \times 1 \times 0,30}$$

$$Q = 9,34 \text{ m}^3/\text{d}$$

Portanto, a quantidade de lodo que seguirá para o destino final será aproximadamente 9,5 m<sup>3</sup>/d. A destinação final desse lodo é o aterro sanitário CTR Maralina, localizado a 15km de distância da ETE.

Podemos então comparar as dimensões das unidades de ambos os sistemas através do Quadro 5 a seguir:

**Quadro 5: Resumo das dimensões obtidas para ambas as variantes de lodos ativados.**

Unidade	Lodos Ativados Convencional		Aeração Prolongada	
	Quantidade	Dimensões	Quantidade	Dimensões
<b>Decantador Primário</b>	3	∅ = 20 m e H = 4 m	-	-
<b>Tanque de Aeração</b>	3	B = 19m, L=60 m e H= 4m	4	B = 26m, L= 86 m e H= 4m
<b>Decantador Secundário</b>	3	∅ = 36 m e H = 4 m	4	∅ = 34 m e H = 4 m
<b>Adensador</b>	2	∅ = 13 m e H = 4,5 m	1	∅ = 14 m e H = 4,5 m
<b>Digestor</b>	2	∅ = 14 m e H = 19 m	-	-
<b>Centrífuga</b>	1	CTC = 28 m <sup>3</sup> /h	1	CTC = 17 m <sup>3</sup> /h

## **5. Avaliação econômica do projeto da ETE**

Neste capítulo serão abordados os custos relativos às duas concepções para a ETE, compreendendo o levantamento dos custos de implantação (capital – CAPEX) e dos custos de operação e manutenção (OPEX).

### **5.1. Composição dos Custos**

De acordo com ARCEIVALA (1981) *apud* VON SPERLING (2005), os custos de implantação incluem: os custos de construção (incluindo aquisição de equipamentos e instalação); a compra ou desapropriação do terreno; os custos de projeto, supervisão e taxas legais e os juros de empréstimo durante o período de construção. Já os custos anuais de operação incluem: os juros de empréstimos; amortização dos empréstimos; depreciação da estação; seguro da estação; custos de manutenção e operação.

Como a área destinada à construção da ETE já foi definida e será a mesma para as duas concepções, os custos de compra e desapropriação do terreno não foram considerados no cálculo. Os custos de projeto, supervisão e taxas legais, os juros de empréstimos durante o período de construção e operação, a amortização dos empréstimos, depreciação e seguro da estação também foram considerados idênticos para as duas concepções e, por isso, não serão incluídos na análise da viabilidade econômica de cada uma.

#### **5.1.1. Custo de implantação**

Os custos de capital que serão contabilizados nessa análise da viabilidade econômica compreendem o custo com a construção civil das unidades da ETE e o custo com a aquisição de todos os equipamentos necessários.

##### ***Construção Civil***

O custo com construção civil abrange os custos de materiais e mão-de-obra para a construção de todas as unidades de tratamento da fase líquida e parte das unidades de tratamento da fase sólida da ETE, além do edifício que vai abrigar a centrífuga e o dosador de polieletrólitos e outras unidades auxiliares, como o prédio da administração, elevatórias de lodo, esgotamento sanitário, águas pluviais, entre outros.

Vale ressaltar que as unidades auxiliares e o edifício para a centrífuga e o dosador terão as mesmas dimensões nas duas concepções e, portanto, não serão incluídos na análise de viabilidade econômica. Sendo assim, para a quantificação do volume de concreto armado requerido por cada uma das unidades de tratamento da ETE serão adotados os seguintes critérios:

- Espessura da parede lateral: 0,30 metros;
- Espessura da base: 0,4 metros;
- No caso de unidades circulares, a fundação rasa em Radier terá diâmetro igual ao diâmetro da unidade acrescido de 5 metros;
- No caso das unidades retangulares, a fundação rasa em Radier terá comprimento e largura iguais ao comprimento e a largura da unidade acrescidos de 5 metros;
- No caso de unidades circulares ou retangulares, a espessura da fundação rasa em Radier é igual a 1,0 metro.

De acordo com o Boletim de Custos da EMOP/RJ, com base em outubro de 2013, o custo unitário do concreto armado, incluindo a mão-de-obra para a construção, é igual a R\$ 1.497,28/m<sup>3</sup>.

### ***Aquisição de Equipamentos***

Os preços de aquisição e montagem de cada equipamento foram obtidos através de consulta telefônica e via e-mail com as empresas fabricantes. Os valores obtidos estão apresentados nos Quadros 6 a 9 a seguir. A potência dos equipamentos foi também obtida por consulta às empresas.

**Quadro 6: Custo unitário de aquisição dos removedores de lodo.**

<b>Removedores de lodo</b>				
<b>Diâmetro</b>	<b>Potência</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Custo unitário</b>	
<b>Decantador primário com diâmetro de 20m</b>	0,18 kW	ECOSAN	R\$ 110.686,84	
<b>Decantador secundário com diâmetro de 30m</b>	0,18 kW	ECOSAN	R\$ 233.189,79	
<b>Decantador secundário com diâmetro de 36m</b>	0,18 kW	ECOSAN	R\$ 248.556,00	

**Fonte: Comunicação pessoal com ECOSAN.**

**Quadro 7: Custo unitário de aquisição dos aeradores superficiais.**

<b>Aeradores superficiais</b>			
<b>Modelo</b>	<b>Potência</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Custo unitário</b>
<b>HB 210-30</b>	22,06 kW	ECOSAN	R\$ 59.008,40
<b>HB 230-50</b>	36,77 kW	ECOSAN	R\$ 96.826,40

**Fonte: Comunicação pessoal com ECOSAN.**

**Quadro 8: Custo unitário de aquisição dos equipamentos para os adensadores por gravidade.**

Adensador por gravidade				
Diâmetro	Altura	Potência	Fabricante	Custo unitário
14 m	4,5 m	0,18 kW	ECOSAN	R\$ 208.216,80

Fonte: Comunicação pessoal com ECOSAN.

**Quadro 9: Custo unitário de aquisição das centrífugas.**

Centrífugas				
Modelo	Capacidade	Potência	Fabricante	Custo unitário
JUMBO 2	20 m³/h	37,75 kW	PIERALISI	R\$ 478.000,00
JUMBO 3	25 m³/h	45,75 kW	PIERALISI	R\$ 532.000,00

Fonte: Comunicação pessoal com PIERALISI.

Os equipamentos utilizados para os adensadores por gravidade incluem o raspador de lodo, a passarela, o anel central e os pontaletes verticais.

Além disso, em consulta ao professor Isaac Volschan, foi estimado que o custo unitário de aquisição do misturador seja da ordem de duas vezes o preço de um aerador do tanque de aeração. Assim, o custo unitário de aquisição de um misturador é de R\$ 193.652,80. A Norma ABNT NBR 12.209/2011 estipula que o dispositivo de homogeneização do lodo (misturador) deve introduzir uma densidade de potência igual ou superior a 1 W/m³. Foram dimensionados dois digestores, cada um com volume de, aproximadamente, 3.400 m³. Sendo assim, a potência necessária do misturador em cada digestor será de 3,4kW. Portanto, a potência total requerida nos dois digestores é de 6,8kW.

### **5.1.2. Custo de operação e manutenção**

Os custos de operação e manutenção considerados nessa análise compreendem os gastos com o consumo de energia elétrica e produtos químicos e com o transporte e disposição final do lodo.

#### **Consumo de produtos químicos**

O polieletrólito escolhido para ser adicionado ao lodo na fase de centrifugação foi o Panfloc TE, constituído por cloreto de polialumínio. De acordo com a consulta feita via e-mail à empresa PANAMERICANA S.A., o preço desse produto é de R\$ 980 por tonelada.

### ***Consumo de energia elétrica***

A ETE é classificada, de acordo com o nível de tensão requerida pelos seus equipamentos, no Grupo A4 e, portanto, está submetida à tarifação horossazonal Azul. Nesta modalidade de tarifação, o contrato entre o consumidor e a concessionária de energia elétrica estabelece tanto o valor da demanda pretendida pelo consumidor no horário de ponta (Demanda Contratada na Ponta) quanto o valor pretendido nas horas fora de ponta (Demanda Contratada fora de Ponta) (GUEDES, 2011).

A conta de energia elétrica da ETE será composta da soma das parcelas referentes ao consumo, demanda e eventual ultrapassagem da demanda contratada. Em todas as parcelas é feita a diferenciação entre horas de ponta e horas fora de ponta.

Neste trabalho, considerou-se que os equipamentos operam durante 3 horas no horário de ponta e 21 horas no horário fora de ponta. Considerou-se que as tarifas serão similares às praticadas pela concessionária Light, conforme o Quadro 10 a seguir.

A partir dessas informações, calculou-se uma tarifa ponderada para a demanda e para o consumo. Essa tarifa ponderada não vai corresponder ao custo real com eletricidade desses equipamentos, pois estes nem sempre vão operar de acordo com os períodos de ponta e fora de ponta definidos. É usual, por exemplo, que a centrífuga opere apenas durante o período fora de ponta. No entanto, por simplicidade, vamos considerar que a tarifa ponderada seja uma boa estimativa dos custos.

Quadro 10: Tarifas de alta tensão / média tensão - Estrutura Horossazonal Azul

Nível de Tensão	Demanda R\$/Kw						Consumo R\$/MWh						Demanda de Ultrapassagem R\$/kW					
	Ponta			Fora Ponta			Ponta			Fora Ponta			Ponta			Fora Ponta		
	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE
<b>A2 (88 a 138kV)</b>	8,39	8,39	0	4,68	4,68	0	249,31	20,85	228,46	159,58	20,85	138,73	16,78	16,78	0	9,36	9,36	0
<b>A3a (30 a 44kV)</b>	21,54	21,54	0	11,27	11,27	0	264,77	36,31	228,46	175,04	36,31	138,73	43,08	43,08	0	22,54	22,54	0
<b>A4 (2,3 a 25kV)</b>	21,54	21,54	0	11,27	11,27	0	268,86	40,4	228,46	179,13	40,4	138,73	43,08	43,08	0	22,54	22,54	0
<b>AS (Subterrâneo)</b>	33,65	33,65	0	17,24	17,24	0	299,46	71	228,46	209,73	71	138,73	67,3	67,3	0	34,48	34,48	0
<p>(*) Tarifas sem incidência de ICMS, PIS e COFINS  (**) Para a classe rural desconto de 10%</p>																		

Fonte: (LIGHT, 2014).

Assim, é possível calcular as tarifas ponderadas que serão aplicadas à demanda e ao consumo de energia elétrica na ETE de Maralina, conforme indicado no Quadro 11 abaixo.

**Quadro 11: Tarifas de energia elétrica ponderadas.**

Tarifa	Ponta		Fora da ponta		Tarifa ponderada
	Tarifa (R\$)	Duração (horas)	Tarifa (R\$)	Duração (horas)	
<b>Demanda</b>	R\$ 21,54	3	R\$ 11,27	21	<b>R\$ 12,55</b>
<b>Consumo</b>	R\$ 0,268	3	R\$ 0,179	21	<b>R\$ 0,192</b>

Fonte: elaboração própria a partir de (LIGHT, 2014).

### ***Transporte do lodo***

A distância entre a ETE de Maralina e o aterro sanitário mais próximo é de 15 km. De acordo com o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2013), o transporte de material de qualquer natureza para uma distância maior que 10 km, com caminhão basculante de 4,0 m<sup>3</sup>, é de R\$ 0,68 / t.km. Sendo assim, o valor de transporte entre a ETE e o aterro sanitário será de R\$ 10,20 / t.

### ***Disposição Final do lodo***

Neste trabalho, estimou-se que o custo de disposição no aterro mais perto da cidade de Maralina seria baseado no custo praticado pela Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Rio, localizada em Seropédica no Estado do Rio de Janeiro. De acordo com consulta via e-mail à empresa Ciclus, responsável por operar a CTR-Rio, foi informado que o custo de disposição para lodo com 30% de teor de sólidos, ou seja, com 70% de umidade, é de R\$ 110,00 por m<sup>3</sup> de lodo.

## **5.2. Sistema de lodos ativados convencional**

Serão estimados agora os custos de implantação e operação da ETE dimensionada para o sistema de lodos ativados convencional.

### **5.2.1. Custos de implantação**

A partir do dimensionamento da ETE de Maralina com o sistema de lodos ativados convencional, obtemos as seguintes dimensões, listadas no Quadro 12, para cada unidade do tratamento.

**Quadro 12: Dimensões das unidades do sistema de lodos ativados convencional.**

Unidade	Quantidade	Dimensões
Decantador Primário	3	∅ = 20 m e H = 4 m (ver página 27)
Tanque de Aeração	3	B = 20m, L= 60 m e H= 4m (ver página 32)
Decantador Secundário	3	∅ = 30 m e H = 4 m (ver página 39)
Adensador	2	∅ = 14 m e H = 3,5 m (ver página 41)
Digestor	2	∅ = 16 m e H = 20 m (ver página 44)
Tanque Pulmão	1	∅ = 7 m e H = 4 m (ver página 44)

A partir dos dados, listados na seção anterior, sobre a espessura da parede e de fundo e das dimensões da fundação de cada unidade, obteve-se o volume de concreto armado, em m<sup>3</sup>, necessário para a construção de cada unidade da ETE, conforme mostra o Quadro 13 a seguir.

**Quadro 13: Volume de concreto armado necessário para a construção das unidades do sistema de lodos ativados convencional.**

Unidade	Volume (m <sup>3</sup> )					% do volume total
	Paredes	Base	Fundação	Cobertura	Total	
Decantador Primário	229,59	399,95	999,87	-	<b>1.629,41</b>	11,05%
Tanque de Aeração	434,88	1.468,80	4.303,00	-	<b>6.206,68</b>	42,10%
Decantador Secundário	342,68	882,50	2.986,15	-	<b>4.211,33</b>	28,56%
Adensador	94,34	133,93	603,44	-	<b>831,71</b>	5,64%
Digestor	614,50	173,14	732,87	129,85	<b>1.693,65</b>	11,49%
Tanque Pulmão	27,52	18,15	124,69	-	<b>170,36</b>	1,16%
<b>Total</b>	<b>1.743,51</b>	<b>3.076,47</b>	<b>9.750,02</b>	<b>129,85</b>	<b>14.743,13</b>	

Considerando o valor unitário de R\$ 1.497,28/m<sup>3</sup>, tem-se que o preço total com construção civil para o sistema de lodos ativados convencional é de:

R\$ 22.009.791 ,52

De acordo com o dimensionamento do tanque de aeração, presente no item 4.2, obteve-se que a potência requerida para o sistema de aeração era de 149 cv, o que pode ser aproximada para 150 cv. Esse valor pode ser obtido utilizando 3 aeradores

de 50 cv ou 5 aeradores de 30 cv. Contudo, a partir do Quadro 14, pode-se perceber que utilizar 3 aeradores de 50cv é a opção mais econômica.

**Quadro 14: Comparação entre as opções de aeradores para o sistema de lodos ativados convencional.**

Equipamento	Unidade	Custo Unitário	Custo Total
Aerador Superficial Modelo HB 210-30 (ver página 38)	5	R\$ 59.008,40	R\$ 295.042,00
Aerador Superficial Modelo HB 230-50 (ver página 38)	3	R\$ 96.826,40	R\$ 290.479,20

Em função do número de unidades da ETE de lodos ativados convencional, estão listados no Quadro 15 a seguir todos os equipamentos necessários e seus respectivos custos.

**Quadro 15: Custo de aquisição dos equipamentos para o sistema de lodos ativados convencional.**

Unidade	Equipamento	Quantidade	Custo unitário	Subtotal
Decantador primário	Removedor de lodo com diâmetro de 20 m	3	R\$ 110.686,84	R\$ 332.060,52
Tanque de Aeração	Aerador Superficial Modelo HB 230-50	9	R\$ 96.826,40	R\$ 871.437,60
Decantador secundário	Removedor de lodo com diâmetro de 30 m	3	R\$ 248.556,00	R\$ 745.668,00
Adensador	Removedor de Lodo com diâmetro de 13 m	2	R\$ 195.465,00	R\$ 390.930,00
Digestor	Misturador	2	R\$ 193.652,80	R\$ 387.305,60
Centrífuga	Centrífuga Modelo JUMBO 3	1	R\$ 532.000,00	R\$ 532.000,00
<b>TOTAL</b>				<b>R\$ 3.076.688,52</b>

O Quadro 16 a seguir resume os custos totais de implantação para o sistema de lodos ativados convencional.

**Quadro 16: Custos totais de implantação para o sistema de lodos ativados convencional.**

Componente CAPEX	Custo total
Construção civil	R\$ 22.009.791,52
Aquisição de equipamentos	R\$ 3.076.688,52
<b>Total</b>	<b>R\$ 25.086.480,04</b>

### 5.2.2. Custos de operação

Considerando a produção de lodo total no sistema de lodos ativados convencionais e as informações a respeito do consumo de polieletrólitos fornecidas pela empresa, pode-se estimar o custo total anual com a aquisição de produtos químicos, conforme o Quadro 17.

**Quadro 17: Custo total com produtos químicos para o sistema de lodos ativados convencional.**

Lodo gerado (t/ano)	Consumo de polímeros (t/ano)	Custo do polímero (R\$/t)	Total anual (R\$/ano)
2.810,50	16,86	980.00	16.525,74

Com base nas informações fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos, é possível também calcular a potência total instalada na ETE e o consumo mensal de energia esperado, conforme o Quadro 18. Assim, considerando as tarifas ponderadas obtidas no Quadro 11, pode-se calcular o custo total com energia elétrica para o sistema de lodos ativados convencional (Quadro 19).

Por fim, as estimativas de custos com o transporte e disposição final do lodo são apresentadas no Quadro 20.

**Quadro 18: Consumo de energia elétrica de cada unidade do sistema de lodos ativados convencional.**

Unidade	Equipamento	Quantidade	Potência Unitária (KW)	Potência Instalada (KW)	Tempo de operação (h/d)	Consumo diário (KWh/d)	Consumo Mensal (KWh/mês)
Decantador primário	Raspadores de lodo	3	0,18	0,55	24	13,24	397,17
Tanque de aeração	HB 210 – 50	9	22,07	198,59	24	4.766,04	142.981,20
Decantador secundário	Raspadores de lodo	3	0,18	0,55	24	13,24	397,17
Adensador	Raspadores de lodo	2	0,18	0,37	24	8,83	264,78
Digestor	Misturador	2	3,40	6,80	24	163,20	4.896,00
Centrífuga	Jumbo 3	1	45,75	45,75	8	366,00	10.980,00
<b>TOTAL</b>		-	-	<b>252,61</b>	-	<b>5.330,54</b>	<b>159.916,32</b>

**Quadro 19: Custo total com energia elétrica no sistema de lodos ativados convencional.**

Potência Instalada (KW)	Tarifa demanda (R\$/KW)	Consumo mensal (KWh)	Tarifa consumo (R\$/KWh)	Custo mensal (R\$/mês)	Custo anual (R\$/ano)
252,61	R\$ 12,55	159.916,32	R\$ 0,192	R\$ 33.935,05	<b>R\$ 407.220,66</b>

**Quadro 20: Custo total com transporte e disposição final do lodo no sistema de lodos ativados convencional.**

Volume de lodo (m³/ano)	Massa de lodo (t/ano)	Transporte (R\$/ano)	Disposição Final (R\$/ano)	Total anual (R\$/ano)
8.760,00	2.810,50	R\$ 28.667,10	R\$ 963.600,00	<b>R\$ 992.267,10</b>

O Quadro 21 resume os custos de operação anuais do sistema de lodos ativados convencional.

**Quadro 21: Custos anuais de operação para o sistema de lodos ativados convencionais.**

Componente OPEX	Custo anual (R\$/ano)
Produtos químicos	R\$ 16.525,74
Eletricidade	R\$ 407.220,66
Transporte e destinação final do lodo	R\$ 992.267,10
<b>Total</b>	<b>R\$ 1.416.013,50</b>

Para totalizar os custos de operação ao longo dos 30 anos que compõem o horizonte do projeto, e para sua atualização ao valor presente, foi considerada a taxa de desconto de 12% a.a.

O cálculo do valor presente é feito pela seguinte Equação:

$$P = A \times \frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} \quad (47)$$

Onde: P: valor presente;

A: gasto anual;

i: taxa de juros anual;

n: número de anos.

Assim, tem-se que:

$$P = \text{R\$ } 11.406.249,21$$

Assim, os custos totais de CAPEX e OPEX relativos ao sistema de lodos ativados convencional estão apresentados no Quadro 22 a seguir.

**Quadro 22: Custos totais do sistema de lodos ativados convencional.**

Componente dos custos	Valor presente total
CAPEX	R\$ 25.086.480,04
OPEX	R\$ 11.406.249,21
<b>Total</b>	<b>R\$ 36.492.729,25</b>

### 5.3. Sistema de lodos ativados de aeração prolongada

Serão estimados agora os custos de implantação e operação da ETE dimensionada para o sistema de lodos ativados por aeração prolongada.

#### 5.3.1. Custos de implantação

A partir do dimensionamento da ETE de Maralina com o sistema de lodos ativados por aeração prolongada, obtemos as seguintes dimensões, listadas no Quadro 23, para cada unidade do tratamento.

**Quadro 23: Dimensões das unidades do sistema de aeração prolongada.**

Unidade	Quantidade	Dimensões
Tanque de Aeração	4	B = 26m, L= 86 m e H= 4m (ver página 51)
Decantador Secundário	4	∅ = 34 m e H = 4 m (ver página 56)
Adensador	1	∅ = 14 m e H = 4,5 m (ver página 56)

A partir dos dados, listados na seção anterior, sobre a espessura da parede e de fundo e das dimensões da fundação de cada unidade, obteve-se o volume de concreto armado, em m<sup>3</sup>, necessário para a construção de cada unidade da ETE, conforme mostra o Quadro 24 a seguir.

**Quadro 24: Volume de concreto armado necessário para a construção das unidades do sistema de aeração prolongada.**

Unidade	Volume (m <sup>3</sup> )			Total	% do volume
	Paredes	Base	Fundação		total
Tanque de Aeração	772,80	3.680,80	4076,80	<b>8.530,40</b>	64,31%
Decantador Secundário	396,59	889,15	3019,07	<b>4.304,81</b>	32,45%
Adensador	60,65	66,97	301,72	<b>429,33</b>	3,24%
<b>Total</b>	<b>1.230,04</b>	<b>4.636,91</b>	<b>7.397,59</b>	<b>13.264,54</b>	

Considerando o valor unitário de R\$ 1.497,28/m<sup>3</sup>, tem-se que o preço total com construção civil para o sistema de aeração prolongada é de:

R\$ 19.860.737,20

De acordo com o dimensionamento do tanque de aeração, presente no item 4.2, obteve-se que a potência requerida para o sistema de aeração era de 358 cv, que

pode ser obtida utilizando 12 aeradores de 30 cv ou 8 aeradores de 50 cv. Contudo, a partir do Quadro 25, pode-se perceber que utilizar 12 aeradores de 30 cv é a opção mais econômica.

**Quadro 25: Comparação entre as opções de aeradores para o sistema de aeração prolongada.**

Equipamento	Unidade	Custo Unitário	Custo Total
Aerador Superficial Modelo HB 210-30 (ver página 55)	12	R\$ 59.008,40	R\$ 708.100,00
Aerador Superficial Modelo HB 230-50 (ver página 55)	8	R\$ 96.826,40	R\$ 774.611,20

Em função do número de unidades da ETE de aeração prolongada, estão listados no Quadro 26 a seguir todos os equipamentos necessários e seus respectivos custos.

**Quadro 26: Custo de aquisição dos equipamentos para o sistema de aeração prolongada.**

Unidade	Equipamento	Quantidade	Custo unitário	Subtotal
Tanque de Aeração	Aeradores superficiais modelo HB 210 – 30 (30 cv)	48	R\$ 59.008,40	R\$ 2.832.403,20
Decantador secundário	Removedor de lodo com diâmetro de 34 m	4	R\$ 233.189,79	R\$ 932.759,16
Adensador	Removedor de lodo para decantador secundário (D = 14m e H = 4,5m)	4	R\$ 233.189,79	R\$ 932.759,16
Centrífuga	Centrífuga Modelo JUMBO 2	1	R\$ 478.000,00	R\$ 478.000,00
<b>TOTAL</b>				<b>R\$ 4.451.379,16</b>

O Quadro 27 a seguir resume os custos totais de implantação para o sistema de aeração prolongada.

**Quadro 27: Custos totais de implantação para o sistema de aeração prolongada.**

Componente CAPEX	Custo total
Construção civil	R\$ 19.860.737,20
Aquisição de equipamento	R\$ 4.451.379,16
<b>Total</b>	<b>R\$ 24.312.116,36</b>

### 5.2.2. Custos de operação

Considerando a produção de lodo total no sistema de aeração prolongada e as informações a respeito do consumo de polieletrólitos fornecidas pela empresa, pode-

se estimar o custo total anual com a aquisição de produtos químicos, conforme o Quadro 28 a seguir.

**Quadro 28: Custo total com produtos químicos para o sistema de aeração prolongada.**

Lodo gerado (t/ano)	Consumo de polímeros (t/ano)	Custo do polímero (R\$/t)	Total anual (R\$/ano)
1.083,69	6,50	R\$ 980,00	R\$ 6.372,07

Com base nas informações fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos, é possível também calcular a potência total instalada na ETE e o consumo mensal de energia esperado, conforme o Quadro 30. Assim, considerando as tarifas ponderadas obtidas no Quadro 11, pode-se calcular o custo total com energia elétrica para o sistema de aeração prolongada (Quadro 31). Por fim, as estimativas de custos com o transporte e disposição final do lodo são apresentadas no Quadro 32.

O Quadro 29 resume os custos de operação anuais do sistema aeração prolongada.

**Quadro 29: Custos anuais de operação para o sistema de aeração prolongada.**

Componente OPEX	Custo anual (R\$/ano)
Produtos químicos	R\$ 6.372,07
Eletricidade	R\$ 1.948.204,14
Transporte e destinação final do lodo	R\$ 392.478,59
<b>Total</b>	<b>R\$ 2.347.054,79</b>

**Quadro 30: Consumo de energia elétrica de cada unidade do sistema de aeração prolongada.**

Unidade	Equipamento	Quantidade	Potência Unitária (KW)	Potência Instalada (KW)	Tempo de operação (h/d)	Consumo diário (KWh/d)	Consumo Mensal (KWh/mês)
Tanque de aeração	HB 210-30	48	22,07	1.059,12	24	25.418,88	762.566,40
Decantador secundário	Raspadores de lodo	4	0,18	0,74	24	17,65	529,56
Adensador	Raspadores de lodo	1	0,18	0,18	24	4,41	132,39
Centrífuga	Jumbo 2	1	37,75	37,75	8	302,00	9.060,00
<b>TOTAL</b>		-	-	<b>1.097,79</b>	-	<b>25.742,95</b>	<b>772.288,35</b>

**Quadro 31: Custo total com energia elétrica no sistema de aeração prolongada.**

Potência Instalada (KW)	Tarifa demanda (R\$/KW)	Consumo mensal (KWh)	Tarifa consumo (R\$/KWh)	Custo mensal (R\$/mês)	Custo anual (R\$/ano)
1.097,79	12,55375	772.288,35	0,192375	R\$ 162.350,34	R\$ 1.948.204,14

**Quadro 32: Custo total com transporte e disposição final do lodo no sistema de aeração prolongada.**

Volume (m³/ano)	Massa (t/ano)	Transporte (R\$/ano)	Disposição Final (R\$/ano)	Total anual (R\$/ano)
3.467,50	1.083,69	R\$ 11.053,59	R\$ 381.425,00	R\$ 392.478,59

Para totalizar os custos de operação ao longo dos 30 anos que compõem o horizonte do projeto, e para sua atualização ao valor presente, foi considerada a taxa de desconto de 12% a.a.

O cálculo do valor presente é feito pela da Equação (47). Sendo assim, tem-se que:

$$P = \text{R\$ } 18.905.958,13$$

Assim, os custos totais de CAPEX e OPEX relativos ao sistema de lodos ativados com aeração prolongada estão apresentados no Quadro 33 a seguir.

**Quadro 33: Custos totais do sistema de aeração prolongada.**

<b>Componente dos custos</b>	<b>Valor presente total</b>
CAPEX	R\$ 24.312.116,36
OPEX	R\$ 18.905.958,13
<b>Total</b>	<b>R\$ 43.218.074,49</b>

## 6. Resultados e discussão

Os resultados da análise comparativa dos custos de implantação e operação das duas concepções da Estação de Tratamento de Esgotos estão sumarizados no Quadro 34 abaixo.

**Quadro 34: Comparação entre os custos das concepções.**

Item	Lodos ativados convencional	Aeração prolongada
<b>Custos de implantação</b>		
Construção civil	R\$ 22.009.791,52	R\$ 19.860.737,20
Equipamentos	R\$ 3.076.688,52	R\$ 4.451.379,16
<b>Subtotal</b>	<b>R\$ 25.086.480,04</b>	<b>R\$ 24.312.116,36</b>
<b>Custos de operação</b>		
Produtos químicos	R\$ 16.525,74	R\$ 6.372,07
Eletricidade	R\$ 407.220,66	R\$ 1.948.204,14
Transporte e destinação final do lodo	R\$ 992.267,10	R\$ 392.478,59
<b>Subtotal anual</b>	<b>R\$ 1.416.013,50</b>	<b>R\$ 2.347.054,79</b>
<b>Valor presente</b>	<b>R\$ 11.406.249,21</b>	<b>R\$ 18.905.958,13</b>
<b>Total</b>	<b>R\$ 36.492.729,25</b>	<b>R\$ 43.218.074,49</b>

Como pode ser visto, o custo total de implantação da Estação de Tratamento de Esgotos pelo sistema de lodos ativados convencional é menor do que o custo relativo ao sistema de aeração prolongada.

Os custos de implantação do sistema de lodos ativados convencional são maiores do que os custos de implantação do sistema de aeração prolongada. Isso ocorre devido ao maior número de unidades que compõem esse sistema, que implica em um maior custo com a construção civil. No entanto, o sistema de aeração prolongada tem um maior custo de aquisição de equipamentos, devido principalmente à grande quantidade de aeradores mecânicos necessários para garantir o fornecimento de oxigênio necessário no tanque de aeração.

No que diz respeito aos custos de operação, o sistema de aeração prolongada teve um gasto de eletricidade muito superior ao sistema convencional, como esperado, devido à maior necessidade de aeração.

Em relação aos custos com produtos químicos, transporte e destinação final do lodo, observou-se um menor valor para o sistema de aeração prolongada em comparação com o sistema de lodos ativados convencional devido ao menor volume de lodo gerado, o que já era esperado com base na literatura. A redução de custos obtida com a redução do volume de lodo encaminhado para tratamento e disposição final, no entanto, não foi capaz de compensar os gastos com energia elétrica.

Assim, os custos de operação do sistema de aeração prolongada foram bastante superiores aos custos de operação do sistema convencional.

Combinando os custos de implantação com os custos de operação trazidos ao valor presente, percebe-se que o custo global do sistema de aeração prolongada é superior ao do sistema de lodos ativados convencional.

A eficiência global do sistema de aeração prolongada foi ligeiramente superior à do sistema convencional, como se pode ver no Quadro 35, embora essa diferença seja virtualmente insignificante.

**Quadro 35: Comparação da eficiência das concepções.**

<b>Eficiência</b>	<b>Lodos ativados convencional</b>	<b>Aeração prolongada</b>
Remoção de DBO solúvel	95%	96%
Remoção de DBO total	81%	91%

Essa discussão remete ao conceito de custos marginais de controle da poluição, ou seja, o custo necessário para se obter a redução de uma determinada quantidade de poluição. Percebe-se, nesse caso, que a opção pelo sistema de aeração prolongada ao invés do sistema de lodos ativados convencional representa um custo marginal muito elevado para obter uma redução pequena da poluição, uma vez que ambas as alternativas já alcançam eficiências bastante elevadas de remoção de poluentes, atendendo aos padrões de lançamento. Assim, ambas as variantes podem ser consideradas igualmente eficazes.

Quanto à área ocupada pelas duas alternativas, de acordo com o Layout apresentado no Anexo 4, percebe-se, pelo Quadro 36, uma diferença também pequena. A área ocupada pelo sistema de aeração prolongada é menor do que a área referente ao sistema convencional, mas ambas as opções são econômicas nos seus requisitos de área em relação a outras tecnologias de tratamento. Caso haja uma limitação muito grande de área, o sistema de aeração prolongada pode se tornar mais viável que o sistema de lodos ativados convencionais.

**Quadro 36: Área ocupada pelas duas concepções.**

	<b>Lodos ativados convencional</b>	<b>Aeração prolongada</b>
<b>B (m)</b>	300	270
<b>H (m)</b>	190	170
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	57.000	45.900

Embora a nitrificação não tenha sido considerada nesse trabalho, sabe-se também que o sistema de aeração prolongada promove um grau de nitrificação maior que os sistemas de lodos ativados convencionais (VON SPERLING, 2012). Se houvesse a necessidade de uma grande remoção de nitrogênio do efluente final, o sistema de aeração prolongada poderia se tornar mais vantajoso que o sistema convencional, apesar do seu maior custo.

Ressalta-se que a comparação dos custos realizada nesse trabalho foi apenas uma estimativa, visto que não entrou no detalhamento de todos os custos que comporiam a ETE. Não foram considerados os custos com tratamento preliminar do esgoto, aquisição de bombas para o recalque do esgoto, implantação de tubulações e construção de edifícios, entre outros, pois partiu-se do pressuposto que esses custos seriam similares nas duas concepções. É possível que, a partir do detalhamento de todos os custos envolvidos, os valores de CAPEX e OPEX obtidos se modificassem.

Além disso, não foram consideradas outras opções de tratamento biológico, como o sistema de lodos ativados por batelada ou o tratamento anaeróbio. Essas outras opções podem ser bastante vantajosas para a situação em questão, devido à simplicidade de construção e operação e aos reduzidos requisitos de área.

## 7. Conclusões e recomendações

A maioria dos municípios no Brasil, em especial os de pequeno ou médio porte, ainda apresentam um déficit muito grande na questão do saneamento ambiental. Como mencionado na introdução, de acordo com o IBGE, apenas 45,7% dos domicílios brasileiros são atendidos por rede coletora de esgoto (IBGE, 2011). Os investimentos no sistema de coleta e tratamento de esgotos se configuram em uma necessidade premente.

Este trabalho buscou comparar duas opções para o tratamento de esgotos através do estudo de caso de um município hipotético de médio porte.

Através do dimensionamento de uma Estação de Tratamento de Esgotos por meio das duas concepções; e do levantamento dos custos mais relevantes de implantação e operação de ambas as opções; pode-se concluir que o sistema de lodos ativados convencional é mais econômico que o sistema de lodos ativados com aeração prolongada. Nas condições analisadas, o ligeiro ganho de eficiência obtido pelo sistema de aeração prolongada é muito pequeno para justificar a construção de uma ETE mais onerosa com esse sistema. Ambos os processos são igualmente eficazes, atendendo aos padrões de lançamento de efluentes exigidos pela legislação brasileira.

Uma recomendação para futuros estudos seria o estudo de outros processos de tratamento biológico, como o sistema de lodos ativados por batelada ou o tratamento anaeróbio. Além disso, pode-se explorar a possibilidade de aproveitamento do biogás gerado no digestor do lodo nos sistemas de lodos ativados convencionais para a produção de energia elétrica, visto que esta técnica vem sendo a cada dia mais empregada em Estações de Tratamento de Esgoto. Além do ganho econômico com a redução do consumo de energia elétrica, o aproveitamento do biogás permite à Estação se inserir no mercado de créditos de carbono por meio do desenvolvimento de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

## 8. Referências bibliográficas

ABNT. **NBR 9.648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1986.

ABNT. **NBR 9.649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário - Procedimento.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1986.

ABNT. **NBR 12.209: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1992.

ABNT. **NBR 12.209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ. 2011.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil, 2013. Disponível em: <[http://downloads.caixa.gov.br/\\_arquivos/sinapi/servicos\\_semdes\\_nov\\_2013/Servicos\\_RJ\\_NOV\\_2013\\_SEM\\_DESONERA%C7%C3O.pdf](http://downloads.caixa.gov.br/_arquivos/sinapi/servicos_semdes_nov_2013/Servicos_RJ_NOV_2013_SEM_DESONERA%C7%C3O.pdf)>. Acesso em: 17 fev. 2014.

GUEDES, J. C. D. S. **Manual de Tarifação da Energia Elétrica.** Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL / Eletrobrás. Rio de Janeiro. 2011.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. 2008.

IBGE. **Atlas de Saneamento 2011.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. 2011.

IPCC. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge Press. Cambridge. 2007.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** Rio de Janeiro: ABES, 2011.

LIGHT. Composição da Tarifa. **Portal Light**, 2014. Disponível em: <<http://www.light.com.br/para-residencias/Sua%20Conta/composicao-da-tarifa.aspx>>. Acesso em: 07 fev. 2014.

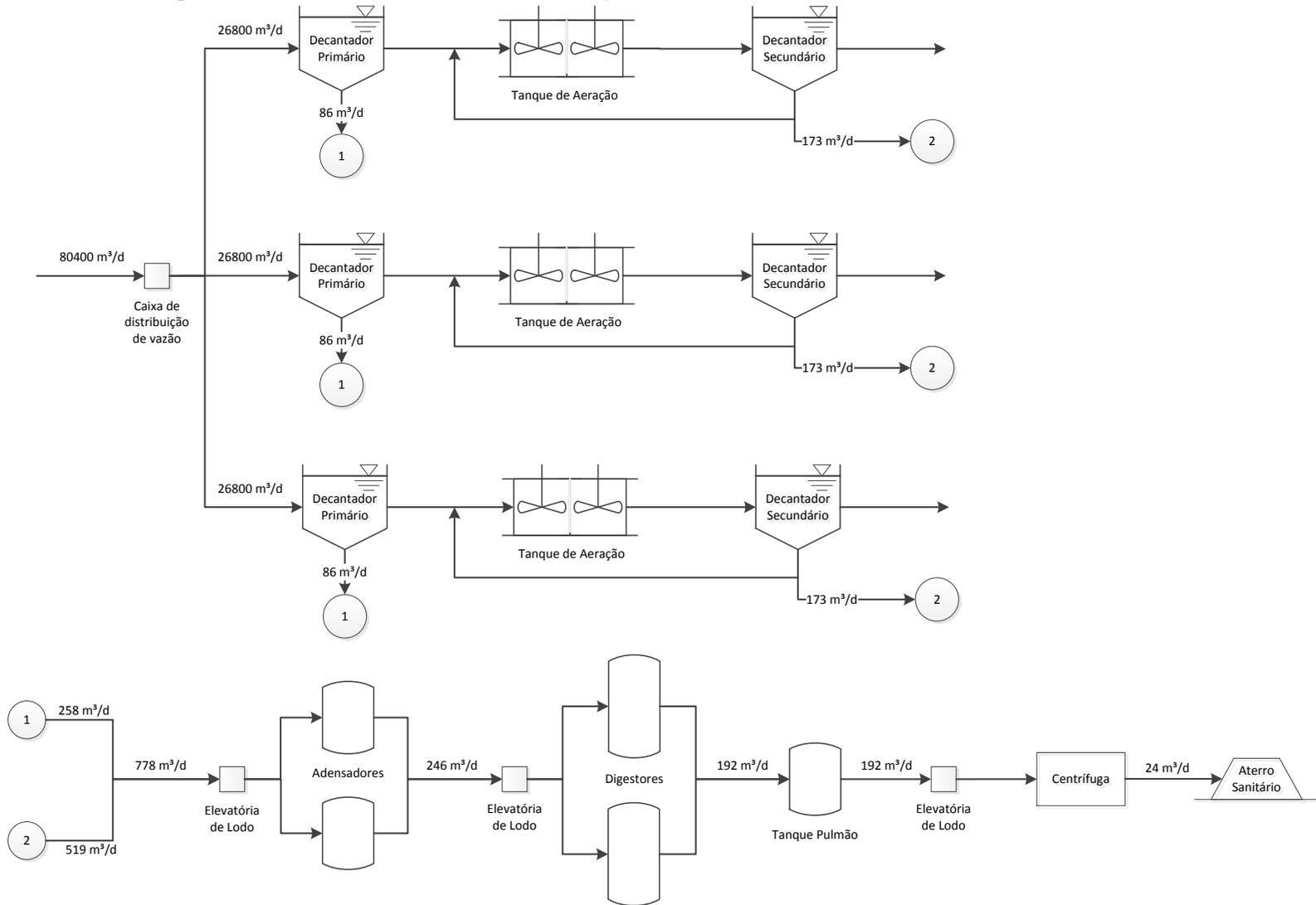
PACHECO, C. A. **Novos Padrões de Localização Industrial? Tendências Recentes dos Indicadores da Produção e do Investimento Industrial.** IPEA. Brasília. 1999.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

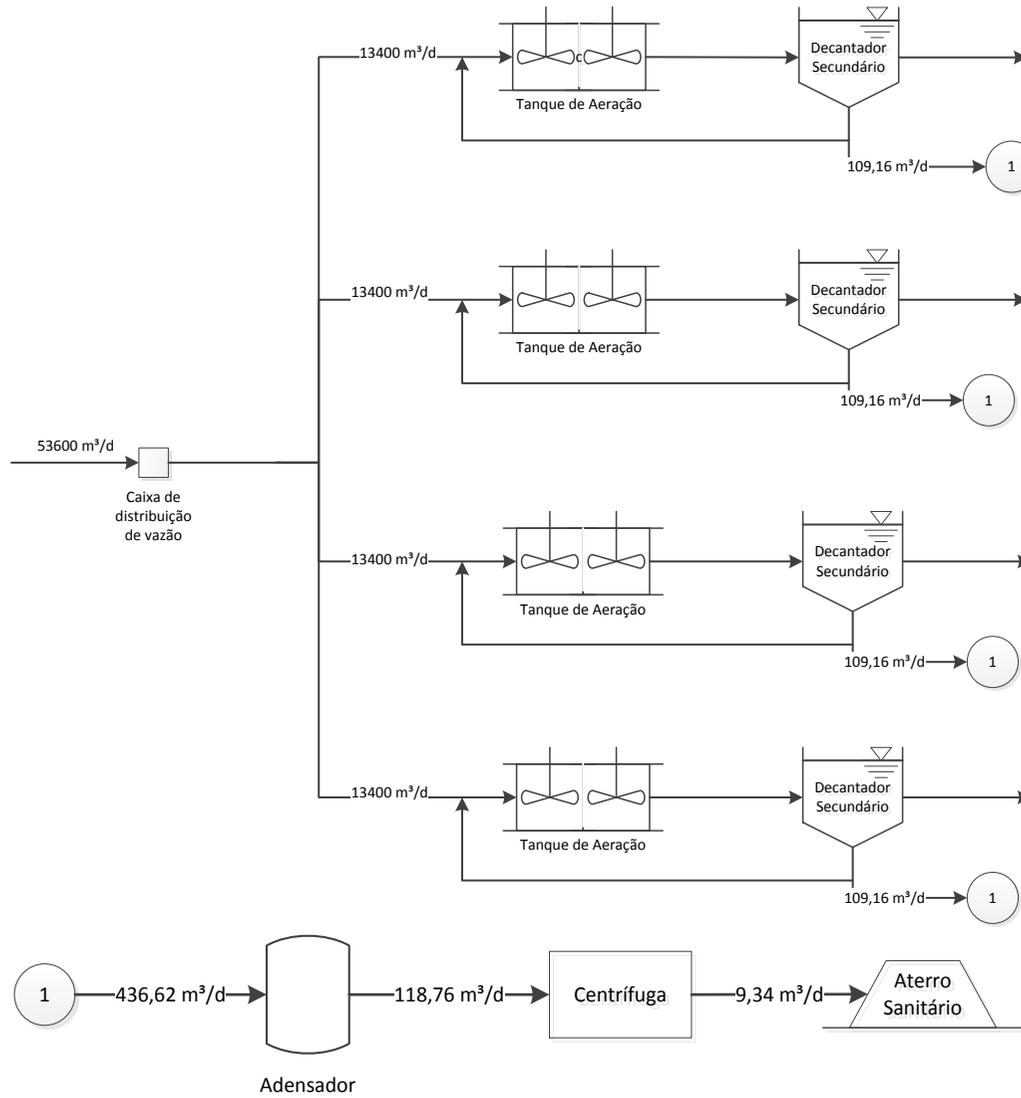
VON SPERLING, M. **Lodos Ativados.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012.

WERF. **State of the Science on Biogas: Treatment, Co-Generation, and Utilization in High Temperature Fuel Cells and as Vehicle Fuel.** Water Environment Research Foundation. [S.l.]. 2011.

# Anexo 1 – Fluxograma da ETE dimensionada para lodos ativados convencional



## Anexo 2 – Fluxograma da ETE dimensionada para o sistema de aeração prolongada



## Anexo 3 – Balanço de massa das concepções da ETE de Maralina

### A. Lodos ativados convencional

Parâmetros:

Dados do Afluente		
Vazão média	53600	m <sup>3</sup> /d
Vazão máxima horária	80400	m <sup>3</sup> /d
DBO	12000	kg/d
SST	14000	kg/d
SSV/SST	75%	
SSV	10500	kg/d
Decantador Primário		
Remoção DBO	30%	
Remoção SST	50%	
Lodo Primário	4%	teor de sólidos
Decantador Secundário		
Remoção SST	77%	
Lodo Secundário	0.80%	teor de sólidos
Adensador		
Lodo Adensado	5%	teor de sólidos
Lodo Adensado	85%	captura de sólidos
DBO sobrenadante	200	mg/l
Digestor		
Lodo digerido	4%	teor de sólidos
DBO sobrenadante	1000	mg/l
Centrífuga		
Lodo Seco	30%	teor de sólidos
Lodo Seco	98%	captura de sólidos
Lodo Seco	1.06	densidade
DBO sobrenadante	1000	mg/l

Parâmetro	Unidade	Fluxo Inicial	Reciclo 1	Reciclo 2	Reciclo 3	Reciclo 4	Reciclo 5	Reciclo 6	Fluxo Final
<b>Afluente ao Decantador Primário</b>									
Vazão	m³/d	80400	666,01	321,13	73,73	14,32	2,72	0,52	1078,42
DBO	kg/d	12000	203,26	67,83	7,56	1,44	0,27	0,27	280,63
SST	kg/d	14000	5355,50	1017,64	197,57	37,55	7,14	1,36	6616,75
SSV	kg/d	10500	3399,80	932,39	181,02	34,41	6,54	1,24	4555,40
<b>Lodo Primário Decantado (3 decantadores)</b>									
Vazão	m³/d	174,99	66,94	25,44	4,94	0,94	0,18		
DBO	kg/d	3600	60,98	20,35	2,27	0,43	0,08		
SST	kg/d	10335,6	2677,75	508,82	98,78	18,78	3,57		
SSV	kg/d	7751,7	2008,31	381,61	74,09	14,08	2,68		
<b>Efluente Primário</b>									
Vazão	l/s	80225,01	599,07	295,69	68,79	13,38	2,54		
DBO	m³/d	8400	142,28	47,48	5,29	1,01	0,19		
SST	kg/d	3664,4	2677,75	508,82	98,78	18,78	3,57		
SSV	kg/d	2748,3	722,05	423,57	82,23	15,63	2,97		
<b>Lodo Secundário Decantado (3 decantadores)</b>									
Vazão	l/s	509,52	257,73	48,97	9,51	1,81	0,34		
SST	kg/d	4076,16	2061,87	391,79	76,06	14,46	2,75		
SSV	kg/d	3057,12	1546,40	293,84	57,05	10,84	2,06		
<b>Lodo Afluente ao Adensador</b>									
Vazão	m³/d	684,51	324,68	74,41	14,45	2,75	0,52		
SST	kg/d	7740,56	2122,84	412,14	78,33	14,89	2,83		
SSV	kg/d	5805,42	3554,71	675,46	131,14	24,92	4,74		
<b>Lodo Adensado</b>									
Vazão	m³/d	188,29	36,09	7,01	1,33	0,25	0,05		
SST	kg/d	6579,47	1804,42	350,32	66,58	12,66	2,41		
SSV	kg/d	4934,60	1353,31	262,74	49,94	9,49	1,80		
<b>Filtrado</b>									
Vazão	m³/d	496,22	288,59	67,41	13,12	2,49	0,47		
DBO	kg/d	37,65	36,09	1,40	0,27	0,05	0,05		
SST	kg/d	1161,08	318,43	61,82	11,75	2,23	0,42		
SSV	kg/d	870,81	238,82	46,37	8,81	1,67	0,32		
<b>Lodo Afluente ao Digestor</b>									
Vazão	m³/d	188,29	36,09	7,01	1,33	0,25	0,05		
SST	kg/d	6579,47	1804,42	350,32	66,58	12,66	2,41		
SSV	kg/d	4934,60	1353,31	262,74	49,94	9,49	1,80		
SSF		1644,86	451,10	87,58	16,65	3,16	0,60		
<b>Lodo Digerido</b>									
Vazão	m³/d	147,1	28,19	5,47	1,04	0,20	0,04		
SST	kg/d	4112,17	1127,76	218,95	41,61	7,91	1,50		
SSV	kg/d	2467,30	676,66	131,37	24,97	4,75	0,90		
<b>Filtrado</b>									
Vazão	m³/d	41,19	7,89	1,53	0,29	0,06	0,01		
DBO	kg/d	147,10	28,19	5,47	1,04	0,20	0,20		
SST	kg/d	4112,17	676,66	131,37	24,97	4,75	0,90		
SSV	kg/d	2467,30	676,66	131,37	24,97	4,75	0,90		
<b>Lodo Afluente à Centrifuga</b>									
Vazão	m³/d	147,10	28,19	5,47	1,04	0,20	0,04		
SST total	kg/d	4112,17	1127,76	218,95	41,61	7,91	1,50		
<b>Torta de Lodo Seco</b>									
Volume		18,50	3,55	0,69	0,13	0,02	0,00		
SST		4029,93	1105,21	214,57	40,78	7,75	1,47		
<b>Filtrado</b>									
Vazão	m³/d	128,60	24,65	4,79	0,91	0,17	0,03		
DBO	kg/d	18,50	3,55	0,69	0,13	0,02	0,02		
SST	kg/d	82,24	22,56	4,38	0,83	0,16	0,03		
SSV	kg/d	61,68	16,92	3,28	0,62	0,12	0,02		

## B. Aeração prolongada

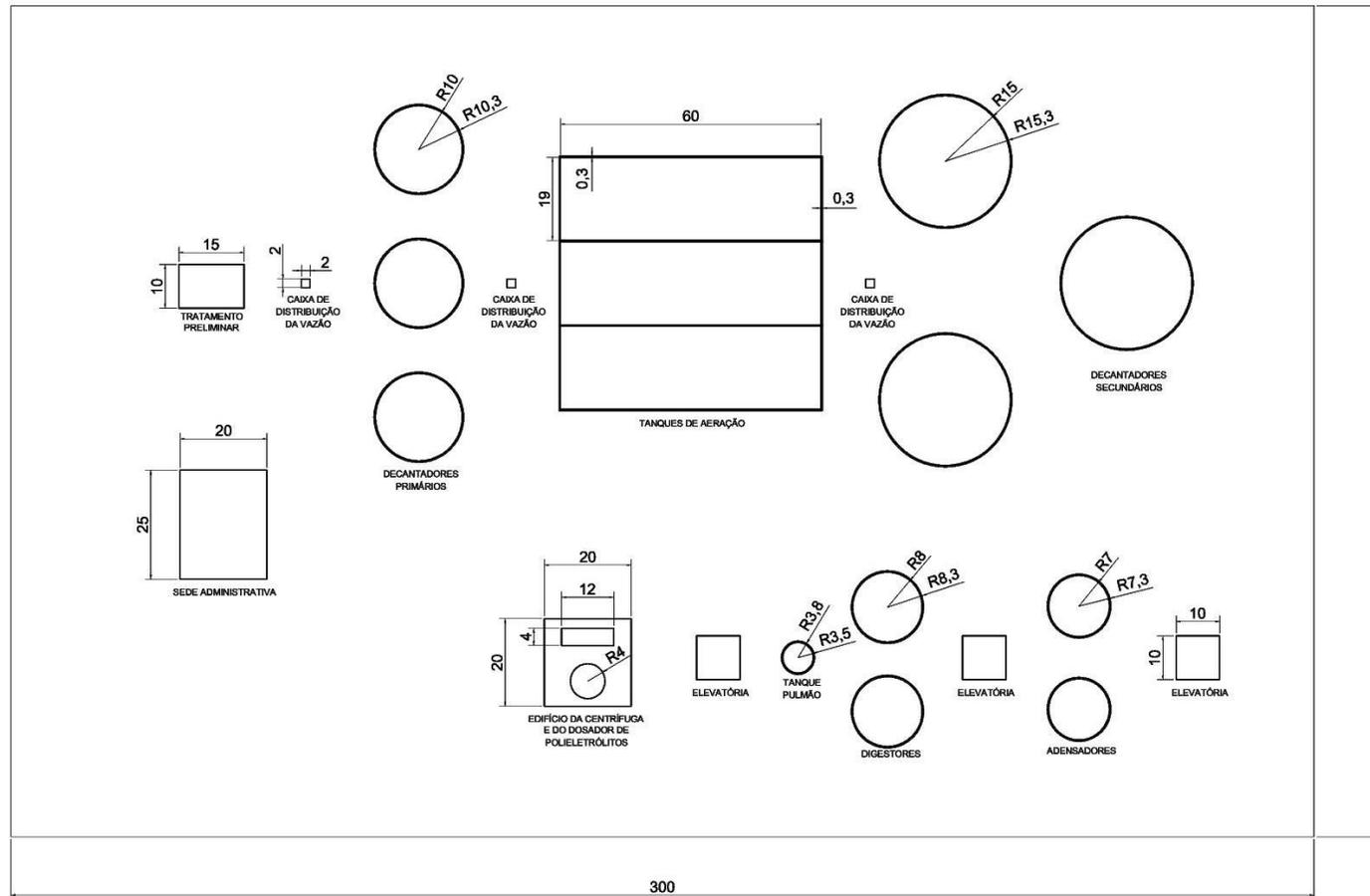
Parâmetros:

Dados do Afluente		
Vazão média	53600	m <sup>3</sup> /d
DBO	12000	kg/d
SST	14000	kg/d
SSV/SST	75%	
SSV	10500	kg/d
Decantador Secundário		
Lodo Secundário	0.80%	teor de sólidos
Remoção de SST	92%	
Adensador		
Lodo Adensado	2.5%	teor de sólidos
Lodo Adensado	85%	captura de sólidos
DBO sobrenadante	200	mg/l
Centrífuga		
Lodo Seco	30%	teor de sólidos
Lodo Seco	98%	captura de sólidos
Lodo Seco	1.06	densidade
DBO Sobrenadante	1000	mg/l

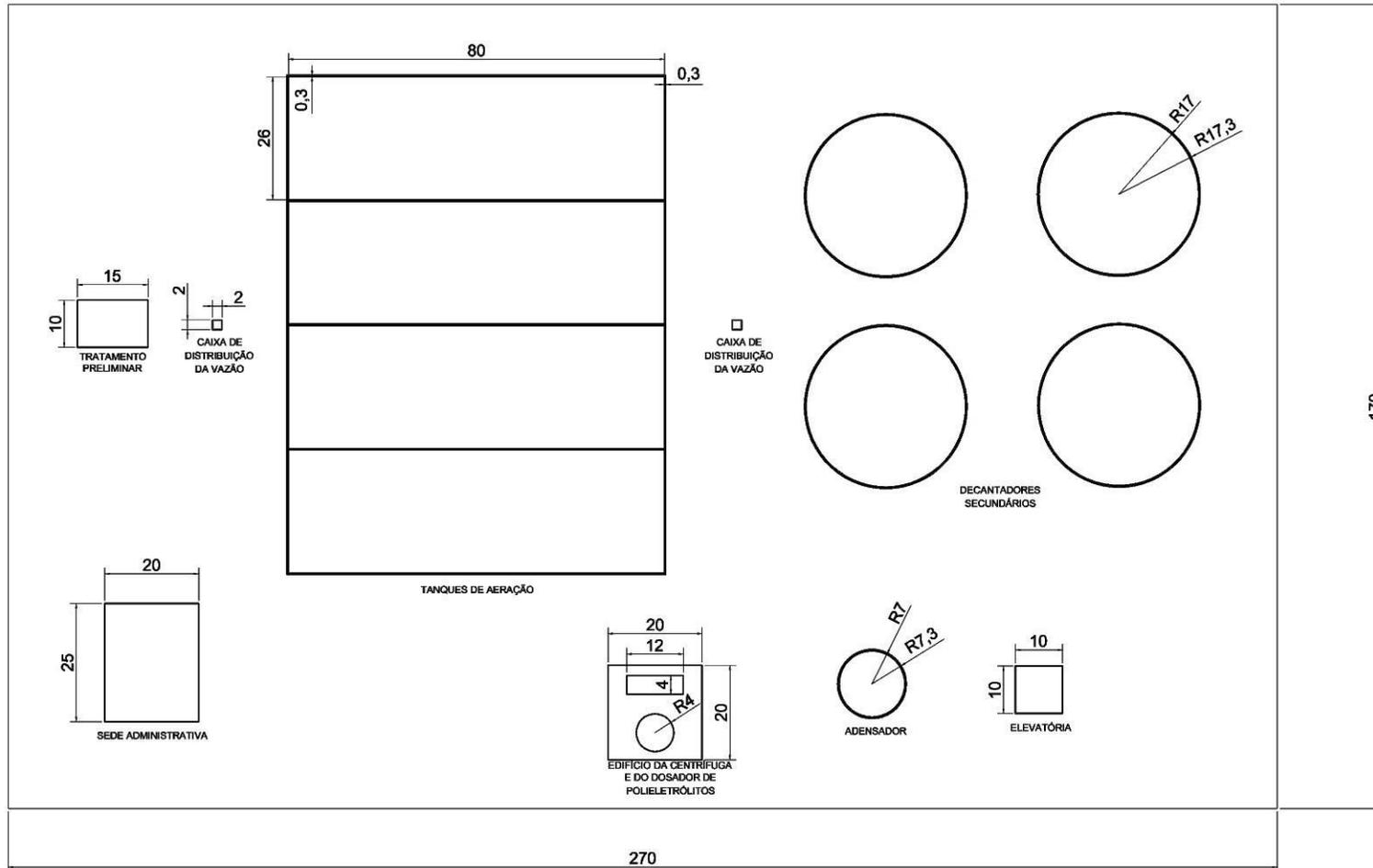
Parâmetro	Unidade	Fluxo Inicial	Reciclo 1	Reciclo 2	Reciclo 3	Reciclo 4	Fluxo Final
Afluente ao Tanque de Aeração							
<b>Vazão</b>	m <sup>3</sup> /d	53600	427.30	65.65	10.09	1.55	504.58
<b>DBO</b>	kg/d	12000	33.09	5.08	0.78	0.12	39.08
<b>SST</b>	kg/d	14000	583.32	89.62	13.77	2.12	688.83
<b>SSV</b>	kg/d	10500	437.49	67.22	10.33	1.59	516.62
Lodo Secundário Decantado (4 decantadores)							
<b>Vazão</b>	l/s	436.64	67.08	10.31	1.58		
<b>SST</b>	kg/d	3492.96	536.66	82.45	12.67		
<b>SSV</b>	kg/d	2619.72	402.49	61.84	9.50		
Lodo Afluente ao Adensador							
<b>Vazão</b>	m <sup>3</sup> /d	436.64	67.08	10.31	1.58		
<b>SST</b>	kg/d	3492.96	536.66	82.45	12.67		
<b>SSV</b>	kg/d	2619.72	402.49	61.84	9.50		
Lodo Adensado							
<b>Vazão</b>	m <sup>3</sup> /d	118.76	18.25	2.80	0.43		
<b>SST</b>	kg/d	2969.016	456.16	70.08	10.77		
<b>SSV</b>	kg/d	2226.762	342.12	52.56	8.08		
Filtrado							
<b>Vazão</b>	m <sup>3</sup> /d	317.88	48.84	7.50	1.15		
<b>DBO</b>	kg/d	23.752	3.65	0.56	0.09		
<b>SST</b>	kg/d	523.94	80.50	12.37	1.90		
<b>SSV</b>	kg/d	392.96	60.37	9.28	1.43		
Lodo Afluente à Centrifuga							
<b>Vazão</b>	m <sup>3</sup> /d	118.76	18.25	2.80	0.43		
<b>SST total</b>	kg/d	2969.016	456.16	70.08	10.77		
Torta de Lodo Seco							
<b>Volume</b>		9.34	1.43	0.22	0.03		
<b>SST</b>		2909.6357	447.04	68.68	10.55		
Filtrado							
<b>Vazão</b>	m <sup>3</sup> /d	109.42	16.81	2.58	0.40		
<b>DBO</b>	kg/d	9.34	1.43	0.22	0.03		
<b>SST</b>	kg/d	59.38032	9.12	1.40	0.22		
<b>SSV</b>	kg/d	44.53524	6.84	1.05	0.16		

## Anexo 4 – Layout das concepções da ETE de Maralina

### A. Lodos ativados convencional



## B. Aeração prolongada

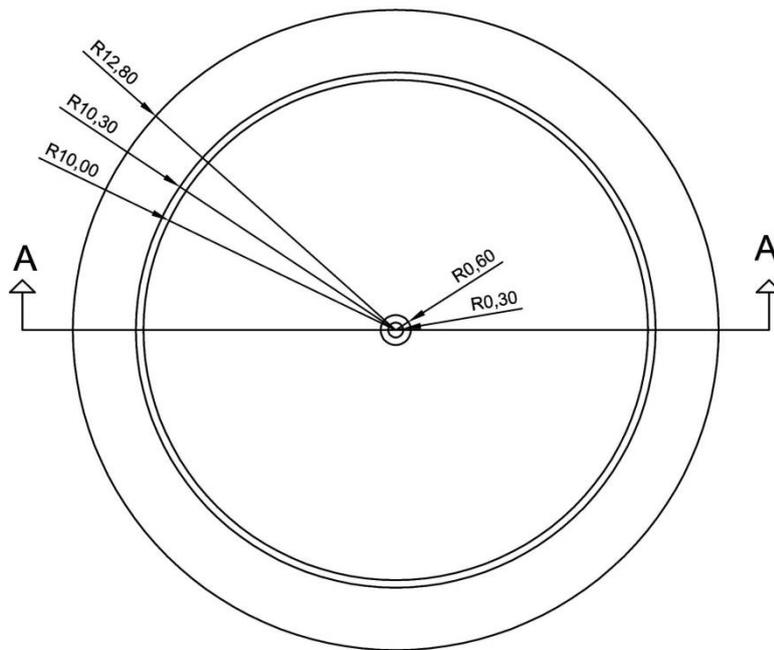


## Anexo 5 – Croquis das unidades de tratamento

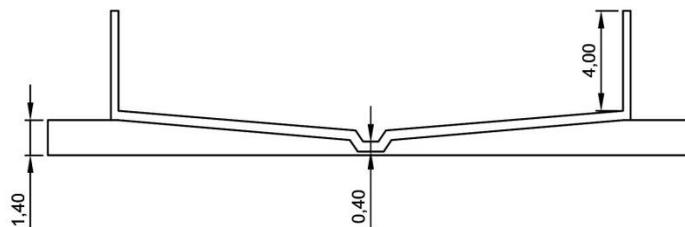
### A. Lodos ativados convencional

Decantador primário

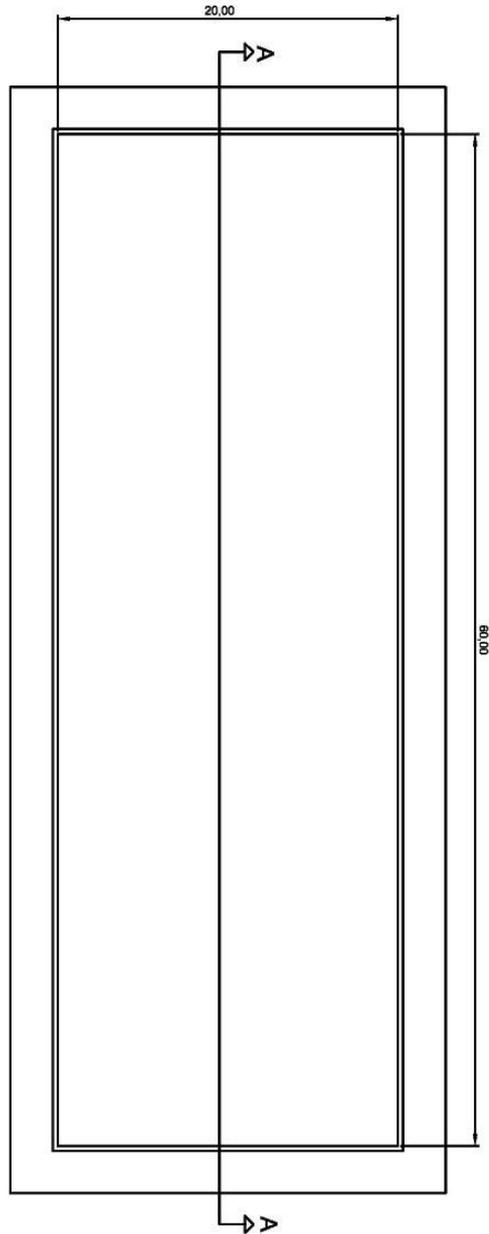
## DECANTADOR PRIMÁRIO - LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL



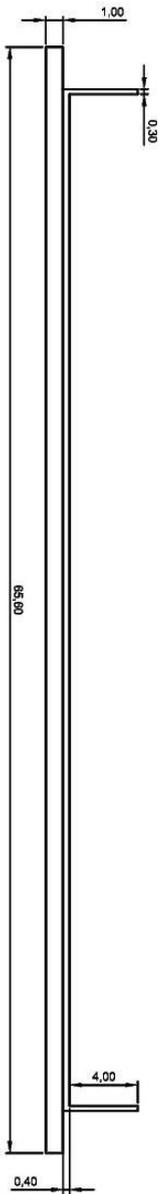
CORTE AA



TANQUE DE AERAÇÃO - Lodos Ativados  
CONVENCIONAL



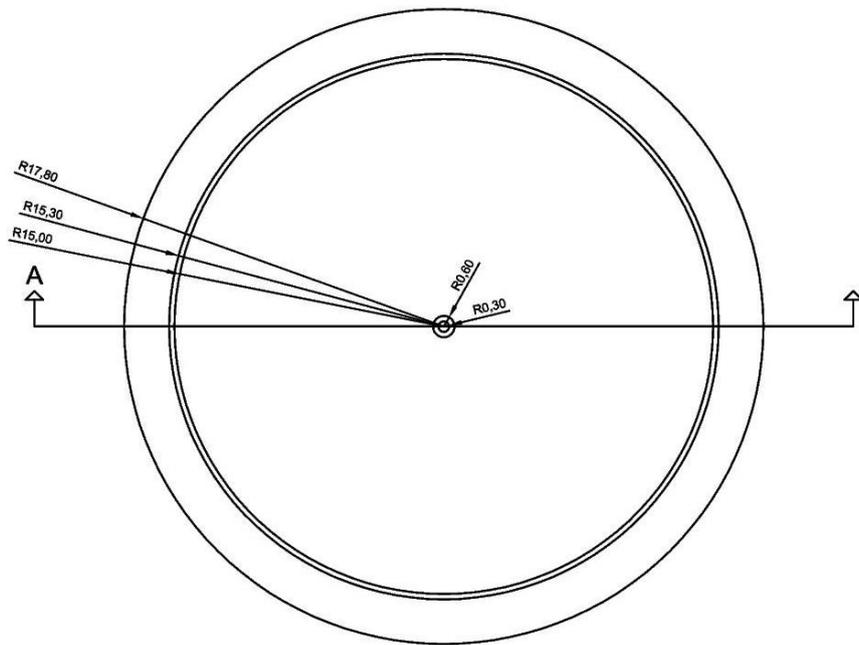
CORTE AA



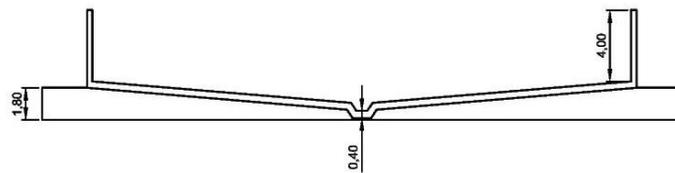
Tanque de aeração

## Decantador secundário

### DECANTADOR SECUNDÁRIO - LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL

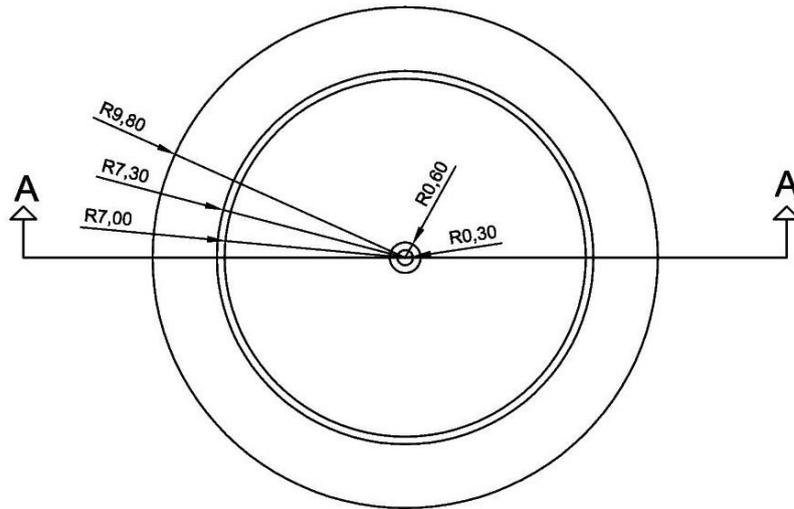


CORTE AA

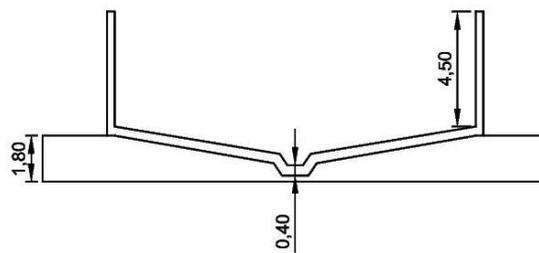


Adensador

## ADENSADOR - LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL

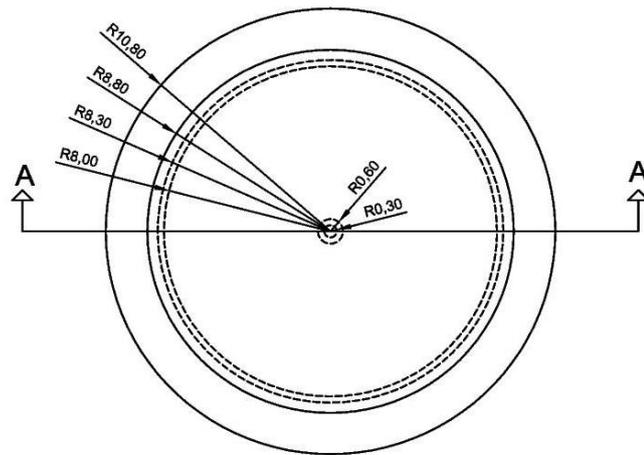


CORTE AA

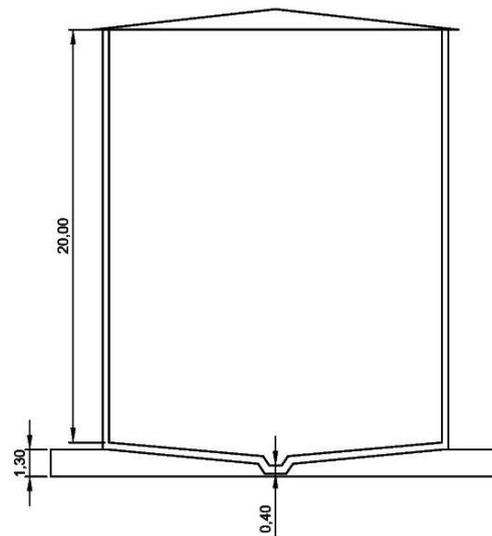


Digestor

DIGESTOR - LODOS ATIVADOS  
CONVENCIONAL

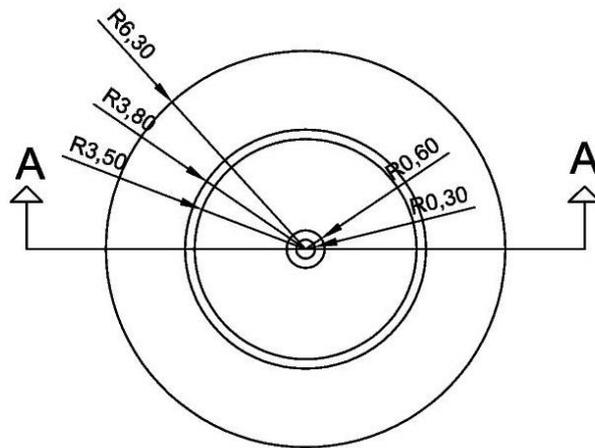


CORTE AA

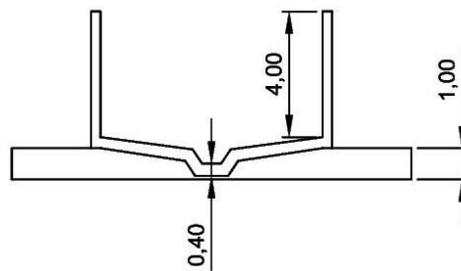


Tanque pulmão

# TANQUE PULMÃO - LODOS ATIVADOS CONVENCIONAL

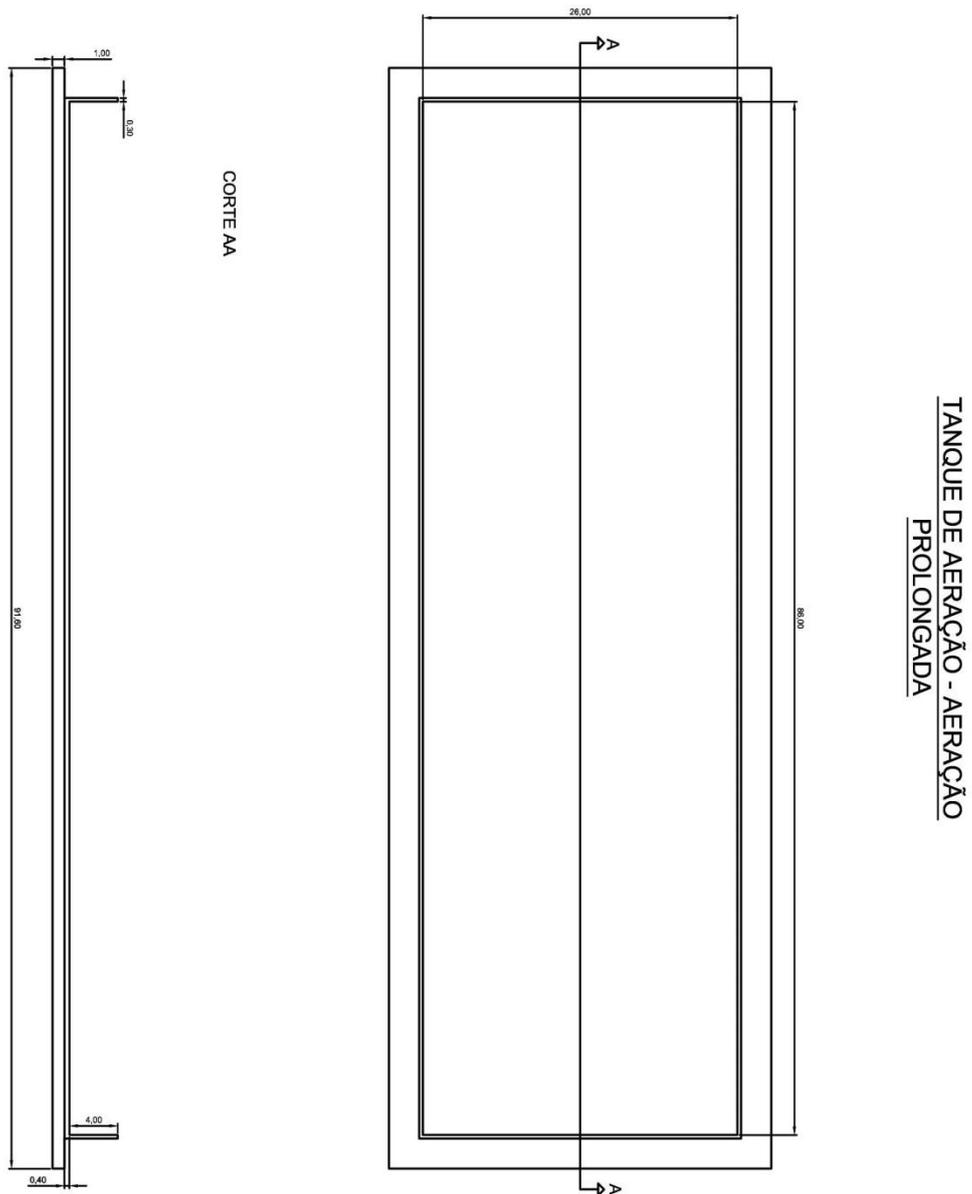


CORTE AA



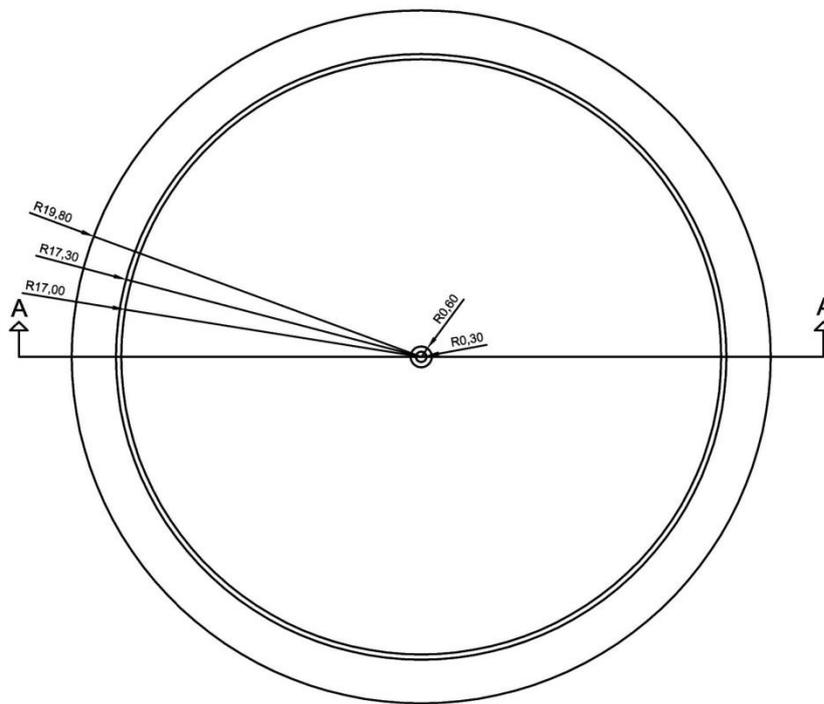
## B. Aeração prolongada

### Tanque de aeração

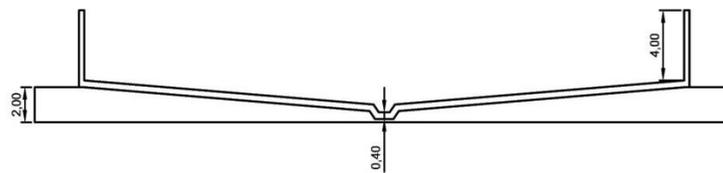


## Decantador secundário

### DECANTADOR SECUNDÁRIO - AERAÇÃO PROLONGADA

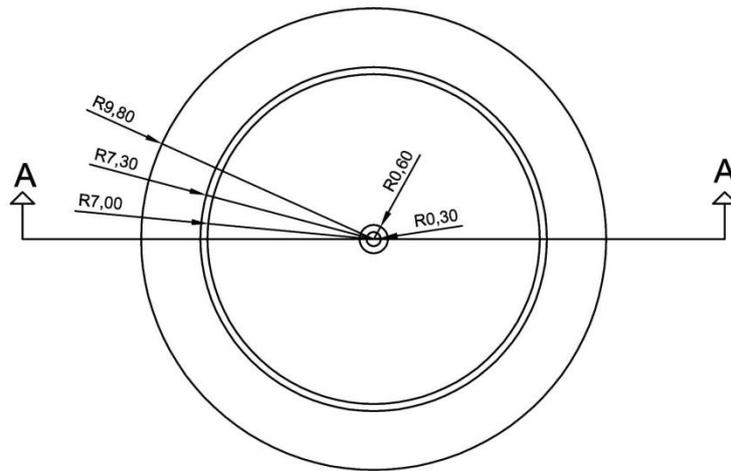


#### CORTE AA



Adensador

ADENSADOR - AERAÇÃO  
PROLONGADA



CORTE AA

