

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS
MESTRADO EM INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

LEANDRO CONTI GARCIA

**PROPOSTA DE UM MODELO DE CHICANA PARA LAGOAS
FACULTATIVAS UTILIZANDO FERRAMENTA DE FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CAMPO MOURÃO

2019

LEANDRO CONTI GARCIA

**PROPOSTA DE UM MODELO DE CHICANA PARA LAGOAS
FACULTATIVAS UTILIZANDO FERRAMENTA DE FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Inovações Tecnológicas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Inovações Tecnológicas.

Orientador: Prof. Dr. Eudes José Arantes.
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Flávia Aparecida Reitz Cardoso.

CAMPO MOURÃO

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Garcia, Leandro Conti

Proposta de um modelo de chicana para lagoas facultativas utilizando ferramenta de fluidodinâmica computacional [recurso eletrônico]/ Leandro Conti Garcia. – Campo Mourão, 2019.

1 arquivo eletrônico (60 f) : PDF ; 3,74 MB

Modo de acesso: World Wide Web

Orientador: Eudes José Arantes

Coorientador: Flávia Aparecida Reitz Cardoso

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Inovações Tecnológicas, Campo Mourão, 2019.

Inclui bibliografia: f. 54-60

1. Fluidodinâmica Computacional. 2. Saneamento. 3. Resíduos industriais. 4. Inovações Tecnológicas – Dissertações. I. Arantes, Eudes José, orient. II. Cardoso, Flávia Aparecida Reitz, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Inovações Tecnológicas. IV. Título.

CDD(22.ed.) 658.514

Biblioteca da UTFPR - Câmpus Campo Mourão

Bibliotecária/Documentalista:
Lígia Patrícia Torino – CRB-9/1278



TERMO DE APROVAÇÃO

PROPOSTA DE UM MODELO DE CHICANA PARA LAGOAS FACULTATIVAS UTILIZANDO FERRAMENTA DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

por

LEANDRO CONTI GARCIA

Esta Dissertação foi apresentada em 04 de outubro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Inovações Tecnológicas. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Eudes José Arantes
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^a. Dr^a. Flávia Aparecida Reitz Cardoso
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^a. Dr^a. Flávia Vieira da Silva Medeiros
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Thiago Morais de Castro
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Alexandre Botari
Universidade Estadual de Maringá

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na coordenação do curso –

RESUMO

GARCIA, Leandro Conti. **Proposta de um modelo de chicana para lagoas facultativas utilizando ferramenta de fluidodinâmica computacional**. 2019. 60 f. Dissertação (Mestrado em Inovações Tecnológicas) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2019.

O desenvolvimento social sempre esteve atrelado à busca pelo saneamento, haja vista a sua necessidade para a promoção da saúde pública. O método de tratamento do esgoto doméstico mais conhecido e também mais utilizado no país é o sistema de lagoas de estabilização, que é eficiente na remoção de poluentes orgânicos, mas pode apresentar problemas operacionais como acúmulo de sedimentos, zonas mortas e zonas de curto-circuito, por falta de manutenção ou erros operacionais, influenciando negativamente na eficiência do tratamento. A utilização de defletores, ou chicanas, é uma forma de mitigação destes problemas, tornando o objetivo deste trabalho a proposição de um modelo alternativo de chicana móvel e flutuante por meio de um estudo em lagoa de estabilização. O desenvolvimento do estudo iniciou com a coleta de dados batimétricos em uma lagoa de estabilização no município de Campo Mourão, tendo como sequência a criação de um modelo tridimensional da camada de sedimentos no leito da lagoa, avaliação do comportamento hidrodinâmico do fluido, desenvolvimento do modelo de chicana e avaliação do comportamento hidrodinâmico de quatro configurações (cenários) de disposição dos defletores no leito da lagoa. No cenário um as chicanas estariam fixadas nas laterais e no centro da lagoa, paralelas à seção de entrada e saída. Os cenários dois e três teriam as chicanas fixadas apenas nas laterais da lagoa, ainda paralelas às seções de entrada e saída, e o cenário quatro teria a fixação das chicanas paralelas ao sentido do fluxo, condicionando a formação do fluxo tipo pistão. A avaliação hidrodinâmica foi realizada por meio de fluidodinâmica computacional. A partir do desenvolvimento da metodologia, identificaram-se os principais problemas operacionais e áreas de ocorrência, condicionando assim a escolha das configurações para disposição das chicanas. A sua utilização permitiu a mitigação dos principais problemas, como o acúmulo de sedimentos, e foi capaz de aumentar a velocidade de fluxo em todos os cenários, assim como aproximar o tempo de detenção hidráulica de operação ao de projeto. De acordo com os dados obtidos, e a análise visual das simulações, é possível afirmar que a configuração de chicanas avaliada no cenário quatro seria mais adequada à mitigação dos problemas operacionais encontrados na lagoa estudada, pois esta disposição condiciona o fluxo do tipo pistão, que proporciona menor acúmulo de sedimentos e desenvolvimento de zonas mortas e zonas de curto circuito no leito. Concluiu-se assim que a instalação de chicanas é capaz de mitigar os problemas operacionais de lagoas de estabilização por meio do direcionamento do fluxo. Da mesma forma, foi possível observar a necessidade de estudos contínuos que permitam o aprimoramento dos sistemas de tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Comportamento hidrodinâmico. Fluidodinâmica computacional. Lagoa Facultativa. Saneamento básico. Tratamento de efluentes.

ABSTRACT

GARCIA, Leandro Conti. **Baffle model proposal for facultative ponds using computational fluid dynamic tool**. 2019. 60 f. Dissertação (Mestrado em Inovações Tecnológicas) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2019.

Social development has always been linked to the search for sanitation, because it is necessary for the promotion of public health. The best known and most widely used domestic sewage treatment method in Brazil is the stabilization pond system, which is efficient in removing organic pollutants, but can present operational problems such as sediment accumulation, dead zones and short circuit zones, that happen due to the lack of maintenance or operational errors, negatively influencing the treatment efficiency. The use of baffles is a way of mitigating these problems, making the objective of this work the proposition of an alternative model of mobile and floating baffles through a stabilization pond study. The study development began with the collection of bathymetric data in a stabilization pond in the municipality of Campo Mourão, the creation of a three-dimensional sediment layer model in the lagoon bed, fluid hydrodynamic behavior evaluation, baffle model development and the hydrodynamic behavior evaluation of four baffle layout configurations (scenarios). In scenario one, the baffles would be fixed to the sides and center of the lagoon, parallel to the entry and exit session. Scenarios two and three would have baffles fixed only to the sides of the lagoon, still parallel to the inlet and outlet sessions, and scenario four would have baffles parallel to the flow direction, conditioning the formation of the piston flow. Hydrodynamic evaluation was performed by computational fluid dynamics. From the development of the methodology, the main operational problems and its areas of occurrence were identified, thus conditioning the configurations choice for the baffles arrangement. Its use allowed the mitigation of major problems, such as sediment accumulation, and it was able to increase flow velocity in all scenarios, as well as approximate the real hydraulic detention time to the operation. According to the obtained data, and the simulations visual analysis, it is possible to affirm that the configuration of baffles evaluated in the scenario four would be more appropriate to the mitigation of the operational problems found in the studied pond, since this arrangement conditions the piston flow, which provides less sediment accumulation as well as lower dead zones and short circuit zones development in the bed. It was concluded that the installation of baffles is able to mitigate the stabilization ponds operational problems by directing the flow. Likewise, it was possible to observe the need for continuous studies that allow the improvement of effluent treatment systems.

Keywords: Basic sanitation. Computational fluid dynamics. Facultative pond. Hydrodynamic behavior. Wastewater treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do município de Campo Mourão e sua posição no estado do Paraná-BR	24
Figura 2 - Modelo do sistema de tratamento de efluentes da ETE analisada no município de Campo Mourão-PR	25
Figura 3 - Croqui da disposição das linhas de coleta batimétrica na lagoa facultativa da estação de tratamento de efluentes de Campo Mourão - PR	27
Figura 4 - Fotos da coleta dos dados batimétricos na lagoa facultativa da ETE - Campo Mourão	28
Figura 5 - Primeiro modelo de disposição das quatro chicanas na lagoa da ETE - Campo Mourão	30
Figura 6 - Segundo modelo de disposição das quatro chicanas na lagoa da ETE - Campo Mourão	31
Figura 7 - Modelo de disposição de chicanas centrais e laterais na ETE - Campo Mourão.....	32
Figura 8 - Modelo de disposição das chicanas longitudinais	32
Figura 9 - Cotas de altitude da camada de sedimentos depositados no leito da lagoa facultativa localizada na ETE de Campo Mourão - PR	36
Figura 10 - Imagem tridimensional e sobreposição das cotas de altitude da camada de sedimentos depositados no leito da lagoa facultativa da ETE de Campo Mourão - PR.....	37
Figura 11 - Caracterização vetorial do fluxo dentro da lagoa facultativa da ETE de Campo Mourão - PR	39
Figura 12 - Caracterização das linhas de corrente dentro da lagoa facultativa da ETE de Campo Mourão - PR	41
Figura 13 - Esboço frontal, lateral e superior do modelo de chicana flutuante	44
Figura 14 - Esboço tridimensional frontal, lateral e superior do modelo de chicana flutuante.	45
Figura 15 - Cenário 1 - chicanas centrais e laterais.....	46
Figura 16 - Cenário 2 - chicanas laterais, com a primeira paralela à entrada.	47
Figura 17 - Cenário 03 - chicanas laterais paralelas à saída.	48
Figura 18 - Cenário 4 - chicanas perpendiculares à entrada e saída.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA 430 de 2011.....	10
Tabela 2 - Parâmetros de lançamento estabelecidos pela Resolução SEMA/PR 021 de 2009.....	11
Tabela 3 - Níveis de tratamento de efluentes.....	12
Tabela 4 - Dados de projeto da lagoa facultativa da ETE de Campo Mourão - PR..	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	05
2 OBJETIVOS	08
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	08
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	09
3.1 LEGISLAÇÃO VIGENTE	09
3.2 NÍVEIS DO TRATAMENTO DE EFLUENTES	12
3.3 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	13
3.4 SISTEMAS DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO	15
3.4.1 Lagoas Aeradas Facultativas	15
3.4.2 Lagoas Anaeróbias	16
3.4.3 Lagoas Facultativas	16
3.5 LAGOAS FACULTATIVAS: PROBLEMAS OPERACIONAIS HIDRODINÂMICOS	17
3.6 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE LAGOAS	18
3.6.1 Batimetria	19
3.6.2 Hidrometria	19
3.6.3 Uso de Traçadores	20
3.6.4 Modelagem CFD	21
3.7 UTILIZAÇÃO DE CHICANAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES	22
4 MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 LOCAL DE ESTUDO	24
4.2 MATERIAL UTILIZADO E MÉTODOS EMPREGADOS	25
4.2.1 Análise da Geometria da Lagoa	26
4.2.2 Coleta de Dados Batimétricos	26
4.2.3 Criação do Modelo Tridimensional dos Sedimentos	28
4.2.4 Construção do Comportamento Hidrodinâmico do Fluido na Lagoa Facultativa	29
4.2.5 Análise dos Resultados Obtidos	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 DADOS DE PROJETO E INFORMAÇÕES BATIMÉTRICAS	34
5.2 MODELO TRIDIMENSIONAL DO BANCO DE LODO	36
5.3 CARACTERIZAÇÃO DA LAGOA POR FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	38
5.4 PROPOSTAS DE UM MODELO DE CHICANA FLUTUANTE	43
5.5 CENÁRIOS DE DISPOSIÇÕES DAS CHICANAS	45
6 CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A busca pela qualidade e ampliação nos serviços de saneamento básico tem sido uma conquista contínua para o progresso e desenvolvimento da sociedade como um todo. Em seu último relatório, o programa de monitoramento conjunto que analisa o desenvolvimento e a melhora na gestão dos sistemas de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto assim como a difusão da higiene no mundo, destacou que 71% da população mundial tem acesso a fontes de água tratada. Deste percentual, 17% conta com o suprimento do recurso por meio de fontes seguras, ou seja, 6,5 bilhões de pessoas possuem acesso à água potável para consumo (OMS, 2017).

O mesmo documento faz ainda uma análise sobre a situação sanitária mundial e, neste aspecto, as informações apresentadas não se mostram tão promissoras. Apesar das conquistas realizadas pelo projeto desde 1990, quando foi criado, os dados coletados mostram que apenas 39% da população mundial contam com serviços adequados de saneamento e outros 29% da população têm acesso a serviços e instalações básicos. Resumidamente, 1,5 bilhão de pessoas ainda vivem em condições precárias de saneamento básico, dos quais aproximadamente 60% fazem suas necessidades fisiológicas em local aberto e totalmente inadequado.

No Brasil, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS é responsável pela coleta de informações sobre o desenvolvimento do saneamento básico no país. O último relatório lançado tem como ano base 2017, e de acordo com os dados apresentados, 83,5% da população tem acesso à água potável e 52,4% têm coleta de esgoto. Deste percentual coletado, cerca de 46,0% recebe tratamento adequado, demonstrando assim que apenas 25%, aproximadamente, do esgoto gerado no país recebe destinação correta (BRASIL, 2019).

Em seus estudos, Teixeira et al. (2014) apresentam o impacto negativo que a ausência de saneamento básico tem sobre a saúde pública, corroborando o desenvolvimento de doenças infecciosas, elevando as taxas de mortalidade infantil e o gasto do Estado com saúde, que poderia ser evitado investindo-se em sistemas de coleta e tratamento de esgotos. Siqueira et al. (2017) apontam, em uma pesquisa realizada na região metropolitana de Porto Alegre, que 93,7% das internações pelo Sistema Único de Saúde, no período de 2010 a 2014, tinham sua origem em

patologias ligadas à contaminação por doenças de transmissão feco-oral, dos quais 2,2% destes casos resultaram em óbito.

A contaminação por agentes patogênicos ligados à falta de saneamento demonstra não só a necessidade de maiores investimentos no aumento das taxas de coleta, mas também a necessidade de se conhecer e melhorar a eficiência das unidades de tratamento dos efluentes domésticos. Jordão e Pessoa (2014) apontam as principais falhas na remoção de poluentes em esgotos ligadas à operacionalização das unidades, que por deficiência de manutenção ou desenvolvimento de metodologias incorretas corrobora processos ineficazes, alimentando corpos hídricos com cargas de poluição elevadas.

Neste sentido, os processos envolvidos na remoção das cargas orgânicas, sólidos, demandas bioquímicas e químicas de oxigênio (DBO e DQO), além dos contaminantes biológicos, devem ser analisados unitariamente a fim de proceder-se melhorias no planejamento, implantação, operacionalização e manutenção. Von Sperling (2014) salienta que a eficiência das unidades de tratamento de efluentes pode ser comprometida pela falta de manutenção nas lagoas de estabilização, haja vista as elevadas taxas de acumulação de sedimentos ocasionando a mudança na geometria do leito. Esta situação compromete o escoamento do fluido durante o tratamento, alterando os cálculos de projeto para o tempo de detenção hidráulica, e influenciando diretamente nas taxas de remoção dos poluentes.

Algumas das consequências do acúmulo de sedimentos em lagoas são a formação de zonas mortas, desenvolvimento de curtos-circuitos e também ampliação da estratificação térmica. Estes fenômenos podem se desenvolver de forma paralela e estão atrelados ao resultado encontrado no efluente tratado (METCALF; EDDY, 2015).

Diversos estudos têm sido feitos na intenção de solucionar tais problemas, como a caracterização do comportamento hidrodinâmico do fluido dentro dos leitos de tratamento e possível identificação da origem do problema. Autores como Passos (2017), Francener et al (2015), Teixeira et al (2014) e Souza et al (2012) utilizam a modelagem matemática aplicada à fluidodinâmica computacional para descrever o movimento do fluido nas lagoas de tratamento no intuito de encontrar as zonas mortas ou curtos-circuitos e outros problemas característicos do acúmulo de sedimento. Tal simulação resulta em dados numéricos e gráficos que corroboram o

desenvolvimento de soluções pontuais e adaptadas a sistemas de tratamento já em funcionamento.

Adaptações de geometria, adução da camada de sedimentos e instalação de controladores de velocidade são algumas das medidas que podem ser adotadas na tentativa de aumentar a taxa de eficiência das lagoas de estabilização. Assim, este trabalho teve por objetivo propor um modelo de chicana móvel e flutuante que promova a diminuição nas taxas de sedimentação em lagoas. Este equipamento foi avaliado por meio da modelagem fluidodinâmica computacional em uma lagoa facultativa, em um sistema de tratamento de esgoto doméstico no município de Campo Mourão- PR.

2 OBJETIVOS

Propor um modelo de chicana móvel e flutuante capaz de diminuir a taxa de acúmulo de sólidos de uma lagoa facultativa em uma estação de tratamento de efluentes no município de Campo Mourão - PR.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance do objetivo principal deste trabalho, tem-se a necessidade da complementação com os seguintes objetivos específicos:

- Obter as dimensões da geometria da lagoa facultativa da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) - Campo Mourão.
- Realizar a coleta dos dados batimétricos da lagoa.
- Replicar a geometria encontrada no leito da lagoa no *software Ansys*.
- Criar um modelo tridimensional da camada de sedimentos no leito da lagoa facultativa da ETE.
- Criar um modelo do comportamento hidrodinâmico do fluido durante sua permanência no tratamento com o uso de CFD.
- Analisar os pontos onde se desenvolvem os problemas de acúmulo de sedimentos, zonas mortas e curtos-circuitos.
- Simular, com controladores de velocidade, qual o melhor modelo de disposição para a diminuição na taxa de acúmulo de sólidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor entendimento do estudo, realiza-se aqui uma abordagem histórica sobre os aspectos mais relevantes do tema, permeando com obrigações legais relativas ao tratamento de efluentes, formas de tratamento e aspectos operacionais mais comuns em estações de tratamento de efluentes domésticos.

3.1 LEGISLAÇÃO VIGENTE

O desenvolvimento dos sistemas de coleta e tratamento de efluentes domésticos e industriais acompanhou a expansão populacional no mundo. As populações antigas já se preocupavam com o destino dos dejetos gerados por eles, sendo que registros mostram tecnologias rudimentares de abastecimento d'água na Pérsia e no Egito (SILVA, 1998; NETTO, 1959), assim como coleta de efluentes na Índia e na Grécia (LIEBEMANN, 1979).

A concentração da população na zona urbana resultou no crescimento exponencial das cidades e, concomitantemente, no aumento da produção de efluentes domésticos. Muratha, Castro e Heller (2015) relatam que as preocupações políticas com o assunto surgiram ainda no século XVII, estando mais ligadas à distribuição d'água, e a partir do final do século XIX as ações políticas começaram a englobar os efluentes gerados nas diversas atividades desenvolvidas nos municípios brasileiros.

O primeiro grande marco regulatório no Brasil foi o Código de Águas (NETTO, 1959) assinado por Getúlio Vargas em 1934, onde os corpos hídricos e afloramentos eram classificados de acordo com o direito de posse, em águas públicas e particulares, além de descrever os regulamentos para a utilização do recurso.

Embora pequena, ficou evidenciada a preocupação também com o descarte e tratamento dos efluentes industriais e domésticos, limitando a abordagem de tal tema aos artigos que vão do Art. 109 ao Art. 116, capítulo único intitulado de Águas Nocivas. O texto caracteriza apenas a ilicitude do ato de contaminação das águas

com prejuízo a terceiros, entretanto, é neste documento que se inicia a legislação de saneamento básico.

Em 1997 entrou em vigência a Política Nacional dos Recursos Hídricos, também conhecido como Lei das Águas, onde foram estabelecidos os principais fundamentos para a preservação da água no país, os objetivos a serem atingidos pela legislação e as diretrizes e instrumentos que conduzem o alcance desses objetivos. Fica definido então: a necessidade de criação dos planos de recursos hídricos, tendo a bacia hidrográfica como unidade territorial; O enquadramento dos corpos hídricos em classes, de acordo com o seu uso; A outorga do direito de uso para captação e lançamentos; A cobrança pelo uso do recurso hídrico; A criação do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

Atualmente a legislação vigente regula de forma muito mais eficiente a captação e tratamento de águas e efluentes. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) promulgou, no ano de 2005, a Resolução 357, que dispunha sobre a classificação dos corpos hídricos e as condições e padrões para o lançamento de efluentes. No ano de 2011 esta resolução foi alterada pela CONAMA 430, que passou a englobar os parâmetros para o lançamento de efluentes, além de dispor de um texto mais abrangente e explicativo. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros estabelecidos por esta legislação federal.

Tabela 1 - Parâmetros de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA 430 de 2011

PARÂMETRO	VALOR LIMITE	OBSERVAÇÕES
pH	5,0 – 9,0	-
Temperatura (C°)	< 40	Varição da temperatura na zona de mistura não excedendo a 3°C.
Materiais sedimentáveis (mL/L)	1	No lançamento em lagos e lagoas com velocidade de circulação nula, devem ser virtualmente ausentes.
Óleos e graxas (mg/L)	<100	-
DBO (mg/L)	<120	Este limite poderá ser ultrapassado no caso de sistema de sistema de tratamento com eficiência mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas de enquadramento do corpo receptor.

Materiais Flutuantes Ausente -

Fonte: CONAMA (2011).

A partir das imposições legais do Ministério do Meio Ambiente, os estados e municípios começaram a se adequar, e também a desenvolver e aprovar legislações próprias, desde que com igual ou maior eficiência que a legislação federal. Neste contexto, o estado do Paraná, por meio da Secretaria de Meio Ambiente e Conselho Estadual do Meio Ambiente publicou no ano de 2009 as resoluções SEMA 021 e CEMA 070.

O escopo de ambas trata do licenciamento ambiental e parâmetros ambientais para a emissão da licença. Nestes padrões são abordados tratamentos, produção, destinação final de efluentes gerados em empreendimentos de saneamento (SEMA, 2009) e na produção industrial (CEMA, 2009). Os parâmetros estabelecidos por estas regulamentações podem ser conferidos na Tabela 2, sendo aplicados sempre que a legislação estadual se mostrar mais restritiva perante a federal.

Tabela 2 - Parâmetros de lançamento estabelecidos pela Resolução SEMA/PR 021 de 2009

PARÂMETRO	VALOR LIMITE	OBSERVAÇÕES
pH	5,0 – 9,0	-
Temperatura (C°)	< 40	Varição da temperatura na zona de mistura não excedendo a 3°C.
Materiais sedimentáveis (mL/L)	1	No lançamento em lagos e lagoas com velocidade de circulação nula, devem ser virtualmente ausentes.
Óleos e graxas (mg/L)	20 ^(a) e 50 ^(b)	(a) Óleos minerais e (b) Óleos vegetais e gorduras animais
DBO (mg/L)	<90	Este limite poderá ser ultrapassado no caso de sistema de sistema de tratamento com eficiência mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas de enquadramento do corpo receptor.
DQO (mg/L)	<225	Casos especiais estão elencados no Anexo 7 da Resolução 070 de 2009.

Materiais Flutuantes Ausente -

Fonte: SEMA/PR (2009).

3.2 NÍVEIS DO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Para que os parâmetros de qualidade do efluente especificados na legislação sejam atendidos, é necessário, muitas vezes, que os compostos passem por níveis diferentes de tratamento, com o objetivo de remover os diferentes tipos de poluentes encontrados.

De acordo com Von Sperling (2017), existem quatro níveis de tratamento de efluentes, e suas aplicações se dão com base nas características físicas, químicas e biológicas do resíduo tratado, além de considerar o resultado final esperado pelo tratamento. Estas classes podem ser observadas subsequentemente na Tabela 3, onde são apresentados os níveis de tratamento e os poluentes removidos.

De uma forma geral, os níveis de tratamento podem ser associados com a classe de poluentes, desta forma, os tratamentos preliminar e primário são responsáveis majoritariamente pela remoção de sólidos. O tratamento secundário é responsável por eliminar a matéria orgânica e os microrganismos contaminantes (CHÁVEZ-VERA, 2017), e o tratamento terciário tem como objetivo a remoção de poluentes mais complexos de origem química (METCALF; EDDY, 2015).

Tabela 3 - Níveis de tratamento de efluentes

NÍVEL	POLUENTES REMOVIDOS
Preliminar	Tem como objetivo a remoção de sólidos grosseiros, em suspensão, como objetos de grandes dimensões e areia.
Primário	Remove os sólidos sedimentáveis e a DBO em suspensão.
Secundário	Responsável por eliminar a maior quantidade de DBO, encontrada em suspensão e dissolvida no efluente.
Terciário	Operações mais complexas que proporcionam a remoção de nutrientes, organismos patogênicos, compostos não biodegradáveis, metais pesados e sólidos remanescentes e inorgânicos dissolvidos.

FONTE: VON SPERLING (2017); JORDÃO; PESSOA (2014).

As metodologias são desenvolvidas para que se alcancem os objetivos de cada nível de tratamento. Desta forma, os sólidos grosseiros (>~1 cm) são removidos no tratamento preliminar por gradeamento. As partículas menores são retidas no nível primário por meio da sedimentação ou adsorção (KELLER; ERICH, 1998).

A matéria orgânica presente pode ser dividida em DBO em suspensão e DBO solúvel. Assim sendo, as partículas em suspensão são removidas por meio de sedimentação, adsorção, hidrólise ou estabilização, todas em nível primário de tratamento. Já a DBO solúvel é eliminada no tratamento secundário por metodologias como adsorção e estabilização. Neste nível de tratamento também são desenvolvidos mecanismos de remoção de patógenos como a exposição à radiação ultravioleta (ORTIZ; MATSUMOTO, 2012).

No tratamento terciário, as ferramentas e mecanismos utilizados têm como objetivo a remoção de organismos patógenos mais complexos, além de nutrientes e contaminantes químicos, desta forma, as metodologias mais empregadas incluem a desinfecção e a alteração das condições ambientais (mudança do pH, temperatura, disponibilidade de alimento), além de processos de filtração com membranas e osmose reversa (ALMEIDA et al., 2015).

3.3 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Os modelos de tratamento mais empregados, corroborados pelas exigências da legislação, são os que atingem o nível secundário, tendo como parâmetros principais a remoção de DBO e DQO, além dos sólidos, cor e temperatura (JUNQUEIRA et al., 2017). Os principais sistemas de tratamento são através de lodos ativados, sistemas aeróbios com biofilmes, sistemas anaeróbios, disposição controlada no solo e lagoas de estabilização (VON SPERLING, 2014).

A utilização de lodos ativados envolve o acúmulo de matéria orgânica nas câmaras de digestão do efluente. São necessários aeradores ou a recirculação do efluente, para que as bactérias consumam a carga orgânica dissolvida. Neste tipo de tratamento pode ou não exigir a implementação de tratamento preliminar, para

remoção do excesso de sólidos, assim como tratamento posterior, para estabilização do lodo gerado (OLIVEIRA, ARAÚJO; FERNANDES, 2009).

Os tratamentos que utilizam o lodo ativado podem ser divididos em três classes principais: tratamento convencional, com recirculação do efluente; por aeração prolongada, com utilização constante de aeradores; e por fluxo intermitente, com a utilização de aeradores em sistema de ciclos (PORRAS; ISAAC, 2006).

Os sistemas aeróbios são aplicados com o emprego de biofilmes e os métodos mais utilizados são o de filtro de baixa carga, filtro de alta carga e os biodiscos. A característica preponderante destes sistemas de tratamento é de que há a presença de um meio suporte no qual as bactérias aeróbias presentes no efluente se aderem e passam a atuar como meio filtrante e retentor de matéria orgânica. O primeiro e segundo sistemas mencionados tem como diferença principal a carga orgânica disponível para o consumo das bactérias, já o terceiro modelo se difere pela estrutura física de instalação, possuindo como meio suporte discos que giram, permitindo que a superfície do meio biológico seja exposta ao ar temporariamente (JORDÃO; PESSOA, 2014).

Como métodos de tratamento anaeróbio podem ser elencados os reatores de manta de lodo e os de filtro anaeróbio. Ambos têm o mecanismo de ação baseado na digestão da matéria orgânica por bactérias anaeróbias, se diferenciando apenas com relação à alocação das bactérias em seu interior. No primeiro modelo, as bactérias se encontram na manta de lodo, no fundo do reator, e por esta característica, este modelo não precisa de tratamento primário. Já no segundo caso, os filtros anaeróbios são formados em um meio de suporte dentro do reator e o sistema necessita de tratamento prévio para remoção de sólidos. Os métodos anaeróbios são conhecidos pela produção do metano como subproduto, que pode ser utilizado na produção de energia térmica ou elétrica (KELLER; ERICH, 1998).

Von Sperling (2014) comenta que quando a forma de gestão do efluente é a disposição no solo, as metodologias aplicadas podem ser: infiltração lenta, infiltração rápida, infiltração sub-superficial e escoamento superficial. Este modelo de disposição proporciona o fornecimento de água e nutrientes às plantas, e possui custos de instalação menores quando comparados aos anteriores. Entretanto, é necessário conhecer a taxa de aplicação do terreno para que não aconteça a superdosagem e, conseqüentemente, a sua contaminação.

3.4 SISTEMAS DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

O modelo de tratamento de efluente mais popular, no entanto, é o composto por lagoas de estabilização. Este sistema é formado por um conjunto de lagoas que têm a função de remover a maior parcela dos poluentes encontrados. Neste conjugado de lagoas podem ser encontradas as lagoas aeradas facultativas, lagoas aeradas de mistura completa com decantadores, lagoas anaeróbias com facultativa ou lagoas facultativas. Cada uma destas células do tratamento tem objetivos e eficiências diferentes, que se complementam para resultar em um tratamento eficiente na remoção de contaminantes físicos, químicos e biológicos (CHÁVEZ-VERA, 2017).

3.4.1 Lagoas Aeradas Facultativas

As lagoas aeradas facultativas são dotadas de aeradores mecânicos, que são responsáveis pela difusão de oxigênio no efluente a ser tratado. Esta ação proporciona condições adequadas de existência para bactérias decompositoras de matéria orgânica, que se tornam responsáveis pelo consumo da DBO solúvel presente. A parcela de DBO suspensa tende a sedimentar, criando assim uma zona anaeróbia ao fundo da lagoa. Nesta faixa de lodo acontece o processo de decomposição por bactérias anaeróbias, consumindo o restante da matéria orgânica (METCALF; EDDY, 2015).

Quando o efluente introduzido na lagoa possui alta densidade energética, os sólidos em suspensão, e por sua vez a DBO, perdem a capacidade de sedimentarem. Estas partículas tomam a característica de coloide e ficam em suspensão na massa a ser tratada. A elevada quantidade de sólidos comporta também uma elevada quantidade de bactérias. Neste sentido, o processo de biodigestão da matéria orgânica é mais eficiente, e a ausência de sedimentação denota ao processo a característica unicamente de digestão aeróbia (JORDÃO; PESSOA, 2014). Este tipo de tratamento necessita de uma complementação para a remoção dos sólidos presentes, desta forma, após o tratamento aeróbio de mistura completa se faz necessário um tempo de retenção em uma lagoa de decantação (KELLER; ERICH, 1998)

3.4.2 Lagoas Anaeróbias

Os processos de consumo biológico da matéria orgânica que não envolvem a presença de oxigênio são conhecidos como processos anaeróbios. Estes têm como principal característica a presença de bactérias anaeróbias que, no consumo da DBO presente, produz gás metano, principalmente, além de gás carbônico (CO₂), hidrogênio (H₂), vapor de água e gás sulfídrico (H₂S) em menores quantidades (PEREIRA, CAMPOE; MOTERANI, 2010).

As lagoas anaeróbias possuem profundidade elevada, limitando a incidência de luz solar e, por sua vez, o crescimento de algas. Esta situação condiciona a não produção de oxigênio dentro da lagoa, tornando o ambiente propício ao desenvolvimento das bactérias anaeróbias. O processo anaeróbio é responsável pelo consumo de aproximadamente 50% da DBO presente no efluente, sendo necessária assim a presença de uma lagoa facultativa em sequencia, para que se elimine o restante da carga orgânica remanescente (VON SPERLING, 2017).

3.4.3 Lagoas Facultativas

Em um cenário que envolve a biodigestão aeróbia e anaeróbia está inserido o modelo de lagoa facultativa. Suas características físicas, na implantação, envolvem uma construção com grande área superficial e profundidade em torno de dois metros. Estes atributos possibilitam grande influência da irradiação solar na superfície, além de permitir o desenvolvimento de uma camada de lodo no fundo, criando um ambiente anaeróbio (LIMA et. al, 2018).

O desenvolvimento do consumo de matéria orgânica nas lagoas facultativas está ligado à associação de diversos organismos com nichos ecológicos diferentes. Devido à grande área de contato com a irradiação solar, algas se desenvolvem na metade superior do perfil da lagoa, e a produção de oxigênio por elas permite o crescimento de bactérias aeróbias. Estas bactérias se aloca próximo à superfície da lagoa e são responsáveis por degradar a DBO em suspensão (PATERNIANI; SILVA, 2005).

A matéria orgânica não solúvel se deposita no fundo da lagoa, local não alcançado pela luz solar. Como esta situação impede o desenvolvimento das algas, acaba por inibir a oxigenação no manto de lodo e possibilita o desenvolvimento das bactérias anaeróbias que degradarão o restante da DBO presente no efluente. Este sistema dá ao efluente tratado estabilidade, não sendo necessários assim tratamentos posteriores (METCALF; EDDY, 2015).

3.5 LAGOAS FACULTATIVAS: PROBLEMAS OPERACIONAIS HIDRODINÂMICOS

As lagoas facultativas sofrem influência direta das variáveis climáticas, como velocidade e direção dos ventos, temperatura e radiação solar. Estes fatores condicionam algumas características operacionais dos sistemas de tratamento e interferem diretamente nos fenômenos de estratificação térmica, zonas de curto-circuito e zonas mortas (JORDÃO; PESSOA, 2014; NAVAL, QUEIRO; SILVA, 2002).

De acordo com Kellner, Moreira e Pires (2009), a diferença de temperatura ou salinidade nas diferentes camadas da massa de efluentes dentro de uma lagoa condicionam sua densidade, conduzindo à formação de estratos com características diferentes, como o volume de sólidos e a proliferação de microrganismos. Ainda de acordo com os autores, esta configuração, em estratos, pode ser corrigida com a ação dos ventos e também pela alocação correta das tubulações de entrada e saída da lagoa, proporcionando a mistura completa do efluente.

O fenômeno de estratificação térmica corrobora o desenvolvimento de zonas mortas e de curto-circuito. Esta situação decorre do aumento no volume de sólidos em estratos inferiores, formando camadas de lodo com maior volume, e limitando assim o fluxo do líquido na região. O desenvolvimento dos bancos de lodo condiciona o movimento do líquido da entrada à saída da lagoa, limitando a sua dispersão de forma radial, gerando assim um fluxo longitudinal e não radial. A influência deste fato no processo de tratamento do efluente é que aspectos operacionais são diretamente afetados, como o tempo de detenção hidráulica e o volume útil da lagoa (CASAROTTI, MATSUMOTO; ALBERTIN, 2012).

As zonas mortas podem ser caracterizadas como regiões que não sofrem influência do fluxo da lagoa, e desta forma a massa de líquido que se encontra

nestas regiões permanece por mais tempo no tratamento do que o calculado em projeto, ou seja, o TDH teórico é maior que o TDH real (KELLNER, MOREIRA; PIRES, 2009).

Quando a massa líquida percorre caminhos mais curtos dentro da lagoa, permanecendo no tratamento por um tempo de detenção hidráulica menor que o calculado em projeto, ocorre o fenômeno de curto-circuito. Este escoamento provoca a perda de eficiência global do sistema, haja vista a impossibilidade de atuação dos microrganismos no período de tempo projetado (METCALF; EDDY, 2015).

Passos (2017) cita ainda outros fenômenos não ideais de fluxo dentro das lagoas de tratamento de efluentes. Estes fenômenos são:

- Escoamento preferencial: escoamento não uniforme do fluido, onde grande parte do volume possui velocidade de escoamento superior ao restante.
- Zonas estagnantes: são caracterizadas como regiões onde há pouca influência do fluxo de entrada e saída da lagoa, mantendo a massa líquida retida. Neste fenômeno a interação com a região ativa é baixo.
- Reciclo: situação na qual parte do fluxo é conduzido à entrada ou interior da lagoa.
- Retromistura: escoamento onde o fluxo possui sentido contrário ao da lagoa.

Kellner, Moreira e Pires (2009) descrevem tais anomalias no fluxo dentro das lagoas de tratamento e complementam afirmando que tais comportamentos interferem diretamente no volume útil, tempo de detenção hidráulica e eficiência da lagoa de tratamento. Os autores caracterizam ainda as zonas advectivas e de mistura, possuindo a primeira as características dimensionadas em projeto e a segunda, uma região onde a velocidade de troca da massa líquida é maior que a projetada.

3.6 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE LAGOAS

3.6.1 Batimetria

A deposição de sólidos nas lagoas acontece devido à ação da força de gravidade sobre as partículas em suspensão no líquido, desenvolvendo estas um movimento oblíquo até atingirem o leito da lagoa. O acúmulo destas partículas, segundo Matsumoto e Sánchez (2013), pode interferir no desempenho do sistema, comprometendo o fluxo projetado e a eficiência na remoção dos poluentes pretendidos.

O estudo batimétrico é uma mensuração topográfica, que tem por objetivo coletar dados sobre o perfil de elevação em diferentes ambientes. Quando aplicado a lagoas de tratamento de efluentes, caracteriza o acúmulo de sedimentos em seus leitos e proporciona o conhecimento sobre o comportamento do fluido e a deposição de sólidos ao longo do perfil longitudinal das mesmas. A coleta de dados pode ser realizada de forma analítica, por meio de uma baliza graduada, por exemplo, ou de forma digital, com o auxílio de sondas (ORTIZ; MATSUMOTTO, 2012).

Com o estudo de elevação da camada de sedimentos em lagoas é possível identificar zonas mortas, de mistura e advectivas. Tal caracterização se deve ao fato de as zonas mortas não apresentarem interação com as zonas advectivas e, portanto, a força da gravidade age por maior tempo sobre os sólidos em suspensão. Tal acontecimento conduz à formação de bancos de lodo com maior espessura quando comparados aos formados em outras regiões das lagoas (ORTIZ; MATSUMOTTO, 2013).

De forma inversa, as zonas de mistura possuem grande velocidade na troca da massa líquida, assim os sólidos suspensos, quando não há barreiras físicas, são carregados junto com o fluxo do líquido, não havendo tempo hábil para sedimentarem no local. Nestas regiões o volume de lodo depositado geralmente é menor se comparado à zona advectiva (KELLNER, MOREIRA; PIRES, 2009).

3.6.2 Hidrometria

Estudos hidrométricos podem ser caracterizados como a coleta de dados sobre o regime hídrico de qualquer ambiente aquático. São informações sobre a

vazão de escoamento de um corpo hídrico que demonstram o comportamento hidrodinâmico do fluido dentro do ambiente (ÁVILA et al., 2016)

A execução do estudo se dá por meio da utilização de equipamentos coletores de informações, como variação da vazão (m^3/s), velocidade de escoamento (m/s) e variação do nível d'água (m). Com estas informações é possível criar uma representação gráfica sobre o perfil hidrodinâmico do ambiente. Uma análise contínua permite ainda identificar informações, como fluxo diário, fluxo de pico e fluxo mínimo, além de caracterizar o escoamento em diferentes estratos do corpo hídrico (AYRES, 2001).

As metodologias para o desenvolvimento da hidrometria são diversas, e a técnica ideal deve ser escolhida a partir de informações específicas sobre o local a ser analisado. Para tanto, devem ser conhecidos: o tipo de leito do corpo hídrico, porte, forma do canal, influência do vento e a quantidade de repetições. A utilização de flutuadores, e sondas são as técnicas mais populares para a execução do estudo (BONIFÁCIO; FREIRE, 2013).

3.6.3 Uso de Traçadores

Traçadores são substâncias utilizadas em sistemas de escoamento para descrever o comportamento hidrodinâmico de fluidos (PASSOS, 2017). O mesmo autor define tais substâncias como: “uma espécie (química ou biológica) utilizada para ‘marcar’ uma fase específica ou parte de um sistema [hidráulico]” (PASSOS, 2017, p. 53).

Casaritti, Matsumotto e Albertin (2012) afirmam que o uso de traçadores em lagoas auxilia na verificação do tempo de residência do volume útil (TDH), existência de zonas mortas e curtos-circuitos, além de avaliar o perfil de velocidade e os padrões de circulação. Estas informações são obtidas por meio de estímulo e resposta, onde uma substância mensurável e inerte ao meio é introduzida à montante da lagoa e sua concentração é aferida ao longo do perfil de escoamento do fluido (JUNQUEIRA et al., 2017).

Para Souza et al. (2012), o emprego de traçadores, apesar de detectar a formação de zonas mortas e curtos-circuitos, restringe os resultados sobre o

comportamento do fluido dentro das lagoas. Como solução ao método, os autores recomendam a utilização de *softwares* de modelagem fluidodinâmica.

3.6.4 Modelagem CFD

De acordo com Souza et al. (2012), durante a elaboração dos projetos de uma estação de tratamento de efluentes e dimensionamento de suas lagoas, são considerados os fenômenos de escoamento ideais, e por meio de características pré-estabelecidas em literatura são definidas as dimensões do projeto. Os autores salientam também que a falta de informações reais sobre o escoamento do efluente a ser utilizado não conforma uma operacionalização bem-sucedida.

A coleta experimental de dados pode, muitas vezes, não se mostrar como uma opção viável técnica e economicamente, limitando o desenvolvimento das ações. Uma das formas de se obter os parâmetros necessários para o correto dimensionamento das unidades de tratamento de efluentes é com o uso da modelagem matemática (OLIVEIRA; TEIXEIRA, 2015).

Neste aspecto, tem-se a fluidodinâmica computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) apta a inferências sobre o comportamento hidrodinâmico de fluidos. Francener (2015) a define como uma ferramenta matemática e computacional capaz de analisar o comportamento hidrodinâmico de um fluido dentro de um volume pré-determinado, ou fora dele, além de relacioná-lo com aspectos externos ao fluido em questão, como o ambiente externo, turbulência, geometria da lagoa, etc.

O funcionamento da fluidodinâmica computacional se dá pela geração de uma malha de nós estabelecida sobre a geometria a ser analisada. Por esta malha serão desenvolvidos as equações e cálculos de interesse para a obtenção do resultado pretendido. Na plataforma de análise são incluídas as condições de contorno, informações estas referentes ao tipo de fluido, movimento da massa e pontos de entrada e saída, além do material de composição do perímetro da geometria para que sejam consideradas as taxas de rugosidade e atrito (PETER, 1999).

Passos (2017) complementa ainda sobre a atuação da modelagem em CFD, que: “os resultados obtidos podem ser analisados numericamente e visualmente, (...)”

e comparados com dados experimentais para calibração e validação” (PASSOS, 2017, p.77). O autor ressalta ainda que este processo de modelagem matemática possui vantagens em relação aos demais haja vista a diminuição no tempo de execução dos modelos e projetos, custo do estudo e alta aplicabilidade em diferentes situações que envolvem a análise fluidodinâmica.

3.7 UTILIZAÇÃO DE CHICANAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

Silva (2007) define chicanas, ou defletores, como barreiras transversais, verticais ou longitudinais capazes de alterar o movimento de um fluido dentro de uma lagoa por meio da sua divisão em diversos canais. A disposição das chicanas é relativa ao objetivo pretendido com a instalação. De acordo com Takeuti (2003), chicanas longitudinais formam canais paralelos nas lagoas, condicionando o escoamento ao fluxo em pistão, atribuindo maior eficiência ao sistema de tratamento que outros modelos hidráulicos, como o fluxo disperso e de mistura completa, no caso das lagoas facultativas.

Outra forma de dispor os defletores em lagoas é de maneira transversal, aumentando o caminho percorrido pelo fluido entre a entrada e a saída da lagoa. Esta disposição é indicada para casos onde o tempo de detenção hidráulica operacional é menor que o TDH teórico, pois com o aumento do percurso, maior será o tempo necessário para que o fluido percorra todo o comprimento da lagoa. Esta configuração permite que haja uma maior exposição do efluente aos raios UV, por exemplo, auxiliando na remoção de organismos patogênicos (KELLNER, PIRES, 1998)

A utilização de chicanas auxilia na remoção de diversas classes de poluentes. A regulação da taxa de sedimentação, o aumento do TDH, o maior tempo de exposição a luz solar, são fatores decorrentes do emprego de chicanas em lagos e condicionam a melhoria do sistema de tratamento na remoção dos poluentes orgânicos como DBO, dos organismos patogênicos restantes, além de compostos nitrogenados que não são eliminados nas etapas anteriores (VON SPERLING, 2017)

Apesar das diversas vantagens no emprego de chicanas em lagoas de tratamento de efluentes, a utilização deste dispositivo pode ter algumas implicações,

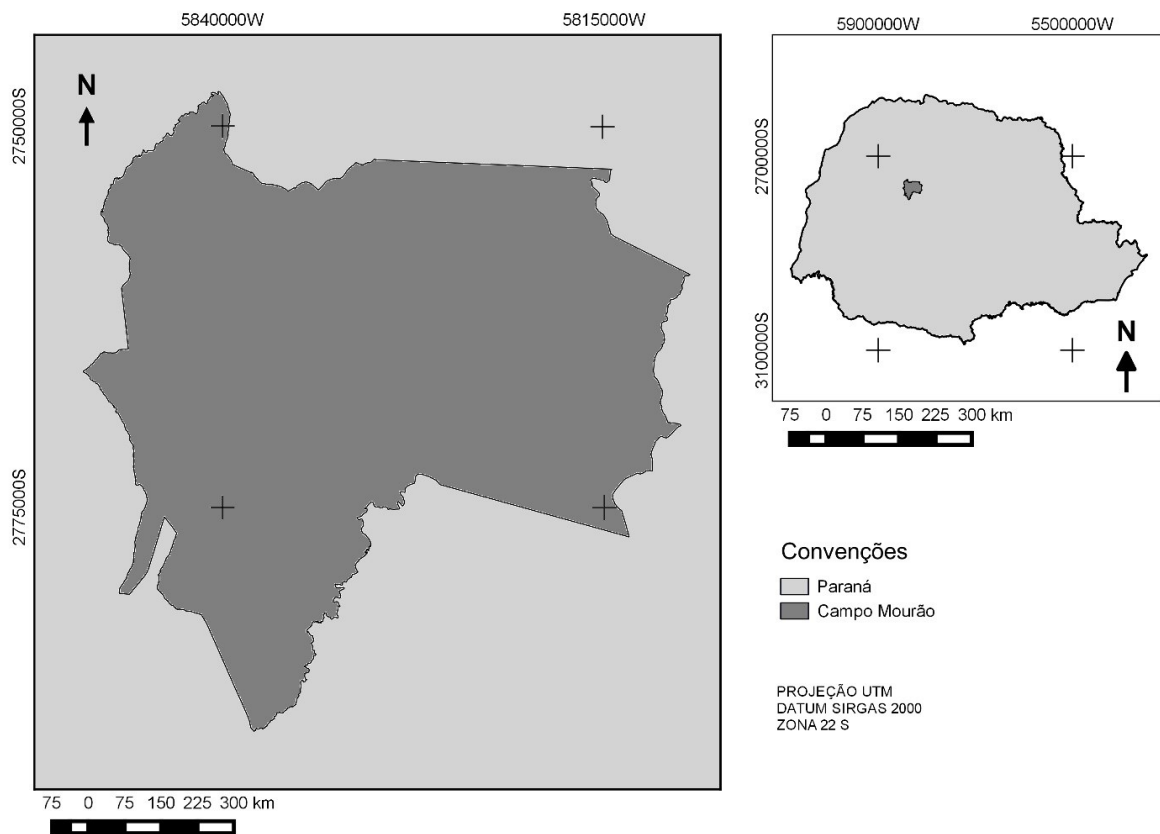
ligadas principalmente ao material de confecção mais comum, que é o concreto. O atrito entre as barreiras de concreto e as geomembranas utilizadas na impermeabilização das lagoas pode resultar em rasgos e vazamentos do efluente no solo. A instalação das chicanas convencionais se torna onerosa e difícil, assim como os procedimentos de manutenção, devido a necessidade de se interromper a operação da unidade de tratamento e drenar a lagoa onde será realizado o trabalho.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCAL DE ESTUDO

Com uma população estimada em 94.212 habitantes, o município de Campo Mourão está localizado na mesoregião centro-ocidental paranaense (Figura 1) e tem sua economia baseada na produção agroindustrial, com culturas de ciclo rápido, predominantemente. A densidade populacional é de 123,37 hab/km², distribuídos em uma área total de 763, 63 km² (IBGE, 2018; IPARDES, 2018). O clima é classificado como Cfa: subtropical úmido, tendo verões quentes e baixa frequência de geadas. A temperatura média anual está entre 20°C e 21°C, e os índices pluviométricos se encontram na faixa de 1400 e 1500 milímetros por ano (IPARDES, 2004).

Figura 1 - Mapa do município de Campo Mourão e sua posição no estado do Paraná-BR

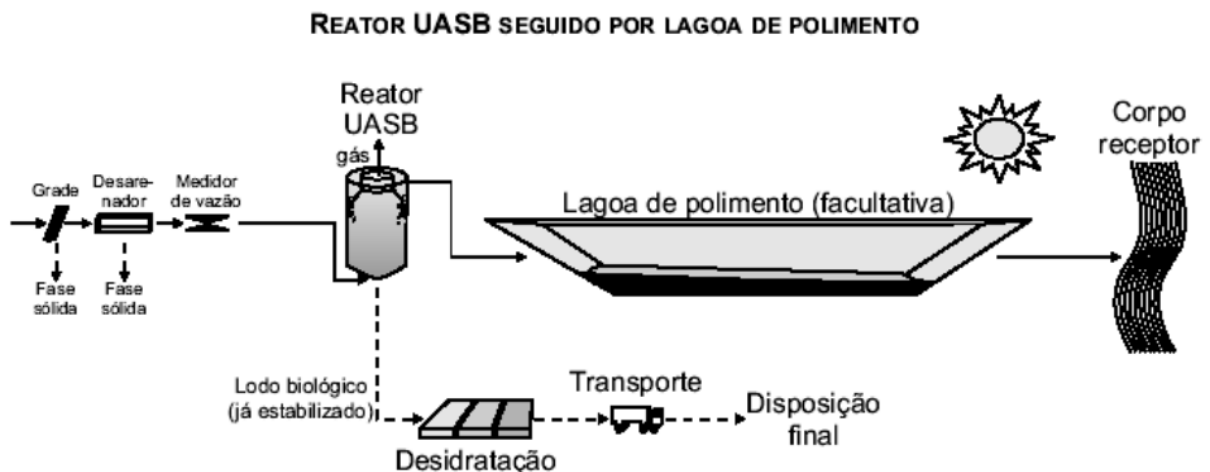


Fonte: GARCIA (2016).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), Campo Mourão possui 30.806 domicílios recenseados, dos quais 75% contam com esgotamento sanitário adequado, ocupando a 43ª posição no *ranking* estadual de saneamento básico.

A lagoa facultativa objeto deste estudo está localizada na região nordeste do município, sob as coordenadas (363475,78 m E; 7345459,05 m S) e (363568,79 m E; 7345574,50 m S). A estação de tratamento é constituída por um sistema composto por tratamento preliminar, primário, secundário e pós-tratamento. O componente principal responsável pela eliminação dos poluentes é um reator anaeróbico do tipo UASB, seguido de lagoa facultativa. O esquema do sistema de tratamento pode ser conferido na Figura 2.

Figura 2 - Modelo do sistema de tratamento de efluentes da ETE analisada no município de Campo Mourão-PR



Fonte: VON SPERLING (2017).

4.2 MATERIAL UTILIZADO E MÉTODOS EMPREGADOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa e alcance dos objetivos propostos, o estudo teve como base o desenvolvimento metodológico descrito nas próximas seções.

4.2.1 Análise da Geometria da Lagoa

A primeira etapa desenvolvida foi a obtenção dos dados de projeto da estação de tratamento de efluentes em questão. A partir destas informações foi possível reconhecer a geometria da lagoa, as dimensões dos taludes, comprimento, largura e profundidade, além dos valores para vazão de entrada, vazão de saída e tempo de detenção hidráulica.

Estes dados são importantes para uma projeção realista do sistema, complementando as informações de contorno utilizadas na modelagem matemática do comportamento do fluido na lagoa. Assim, foram obtidas informações sobre o material utilizado na impermeabilização da lagoa, espessura dos dutos e formato da tubulação de entrada e saída.

4.2.2 Coleta de Dados Batimétricos

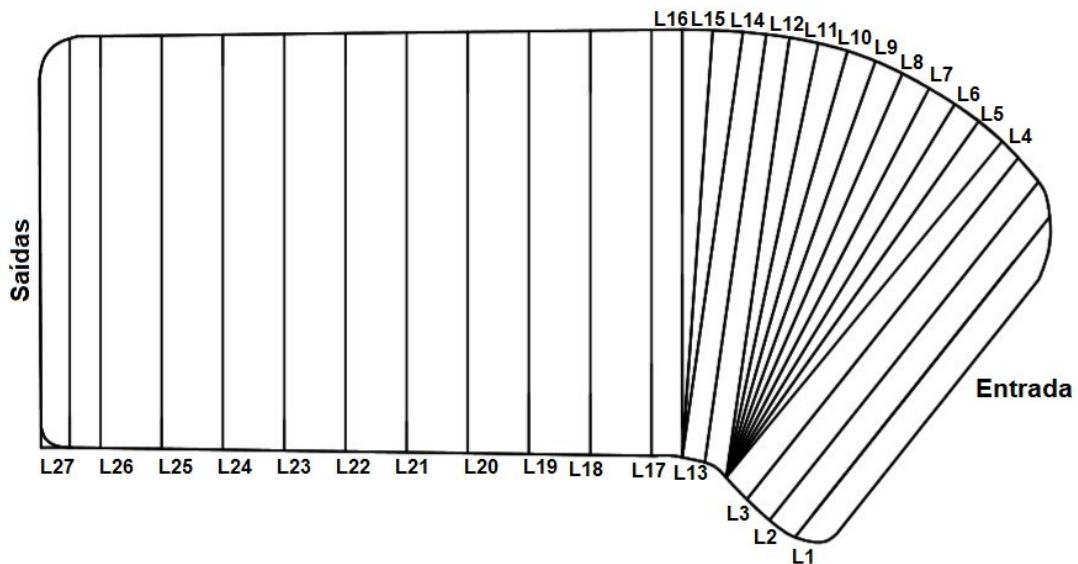
A geometria da lagoa facultativa tem formato irregular, impedindo a confecção de uma malha convencional para a coleta dos dados batimétricos. Desta forma, o método desenvolvido para padronizar os pontos de coleta foi com a utilização de uma corda guia na superfície da lagoa, movendo-a cinco metros a cada linha de coleta, paralelamente à margem de entrada do efluente.

Para a operação, a guia foi fixada às margens paralelas a seção dos dutos de entrada, com o auxílio de ganchos de ferro. Após esta fixação, a partir de cinco metros da linha d'água da lagoa efetuou-se a primeira coleta, como pode ser observado na Figura 3. As medições seguintes foram realizadas a cada cinco metros do ponto anterior. Finalizando a primeira linha de pontos, a guia foi recolocada paralelamente a seção dos dutos de entrada, ainda mantendo a distância de cinco metros da linha anterior.

A lagoa possui uma geometria que se assemelha a uma baía na área de entrada do fluido, e em seguida se estende como um retângulo. Na curvatura do perímetro a movimentação da corda guia aconteceu de forma diferenciada, mantendo-a fixa na margem interna da curva, e percorrendo os cinco metros a cada linha apenas na margem externa (Figura 3). Quando a corda guia tornou-se paralela

à margem de saída do fluido, a distância entre linhas passou a ser de dez metros, entretanto, a distância entre pontos se manteve em cinco metros.

Figura 3 - Croqui da disposição das linhas de coleta batimétrica na lagoa facultativa da estação de tratamento de efluentes de Campo Mourão - PR



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Para realizar a coleta dos dados batimétricos utilizou-se um bote de alumínio, equipado com remos, que foram utilizados com a máxima cautela a fim de evitar a movimentação da massa de lodo na lagoa (Figura 4). A medição foi realizada por meio de uma baliza de aço inoxidável, graduada, com comprimento de três metros, tendo sua extremidade inferior equipada com um disco de aproximadamente 0,15 metros de diâmetro.

Ao encontrar o ponto de coleta, a baliza era afundada na lagoa, tendo sua velocidade de submersão controlada, até atingir a camada de lodo. Neste instante era possível observar que o disco na extremidade da baliza sofria resistência para penetrar na massa semissólida, e então o valor encontrado na baliza era anotado.

Figura 4 - Fotos da coleta dos dados batimétricos na lagoa facultativa da ETE - Campo Mourão



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

4.2.3 Criação do Modelo Tridimensional dos Sedimentos

A partir dos dados obtidos na batimetria, desenvolveu-se uma superfície tridimensional que caracteriza a situação encontrada no fundo da lagoa facultativa. Para tal operação foi utilizado o *software Surfer 8®*, de distribuição gratuita. Para que fosse possível replicar a situação encontrada na lagoa, foi necessário oferecer

um tratamento aos dados coletados, atribuindo-lhes valores para as coordenadas X, Y e Z.

Assim, a geometria da lagoa foi replicada no *software* AutoCAD®, onde foi possível desenhar as linhas de coleta e localizar os pontos em cada uma das linhas. Depois de finalizado o desenho do perímetro e linhas de coleta, a geometria foi alinhada ao eixo cartesiano (0,0) permitindo então que se encontrassem as coordenadas de cada um dos pontos de coleta. Desta forma, os pontos passaram a ter dimensões X, Y e Z.

As informações cartesianas geradas no AutoCAD® foram inseridas nas planilhas do *Surfer* e possibilitaram então o desenvolvimento da superfície inferior da lagoa. Utilizado as ferramentas deste *software* foi possível manipular a imagem gerada, graduando-a de acordo com a altura da camada de lodo.

4.2.4 Construção do Comportamento Hidrodinâmico do Fluido na Lagoa Facultativa

Com as informações de dimensionamento da lagoa, obtidas pela análise do projeto de implantação da estação de tratamento, a geometria tridimensional da lagoa facultativa foi replicada na plataforma de criação de sólidos disponível no *software* Ansys 14.5®, um programa de alta performance utilizado para simulação computacional.

Este procedimento se deu aplicando as dimensões reais da lagoa para comprimento, largura e profundidade, espessura e formato das tubulações de entrada e saída. Informações como a rugosidade das paredes laterais e inferior e características do fluido foram adicionadas às condições de contorno disponibilizadas pelo *software*.

Após a criação e caracterização do sólido que representa a lagoa de tratamento, o programa *Ansys*® gerou uma malha estruturada de pontos triangulados que envolveram toda a geometria. A cada nó desta malha foi atribuída uma equação, de acordo com as informações fornecidas previamente. Além disto, o *software* permitiu a implementação da modelagem matemática sobre as características de escoamento do fluido utilizado. A interação das equações em cada um dos pontos da malha com o modelo de escoamento do fluido permitiu

atribuir ao conjunto (lagoa + efluente) o comportamento hidrodinâmico do fluido ao longo do fluxo de tratamento, atribuindo ao escoamento uma caracterização vetorial que representa a direção, sentido e velocidade do líquido em todo leito da lagoa.

Foi realizada ainda a confecção de outros quatro modelos de lagoa, todos com dimensões iguais a original, mas utilizando chicanas para direcionar o fluido no seu trajeto. Os quatro modelos de chicanas foram:

1. Quatro chicanas laterais, com comprimento de dois terços da largura da lagoa, dispostas da seguinte forma: a primeira chicana, paralela a seção do duto de entrada do fluido, as demais, paralelas aos dutos de saída, tendo distância equivalente entre elas, de aproximadamente 25m (Figura 5).

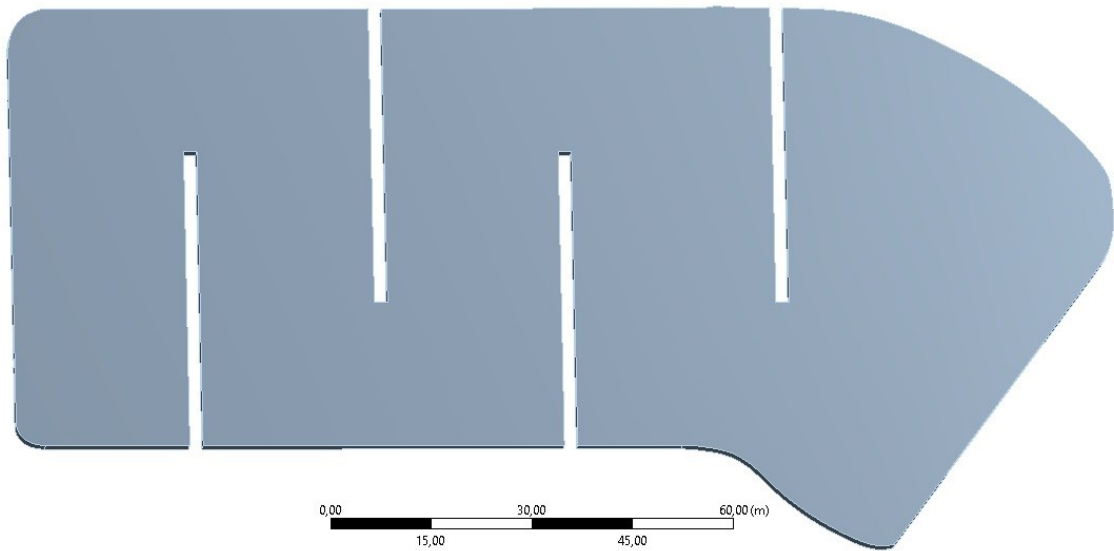
Figura 5 - Primeiro modelo de disposição das quatro chicanas na lagoa da ETE - Campo Mourão



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

2. Quatro chicanas laterais, com dimensões e distâncias iguais ao caso anterior, entretanto todas dispostas paralelamente a seção dos dutos de saída (Figura 6).

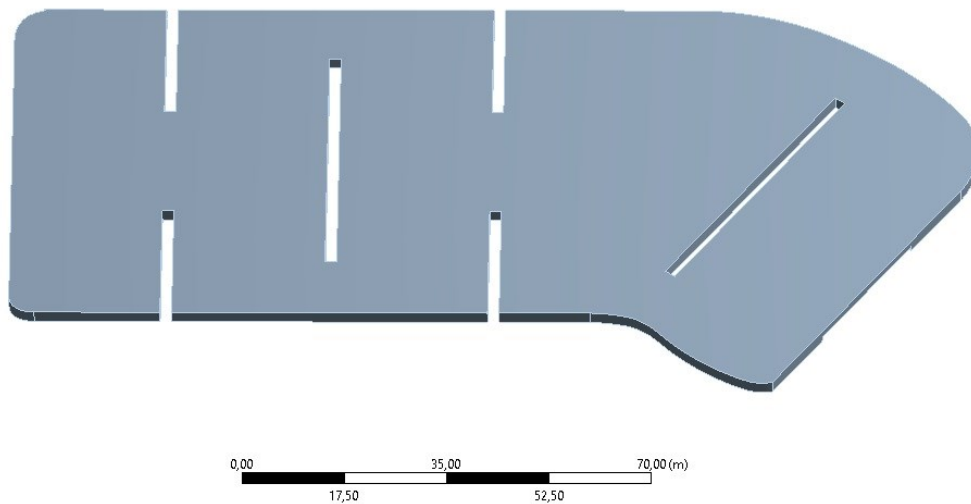
Figura 6 - Segundo modelo de disposição das quatro chicanas na lagoa da ETE - Campo Mourão



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

3. Duas chicanas centrais somadas a quatro laterais. Nesta situação, as chicanas centrais tinham o comprimento de dois terços da largura da lagoa e foram dispostas de forma alternada com as chicanas laterais, que possuíam um terço do comprimento da lagoa. O espaçamento seguiu equivalente entre elas, a primeira chicana era central e paralela a seção do duto de entrada, e as demais paralelas a seção dos dutos de saída (Figura 7).

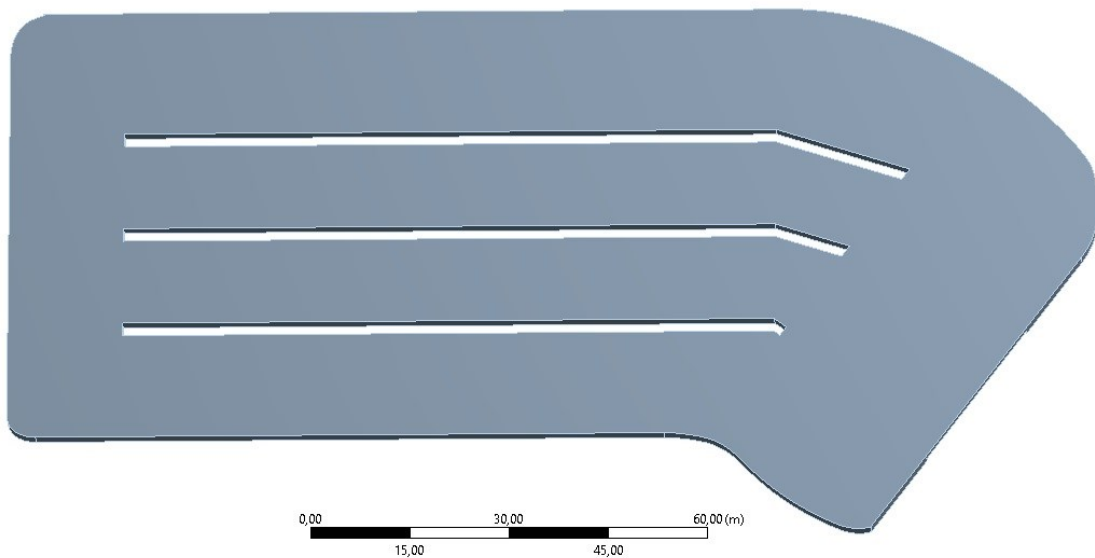
Figura 7 - Modelo de disposição de chicanas centrais e laterais na ETE - Campo Mourão



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

4. Três chicanas centrais, dispostas longitudinalmente, perpendiculares aos dutos de entrada e saída, com comprimento de dois terços do comprimento total da lagoa e distância de aproximadamente 17m (Figura 8).

Figura 8 - Modelo de disposição das chicanas longitudinais



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

4.2.5 Análise dos Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nesta operação foram numéricos (velocidade atingida pelo fluido) e gráficos (caracterização vetorial do comportamento do fluido), possibilitando uma análise sobre a existência de diferenças do comportamento do fluido, assim com uma análise visual da composição vetorial hidrodinâmica. Os valores encontrados são referentes às faixas de velocidade do fluido ao longo do leito da lagoa. Esta faixa de velocidade foi estabelecida de acordo com as diferentes configurações das chicanas, e já nas imagens foi possível identificar as regiões de curto-circuito, recirculação, retrocirculação e zonas mortas, as quais foram confrontadas com os dados coletados em campo.

A análise dos resultados se deu em duas etapas, sendo a primeira delas a comparação entre a modelagem CFD e a realidade batimétrica. A comparação da superfície gerada pelo *Surfer* com o modelo de escoamento gerado pelo *Ansys* permitiu verificar a confiabilidade da modelagem fluidodinâmica na projeção das linhas de corrente do fluido dentro da lagoa, nas zonas de recirculação e também zonas mortas, locais com os mais baixos gradientes de velocidade.

A segunda parte da análise de resultados foi uma comparação entre o modelo de escoamento livre do fluido dentro da lagoa com quatro diferentes modelos de escoamento com barreiras (chicanas). A função desta comparação foi verificar o modelo que apresentava menores problemas operacionais, como velocidade de escoamento controlada, geração de zonas de curto-circuito ou zonas mortas, além de zonas de retromistura.

Além de poder encontrar dentre os modelos de disposição das chicanas o que melhor possibilite a mitigação dos problemas hidrodinâmicos, a comparação também permitiu justificar a criação do modelo de chicanas flutuantes, que podem ser utilizadas em diferentes formatos e instaladas em lagoas já operando.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DADOS DE PROJETO E INFORMAÇÕES BATIMÉTRICAS

Os dados do projeto da lagoa facultativa objeto deste estudo foram obtidos junto à companhia responsável pela operação da estação de tratamento. De acordo com a companhia, o projeto inicial foi alterado durante a construção da estação de tratamento em função de adequações necessárias ao local de instalação. Desta forma, a lagoa ganhou o formato que apresenta hoje, diferentemente do projeto construtivo original, onde apresentava formato retangular.

A entrada se dá por duto centralizado, com vazão média de 28,99 L/s, e velocidade média na entrada de 0,137 m/s, e as saídas são compostas por quatro comportas afastadas aproximadamente 5,0 m da margem, com vazão média de 7,2475 L/s cada (Tabela 4). As comportas condicionam o fluido a extravasar pela parte superior do sistema de saída, evitando assim a liberação de sedimentos e algas para o corpo receptor. A lagoa tem todo o seu revestimento em concreto, profundidade aproximada de 2,5 m e inclinação dos taludes de 2:1.

Tabela 4 - Dados de operação da lagoa facultativa da ETE de Campo Mourão - PR

CARACTERÍSTICAS		VALOR	UNIDADE	OBSERVAÇÃO
Dimensões	Comprimento	162,0	m	Maior comprimento
	Largura	70,0	m	Maior largura
	Profundidade	2,5	m	
Vazão	Máxima	52,18	L/s	
	Média	28,99	L/s	
	Mínima	14,49	L/s	
Tempo de Detenção	Projeto	2,28	d	
	Operação	6,27	d	
Taxa de Aplicação	Superficial	0,75	m ³ /m ² /dia	
	Volumétrica	2,78	m ³ /m ² /dia	
	De Carga	0,58	kg DBO ₅ ²⁰ /m ³ /dia	
Talude	Grau de inclinação	2:1		
	Revestimento	Concreto		

Fonte: SANEPAR, 2019.

As linhas de coleta dos dados batimétricos variaram conforme a geometria da lagoa, não sendo possível, portanto, criar uma malha retangular para normatização da coleta. Foram obtidos resultados de 356 pontos em 27 linhas de coleta, conformando uma média de 13 pontos por linha.

Para o desenvolvimento dos estudos relacionados ao acúmulo de lodo na lagoa, considerou-se a vazão de operação como a vazão média obtida em projeto. A maior largura da lagoa foi encontrada no intervalo entre as linhas L3 e L13, possuindo a dimensão de 70,0 m, enquanto o maior comprimento foi verificado ao final da curvatura externa da lagoa, indo do duto de entrada até a primeira comporta de saída, com a dimensão de 162,0 m.

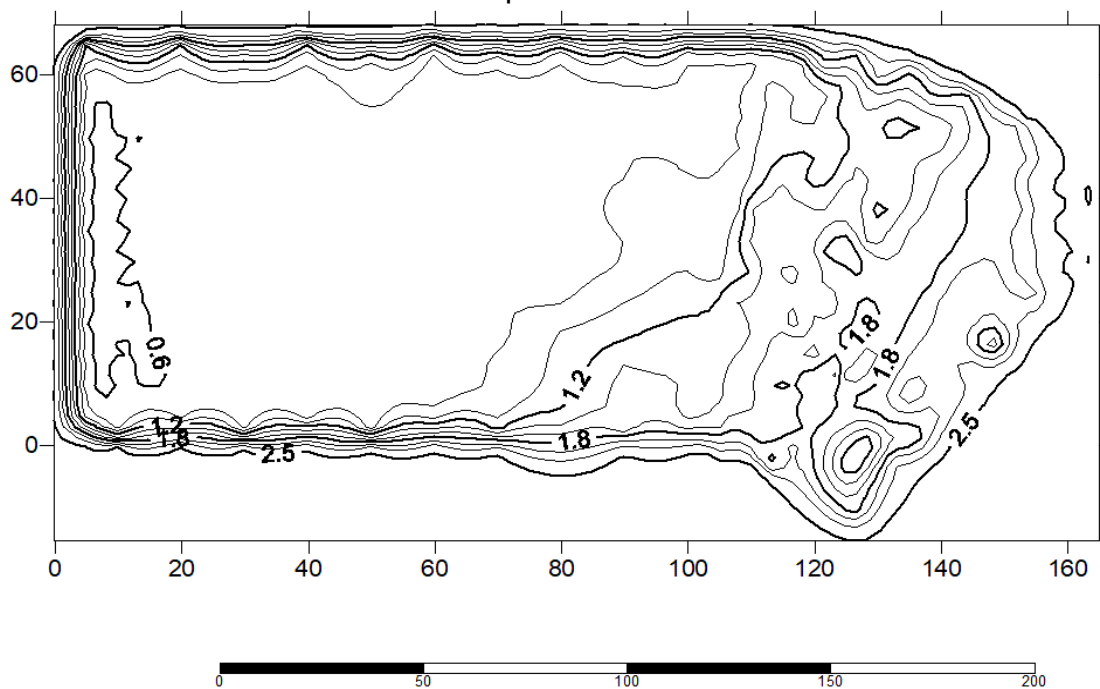
Observa-se com os dados obtidos que o tempo de detenção do fluido na lagoa é aproximadamente 2,75 vezes maior que o tempo de detenção do projeto. Tal fato pode, de acordo com Von Sperling (2017), ser condicionado por problemas operacionais como as zonas de retromistura e as zonas mortas. No primeiro caso, o fluxo, ao encontrar uma barreira, reflete o seu curso e volta a se dirigir à entrada da lagoa, formando uma zona cíclica onde permanece por mais tempo que o calculado em projeto. Já nas zonas mortas, a massa líquida perde velocidade por estar fora da zona de fluxo, se estagnando em áreas periféricas da lagoa. Esta situação contribui com a deposição de sedimentos nestes locais, já que a diminuição da turbulência e velocidade são fatores condicionantes do movimento das partículas de lodo dentro do fluido (MATSUMOTO; SÁNCHEZ, 2013).

A taxa de aplicação encontrada no projeto faz referência à distribuição superficial e volumétrica da massa de DBO, assim, a taxa superficial é a relação entre a área superficial da lagoa e a massa de DBO, enquanto a taxa volumétrica se relaciona com o volume útil da lagoa. Estes valores são responsáveis por auxiliar no cálculo de formação do banco de lodo da lagoa, e são condicionados pela taxa de carga do líquido, ou seja, a quantidade de DBO introduzida na lagoa a cada metro cúbico de fluido aportado (SABESP, 2009).

5.2 MODELO TRIDIMENSIONAL DO BANCO DE LODO

A partir dos dados batimétricos já coordenados, realizou-se a confecção do modelo plano (Figura 9) e tridimensional (Figura 10) da camada de sedimentos depositada no fundo da lagoa. Inicialmente foi gerada uma imagem plana, representando as cotas de altitude encontradas no leito da unidade e, em seguida, elaborou-se a imagem tridimensional do banco de lodo.

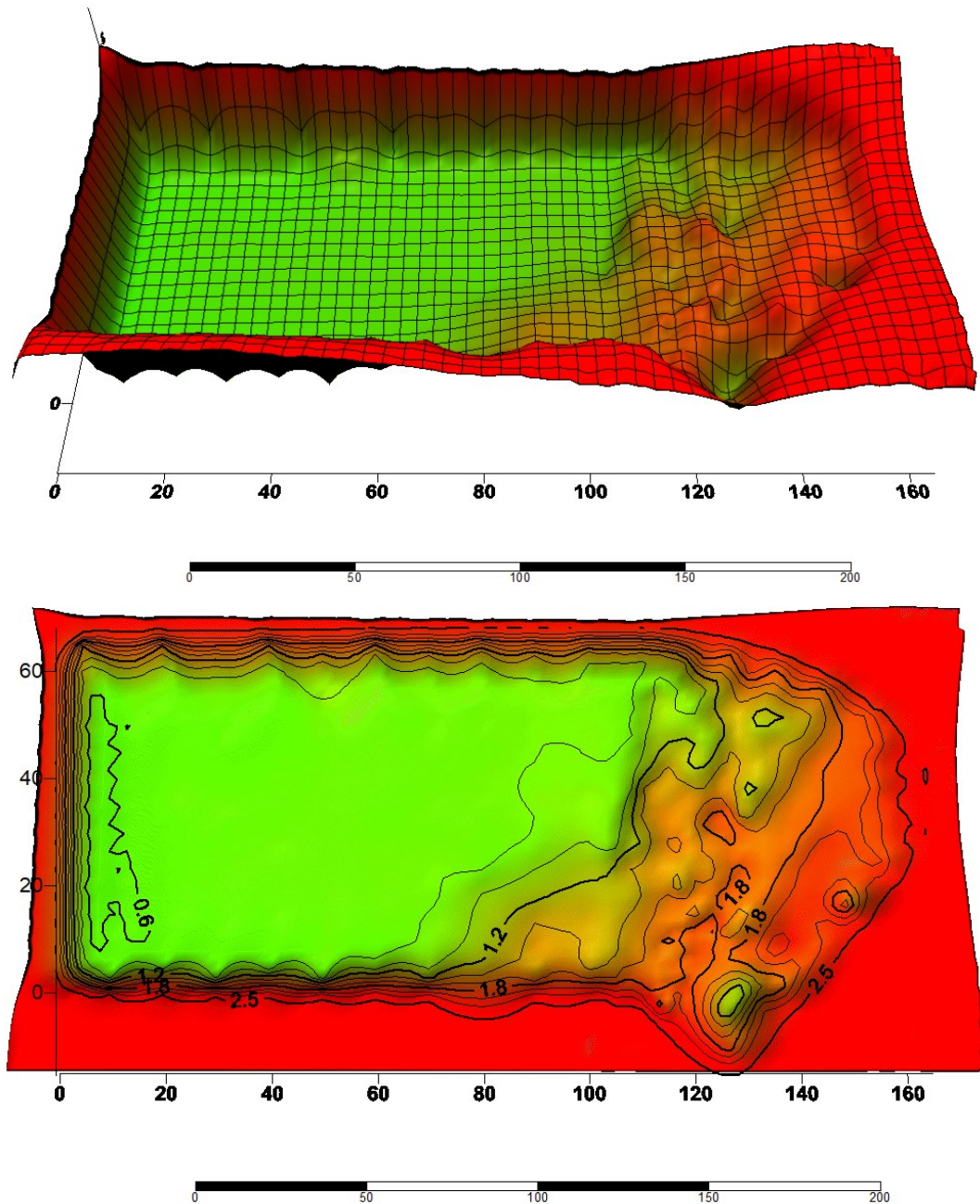
Figura 9 - Cotas de altitude da camada de sedimentos depositados no leito da lagoa facultativa localizada na ETE de Campo Mourão - PR



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Pela Figura 9 é possível verificar que o sedimento tem sua maior taxa de sedimentação no início da lagoa, próximo aos dutos de entrada, chegando nestes pontos à altura de 2,5 m, a mesma profundidade da lagoa. O padrão de deposição segue paralelamente à margem de entrada, na forma de um talude, onde a declividade decai gradualmente até atingir a altura que varia entre 0,8 e 0,6 m a partir do meio da lagoa. Há de salientar ainda que a sedimentação do lodo acompanha a declividade dos taludes, se mostrando mais intensa próxima às margens (Figura 10), assim como mencionam Ortiz e Matsumoto (2013).

Figura 10 - Imagem tridimensional e sobreposição das cotas de altitude da camada de sedimentos depositados no leito da lagoa facultativa da ETE de Campo Mourão - PR



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

O modelo de cotas encontrado a partir da batimetria aponta que a maior influência para o acúmulo do lodo no início da lagoa é o seu formato irregular (Figura 10). Tal situação, com base em Souza et al. (2012), se deve ao fato da margem curva se transformar em uma barreira ao fluxo emitido pelos dutos de entrada, assim, quando o líquido adentra a lagoa facultativa, este não tem um escoamento longitudinal livre. Ao se chocar com a margem curva, a velocidade de escoamento é

drasticamente reduzida e o fluxo é redirecionado a formar zonas de retromistura. Nesta situação o volume de sólidos se adensa, condicionando a sedimentação e a formação dos bancos de lodo (CASAROTTI, MATSUMOTO; ALBERTIN, 2012).

Da forma como acontece em uma caixa de areia, um tratamento primário comum, quando o fluido consegue seguir pela lagoa, no sentido da saída, a concentração de sólidos em suspensão é consideravelmente inferior, permitindo que o escoamento ocorra sem elevadas taxas de deposição de sedimentos e formação de camadas de lodo muito espessas. Esta situação é observada na segunda metade da lagoa, mais próxima aos dutos de saída (VON SPERLING, 2014).

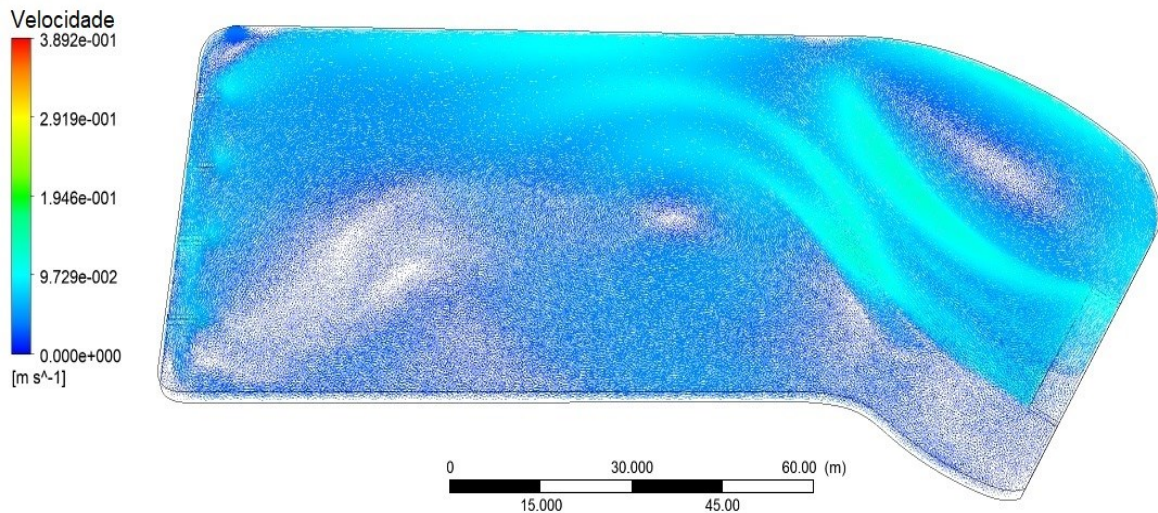
5.3 CARACTERIZAÇÃO DA LAGOA POR FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A partir dos dados coletados no local e dos obtidos junto à companhia responsável pela operação da estação de tratamento de efluentes, realizou-se a modelagem do comportamento do fluido dentro da lagoa facultativa. Foram obtidas imagens vetoriais que apontam o comportamento do fluido a cada instante da sua permanência dentro do leito, desde o aporte até a saída.

A escala de velocidade variou, de zero a 0,568 m/s, entretanto manteve-se principalmente entre 0,097 e 0,148 m/s. Como condição de contorno da modelagem, utilizou-se como velocidade de entrada o valor de 0,137 m/s, calculada por meio da vazão média de entrada do efluente, que é de 28,99 L/s (Tabela 4), mostrando assim que a velocidade de fluxo se mantém regular no interior da lagoa, sofrendo alterações apenas quando sob influência da geometria.

Com a Figura 11, nota-se a intensa movimentação do fluido na margem direita da lagoa, bem como no espaço entre as curvas interna e externa do perímetro. Estes locais possuem coloração mais clara, em tom de ciano, e caracterizam aumento na velocidade do fluido. Observa-se ainda que na região retangular da lagoa, nas proximidades da margem inferior, os vetores possuem uma coloração mais escura e o espaçamento entre os postos é maior, caracterizando a região como um local onde ocorre a perda da velocidade de fluxo (PASSOS, 2017).

Figura 11 - Caracterização vetorial do fluxo dentro da lagoa facultativa da ETE de Campo Mourão - PR



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Estas condições são a evidência dos problemas operacionais encontrados no local. A mudança de velocidade é ocasionada principalmente pela geometria do local, a qual também condiciona a direção do fluxo. Outros fatores que influenciam no ganho ou perda de velocidade são: a concentração de sedimentos na lagoa, a densidade e espessura da camada de lodo, a estratificação térmica e a intensidade e direção dos ventos. Os fatores externos à lagoa são capazes de alterar o fluxo próximo à superfície, influenciando então na forma com que os sedimentos se comportam (CASAROTTI, MATSUMOTO; ALBERTIN, 2012).

Em casos de estratificação térmica, bem como ventos de alta intensidade, o fluido é influenciado a uma movimentação vertical, revolvendo a camada de lodo do fundo, fazendo com que os sedimentos já depositados voltem ao estado de suspensão, como afirmam Jordão e Pessoa (2014). No cenário pesquisado não houve comprovação da influência eólica ou térmica na lagoa. O local onde está instalada é cercado por uma cortina de vegetação de grande porte, dificultando que rajadas de vento de alta velocidade atinjam a lagoa, assim como a protegem de grandes amplitudes na variação da temperatura. Historicamente o município de Campo Mourão tem temperaturas amenas, com médias em torno dos 20°C, com

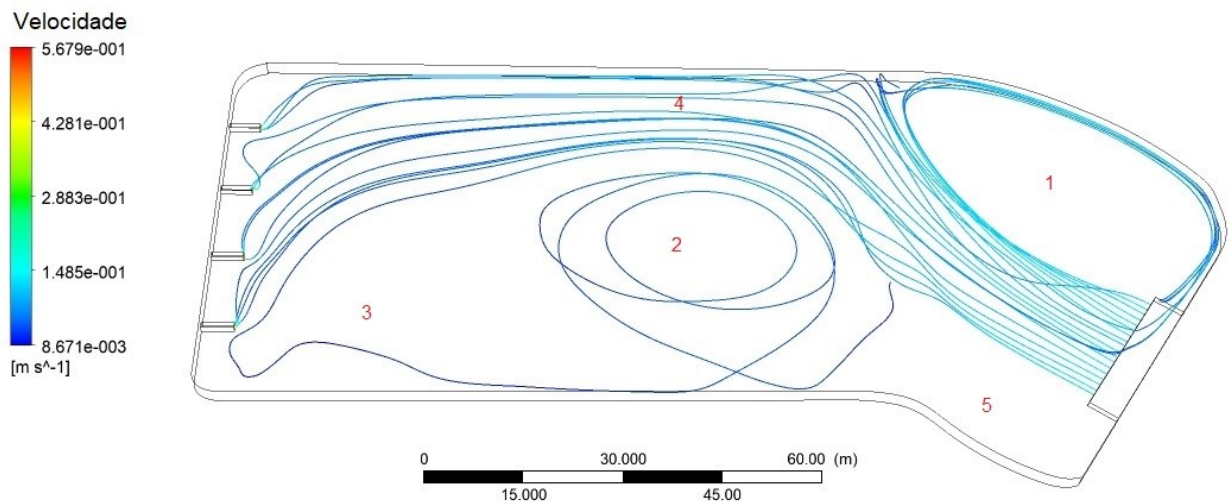
picos positivos no verão, acima dos 35°C, característica essa que torna raro o efeito de estratificação térmica (IPARDES, 2004).

A camada de sedimentos depositada no fundo da lagoa não se comporta como um sólido. O material particulado em suspensão no líquido, ao perder velocidade vai de encontro ao fundo da lagoa, e conforme este processo se intensifica, a quantidade de partículas aumenta. Entretanto, estas partículas se mantêm separadas uma das outras, havendo então um espaço para a circulação do fluido entre elas. Quanto maior é o número de partículas que chega ao fundo da lagoa, mais denso é o lodo, e maior é a pressão que o fluido entre as partículas sofre (KELLNER, MOREIRA; PIRES, 2009).

Ao se considerar a pressão atmosférica que atinge a superfície da lagoa, a velocidade e turbulência do fluido no duto de entrada, o fluido tem um trajeto limitado a seguir. Na lagoa analisada, este trajeto possui a maior concentração de sólido, sendo a influência destas partículas o motivo para o ganho de velocidade do fluido (VOS SPERLING, 1996).

Decompondo-se a análise vetorial em linhas de fluxo (Figura 12), é possível notar com maior visibilidade os fenômenos que atingem a lagoa. Estas situações foram numeradas para melhor explicação sobre cada um dos casos, que podem elucidar as principais causas para a perda de eficiência do sistema de tratamento na lagoa facultativa, assim como para o elevado nível de sedimentação próximo à entrada do esgoto.

Figura 12 - Caracterização das linhas de corrente dentro da lagoa facultativa da ETE de Campo Mourão - PR



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Discriminada pelo número 1 (Figura 12), encontra-se uma região de retromistura, na qual uma parcela do líquido se mantém em movimento cíclico até que seja arrastada novamente à corrente. Durante este movimento há a atuação das forças gravitacionais sobre os sólidos em suspensão, levando à colisão das partículas, adensamento dos sólidos e formação de uma camada de sedimentos. Com o aumento de sedimentos neste local, o direcionamento do fluido se acentua perpetuando esta condição cíclica e intensificando, portanto, as adversidades advindas do acúmulo de sedimentos (KELLNER; MOREIRA, 2009).

Outra parcela do fluido, mais volumosa, ao encontrar o talude da lagoa é direcionada à saída, região de número 4. Neste caso, o líquido segue a barreira imposta pelas margens da lagoa e se dirige aos dutos de saída. Em um projeto de lagoas, o cálculo para o tempo de detenção do líquido em seu interior considera que todo o volume introduzido deve passar por todo o leito com velocidade constante para então ser extravasado. Quando o fluido passa menos tempo na lagoa que o calculado em projeto, observa-se uma situação de curto-circuito, onde parte do fluido se dirige ao caminho com menos obstáculos para então chegar à saída (METCALF; EDDY, 2015).

A lagoa analisada possui uma zona de curto-circuito (4) e ainda assim o tempo de detenção operacional é maior que o calculado. Esta contradição se dá pois apesar de parte do fluido se direcionar à saída mais rapidamente que o calculado, o

restante do líquido que permanece na lagoa possui maior volume, e este se mantém no seu interior por mais tempo que o esperado. Uma característica não impede que a outra se desenvolva, pois o tempo de detenção hidráulica é influenciado por todos os demais processos operacionais encontrados na lagoa (JORDÃO; PESSOA, 2014).

É possível ainda verificar na Figura 12 duas regiões da lagoa onde há pouca ou nenhuma presença das linhas de corrente. Estas regiões receberam os números 3 e 5, e são as regiões de zona mortas responsáveis por elevar o tempo de detenção hidráulica acima do projetado. O fenômeno de zona morta é caracterizado por uma região onde o fluido apresenta velocidade de escoamento inferior à velocidade de projeto. Neste caso, a zona morta começa a se formar quando o fluxo no curto-circuito produz uma força centrípeta que direciona o fluido para a margem inferior, em um movimento circular. Este fluxo d'água é então conduzido pelo talude até reencontrar a corrente de entrada, momento este que sofre novamente com a força centrípeta produzida pelo curto-circuito. Nesta situação, são obtidos três cenários (PASSOS, 2017).

O primeiro deles é a grande área de baixa velocidade (3), onde o fluido permanece quase em inércia, sendo direcionado para os dutos de saída por influência externa, como a eólica. O segundo cenário é a zona de recirculação encontrada no meio da lagoa (2). Neste local, o fluxo que ali se encontra em movimento circular é constantemente acelerado pela ação da zona de curto-circuito tendo, portanto, movimento contínuo. A formação da camada de sedimentos nessa região não é tão intensa como na região (1), pois o líquido que se encontra em recirculação possui menor concentração de sólidos suspensos, já que grande parte destes sedimentou no início da lagoa (NAVAL, QUEIRO; SILVA, 2002).

O terceiro cenário é formado por uma região preenchida por líquido, mas sem fluxo (5). Neste ponto da lagoa não há ocorrência de zonas de retromistura, recirculação ou regiões de curto-circuito e a massa líquida ali presente flui com velocidade quase nula. Nesta região há grande acúmulo de sedimentos porque nela existem características semelhantes à de um decantador, permitindo que as forças gravitacionais atuem nas partículas sólidas sem a interferência dos gradientes de velocidade que arrastariam elas para o centro da lagoa (VON SPERLING, 2014).

A formação desta zona morta (5) é motivada por dois fatores principais:

- O direcionamento do fluxo de entrada, que conduz o fluido até cinco metros para dentro do leito da lagoa e o direciona no sentido oposto ao da região.
- A região de recirculação (2), que por possuir velocidade maior que o fluido presente em (3) e (5) não permite que aja conexão entre tais regiões.

5.4 PROPOSTAS DE UM MODELO DE CHICANA FLUTUANTE

Diversas metodologias podem ser utilizadas para a resolução de problemas operacionais como os descritos neste caso. Dentre elas estão alterações nas vazões de entrada e/ou saída, mudança de geometria da lagoa, remoção dos sedimentos acumulados e utilização de barreiras internas, ou chicanas (SOUZA et al., 2012).

A vazão de entrada e saída da lagoa é dependente do volume de efluentes domésticos que a estação de tratamento recebe, podendo por este motivo não apresentar os resultados esperados, ou ainda não possuir volume suficiente para grandes mudanças. Adequações na estrutura física bem como a remoção mecânica de sedimentos são operações onerosas, que inviabilizam a operação da lagoa durante a adequação, no primeiro caso, e com efeitos em curto prazo, no segundo caso (ORTIZ; MATSUMOTO, 2012).

Adotar a implantação de chicanas na lagoa seria também uma operação com gastos elevados e impediria o funcionamento da lagoa durante a instalação das barreiras, mas propõe-se aqui a criação de um modelo de chicanas confeccionadas em material plástico, semelhante às geomembranas, que possam ser instaladas em lagoas já em operação, sem a necessidade de drenagem da mesma, ou paralização da sua operação.

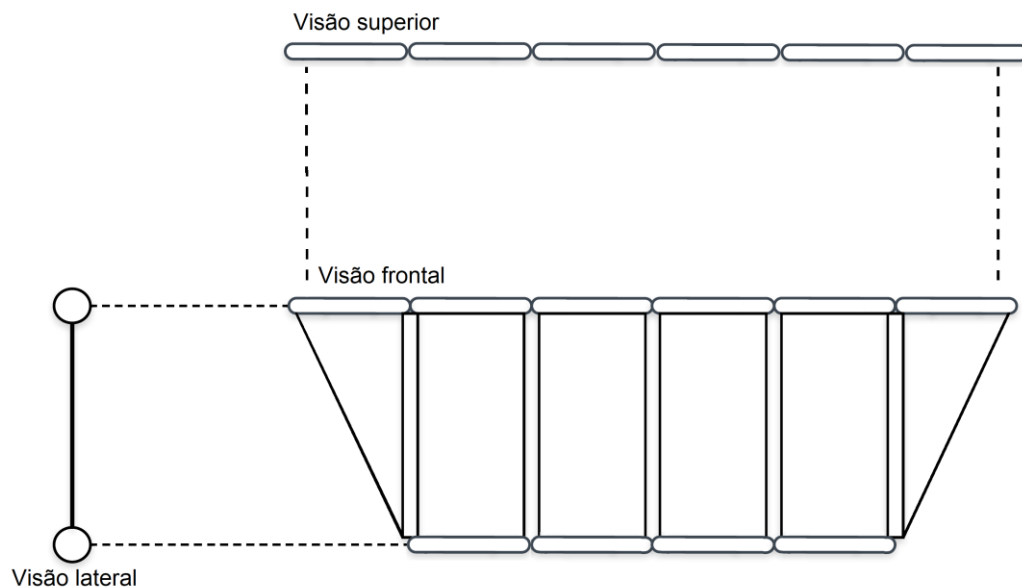
A criação de um modelo móvel, cuja instalação se proceda de forma simples quando comparado aos modelos convencionais, e possibilite o reajuste em casos necessários, permite que os operadores das lagoas encontrem a melhor configuração de barreiras para cada caso, possibilitando um ganho de eficiência.

O modelo desenvolvido foi projetado para ser constituído de material plástico, semelhante as geomembranas disponíveis no mercado hoje, e é formado por módulos com duas unidades de armazenamento nas extremidades, e uma membrana ligando-os. As unidades de armazenamento serão responsáveis pela

flutuação de uma extremidade e fixação da outra no fundo do leito e, portanto, serão preenchidas uma com ar e a outra com areia.

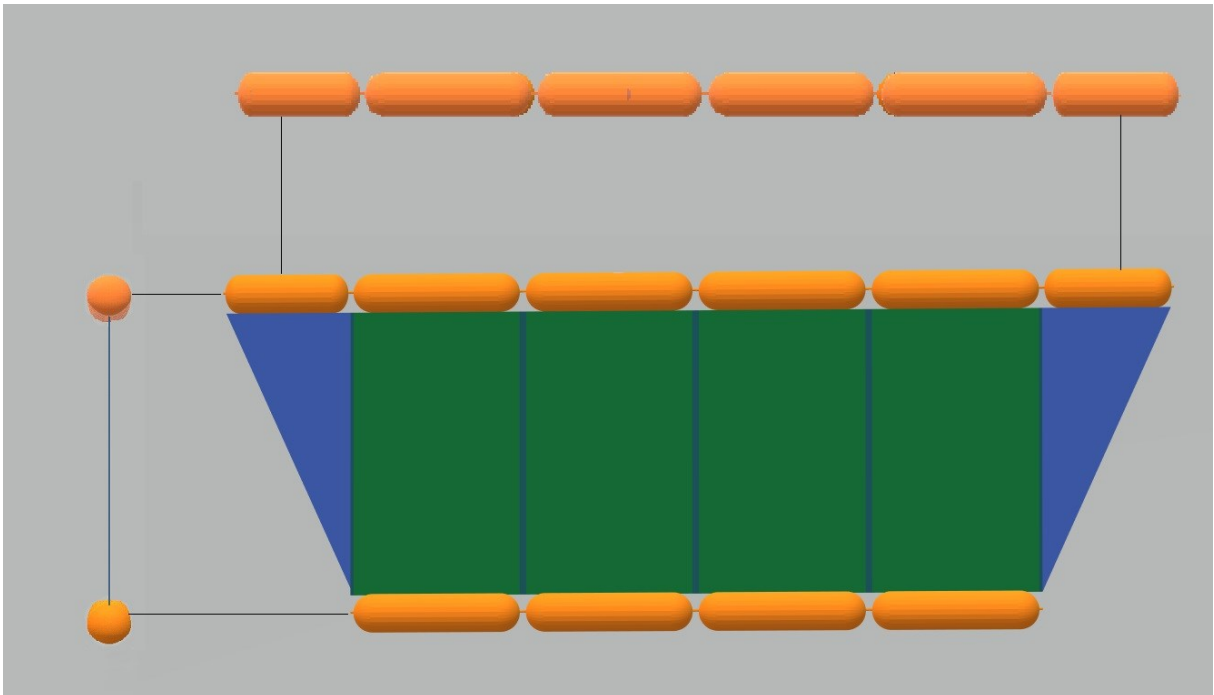
Por ser constituída por módulos, as chicanas podem ter diferentes dimensões, se adequando assim a diversas geometrias de lagoas. Sua fixação no leito se dará por meio de cabos guia, que manterão as boias alinhadas na superfície e ligadas às margens. O modelo de chicana, com quatro módulos centrais e dois módulos externos, se encontra apresentado nas Figuras 13 e 14. Os módulos externos possuem apenas o flutuador, e a membrana central tem formato triangular, com a finalidade de se encaixar corretamente nos taludes.

Figura 13 - Esboço frontal, lateral e superior do modelo de chicana flutuante



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Figura 14 - Esboço tridimensional frontal, lateral e superior do modelo de chicana flutuante.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

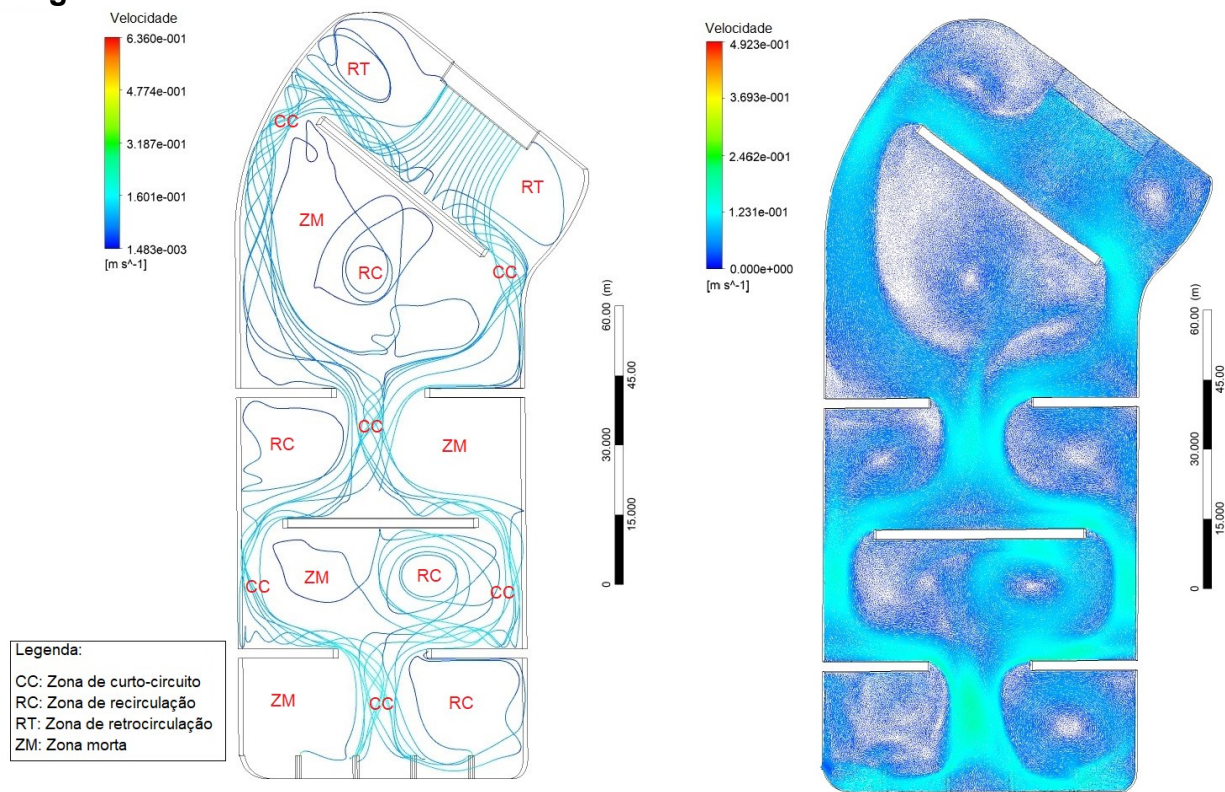
5.5 CENÁRIOS DE DISPOSIÇÕES DAS CHICANAS

Com a finalidade de demonstrar o potencial mitigador das chicanas para os problemas operacionais já elucidados, são apresentados a seguir quatro modelos de disposição das barreiras no interior da lagoa, e a consequência destas diferentes disposições no fluxo da massa líquida no leito.

- **Cenário 1:** disposição das chicanas nas laterais e no centro da lagoa, paralelas a seção dos dutos de entrada e saída (Figura 15).

A chicana disposta próxima à entrada da lagoa contribuiu para a dispersão do líquido por toda a área disponível, evitando que o fluido fosse direcionado todo no mesmo sentido. Entretanto, devido à proximidade do duto de entrada e a velocidade do fluxo, houve a formação de zonas de recirculação nas laterais da lagoa, assim como a criação de uma grande zona morta após a chicana.

Figura 15 - Cenário 1 - chicanas centrais e laterais.



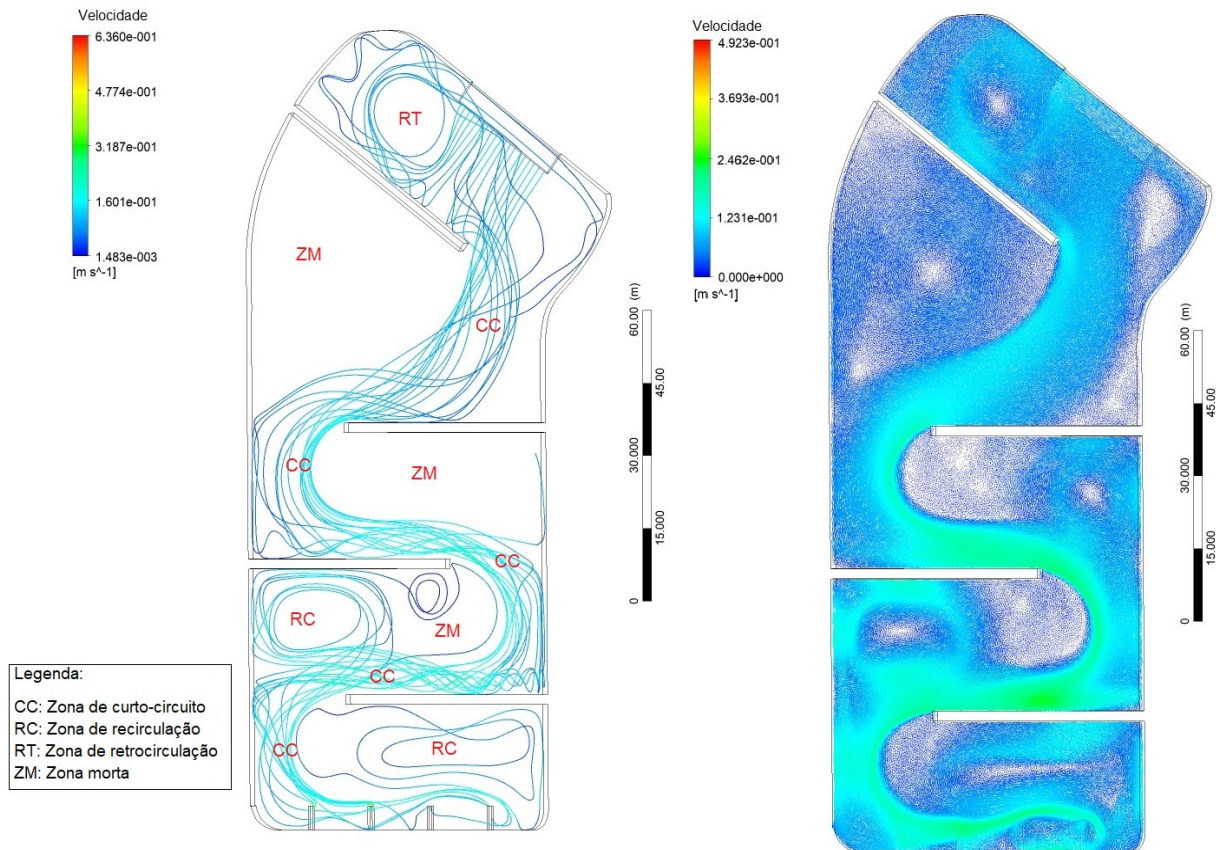
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Na região retangular o fluido se comportou de forma uniforme, dispersando-se por toda a área disponível e não formando mais regiões de baixa velocidade. Neste cenário, é possível prever a formação de um banco de sedimentos na região da primeira chicana, próximo à entrada, assim como acontece na configuração original. As linhas de corrente evidenciam a formação das zonas de recirculação e a grande região de baixa velocidade logo após a primeira chicana.

A velocidade neste cenário aumenta proporcionalmente à proximidade dos dutos de saída, variando entre 0,002 m/s e 0,221 m/s. Esta característica se deve ao fato de o fluxo ser contínuo e o volume de entrada ser igual ao de saída, diminuindo, portanto, a possibilidade de haver zonas mortas significantes. Tal fato se explica pela área dos dutos de saída ser menor que a área do duto de entrada, e para que a vazão se mantenha igual, é necessário que a velocidade de escoamento seja maior.

- **Cenário 2:** quatro chicanas laterais, com a primeira paralela a seção do duto de entrada e as demais paralelas a seção dos dutos de saída (Figura 16).

Figura 16 - Cenário 2 - chicanas laterais, com a primeira paralela à entrada.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

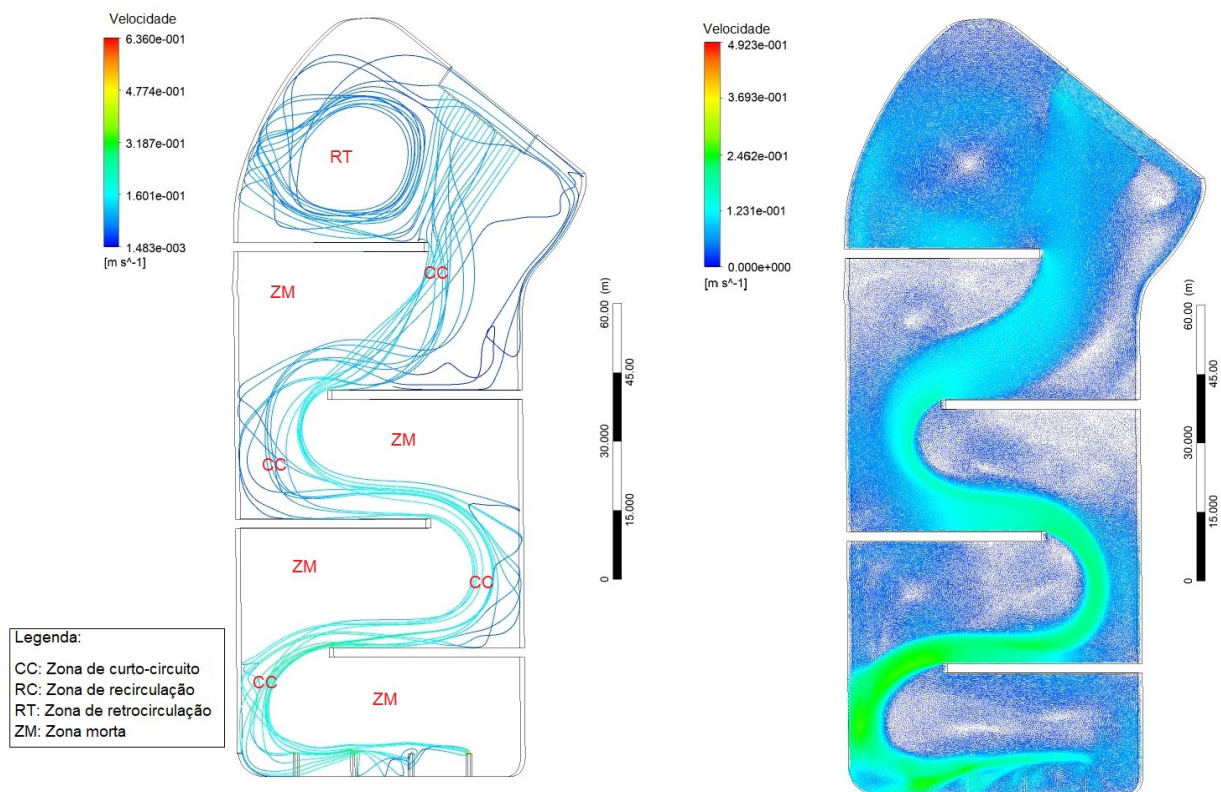
Assim como no primeiro caso, há a formação de diversas regiões de recirculação e uma grande zona morta após a primeira chicana. O fluido, na área retangular, se distribui de maneira a formar um canal, e o fluido passa a se comportar como em corpos hídricos naturais meandrantés, ou seja, passa a fazer o arraste de sedimentos na parte externa das curvas e a acumular na parte interna. Desta forma, nesta concepção de barreiras, o acúmulo de sedimentos aconteceria principalmente atrás das chicanas, aumentando de acordo com a proximidade dos taludes.

A presença de uma chicana paralela a seção do duto de entrada induz a formação de zonas mortas, fato este relacionado à velocidade de entrada do fluido na lagoa e, portanto, dependente da vazão do efluente. A velocidade variou entre 0,002 m/s e 0,324 m/s, entretanto, as imagens demonstram que a maior parte do escoamento apresentou velocidade média em torno de 0,121 m/s.

- **Cenário 3:** quatro chicanas dispostas paralelamente à seção das comportas de saída (Figura 17)

Adotou-se tal configuração tendo como objetivo verificar se a mudança na orientação da primeira chicana afetaria a formação de zonas mortas, diminuindo-as ou até mesmo as eliminando.

Figura 17 - Cenário 03 - chicanas laterais paralelas à saída.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

O que se observa é que a angulação da primeira chicana realmente interfere na formação de zonas mortas, visto que direciona o fluxo às margens curvas da lagoa, fazendo com que o fluido que chega à parte de trás da chicana tenha velocidade mais baixa que a do fluxo.

Quando alterada a orientação da chicana, observa-se então a formação de uma grande zona de recirculação. O fluido quando encontra a barreira ainda possui variação de velocidade elevada, devido às condições de entrada, e ao se chocar se separa em duas correntes: uma segue o fluxo para a saída, enquanto a segunda é encaminhada para o talude, em seguida retorna para a região de entrada e acompanha o fluxo inicial novamente.

Nota-se ainda nesta configuração o aumento expressivo da velocidade no final do percurso, chegando aos 0,326 m/s. Com a diminuição das zonas mortas, o volume de esgoto em circulação aumenta, sendo necessário, portanto, que a velocidade ao final do trajeto seja maior para que a vazão de entrada e de saída se mantenham iguais, como já mencionado anteriormente.

O modelo apresenta zonas mortas e de recirculação concentrados atrás das chicanas, aumentando conforme a proximidade do talude, assim como na configuração anterior, mostrando que o comprimento das barreiras necessita ser menor, a fim de evitar que o fluxo da massa líquida não atinja toda a área disponível da lagoa.

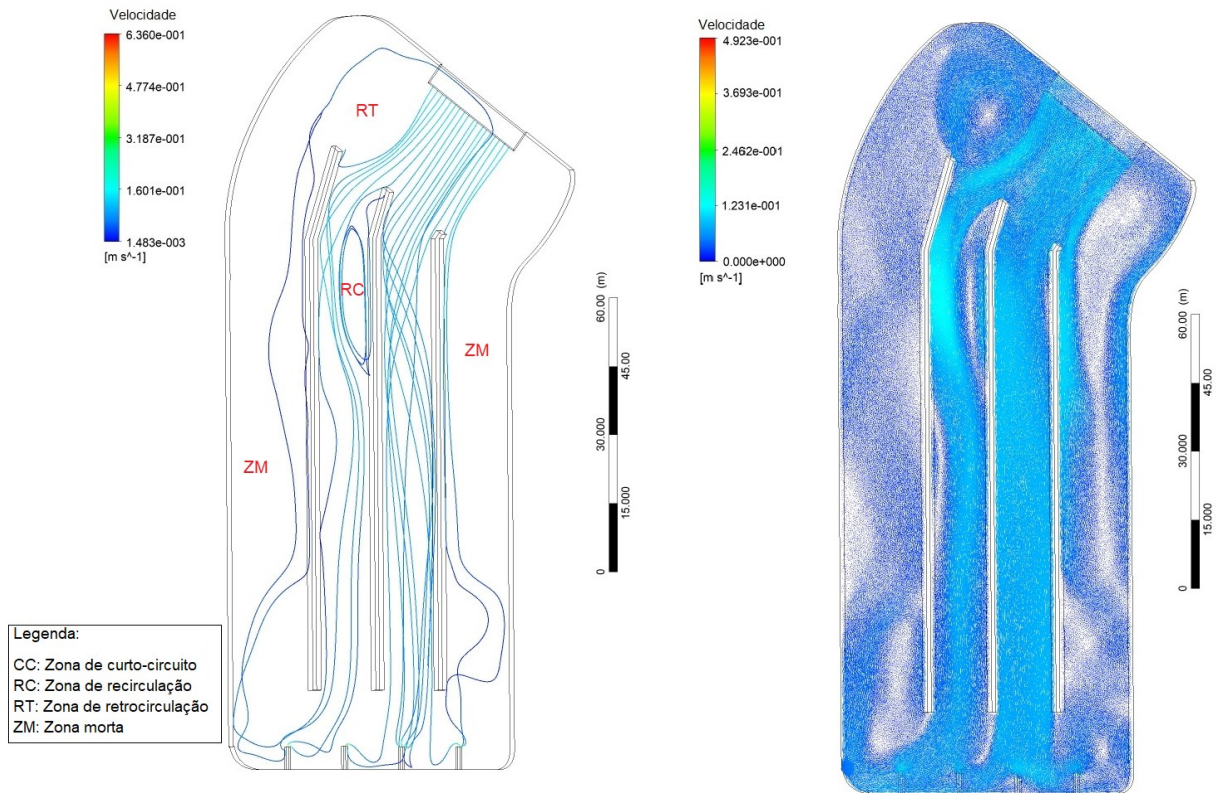
- **Cenário 4:** três chicanas perpendiculares aos dutos de entrada e saída (Figura 18).

Como última proposta, elaborou-se um modelo onde as chicanas se dispunham perpendicularmente à entrada e às saídas. Esta configuração replica a geometria da lagoa em dimensões menores, formando um fluxo para cada uma das saídas, na forma de um fluxo de pistão. A ausência de barreiras paralelas evita a formação das zonas mortas pela velocidade de entrada e redirecionamento do fluxo, entretanto, o formato irregular da lagoa, mais uma vez, contribuiu para o desenvolvimento de alguns problemas operacionais.

Ao entrar na lagoa, a corrente se dirige principalmente aos canais centrais formados pela chicana, formando uma pequena zona de recirculação, a única desenvolvida neste modelo. Esta zona de recirculação contribui para que o fluxo não consiga percorrer o último canal (acima da zona de recirculação) com velocidade equivalente à de entrada na lagoa. Esta configuração denota características de decantadores para esta área, onde as forças gravitacionais são maiores que as forças de arraste, levando assim a sedimentação dos sólidos em suspensão. Desta forma, esta região seria a que possivelmente sofreria com o maior acúmulo de sedimentos.

Uma pequena parte do fluxo de entrada se dirige para o primeiro canal, e a sua movimentação acompanha a disposição da chicana. Nesta situação, também haverá a formação de uma camada de sedimentos mais adensada, entretanto, a velocidade de fluxo próxima a chicana contribuirá para que este acúmulo seja menor que o do último canal.

Figura 18 - Cenário 4 - chicanas perpendiculares à entrada e saída.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Os dois canais formados no centro da lagoa recebem a maior parte do fluxo de esgoto que entra na lagoa. O fluido se comporta nestes espaços de forma uniforme, abrangendo toda a área disponível para o escoamento e não há a formação de zonas de recirculação ou zonas mortas. A velocidade varia entre 0,002 m/s e 0,167 m/s, demonstrando assim que a distribuição do escoamento do líquido na lagoa não sobrecarregou nenhum circuito.

A partir da observação dos efeitos das diferentes disposições de chicanas nos modelos apresentados, é possível constatar que o principal fator de origem dos problemas é de fato o formato da lagoa, mas o volume de operação também tem grande influência. A lagoa possui dimensões muito amplas, desproporcionais à vazão de esgoto para qual é utilizada. O fato de ter uma área muito grande proporciona a perda de velocidade do fluido, aumentando a taxa de sedimentação e o tempo de detenção hidráulica, tendo assim uma característica de ambiente lântico, ideal para o desenvolvimento de algas.

Considerando então a diminuição da taxa de sedimentação, o cenário ideal seria atingido com o aumento da vazão de operação e instalação de chicanas

perpendiculares aos dutos de entrada e saída, como no último caso apresentado. Na impossibilidade de se aumentar a vazão de operação, diminuir a área da lagoa seria outra alternativa. Esta nova configuração poderia ser atingida estendendo-se a primeira e a última chicana até as margens de entrada e saída, e o novo formato englobaria apenas os circuitos centrais apresentados no caso 4.

6 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos nesta pesquisa foi possível verificar o comportamento hidrodinâmico do esgoto sanitário em uma lagoa facultativa, além da relação entre a geometria da lagoa, a deposição dos sedimentos e o desenvolvimento de problemas operacionais que influenciam negativamente na taxa de eficiência da remoção de poluentes. Notou-se que o principal fator de influência na deposição dos sólidos e formação da camada de lodo é o formato da lagoa. O duto de entrada direcionado a uma das margens condiciona o choque das partículas em suspensão contra o talude da lagoa, causando uma zona de recirculação na entrada da lagoa e aumentando o volume de sedimentos depositados nesta região.

A coleta dos dados batimétricos possibilitou a projeção da camada de sedimentos em uma superfície tridimensional, a qual evidenciou a concentração desigual de sólidos ocasionada por conta da geometria do sistema. Por meio da batimetria conheceu-se de fato a situação operacional da lagoa, sendo possível então atestar a veracidade do modelo matemático produzido pelo *software Ansys*. A superfície tridimensional que representa os sólidos depositados foi a base para a elaboração da proposta de mitigação da situação problemática encontrada, bem como conduziu a escolha dos modelos de disposição de chicanas nos quatro casos analisados.

Com a análise do comportamento hidrodinâmico nos diferentes modelos de disposição das chicanas, ficou claro que o movimento do fluido dentro do espaço analisado pode ser reorientado, suavizando o acúmulo de sedimentos no início da lagoa, passando então a uma distribuição uniforme deste ao longo do leito. Os cenários mostraram que a disposição longitudinal das barreiras é a que apresenta a menor formação de zonas mortas, zonas de retromistura e zonas de curto-circuito sendo, portanto, a indicada para a mitigação dos problemas por meio de baixos investimentos.

Concluiu-se também com as análises, que lagoas com dimensões menores e a escolha de sistemas com fluxo de pistão se adaptam melhor ao tratamento de efluentes, e evitam o acúmulo de lodo em postos específicos do leito, levando a uma sedimentação contínua e uniforme. A escolha de unidades com capacidade para volumes mais baixos e dimensões menores se justifica pelo fato de que o maior

volume de sedimentos depositados foi encontrado próximo às margens, onde o fluido não teve velocidade suficiente para fazer o arraste das partículas através do leito. Este acúmulo também foi maior nas regiões em que a geometria apresenta curvatura, devendo então optar-se por geometrias retangulares no dimensionamento e elaboração dos projetos de lagoas para o tratamento de efluentes.

Por fim, os resultados aqui obtidos permitiram o desenvolvimento de um modelo alternativo de chicanas, com instalação mais simples, sem a necessidade de se interromper o funcionamento da ETE, ou realizar a drenagem da lagoa. O desenvolvimento e resultado final deste trabalho mostrou que é possível mitigar os problemas operacionais encontrados na lagoa apenas com a instalação de barreiras em seu leito, de forma a direcionar o fluxo da entrada à saída. Corroborou-se também a necessidade de estudos contínuos que visem a constante melhoria dos sistemas de tratamento de efluentes, visando a diminuição da poluição hídrica e, conseqüentemente contribuindo de modo positivo na crescente crise hídrica.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Fernanda Salbego Colombari de; CAVALLI, Aline; LENHARD, Daiane Cristina; GENENA, Aziza Kamal. Determinação das condições operacionais para o tratamento terciário de efluente frigorífico pelo processo integrado Fenton Coagulação. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.565-573, jul. 2015. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi). Disponível em:

https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1980-993X2015000300565&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 12 set. 2018.

ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. (Org.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p.

ÁVILA, Marcelo Wangler de; HORA, Mônica de Aquino Galeano Massera da; ÁVILA, Celso Rosa de; ALVES, Fabricio Vieira; FARIA, Matheus Marinho; VIEIRA, Maurrem Ramon. Gestão qualitativa dos recursos hídricos. Proposta metodológica para o planejamento de uma rede de estações para monitoramento da qualidade de águas superficiais: Estudo de caso: bacia hidrográfica do Rio Muriaé. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p.401-415, abr./jun. 2016.

Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2318-03312016000200401&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 05 jul. 2018.

AYRES, Mario Carlos. **Hidrometria: medição de vazão**. 2001. 40 f. Seminário (Graduação) - Curso de Faculdade de Ciências Agrônômicas, Unesp, Botucatu, 2001. Disponível em: <http://docplayer.com.br/18262486-Hidrometria-medicao-de-vazao.html>. Acesso em: 28 maio 2018.

BONIFÁCIO, Cássia Maria; FREIRE, Rosana. Comparação de três métodos para a medição da vazão e velocidade aplicados em dois cursos d'água da bacia do Ribeirão Maringá. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, Tupã, v. 9, n. 2, p.406-415, jan./dez. 2013. Disponível em:

https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/656. Acesso em 11 jun. 2018.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 23. nov. 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA. **Sistema nacional de informações sobre saneamento**: diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2017. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2019. 226 p. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2017>. Acesso em: 18 ago. 2018.

CASAROTTI, Edson Geraldo; MATSUMOTO, Tsunao; ALBERTIN, Liliane Lazzari. Avaliação da influência do vento na circulação de uma lagoa de estabilização. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 4, p.401-412, out./dez. 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522012000400007. Acesso em: 20 set. 2018.

CHÁVEZ-VERA, Ingrid G. Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de Aguas residuales. **Dominio de Las Ciencias**: Ciencias Industriales, Ciudadela El Palmar, v. 3, n. 1, p.536-560, mar. 2017. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6134928>. Acesso em: 12 maio 2019.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Constituição (2009). Resolução nº 070, de 01 de outubro de 2009. **Resolução Cema Nº 070**. Curitiba, PR. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=144192>. Acesso em 18 nov. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Constituição (2005). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Resolução Conama Nº 357**. Brasília, DF. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 18 nov. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Constituição (2011). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Resolução Conama Nº 430**. Brasília, DF. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 18 nov. 2017.

FRANCENER, Sandra Ferronato; SOUZA, Vinicius Alexandre Sikoroa de; PEREIRA, Edilene da Silva; BRUCHA, Gunther; SILVEIRA, Alexandre. Estudo da influencia da hidrodinâmica no perfil de remoção de matéria orgânica em lagoas de estabilização anaeróbia da amazônia ocidental: estação de tratamento de esgoto sanitário do município de Cacoal - RO. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 12, n. 1, p.31-40, jan./jun. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316991277_Estudo_da_Influencia_da_Hidrodinamica_no_Perfil_de_Remocao_de_Materia_Organica_em_Lagoa_de_Estabilizacao_Anaerobia_da_Amazonia_Ocidental_Estacao_de_Tratamento_do_Esgoto_de_Cacoal_-_RO. Acesso em: 12 fev. 2019.

GARCIA, Leandro Conti. **Análise de viabilidade econômica para implantação de um sistema fotovoltaico on grid na APAE rural de Campo Mourão – PR.** 2016. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/7244>. Acesso em 30 março 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (Brasil). **Cidades:** Campo Mourão. 2018. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/campo-mourao/panorama>. Acesso em: 25 out. 2018.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (Paraná). **Perfil avançado do município de Campo Mourão.** 2018. Disponível em: http://www.ipardes.gov.br/perfil_municipal/MontaPerfil.php?codlocal=332. Acesso em: 25 out. 2018.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. **Tratamento de esgotos domésticos.** 7. ed. Rio de Janeiro: Abes, 2014. 932 p.

JUNQUEIRA, Waina Bella de Castro; CAMPOS, Claudio Milton Montenegro; FIA, Ronaldo; FIA, Fátima Resende Luiz; AMORIM, Fabiana. Estudos hidrodinâmicos do escoamento em caixa de gordura empregada no tratamento preliminar dos efluentes de cozinha industrial. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p.911-919, set./out. 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522017000500911&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 7 out. 2018.

KELLNER, Erich; PIRES, Eduardo Cleto. **Lagoas de estabilização:** projeto e operação. Rio de Janeiro: Abes, 1998. 244 p.

KELLNER, Erich; MOREIRA, João Fernandes Viana; PIRES, Eduardo Cleto. Influência da estratificação térmica no volume útil e no comportamento hidrodinâmico de lagoa de estabilização: determinação experimental e teórica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p.129-138, jan./mar. 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522009000100014. Acesso em 25 abr. 2019.

KOHNKE, Peter (ed.). **ANSYS:** theory reference. Canonsburg: Ansys, 1999. 1286 p. Disponível em:

<http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>. Acesso em: 17 set. 2018.

LIEBMANN, Hans. **Terra, um planeta inabitável: da antiguidade, até os nossos dias, toda a trajetória poluidora da humanidade**. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, 1979.

LIMA, Luiz Paulo de; FERREIRA, Aline Gomes; VAZ, Lucas Rafael Lommez; ANDRADE, Willian Rufino; FERREIRA, Cecília de Fátima Souza. Método para seleção de sistemas de tratamento de efluentes em agroindústrias de micro e pequeno porte. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 26, n. 4, p.334-342, ago. 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/847/pdf>. Acesso em: 10 jan. 2019.

MATSUMOTO, Tsunao; ORTIZ., Iván Sánchez. Monitoreo del desempeño y estudio batimétrico de la planta de tratamiento de aguas residuales de Neves Paulista (São Paulo, Brasil). **Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia**, Medellín, v. 10, n. 20, p.139-151, jul./dez. 2013. Disponível em: <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/525>. Acesso em: 22 maio 2018.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P. **Wastewater Engineering**. Treatment, Disposal and Reuse. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2015.

MURATHA, Ney Albert; CASTRO, José Esteban; HELLER, Léo. Uma perspectiva histórica das primeiras políticas públicas de saneamento e de recursos hídricos no Brasil. **Revista Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 18, n. 3, p.193-210. 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1414-753X2015000300012&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 11 mar. 2019.

NETTO, J M Azevedo. Cronologia dos serviços de esgotos, com especial menção ao Brasil. **Dae**, São Paulo, v. 33, p.15-19, 1959. Disponível em: <http://revistadae.com.br/site/artigo/704-Cronologia-dos-servicos-de-esgotos,-com-especial-mencao-ao-Brasil>. Acesso em 03 jun. 2019.

OLIVEIRA, Gisele Santos Silva de; ARAÚJO, Cristiano Venícius de Matos; FERNANDES, José Gilson Santos. Microbiologia de sistema de lodos ativados e sua relação com o tratamento de efluentes industriais: a experiência da Cetrel. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p.183-192, abr./jun. 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522009000200006&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em 20 nov. 2018.

OLIVEIRA, Daniel Soares de; TEIXEIRA, Edmilson Costa. Modelagem fluidodinâmica computacional aplicada ao projeto de unidades de floculação. **Sodebras**: soluções para o desenvolvimento do país, Curitiba, v. 10, n. 111, p.121-124, mar. 2015. Disponível em: <http://www.sodebras.com.br/edicoes/N111.pdf>. Acesso em 28 mar. 2019.

ORTIZ, Iván Andrés Sánchez; MATSUMOTO, Tsunao. Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de Ilha Solteira (SP) por lagunas facultativas primarias. **Ingeniería y Desarrollo**, Porto Colombia, v. 30, n. 2, p.199-222, jul./dez. 2012. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-34612012000200005&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 15 fev. 2019.

ORTIZ, Iván Sánchez; MATSUMOTO, Tsunao. Estudio de Batimetría y eficiencia de un sistema de lagunas de estabilización. **Revista de Ciências Agrícolas**, San Juan de Pasto, v. 30, n. 1, p.65-78, maio 2013. Disponível em: <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rfacia/issue/view/140>. Acesso em: 03 dez. 2018.

PASSOS, Ricardo Gomes. **Estudos e modelagem do comportamento hidrodinâmico de lagoas de polimento**. 2017. 422 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-ATSMR5>. Acesso em 25 nov. 2018.

PATERNIANI, José Euclides Stipp; SILVA, Marcelo Jacomini Moreira da. Desinfecção de efluentes com tratamento terciário utilizando energia solar (SODIS): Avaliação do uso de dispositivo para concentração dos raios solares. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p.9-13, jan./mar. 2005. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522005000100002&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 13 out. 2018.

PEREIRA, Erlon Lopes; CAMPOS, Cláudio Milton Montenegro; MOTERANI, Fabrício. Physical-chemical and operational performance of an anaerobic baffled reactor (ABR) treating swine wastewater. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 32, n. 4, p.399-405, jan./dez. 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/231533111_Physical-chemical_and_operational_performance_of_an_Anaerobic_Baffled_Reactor_ABR_treating_swine_wastewater/link/09e41506b3c2c16830000000/download. Acesso em: 10 jun. 2018.

PORRAS, Álvaro Chávez; ISAAC, Ricardo de Lima. Montagem e avaliação de reator de laboratório para tratamento biológico de efluente têxtil no sistema LAB (Iodos

ativados por batelada). **Ciencia e Ingeniería Neogradina**, Nova Granadina, v. 16, n. 2, p.6-13, dez. 2006. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/237042106_Montagem_e_avaliacao_de_reator_de_laboratorio_para_tratamento_biologico_de_efluente_textil_no_sistema_lab_lodos_ativados_por_batelada/link/57b36c1d08aee0b132d8e596/download. Acesso em 12 jul. 2018.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Constituição (2009). Resolução nº 021, de 22 de abril de 2009. Resolução SEMA nº 021. Curitiba, PR.

www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/RESOLUCAO_SEMA_21_2009_LICENCIAMENTO_PADROES_AMBIENTAIS_SANEAMENTO.pdf resolução sema 021/09. Acesso em: 09 abril 2018.

SIQUEIRA, Mariana Santiago; ROSA, Roger dos Santos; BORDIN, Ronaldo; NUGEM, Rita de Cássia. Interações por doenças relacionadas ao saneamento ambiental inadequado na rede pública de saúde da região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2010-2014. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, v. 26, n. 4, p.795-806, out./dez. 2017. Disponível em:

https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S2237-96222017000400795&script=sci_abstract&lng=pt. Acesso em 12 jul. 2018.

SILVA, Elmo Rodrigues da. **O curso da água na história: simbologia, moralidade e gestão de recursos hídricos**.1998. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro. 1998.

Disponível em: http://www.pick-upau.org.br/mundo/curso_agua/curso_agua.htm. Acesso em: 10 jun. 2018.

SILVA, José Vanderley do Nascimento. **Avaliação da influência de chicanas e das estruturas de entrada e saída no desempenho de lagoas de estabilização**. 2007.

76 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp050690.pdf>. Acesso em: 02 maio 2018.

SOUZA, Vinicius Alexandre Sikora; HELBEL, Alyne Foschiani; JANZEN, Johannes Gerson; DIAS, Rafael Henrique Serafim; COLTRE, Harrison Cesar de Souza.

Simulação computacional do comportamento hidrodinâmico em lagoas facultativas com chicanas. **Ciência & Engenharia**, Uberlândia, v. 21, n. 1, p.15-21, jan./jun. 2012. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/17137>.

Acesso em: 23 set. 2018.

TAKEUTI, Marcos Roberto Shoiti. **Avaliação de desempenho de uma estação de tratamento de esgoto por lagoas de estabilização com chicanas**. 2003. 99 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil,

Universidade Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2003. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/98107>. Acesso em 28 mar. 2019.

TEIXEIRA, Júlio César; OLIVEIRA, Guilherme Soares de; VIALI, Amanda de Mello; MUNIZ, Samuel Soares. Estudo do impacto das deficiências de saneamento básico sobre a saúde pública no Brasil no período de 2001 a 2009. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 1, p.87-96, jan./mar. 2014. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522014000100087&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em 20 nov. 2018.

VON SPERLING, Marcos. **Lagoas de estabilização**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2017. 196 p.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 472 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO (Suiça). **Progress on drinking water, sanitation and hygiene: Update and SDG Baselines**. Genebra: World Health Organization, 2017. 66 p. Disponível em: https://www.unicef.org/publications/index_96611.html. Acesso em 03 jul. 2019.