



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PPGESA

MODELAGEM DE INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO (BIM) PARA PROPOSIÇÃO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE LIXIVIADO

DISCENTE: ENG(A).RAFAEL HARUO YOSHIDA SILVA

ORIENTADOR(A): PROF.DR. NEYSON MARTINS MENDONÇA

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**



BELÉM (2025)



MODELAGEM DE INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO (BIM) PARA PROPOSIÇÃO DE ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE LIXIVIADO.

RAFAEL HARUO YOSHIDA SILVA

PTT (PRODUTO BIBLIOGRÁFICO) APRESENTADO AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGESA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL.

Data da avaliação: 19/03/2025.

Examinado(a) por:

Prof. Neyson Martins Mendonça, Dr. em Hidráulica e Saneamento
(PPGESA/ITEC/UFPA – Orientador)

Prof. André Bezerra dos Santos, Dr. em Ciências Ambientais
(Universidade Federal do Ceará – Membro)

Prof. Luciano Matos Queiroz, Dr. em Engenharia Civil – Hidráulica
(Universidade Federal da Bahia – Membro)

BELÉM

2025



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

- Y54m Yoshida Silva, Rafael Haruo.
Modelagem de Informação da Construção (Bim) para
Proposição de Alternativas de Tratamento de Lixiviado. /
Rafael Haruo Yoshida Silva. — 2025.
126 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça
Coorientador(a): Prof. Me. Isaque Wilkson de Sousa
Brandão
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental, Belém, 2025.
1. Building Information Modeling. 2. Projeto de
Engenharia. 3. Estação de Tratamento de Lixiviado. 4.
Tratamento de Lixiviado. 5. Lixiviado de Resíduo Sólido
Urbano. I. Título.

CDD 620.0042



Resumo

O tratamento do lixiviado de RSU envolve grande complexidade técnica, dado a sua composição altamente diversificada e concentrada em termos de contaminantes orgânicos, inorgânicos e emergentes, exigindo dessa forma, um alto nível de projeto de engenharia. Neste contexto, a utilização de ferramentas facilitadoras como o *Building Information Modelling* (BIM) nas etapas de concepção, execução e gerenciamento destes projetos, torna-se fundamental para otimização do tempo e dos recursos necessários em cada fase relacionada, sendo corroborada pelo Decreto-Lei nº 10.306, de 2 de abril 2020 e Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021. Tendo em vista a necessidade de adequação dos projetos de engenharia ao BIM e o gerenciamento ambientalmente adequado do lixiviado gerado nos aterros sanitários, esta dissertação dissertação tem como objetivo a utilização do conceito BIM no desenvolvimento de alternativas de tratamento de lixiviado de RSU, explorando dois arranjos de tratamento, sendo a alternativa 01 para o cenário baixa carga e a alternativa 02 para o cenário alta carga. Os resultados obtidos com a aplicação do BIM na concepção das duas alternativas de tratamento de lixiviado foram: (I) quantitativos de tubulações, conexões, equipamentos hidráulicos e unidades de tratamento; (II) verificação do número de inconsistências existentes nos dois modelos; e (III) Peças gráficas e imagens dos modelos. O quantitativo da alternativa 02 superou em 100% o da alternativa 01 na maioria dos itens analisados, com exceção nas tubulações, devido à complexidade da alternativa 02 e ao cenário a que este pertence (alta carga), demandando assim uma maior alocação de recursos. No que diz respeito as inconsistências observadas nos dois modelos, foram identificadas e corrigidas um montante de 64 inconsistências entre tubos, conexões e válvulas especiais. Como resultado da modelagem, foram geradas 70 peças gráficas, 10 tabelas de quantitativo e 8 imagens 3D renderizadas. Quanto à avaliação das alternativas de tratamento de lixiviado 01 e 02 por meio do método *Simple Additive Weighting* (SAW), foram obtidos os índices de 0,94 e 0,74, respectivamente, evidenciando a diferença existente entre os dois cenários (alta carga e baixa carga) e a necessidade de maior estrutura e recursos mais expressivos na expansão da estação de tratamento de lixiviado para a alternativa 02. Comparando-se os padrões de lançamento de efluente tratado da



CONAMA 430/2011 com os padrões internacionais de lançamento de lixiviado tratado foi possível observar que o Japão, Austrália, França e Estados Unidos foram os países que mais se aproximaram do Brasil, apresentando valores de parâmetros similares regulamentados de 52,63%, 42,11%, 42,11% e 42,11 respectivamente. Entretanto, grande parte desses parâmetros possuem valores máximos permitidos diferentes quando comparados com o do Brasil, destacando a necessidade de requalificação das normativas e resoluções vigentes. Considerando todos os resultados obtidos no presente trabalho de dissertação, a aplicação do BIM nos projetos de engenharia revela-se como um caminho promissor na otimização de tempo e recursos na concepção, execução e gerenciamento de projetos, ainda que em passos tímidos no Brasil.

Palavras-chave: *building information modeling*; projeto de engenharia; estação de tratamento de lixiviado; tratamento de lixiviado; lixiviado de resíduo sólido urbano.



Abstract

The treatment of municipal solid waste leachate involves significant technical complexity due to its highly diverse composition, which is concentrated in organic, inorganic, and emerging contaminants, demanding a high level of engineering design. In this context, the use of facilitating tools such as Building Information Modelling (BIM) in the conception, execution, and management phases of these projects becomes essential for optimizing the time and resources required for each related stage. This is supported by Decree-Law No. 10,306 of April 2, 2020, and Law No. 14,133 of April 1, 2021. Given the need for adapting engineering projects to BIM and the environmentally adequate management of leachate generated in sanitary landfills, this dissertation aims to apply the BIM concept in the development of leachate treatment alternatives, exploring two treatment arrangements: alternative 01 for the low-load scenario and alternative 02 for the high-load scenario. The results obtained from the application of BIM in the design of the two leachate treatment alternatives were: (I) quantities of pipes, connections, hydraulic equipment, and treatment units; (II) verification of the number of inconsistencies in the two models; and (III) graphical pieces and images of the models. The quantity of alternative 02 exceeded alternative 01 by 100% in most of the items analyzed, except for the pipes, due to the complexity of alternative 02 and the scenario it pertains to (high load), thus requiring a greater allocation of resources. Regarding the inconsistencies observed in both models, a total of 64 inconsistencies between pipes, connections, and special valves were identified and corrected. As a result of the modeling, 70 graphical pieces, 10 quantity tables, and 8 rendered 3D images were generated. Regarding the evaluation of the leachate treatment alternatives 01 and 02 through the Simple Additive Weighting (SAW) method, indices of 0,94 and 0,74 was obtained, respectively. These values highlight the difference between the two scenarios (high load and low load) and the need for greater infrastructure and more significant resources in the expansion of the leachate treatment plant for alternative 02. By comparing the treated effluent discharge standards from CONAMA 430/2011 with international standards for treated leachate discharge, it was observed that Japan, Australia, France and United States of America were the countries most similar to Brazil, presenting similar regulated parameter values



of 52.63%, 42.11%, 42.11% and 42.11 respectively. However, many of these parameters have different maximum allowable values when compared to those in Brazil, emphasizing the need for the requalification of current regulations and resolutions. Considering all the results obtained in this dissertation, the application of BIM in engineering projects proves to be a promising approach for optimizing time and resources in the conception, execution, and management of projects, although still in early stages in Brazil.

Keywords: building information modeling; engineering project; leachate treatment plant; leachate treatment; leachate from municipal solid waste.



Lista de Ilustrações

Figura 1 – Principais contaminantes presentes no lixiviado de resíduos sólidos urbanos.	28
Figura 2 – Principais técnicas de tratamento de lixiviado.	33
Figura 3 – Progressão do nível de maturidade do BIM em função dos anos.	38
Figura 4 – Nível de desenvolvimento do modelo BIM e suas características.	40
Figura 5 – Layout geral do Centro de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do CONCISSS.	49
Figura 6 – Cenário de baixa carga de operação da ETL.	53
Figura 7 – Fluxograma da ETL para o cenário alta carga.	55
Figura 8 – Tanque de equalização de lixiviado bruto.	58
Figura 9 – Unidade de tratamento de torre de arraste.	64
Figura 10 – Gráfico de determinação do número de elementos de mistura.	66
Figura 11 – Curva de perda de carga do misturador estático.	66
Figura 12 – Etapa de dosagem de coagulante e unidade de mistura rápida.	67
Figura 13 – Misturador hidráulico tipo chicana de tubos.	69
Figura 14 – Unidade de floculação mecanizada tipo turbina.	72
Figura 15 – Unidade de decantação tipo decantador Dortmund.	76
Figura 16 – Unidade de condicionamento de lodo (UCL).	78
Figura 17 – Unidade de desaguamento de lodo tipo leito de secagem com bloco drenante em polipropileno.	80
Figura 18 – Unidade de desaguamento de lodo mecanizado tipo decanter centrífugo.	82
Figura 19 – Tanque de sedimentação do lixiviado gerado na célula de RDC.	85
Figura 20 – Unidade de tratamento por membrana tipo osmose reversa.	87
Figura 21 – Layout da ETL para alternativa de tratamento de lixiviado 01 e suas vazões.	94
Figura 22 – Layout da ETL para a alternativa de tratamento de lixiviado 02 e suas vazões.	102
Figura 23 – Quantitativo das tubulações e conexões hidráulicas da alternativa de tratamento de lixiviado 01.	106



Figura 24 – Quantitativo das unidades de tratamento, equipamentos hidráulicos e válvulas especiais da alternativa de tratamento 01.	107
Figura 25 – Quantitativo das tubulações e conexões hidráulicas da alternativa de tratamento de lixiviado 02.	109
Figura 26 – Quantitativo das unidades de tratamento, equipamentos hidráulicos e válvulas especiais da alternativa de tratamento 02.	110
Figura 27 – Relatório de interferências do modelo do sistema hidráulico das alternativas de tratamento.	112
Figura 28 – Organização das peças gráficas e quantitativo gerado no modelo.	113
Figura 29 – Vistas 3D da ETL para a alternativa de tratamento de lixiviado 01.	114
Figura 30 – Vistas 3D da ETL para a alternativa de tratamento de lixiviado 02.	115



Lista de Quadros

Quadro 1 – Principais métodos de estimativa de geração de lixiviados.....	27
Quadro 2 – Principais arranjos de unidades de tratamento convencionais e não convencionais.....	32
Quadro 3 – Aspectos positivos e negativos das técnicas de tratamento de lixiviado.	34
Quadro 4 – Evolução da maturidade do BIM em função dos níveis.....	39
Quadro 5 – Elementos obrigatórios para elaboração de projeto conceitual/anteprojeto e o nível de desenvolvimento do modelo BIM desta etapa.	41
Quadro 6 – Elementos obrigatórios para elaboração de projeto básico e o nível de desenvolvimento do modelo BIM desta etapa.....	42
Quadro 7 – Quadro resumo das etapas de tratamento de dados no RStudio para análise bibliométrica.....	47
Quadro 8 – Matriz de avaliação das alternativas de tratamento de lixiviado.....	90
Quadro 9 – Principais características das unidades de tratamento da Alternativa 01.	91
Quadro 10 – Principais características das unidades de tratamento da Alternativa 02.	96
Quadro 11 – Matriz de avaliação de dados da alternativa de tratamento 01 e 02 pelo método SAW.....	104



Lista de Tabelas

Tabela 1 – Geração de lixiviado em aterros sanitários.....	25
Tabela 2 – Características físico-químicas do lixiviado bruto de diferentes aterros sanitários.....	30
Tabela 3 – Indicadores das bases de periódicos utilizados.	44
Tabela 4 – Ocorrência de parâmetros similares de lançamento de lixiviado no Brasil e em diferentes países do mundo.	117



Lista de Abreviaturas e Siglas

RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
BIM	<i>Building Information Modelling</i>
ETL	Estação de Tratamento de Lixiviado
CGIRS	Centro de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
pH	Potencial Hidrogeniônico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
PFAS	Substâncias Per e Polifluoroalquil
ABDI	Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
ND	Nível de Desenvolvimento
WOS	Web of Science
TMB	Tratamento Mecanizado Biológico
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
RDC	Resíduos da Demolição e Construção Civil
PET	Polietileno Tereftalato
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PP	Polipropileno
CDDV	Caixa de Divisão e Distribuição de Vazão
OR	Osmose Reversa
TQEP	Tanque de Equalização de Permeado
TQEC	Tanque de Equalização do Concentrado
TSH	Tanque de Sedimentação Horizontal
FQ	Tratamento Físico-Químico
TA	Torre de Arraste
UCL	Unidade de Condicionamento de Lodo
DC	Decanter Centrífugo
LS	Leito de Secagem



ME	Misturador Estático
MHC	Misturador Hidráulico Chicanado
FM	Floculador Mecânico
DD	Decantador Dortmund
UV	Ultra Violeta
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SST	Sólidos Suspensos Totais
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>



Lista de Símbolos

L	Volume de lixiviado
W_P	Entrada em decorrência da precipitação
W_{SR}	Entrada de água pluvial ou de fora da área do aterro
W_{IR}	Entrada de irrigação ou recirculação
W_D	Contribuição de água em decorrência da composição dos resíduos
W_{GW}	Infiltração pela base
R	Escoamento superficial
E	Evapotranspiração
ΔS_S	Varição da umidade armazenada no solo de cobertura
ΔS_R	Varição da umidade armazenada nos resíduos sólidos
Q_m	Vazão média mensal
P	Índice de precipitação pluviométrica, valores médios mensais
ES	Escoamento superficial
AAS	Troca de armazenamento de água no solo
ER	Evapotranspiração real
A	Área do aterro sanitário
T	Tempo (s)
Q	Vazão média de lixiviado
P	Precipitação média anual
A	área do aterro
t	Número de segundos em um ano
K	Coefficiente que depende do grau de compactação dos resíduos
V_{TE}	Volume do tanque de equalização
Q_{ETL}	Vazão de tratamento da ETL
Q_{LB}	Vazão de lixiviado bruto afluyente
t_{TE}	Tempo para equalização
h_{eq}	Altura útil do tanque de equalização
H_T	Altura total do tanque de equalização
B_L	Borda livre
L/B	Relação comprimento-largura



ATQE	Área do tanque de equalização
L _{eq}	Comprimento do tanque de equalização
B _{eq}	Base do tanque de equalização
d	Inclinação do talude
L _F	Comprimento do tanque de equalização no fundo
B _F	Base do tanque de equalização no fundo
L _{NA}	Comprimento do tanque de equalização no nível d'água
B _{NA}	Base do tanque de equalização no nível d'água
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
Q _{LB-NTAR}	Vazão de lixiviado bruto unitária da torre de arraste
Q _{LB}	Vazão de lixiviado bruto total
N _{TAR}	Número de torres de arraste
H _{YC-NH3}	Constante de Henry da amônia em função da temperatura
K _c	Constante de equilíbrio da amônia
$\Delta H^{\circ}_{\text{dist}}^a$	Varição da entalpia da amônia a 20°C
T	Temperatura de projeto
R	Constante universal dos gases
C _{EF}	Concentração efluente de amônia
C _{AF}	Concentração afluente de amônia
E _{R-NH3}	Eficiência de remoção da amônia
(Q _G /Q _L) _{Mín}	Razão mínima de vazão de ar e vazão de lixiviado
(Q _G /Q _L) _{Proj}	Razão de vazão de ar e vazão de lixiviado de projeto
S	Fator de arraste
S _{NH3}	Fator de arraste da amônia
(G _m /L _m)	Razão de taxa de aplicação superficial mássica de ar e taxa de aplicação superficial mássica de lixiviado
ρ_{Ar}	Massa específica do ar
ρ_{L}	Massa específica do lixiviado
x	Valor do eixo "x" da curva de Eckert
G _m	Taxa de aplicação superficial mássica de ar
L _m	Taxa de aplicação superficial mássica de lixiviado
A _{TA}	Área da torre de arraste



D	Diâmetro da torre de arraste
a_w	Área superficial específica molhada do material de compactação
a_t	Área total da superfície específica do material de compactação
d_p	Diâmetro nominal do material de compactação
D_G	Coefficiente de difusão da amônia na fase gasosa
D_L	Coefficiente de difusão da amônia na fase líquida
g	Constante gravitacional
μ_L	Viscosidade do lixiviado
μ_G	Viscosidade do ar
σ_L	Tensão superficial do lixiviado
σ_c	Tensão superficial crítica do material de compactação
K_{La}	Constante da taxa de transferência de massa do lado líquido global
K_L	Coefficiente da taxa de transferência de massa na fase líquida
K_G	Coefficiente da taxa de transferência de massa na fase gasosa
a	Área disponível para a transferência de massa dividida pelo volume do vaso
FS	Fator de segurança
L_{TA}	Comprimento da torre de arraste
Q_{m-Ar}	Vazão mássica de ar
ΔP_{LOSS}	Variação da queda de pressão
k_p	Constante empírica da queda de pressão
P_{in}	Pressão de entrada de ar na torre
P_{out}	Pressão de saída de ar na torre
P_a	Pressão ambiente
P_{Sopr}	Potência do soprador
G_{me}	Vazão mássica de ar
M_W	Massa molecular do ar
n_a	Constante de potência de parada do soprador para o ar
E_{Sopr}	Eficiência do soprador
T_{Ar}	Temperatura do ar
P_{Bomba}	Potência da bomba
E_{CMB}	Eficiência do conjunto moto-bomba



P_{Total}	Potência total
E_{ESP}	Consumo de energia específica
V_{fp}	Velocidade de final de plano
Q_{LB}	Vazão máxima de lixiviado afluente
A_{ME}	Área da secção transversal do misturador estático
Re_{fp}	Número de Reynolds de final de plano
D_{ME}	Diâmetro do misturador estático
v_{tv}	Velocidade no tubo velho
Re_{tv}	Número de Reynolds para o tubo velho
D_i	Diâmetro interno do misturador hidráulico tipo chicana
J	Perda de carga unitária
G	Gradiente de velocidade
L_{ME}	Comprimento da tubulação do misturador hidráulico tipo chicana
Δt_{tv}	Tempo de percurso do misturador hidráulico tipo chicana
V_{u-CF}	Volume útil da câmara de floculação
L_{CF}	Comprimento da câmara de floculação
B_{CF}	Largura da câmara de floculação
H_{u-CF}	Altura útil da câmara de floculação
V_{TF}	Volume total da unidade de floculação
n_{CF}	Número de câmaras de floculação
TDH_F	Tempo de detenção hidráulica do floculador
Q_{LB}	Vazão máxima de lixiviado bruto afluente
$P_{Máx}$	Potência máxima do agitador
$P_{Mín}$	Potência mínima do agitador
G_1	Gradiente da câmara 1
G_3	Gradiente da câmara 3
D_e	Diâmetro equivalente
K_t	Número de potência
$n_{Mín}$	Rotação mínima do agitador
$n_{Máx}$	Rotação máxima do agitador
D_{AG}	Diâmetro do agitador
$VP-Máx$	Velocidade periférica máxima



VP-Mín	Velocidade periférica mínima
A _{D-u}	Área do decantador unitária
TAS	Taxa de aplicação superficial
n _D	Número de decantadores
D _{D-u}	Diâmetro unitário do decantador
P _{D-u}	Perímetro unitário do decantador
V _{D-u}	Volume unitário de decantador
θ	Tempo de detenção hidráulica
H _{Cone}	Altura do cone
D _{D-b}	Diâmetro do decantador na base
H _{Cone-2/3}	Altura de 2/3 do cone
H _{Cone-1/3}	Altura de 1/3 do cone
V _{Cone}	Volume do cone
V _{Cone-2/3}	Volume de 2/3 do cone
V _{Cone-1/3}	Volume de 1/3 do cone
V _{Cil}	Volume do cilindro
H _{Cil}	Altura do cilindro
H _{DT}	Altura total do decantador
$\theta_{Máx}$	Tempo de detenção hidráulica para a vazão máxima
$\theta_{Méd}$	Tempo de detenção hidráulica para a vazão média
V _{Lodo}	Volume de lodo
q	Taxa de escoamento linear nas calhas de coleta do clarificado
n _v	Número de vertedores
n _c	Número de calhas
L _c	Comprimento das Calhas
n _{L-c}	Número de lados da calha
n _{L-c}	Distância entre os vértices do vertedor triangular
Q _v	Vazão unitária do vertedor
h _v	Altura da lâmina d'água sobre a crista do vertedor triangular
h _c	Altura crítica
b	Largura da calha de coleta do clarificado
Q _{LT}	Vazão de lodo afluyente total



Q_{L-u}	Vazão de lodo unitária
n_u	Número de unidades
A_u	Área unitária
D	Diâmetro da unidade
H_u	Altura útil
H_T	Altura total
N_d	Número de descargas
V_{U-u}	Volume útil unitário
V_{UT}	Volume útil total
M_{LS}	Massa de lodo seco
Q_{Lodo}	Vazão de lodo
t_c	Tempo de ciclo
TAS	Taxa de aplicação de sólidos
A_{LS}	Área do leito de secagem
A_{LS-u}	Área do leito de secagem unitária
n_{LS}	Número de leitos de secagem
B_{LS}	Largura do leito de secagem
L_{LS}	Comprimento do leito de secagem
H_{LS}	Altura de lodo no leito de secagem
Q_{Lodo-u}	Vazão unitária de lodo
Q_{Lodo-T}	Vazão de lodo total
n_{DC}	Número de decanter centrífugo
Q_{ML-u}	Vazão mássica unitária de lodo
$[ST]_{AF}$	Concentração de sólidos totais afluyente
M_{P-u}	Massa de polímero unitária
$[D]_P$	Dosagem de polímero
Q_{ML+P-u}	Vazão mássica unitária de lodo + polímero
TCS	Taxa de captura de sólidos
ρ_{Lodo}	Massa específica do lodo
$[TS]_T$	Teor de sólidos da torta
$V_{Torta-u}$	Volume unitário de torta
$V_{Torta-T}$	Volume de torta total



$Q_{M,CL-u}$	Vazão unitária mássica do clarificado
Q_{CL-u}	Vazão unitária de clarificado
Q_{CL-u}	Vazão total de clarificado
A_m	Área molhada
B	Base maior
b	Base menor
P_m	Perímetro molhado
V_{m-f}	Velocidade média de fluxo
Q_{L-RDC}	Vazão de lixiviado de RDC
R_h	Raio hidráulico
A_{S-r}	Área superficial requerida
r	Razão comprimento e largura
L	Comprimento do tanque de sedimentação
n_{TQ}	Número de tanques de sedimentação
H_{Lodo}	Altura de lodo
H_{Des}	Altura do desnível
Fr	Número de Froud
C_P	Concentração de STD do permeado
C_{AF}	Concentração de STD afluente
CC	Concentração de STD do concentrado
E	Eficiência de remoção de STD
r	Taxa de recuperação
Q_{LB}	Vazão de lixiviado afluente
Q_C	Vazão de concentrado
Q_P	Vazão de permeado
P_w	Potência unitária de tratamento
f_{ij}	atributo normalizado
r_{ij}	Elemento a ser normalizado
\max_{rij}	Maior valor observado entre os elementos de um mesmo atributo
\min_{rij}	Menor valor observado entre os elementos de um mesmo atributo



Sumário

1	INTRODUÇÃO	22
2	OBJETIVOS	24
2.1	Objetivo Geral	24
2.2	Objetivos Específicos	24
3	REFERENCIAL TEÓRICO	25
3.1	Lixiviado de Resíduo Sólido Urbano – Origem e Geração.....	25
3.2	Lixiviado de Resíduo Sólido Urbano – Composição	28
3.3	Estação de Tratamento de Lixiviado (ETL)	31
3.3.1	Definições – ETL	31
3.3.2	Principais Arranjos de Tratamento de Lixiviado.....	31
3.3.3	Legislações e Padrão de Lançamento de Lixiviado Tratado	35
3.4	Conceito BIM.....	36
3.4.1	Modelagem de Informação da Construção (BIM)	36
3.4.2	Principais Características do Modelo BIM	36
3.4.3	Nível de Desenvolvimento do Modelo BIM	39
3.5	Diretrizes de Projeto e o Conceito BIM.....	41
3.5.1	Projeto Conceitual	41
3.5.2	Projeto Básico	42
3.5.3	Projeto Executivo.....	43
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	44
4.1	Revisão Bibliométrica de Fundamentação do Estudo	44
4.1.1	Método Utilizado para Filtrar as Informações da Análise Bibliométrica	44
4.1.2	Tratamento das Informações no Rstudio.....	45
4.2	Descrição do Empreendimento.....	48
4.2.1	Localização do Empreendimento	48
4.2.2	Características Gerais da Estação de tratamento de lixiviados (ETL).....	50
4.3	Etapas da ETL do CGIRS do Consórcio CONCISSS.....	51
4.3.1	Cenário de Baixa Carga	51
4.3.2	Cenário de Alta Carga	54



4.4	Descrição das Unidades de Tratamento.....	56
4.4.1	Tanque de Equalização de Lixiviado Bruto (TQLB).....	56
4.4.2	Unidade de Torre de Arraste (TA)	59
4.4.3	Unidade de Tratamento Físico-Químico – Coagulação.....	64
4.4.4	Unidade de Tratamento Físico-Químico – Flocculação.....	69
4.4.5	Unidade de Decantação – Decantador Dortmund	72
4.4.6	Unidade de Condicionamento de Lodo	76
4.4.7	Unidade de Desaguamento de Lodo Tipo Leito de Secagem (LS).....	78
4.4.8	Unidade de Desaguamento de Lodo Mecanizado Tipo Decanter Centrífugo 80	
4.4.9	Tanque de sedimentação de Fluxo horizontal.....	83
4.4.10	Unidade de Osmose Reversa (OR).....	86
4.5	Avaliação das Alternativas de Tratamento de Lixiviado pelo Método de Ponderação Simples (SAW)	87
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
5.1	Alternativa de Tratamento de Lixiviado 01 – Cenário Baixa Carga.....	91
5.2	Alternativa de Tratamento de Lixiviado 02 – Cenário Alta Carga.....	95
5.3	Matriz de Avaliação das Alternativas de Tratamento de Lixiviado	104
5.4	Aplicação do Conceito BIM na Concepção das Alternativas de Tratamento 01 e 02.....	105
5.4.1	Quantitativo das Alternativas de Tratamento de Lixiviado 01 e 02	106
5.4.2	Identificação e Correção das Inconsistências do Modelo das Alternativas de Tratamento de Lixiviado 01 e 02	111
5.4.3	Resultado da Modelagem da Alternativa 01 e Alternativa 02 de Tratamento de Lixiviado	113
5.5	Padrões de Lançamento de Lixiviado no Estado do Pará e em Diferentes Países do Mundo.....	116
6	CONCLUSÃO GERAL.....	118



1 INTRODUÇÃO

A utilização do aterro sanitário como forma de disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) continua sendo um dos métodos mais utilizados em todo o mundo, devido ao menor custo de implantação e operação mais simplificada em relação aos demais métodos existentes, como a incineração e a compostagem (RENOU *et al.*, 2008).

No Brasil, no ano de 2019, cerca de 46,1% dos municípios possuíam o aterro sanitário como disposição final de seus resíduos, os 53,9% restantes tinham como disposição final o aterro controlado ou lixão (BRASIL, 2022). Embora o aterro sanitário seja um método considerado adequado em função do seu menor custo de implantação, os subprodutos gerados (lixiviados e gases) em sua operação apresentam grandes riscos ao meio ambiente se mal gerenciados (MOODY; TOWNSEND, 2017).

O tratamento desses subprodutos, em destaque, o lixiviado, envolve grande complexidade técnica, dado a sua composição altamente diversificada em termos de contaminantes orgânicos, inorgânicos e emergentes, representando um grande desafio para os municípios brasileiros. Além disso, as suas características variam em função da composição gravimétrica dos resíduos, idade/tipo do aterro (aterro convencional, aterro de inertes e aterro especial) e clima local (COSTA; ALFAIA; CAMPOS, 2019).

Algumas ferramentas como o *Building Information Modelling* (BIM) ou modelagem da informação da construção vêm sendo amplamente utilizado como facilitador na concepção e na execução de projetos de engenharia. O conceito BIM pode ser entendido como uma tecnologia de modelagem espacial (3D) que considera as interações entre os parâmetros (dados e fórmulas) de cada elemento existente no modelo, objetivando a sincronização, otimização, e integração de processos e informações entre as disciplinas de projeto envolvidas (SACKS *et al.*, 2018).

A utilização do conceito BIM tornou-se fundamental no gerenciamento e na execução das obras em todo o mundo, modernizando a forma de conceber as construções de maneira geral. No Brasil, o Decreto Lei nº 10.306, de 2 de abril de 2020 e a Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021 corroboram com a ampla utilização do



BIM em licitações de obras de engenharia e arquitetura e na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal (BRASIL, 2020, 2021).

Tendo em vista a necessidade de adequação dos projetos de engenharia ao BIM e o gerenciamento ambientalmente adequado do lixiviado gerado nos aterros sanitários, a presente dissertação tem como objetivo a utilização do conceito BIM no desenvolvimento de alternativas de tratamento de lixiviado de RSU, explorando dois arranjos de tratamento, sendo a primeira alternativa para o cenário baixa carga e a segunda para o cenário alta carga. Como produto deste trabalho, será apresentado a modelagem do layout da Estação de Tratamento de Lixiviado (ETL) do Centro de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (CGIRS) do Consórcio CONCISSS, para o cenário alta carga e baixa carga.



2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo a utilização do conceito BIM, explorando suas ferramentas e aplicações na concepção de alternativas de tratamento de lixiviado de RSU com diferentes arranjos e tipos de unidade de tratamento. Como produto deste trabalho, será apresentado a modelagem do layout da Estação de Tratamento de Lixiviado (ETL) do Centro de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (CGIRS) do Consórcio CONCISSS, para o cenário alta carga e baixa carga.

2.2 Objetivos Específicos

- Levantamento dos diferentes tipos de aterro sanitário e lixiviados, principais arranjos de tratamento de lixiviado (layout) e os níveis de eficiência atingidos por estes, padrões internacionais de lançamento de lixiviado tratado, e a descrição das diretrizes normativas de projeto nas etapas conceitual, básico e executivo, bem como o nível de desenvolvimento BIM alcançado em cada etapa; e
- Apresentação do layout da Estação de Tratamento de Lixiviado (ETL) do Centro de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (CGIRS) do Consórcio CONCISSS, para o cenário alta carga e baixa carga.



3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Lixiviado de Resíduo Sólido Urbano – Origem e Geração

O lixiviado de RSU pode ser entendido como a fração líquida resultante da combinação de fatores como a umidade específica do resíduo, decomposição dos resíduos depositados nas células de aterramento, e da ação da percolação da água da chuva sobre as várias camadas de resíduos, que, por sua vez, lixivia os contaminantes existentes no percurso e gera um efluente altamente concentrado com uma gama elementos orgânicos e inorgânicos em sua composição (KURNIAWAN; LO; CHAN, 2006b; LUO *et al.*, 2020).

A quantidade de lixiviado gerado está relacionada com diversos fatores, como: quantidade de chuvas, quantidade de resíduo depositado, quantidade de umidade presente nos resíduos e nas camadas de solo, permeabilidade do solo utilizado nas camadas de cobertura e o grau de compactação utilizado na operação das células de deposição (LUO *et al.*, 2020). Os dados de geração de lixiviados em aterros sanitários podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Geração de lixiviado em aterros sanitários.

Área do AS (m ²)	País	Resíduos (t/d)	Vazão (m ³ /d)	Método	Referência
220.000	POL	33,8	13,70	Estimativa	(KULIKOWSKA; KLIMIUK, 2008)
-	-	-	945	Estimativa	(EGGEN; MOEDER; ARUKWE, 2010)
470.000	TUN	2.000	270	Estimativa	(TIZAOUI <i>et al.</i> , 2007)
610.000	CNH	3.800	800	Estimativa	(KURNIAWAN; LO; CHAN, 2006a)
400.000	DZA	0,994	47	Estimativa	(SALEM <i>et al.</i> , 2008)

Fonte: Adaptado, (EGGEN; MOEDER; ARUKWE, 2010; KULIKOWSKA; KLIMIUK, 2008; KURNIAWAN; LO; CHAN, 2006a; SALEM *et al.*, 2008; TIZAOUI *et al.*, 2007).

Algumas medidas operacionais podem diminuir significativamente a geração de lixiviado, como a utilização de coberturas temporárias nas frentes de trabalho, o



melhoramento do grau de compactação no processo de aterramento dos resíduos e a utilização de coberturas impermeáveis como as geomembranas de PEAD na etapa de finalização das células de aterramento (COSTA; ALFAIA; CAMPOS, 2019; RENO *et al.*, 2008).

A vazão e a composição do lixiviado são informações fundamentais para o seu gerenciamento e monitoramento, influenciando diretamente na tomada de decisão acerca da rota de tratamento a ser escolhida. A vazão de lixiviado pode ser estimada pelo método suíço e pelo método de balanço hídrico, sendo este último o mais completo em termos de equacionamento e variáveis consideradas (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2003; TCHOBANOGLIOUS; KREITH, 2011)

A estimativa da geração de lixiviado pelo balanço hídrico na sua forma geral e básica, podem ser observadas respectivamente nas Equações 1 e 2 a seguir.

$$L = W_P + W_{SR} + W_{IR} + W_D + W_{GW} - R - E - \Delta S_S - \Delta S_R \quad (1)$$

Onde:

L – Volume de lixiviado;

W_P – Entrada em decorrência da precipitação;

W_{SR} – Entrada de água pluvial ou de fora da área do aterro;

W_{IR} – Entrada de irrigação ou recirculação;

W_D – Contribuição de água em decorrência da composição dos resíduos;

W_{GW} – Infiltração pela base;

R – escoamento superficial;

E – Evapotranspiração;

ΔS_S – Variação da umidade armazenada no solo de cobertura;

ΔS_R – Variação da umidade armazenada nos resíduos sólidos.

$$Q_m = \frac{(P - ES - AAS - ER) \times A}{T} \quad (2)$$

Onde:

Q_m – Vazão média mensal;



P – Índice de precipitação pluviométrica, valores médios mensais;

ES – Escoamento superficial;

AAS – Troca de armazenamento de água no solo;

ER – Evapotranspiração real;

A – Área do aterro sanitário;

T – Tempo (s).

O equacionamento da estimativa da geração de lixiviado pelo método suíço é dado pela Equação 3, a seguir.

$$Q = \frac{1}{t} \times P \times A \times K \quad (3)$$

Onde:

Q – Vazão média de lixiviado (L/s).

P – Precipitação média anual (mm);

A – área do aterro (m²);

t – Número de segundos em um ano (s);

K – Coeficiente que depende do grau de compactação dos resíduos (valores tabelados).

A compilação dos métodos de estimativa de geração de lixiviado pode ser observada no Quadro 1, a seguir.

Quadro 1 – Principais métodos de estimativa de geração de lixiviados.

Método		Equação	
Balanço	Equação geral	$L = W_P + W_{SR} + W_{IR} + W_D + W_{GW} - R - E - \Delta S_S - \Delta S_R$	(1)
Hídrico	Equação básica	$Q_M = \frac{(P - ES - AAS - ER) \times A}{T}$	(2)
Suíço	-	$Q = \frac{1}{t} \times P \times A \times K$	(3)

Fonte: Adaptado, (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2003; TCHOBANOGLOUS; KREITH, 2011).

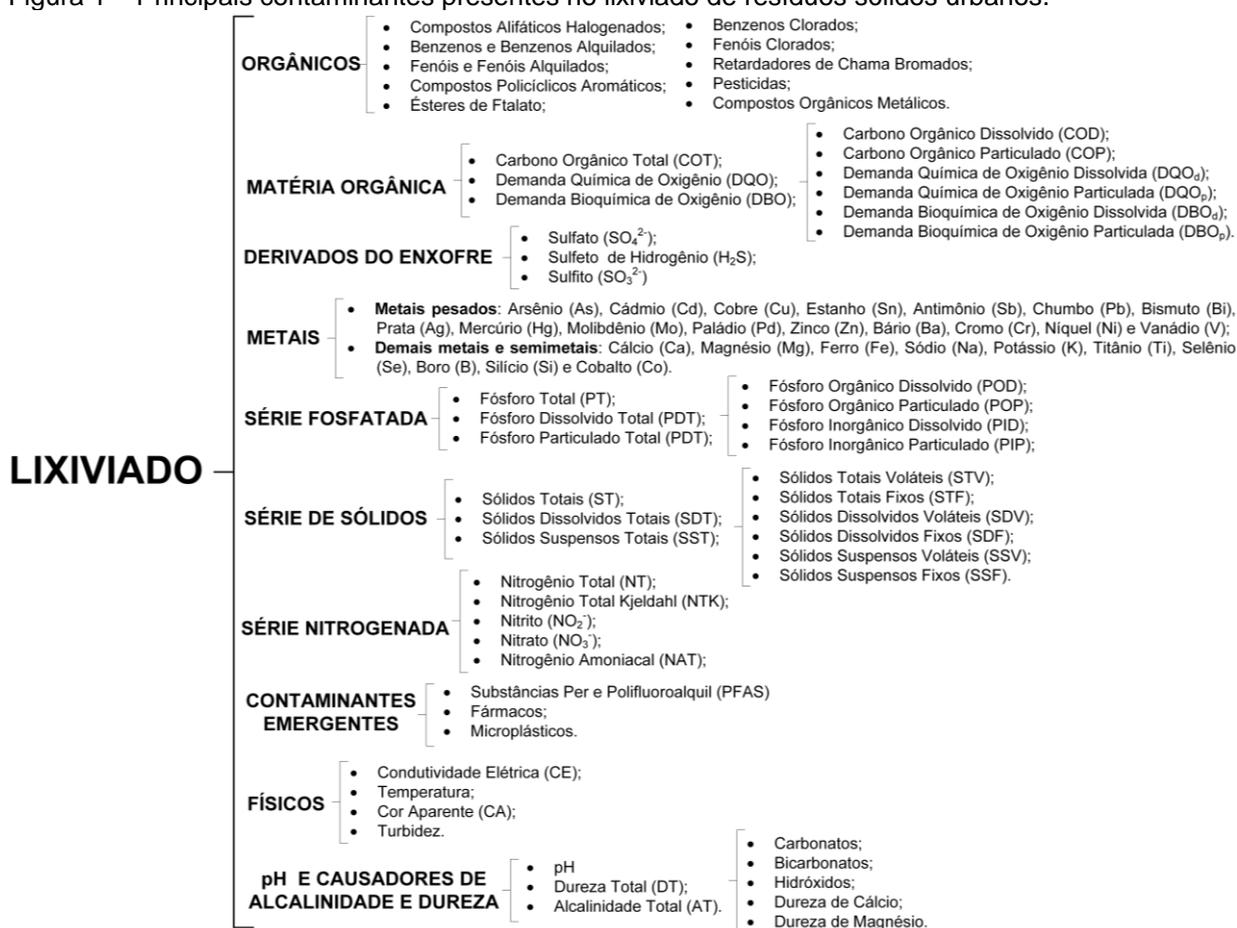


3.2 Lixiviado de Resíduo Sólido Urbano – Composição

A composição do lixiviado, bem como as suas propriedades, modificam-se de acordo com as características dos resíduos sólidos, idade/tipo de aterro sanitário e condição climática tornando-o particular para cada local ou região (KULIKOWSKA; KLIMIUK, 2008; SLACK; GRONOW; VOULVOULIS, 2005).

Os componentes presentes no lixiviado podem ser divididos em 10 grandes grupos, que são eles: os físicos, orgânicos, inorgânicos, matéria orgânica, série de sólidos, série nitrogenada, série fosfatada, derivados do enxofre, causadores de dureza e alcalinidade e contaminantes emergentes (EGGEN; MOEDER; ARUKWE, 2010; ÖMAN; JUNESTEDT, 2008). Os principais contaminantes presentes no lixiviado podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 – Principais contaminantes presentes no lixiviado de resíduos sólidos urbanos.



Fonte: Adaptado, (EGGEN; MOEDER; ARUKWE, 2010; ÖMAN; JUNESTEDT, 2008).



Os principais grupos de contaminantes apresentados na Figura 1, representam grande parte dos elementos constituintes do lixiviado. A investigação dessas variáveis é de suma importância no controle e monitoramento da qualidade do efluente, bruto, tratado e da água subterrânea dos poços de monitoramento no entorno do aterro sanitário.

Cada resíduo/tipo de tratamento de resíduos gera um lixiviado com características físico-químicas e microbiológicas proporcionais à sua natureza, sendo influenciada também pela idade do aterro. Os aterros mais jovens com idade inferior a 5 anos possuem grande quantidade de matéria orgânica biodegradável, com relação DBO/DQO superior a 0,3, propiciando processos anaeróbios de fermentação rápida (fase acetogênica, $\text{pH} = 6,5$), originando os ácidos graxos voláteis (AGV) como principal subproduto (KURNIAWAN; LO; CHAN, 2006).

Para aterros de idade intermediária entre 5 e 10 anos, o pH encontra-se próximo a neutralidade (6,5 a 7,5) e a DQO varia de 4.000 mg/L a 10.000 mg/L, com uma relação DBO/DQO entre 0,1 e 0,3, representando uma biodegradabilidade média em decorrência da redução dos ácidos graxos voláteis (5 – 30% de AGV) e surgimento dos ácidos húmicos e fúlvicos (ÖMAN; JUNESTEDT, 2008).

Por outro lado, aterros com idade superior a 10 anos possuem a fase metanogênica como predominante. Esta etapa é caracterizada pela conversão dos ácidos voláteis em biogás (gás metano e dióxido de carbono) pelos microrganismos metanogênicos, a relação DBO/DQO é inferior a 0,1 e concentração de N-NH_3 no lixiviado aumenta (RENOU, 2008). A compilação das características físico-químicas do lixiviado bruto de aterro sanitário de diferentes países pode ser observada na Tabela 2, a seguir.



Tabela 2 – Características físico-químicas do lixiviado bruto de diferentes aterros sanitários.

País	Aterro Idade	pH	DQO	DBO	CE	SDT	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn	REF
IND	AC + AI Velho	6,9	27.200	19.000	24.500	27.958	2.675	545	1.590	0,06	0,29	0,93	1,54	0,41	2,21	(1)
POL	AC + AE Velho	8,6	1.821	701	-	6.823	364	-	-	0,13	0,08	0,09	1,84	0,07	0,43	(2)
IND	AC Velho	7,4	10.400	1.500	4.120	2.027	1.803	3.710	1.675	0,03	0,02	0,15	0,3	1,34	3,00	(3)
SWE	AC + AI Velho	7,6	560	12	687	-	180	298	148	2*10 ⁻⁴	8*10 ⁻³	1*10 ⁻³	3*10 ⁻³	2*10 ⁻²	4*10 ⁻²	(4)
CNH	AC + AI Média	7,9	2.483	164,6	23.753	9.463	-	1.910	991,5	<0,01	0,32	0,74	0,045	0,145	0,345	(5)
BRA	AC Velho	-	1.950	390	-	-	1.380	696	854	-	-	0,08	<0,05	-	0,22	(6)
EGY	AC Velho	8,2	8.250	3.400	59.400	26.612	3.745	-	-	-	-	-	-	-	-	(7)

Legenda: AS – aterro sanitário; AC – aterro convencional; AI – aterro de inertes; AE – aterro especial.

Fonte: Adaptado, (1) – (MOR *et al.*, 2006); (2) – (KULIKOWSKA; KLIMIUK, 2008); (3) – (NAVEEN *et al.*, 2017); (4) – (ÖMAN; JUNESTEDT, 2008); (5) – (FAN *et al.*, 2006); (6) – (MORAES; BERTAZZOLI, 2005); (7) - (RAGHAB; ABD EL MEQUID; HEGAZI, 2013).



3.3 Estação de Tratamento de Lixiviado (ETL)

3.3.1 Definições – ETL

Por definição, a ETL pode ser entendida como a integração de um conjunto de unidades de tratamento que têm como objetivo a instituição de barreiras sanitárias que impeçam ou diminuam a concentração de contaminantes no efluente final, contribuindo com a minimização de possíveis impactos no meio ambiente e na saúde pública (COSTA; ALFAIA; CAMPOS, 2019; WISZNIOWSKI *et al.*, 2006).

A necessidade de adequação das características físico-químicas e microbiológicas do lixiviado aos padrões de lançamento impulsionaram o desenvolvimento de novas tecnologias e alternativas de arranjos de tratamento. As unidades que compõem a ETL são selecionadas a partir das características do lixiviado em termos de carga poluidora (vazão x concentração) e dos objetivos que foram traçados em sua concepção (metas de eficiência de remoção) (RENOU *et al.*, 2008).

O tratamento de lixiviados pode ser dividida em 2 classes, sendo o tratamento convencional e o tratamento não convencional. O tratamento convencional é formado por 3 grupos, sendo: 1) transferência de lixiviado (recirculação de lixiviado para o maciço e tratamento combinado com esgotos domésticos), 2) tratamento biológico (processos de biodegradação aeróbia e anaeróbia) e 3) tratamento físico-químico (oxidação e precipitação química, adsorção, coagulação, floculação, flotação, sedimentação e arraste com ar). No que diz respeito ao tratamento não convencional, têm-se a utilização das membranas de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa como os principais métodos de remoção de contaminantes do lixiviados (LUO *et al.*, 2020; RENOU *et al.*, 2008; WISZNIOWSKI *et al.*, 2006).

3.3.2 Principais Arranjos de Tratamento de Lixiviado

As combinações entre unidades de tratamento são diversas, podendo-se obter em um mesmo arranjo a presença de unidades de tratamento convencionais (recirculação de lixiviados, tratamento biológico e tratamento físico-químico) e não



convencionais (tratamento por membranas). A disposição das unidades deverá ser escolhida levando-se em consideração fatores como: custos de aquisição e operação, carga afluyente, complexidade de operação, atendimento aos padrões de lançamento de efluentes e as metas de eficiência definidas na etapa de concepção do projeto (COSTA; ALFAIA; CAMPOS, 2019; RENO *et al.*, 2008).

Os principais arranjos de alternativas de tratamento de lixiviado podem ser observados no Quadro 2, a seguir.

Quadro 2 – Principais arranjos de unidades de tratamento convencionais e não convencionais.

Método	Configuração	Referência
Convencional + Não Convencional	TA + LA + DS + FA + UF + OR	(JIA <i>et al.</i> , 2022)
Não Convencional	OR	(ZHU <i>et al.</i> , 2022)
Convencional	LA	(BAUMGARTEN; SEYFRIED, 1996)
Convencional + Não Convencional	UASB + RSB + MFC + OR	(WU <i>et al.</i> , 2010)
Convencional + Não Convencional	TB + UF + OR	(ZHOU <i>et al.</i> , 2016)
Convencional	WLC	(VYMAZAL, 2009)
Convencional + Não Convencional	OR + AS	(LABIADH <i>et al.</i> , 2016)
Convencional + Não Convencional	BRM + UF + OR	(WANG <i>et al.</i> , 2016)

Legenda: TA – Tanque Anóxico; LA – Lodos Ativados; DS – Decantador Secundário; FA – Filtro de Areia; UF – Ultrafiltração; OR – Osmose Reversa; AS – *Air Stripping*; BRM – Biorreator de Membrana; RSB – Reator Sequencial de Batelada; MFC – Microfiltração Contínua; TFQ – Tratamento Físico-Químico; DP – Decantador Primário; TB – Tratamento Biológico; NF – Nanofiltração; UASB – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente; WLC – *Wetlands* Construído.

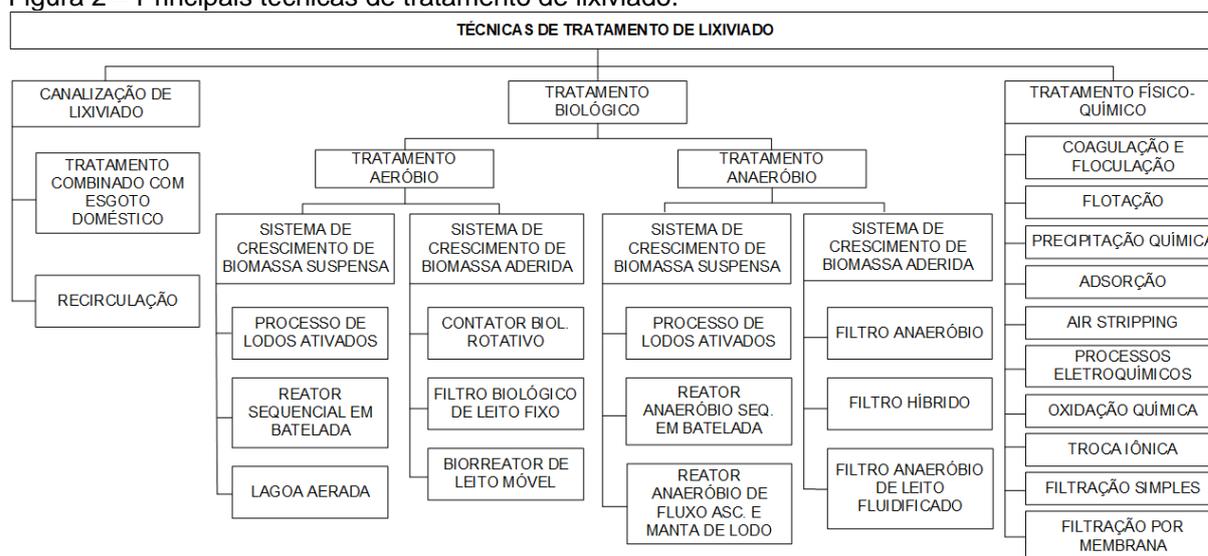
Observando-se o Quadro 2, nota-se que os estudos mais recentes apresentaram no arranjo de suas estações a combinação de unidades de tratamento convencionais com unidades não convencionais, ou mesmo a atuação de apenas unidades não convencionais como a osmose reversa.

Além disso, estes arranjos possuem em sua estrutura etapas de tratamento de lixiviado em diferentes níveis como o secundário no tratamento biológico e o terciário



no tratamento por membranas. As principais técnicas utilizadas no tratamento de lixiviado de RSU pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Principais técnicas de tratamento de lixiviado.



Fonte: (KAMARUDDIN *et al.*, 2017).

As técnicas de tratamento de lixiviado de RSU observadas na Figura 2 possuem aspectos positivos e negativos quanto à sua operação, implantação e manutenção, dessa forma, o arranjo mais adequado para o tratamento de lixiviado será aquele que possui unidades que se complementam, minimizando os pontos negativos existentes e tornando factível a sua implementação (COSTA; ALFAIA; CAMPOS, 2019; RENO *et al.*, 2008; WISZNIOWSKI *et al.*, 2006).

As principais técnicas de tratamento de lixiviado, bem como os aspectos positivos e negativos relacionados, podem ser observados no Quadro 3.



Quadro 3 – Aspectos positivos e negativos das técnicas de tratamento de lixiviado.

Tratamento	Aspectos Positivos	Aspectos Negativos
Recirculação	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo de implantação e operação; Melhoria na distribuição de nutrientes, enzimas e da umidade no interior do maciço de rejeitos; Redução no tempo necessário para a estabilização do lixiviado. 	<ul style="list-style-type: none"> Pode causar a acidificação do meio pela inserção de ácidos orgânicos ($\text{pH} < 5$) e a inibição da metanogênese e conseqüentemente a redução do potencial de reaproveitamento energético; e Pode ocorrer a saturação do meio quando se tem altas taxas de recirculação.
Tratamento Combinado E. Doméstico	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo de operação e manutenção; Baixa necessidade de adição de nutrientes (nitrogênio e fósforo) no tratamento. 	<ul style="list-style-type: none"> Pode reduzir a eficiência do tratamento em virtude dos metais pesados e dos componentes orgânicos inibitórios presentes no lixiviado; Reduz a biodegradabilidade do efluente.
Biorreator de Leito Móvel (MBBR)	<ul style="list-style-type: none"> Baixa sensibilidade à variação de carga e toxinas; Alta concentração de biomassa e boa performance na remoção de matéria orgânica e nitrogênio; e Menor tempo de sedimentação de lodo necessário. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto consumo de energia; Altos custos para a sua implementação; Operação qualificada necessária.
Lodos Ativados	<ul style="list-style-type: none"> Boa remoção de sólidos suspensos, DQO, DBO5 e nitrogênio; Lodo parcialmente estabilizado (varia em função do tempo de detenção celular). 	<ul style="list-style-type: none"> Altos custos para a sua implementação; Alto consumo de energia; Sensível à variação de carga; e Alta produção de lodo.
Reator UASB	<ul style="list-style-type: none"> Baixo consumo de energia e menor custo operacional. Menor tempo de detenção hidráulica necessário; Boa performance na remoção de matéria orgânica; e Menor produção de lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> Sensível a substâncias tóxicas (metais pesados, amônia em excesso, compostos orgânicos voláteis etc.) e variação do pH; A temperatura ($20^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$) influi diretamente em sua performance; e Baixa remoção de nitrogênio (N-NH_3).
Coagulação e Floculação	<ul style="list-style-type: none"> Apresenta bons resultados quando associado a outros tratamentos, sendo utilizado na etapa de pré-tratamento do lixiviado; e Boa performance o abatimento de carga orgânica. 	<ul style="list-style-type: none"> Altos custos com produtos químicos e elevada geração de lodo; Sensível à variação de pH; e Adição de mais um elemento químico no efluente (alumínio e ferro).
Osmose Reversa	<ul style="list-style-type: none"> Alta performance na remoção de DQO, DBO, metais pesados, entre outros poluentes; Sua implantação pode ser realizada em locais com pequenas áreas disponíveis; e Alto potencial na geração de água para reuso. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto custo de implantação e operação; Gera uma fração concentrada com alto potencial poluidor; Geralmente esta tecnologia necessita de uma etapa de pré-tratamento para aumentar a vida útil das membranas; e Necessidade de operação altamente qualificada.

Fonte: (KURNIAWAN *et al.*, 2010; LUO *et al.*, 2020; RENOU *et al.*, 2008; WISZNIOWSKI *et al.*, 2006).



3.3.3 Legislações e Padrão de Lançamento de Lixiviado Tratado

A regulamentação do lançamento de lixiviados assim como o seu tratamento são grandes desafios desta temática. A alta concentração de contaminantes presentes no lixiviado distingue este efluente das demais matrizes existentes e exige um nível de controle e parâmetros mais restritivos em seu lançamento (MUKHERJEE *et al.*, 2015).

No Brasil, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 430 de 13 de maio de 2011 é a responsável pela regulamentação do lançamento de efluentes, no entanto, esta norma considera que os valores limites de lançamento de esgoto sanitário são iguais aos padrões de lançamento de lixiviado, enquadrando de forma equivalente matrizes de natureza completamente distintas. No Pará, a Resolução CERH nº 10, de 03 de setembro de 2010 define como padrão de lançamento de lixiviado tratado os valores definidos pela Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, do CONAMA.

O lixiviado de RSU por ser um efluente de matriz complexa possui em sua composição uma variedade de poluentes que não estão listados na Resolução CONAMA 430/2011, podendo causar efeitos nocivos à saúde do homem e do meio ambiente quando mal gerenciados. Dentre estes poluentes podemos citar os fármacos, os microplásticos e as substâncias per e polifluoroalquil (PFAS) (EGGEN; MOEDER; ARUKWE, 2010; ÖMAN; JUNESTEDT, 2008).

O desenvolvimento de uma nova resolução específica para lixiviados de RSU no Estado do Pará para o atendimento das necessidades de lançamento de lixiviado tratado são de suma importância, principalmente em virtude das metas de encerramento de lixões e controle dos passivos ambientais gerados, definida pela Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 (política nacional de resíduos sólidos), bem como dos decretos que o regulamentam.



3.4 Conceito BIM

3.4.1 Modelagem de Informação da Construção (BIM)

O BIM pode ser entendido como uma tecnologia de modelagem e associação de um conjunto de processos para comunicar, produzir e analisar modelos de construção enfatizando os aspectos do processo. Além disso, os modelos BIM consideram rotinas de interações entre representações gráficas e regras paramétricas entre os objetos presentes no modelo, sincronizando qualquer tipo de modificação ou informação adicionada, eliminando a possibilidade de redundância de informações (SACKS *et al.*, 2018).

O sucesso da implantação do modelo BIM depende de sumariamente 3 fatores, que são eles: tecnologia, pessoas e processos. A tecnologia no contexto BIM envolve os elementos de infraestrutura para operação (*hardware*), internet, segurança, armazenamento de arquivos e o treinamento dos usuários.

A etapa de treinamento relaciona-se com o segundo fator que é o foco nas pessoas que irão executar as atividades, estas devem ter o conhecimento, a experiência e a capacidade necessária para atuação no modelo BIM de maneira harmônica com os demais participantes da equipe, seja interna ou externa.

O terceiro fator são os processos internos e interempresariais envolvidos em todo o plano de trabalho, que são eles: fluxo de trabalho, cronograma, organograma das funções, sistema de contratação de dados, especificação dos entregáveis, método de comunicação, arquivos e informações, o nível de detalhamento de em cada fase e a especificação do uso do modelo em todos os ciclos de vida da edificação. Estes fatores são interligados entre si por procedimentos normas e boas práticas, que definem as diretrizes de execução das atividades a serem realizadas (ABDI, 2017).

3.4.2 Principais Características do Modelo BIM

Os modelos de construção desenvolvidos por meio do conceito BIM reúnem uma combinação de informações e arquivos das diversas disciplinas envolvidas no



projeto, oferecendo uma visão completa da construção virtual por meio de sua interoperabilidade (NIBS, 2017).

Segundo Sacks *et al.* (2018), as principais características do modelo BIM são:

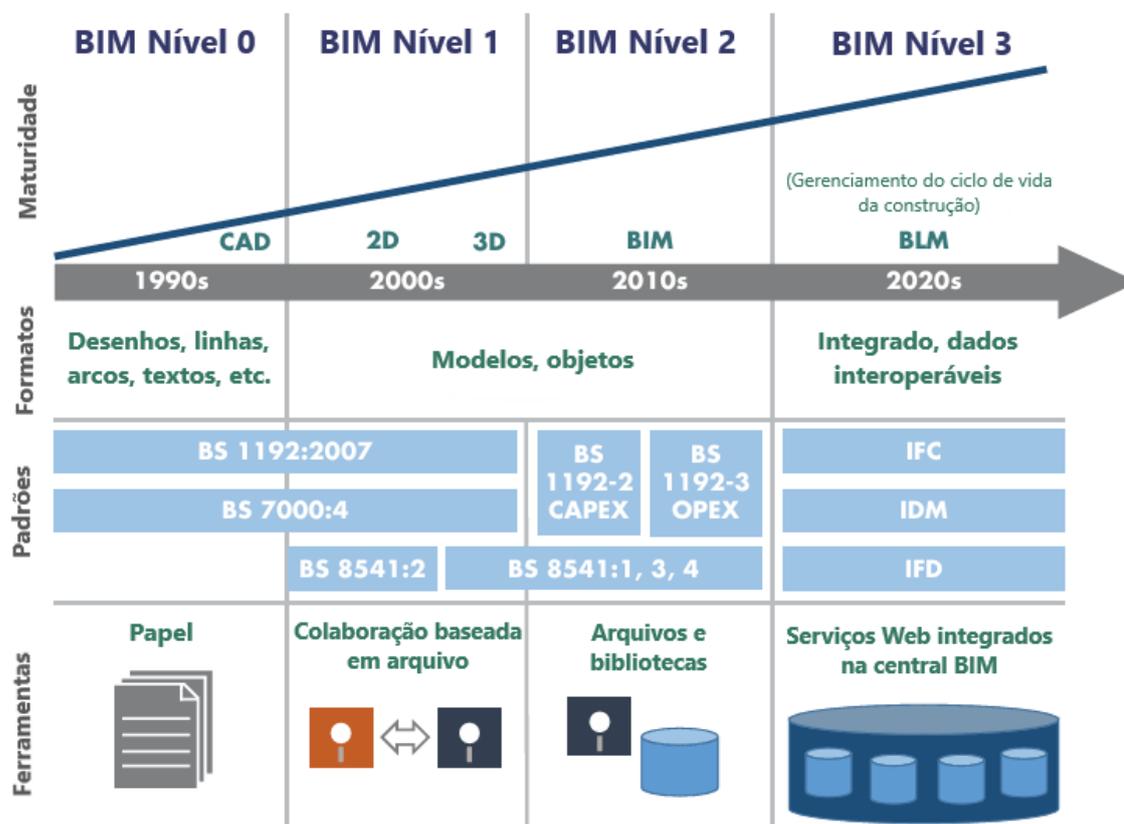
- Presença de componentes de construção representadas digitalmente, contendo atributos gráficos e de dados que são computados e identificados pelos *softwares*;
- Regras paramétricas que possibilitam a manipulação/modificação inteligente dos componentes de construção;
- Presença de informações que descrevem como as componentes da construção se comportam, fornecendo os dados que subsidiam processos como levantamento de quantidades, especificação técnica e análise energética; e
- Consistência, otimização e sincronização dos dados, evitando a redundância de informações e atualizando as modificações realizadas na componente em todas as vistas do projeto.

O BIM também pode ser caracterizado pelo seu nível de progressão de maturidade, que, por sua vez, evolui em função da aplicação da tecnologia de informação na construção, expressos em degraus de colaboração e em nível de sofisticação do uso das ferramentas individuais (NIBS, 2017).

A evolução da maturidade do BIM em função dos níveis de aplicação de suas ferramentas pode ser observada na Figura 3.



Figura 3 – Progressão do nível de maturidade do BIM em função dos anos.



Fonte: Adaptado, (SACKS *et al.*, 2018).

Observando-se a Figura 3, observa-se a evolução dos níveis de maturidade do BIM em função do tempo, dos formatos, padrões e ferramentas utilizadas na produção, comunicação e análise de modelos de construção.

No Brasil, segundo o mapeamento de maturidade BIM realizado pela Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 73,2% dos respondentes encontram-se na região sul e sudeste do país, além disso, 58% das organizações consultadas se autoavaliaram em níveis iniciais de maturidade, estando entre o nível 0 e 1, em que a informação é, basicamente, produzida com desenhos CAD 2D e 3D, os arquivos de projetos são compartilhados digitalmente e não há um modelo unificado para o gerenciamento de informações (ABDI, 2022).

As características dos níveis da metodologia BIM em um projeto variam de 0 a 3 e podem ser observadas no Quadro 4.



Quadro 4 – Evolução da maturidade do BIM em função dos níveis.

Maturidade BIM	Descrição
Nível 0	Este nível é caracterizado pela utilização do <i>CAD (Computer Aided Design)</i> de maneira não gerenciada, geralmente apenas em 2D com compartilhamento das peças gráficas por meio físico (papel) ou digital (PDF), com informações segmentadas.
Nível 1	Este nível é caracterizado pela mistura entre <i>CAD 3D</i> para etapa de concepção de projeto e <i>CAD 2D</i> para emissão de documentos técnicos para aprovação legal. O compartilhamento das informações é realizado por meio de um ambiente de dados comum, gerenciado na maioria das vezes pelo contratante. Os modelos BIM não são compartilhados entre os membros do projeto.
Nível 2	Neste nível, todos os envolvidos utilizam seus próprios modelos 3D de forma singular não estando ainda integrados em um único modelo compartilhado. A diferença deste nível para os demais é o início do trabalho colaborativo, onde o compartilhamento das informações de projeto é realizado por meio de formato de arquivo comum que permite a organização e a combinação das informações de forma a gerar um modelo BIM federado. Entretanto
Nível 3	Este nível é denominado de “ <i>Open BIM</i> ” e é caracterizado pela plena colaboração entre as disciplinas de projeto envolvidas, utilizando um único modelo de projeto compartilhado centralizado em um repositório (geralmente um banco de armazenamento em nuvem). Todos os colaboradores podem modificar o mesmo modelo evitando o risco de conflito de informações.

Fonte: Adaptado, (SACKS *et al.*, 2018)

3.4.3 Nível de Desenvolvimento do Modelo BIM

O modelo BIM é constituído por elementos e componentes de diferentes níveis de desenvolvimento (ND), sendo divididos em 6 níveis, que são eles: ND 100, ND 200, ND 300, ND 350, ND 400, ND 500, onde cada nível possui uma quantidade diferente de informação (ABDI, 2017).

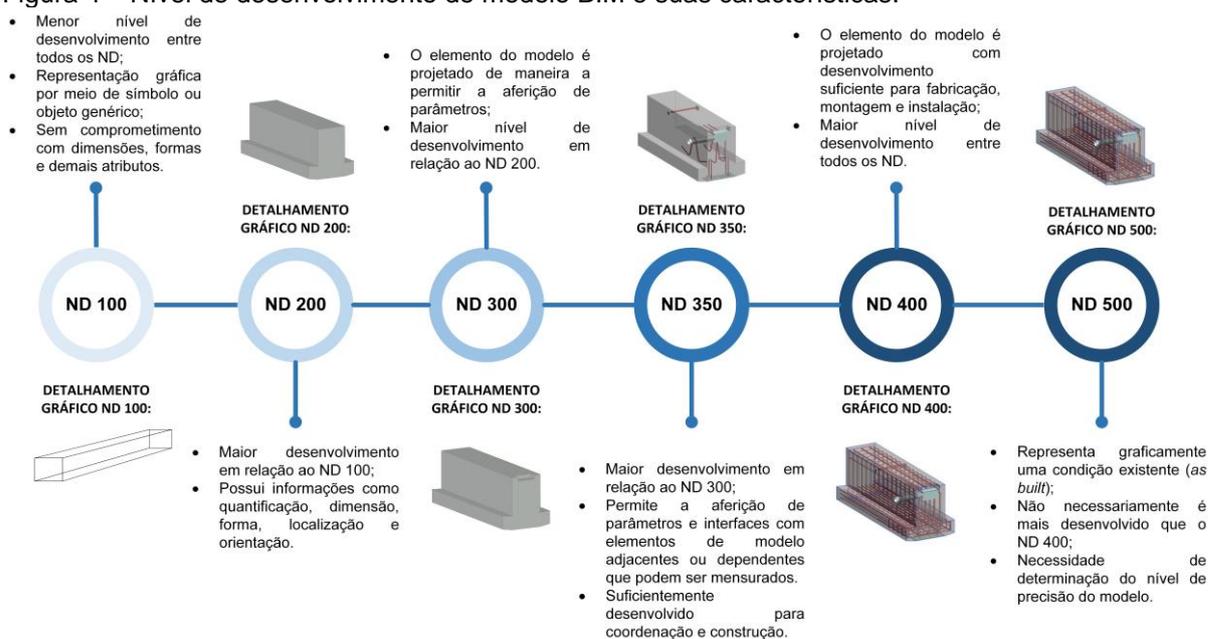
O nível de desenvolvimento (ND) 100 é caracterizado pela menor quantidade de informação, podendo ser representado graficamente no modelo por um símbolo ou representação genérica sem comprometimento com dimensões, forma e demais atributos. O ND 200 já possui um maior desenvolvimento das informações em comparação o ND 100, representando graficamente os elementos presentes no modelo com quantificação, dimensão, forma, localização e orientação. No nível de desenvolvimento 300, o modelo de construção é projetado de forma que seja possível realizar a aferição de parâmetros como quantidade, tamanho, forma localização e orientação (ABDI, 2017).



O ND 350 o modelo de construção é projetado de forma que seja possível realizar a aferição de parâmetros como quantidade, tamanho, forma localização e orientação e interfaces com elementos de modelo adjacentes ou dependentes que podem ser mensurados. Este nível define os requisitos para que os elementos do modelo sejam suficientemente desenvolvidos para atendimento à construção e coordenação. No ND 400 o elemento do modelo é projetado e desenvolvido suficientemente para fabricação, montagem e instalação (AIA, 2023).

No nível de desenvolvimento 500, o elemento do modelo representa graficamente uma condição existente (*as built*) desenvolvida por meio da observação, verificação em campo e interpolação, no entanto, este nível não é considerado como superior ao ND 400, indicando apenas que o elemento do modelo foi gerado a partir de uma construção já existente, diferentemente do ND 400 que indica o projeto de algo que ainda será construído. Outro requisito do ND 500 é a necessidade da determinação do nível de precisão do modelo, que, por sua vez, deve ser anotado ou anexado neste (AIA, 2023). O resumo das características dos níveis de desenvolvimento, bem como a exemplificação gráfica de detalhamento de cada etapa, pode ser observado na Figura 4, a seguir.

Figura 4 – Nível de desenvolvimento do modelo BIM e suas características.



Fonte: Adaptado, (AIA, 2023).



3.5 Diretrizes de Projeto e o Conceito BIM

As principais definições de projeto conceitual/anteprojeto, projeto básico e projeto executivo, os itens obrigatórios de cada etapa de projeto aliado ao nível de desenvolvimento do modelo BIM serão apresentados nos tópicos a seguir.

3.5.1 Projeto Conceitual

O projeto conceitual também conhecido como anteprojeto, é definido como a etapa inicial de concepção da construção, portando os todos os itens necessários para subsidiar à elaboração do projeto básico. O anteprojeto é fomentado a partir de um estudo técnico preliminar e deve apresentar em seu conteúdo elementos como: a justificativa técnica de condições de solidez, durabilidade, segurança, atendimento à necessidade, motivação técnico-econômico-social, entre outros itens definidos pela Lei nº 14.133 de, de 1º de abril de 2021 (BRASIL, 2021). O Quadro 5 apresenta os itens mínimos obrigatórios de um projeto conceitual e o ND do modelo BIM deste.

Quadro 5 – Elementos obrigatórios para elaboração de projeto conceitual/anteprojeto e o nível de desenvolvimento do modelo BIM desta etapa.

PROJETO CONCEITUAL	
Itens obrigatórios	ND Modelo BIM
<ul style="list-style-type: none"> • Demonstração e justificativa do programa de necessidades, avaliação de demanda do público-alvo, motivação técnico-econômico-social do empreendimento, visão global dos investimentos e definições relacionadas ao nível de serviço desejado; • Condições de solidez, de segurança e de durabilidade; • Prazo de entrega; • Estética do projeto arquitetônico, traçado geométrico e/ou projeto da área de influência, quando cabível; • Parâmetros de adequação, de economia na utilização, de facilidade na execução, de impacto ambiental e de acessibilidade; • Proposta de concepção da obra ou do serviço de engenharia; • Projetos anteriores ou estudos preliminares que embasaram a concepção proposta; • Levantamento topográfico e cadastral; • Pareceres de sondagem; • Memorial descritivo dos elementos da edificação, dos componentes construtivos e dos materiais de construção. 	<p>ND 200: contempla informações gerais como quantificação, dimensão, forma, localização e orientação.</p>

Fonte: Adaptado, (BRASIL, 2021); (ABDI, 2017).



O nível de desenvolvimento (ND) do modelo BIM em um projeto conceitual geralmente alcança o ND 200, neste nível os elementos presentes no modelo já possuem informações que possibilitam a análise geral da construção, a extração de quantitativos preliminares como a área de construção (paredes, pisos e coberturas), volume das estruturas e a contagem de portas janelas e demais componentes (ABDI, 2017).

3.5.2 Projeto Básico

O projeto básico é constituído por um conjunto de elementos munidos de informações suficientes e com precisão adequada para a definição e o dimensionamento de determinada obra ou serviço, sendo elaborado com base nas informações levantadas na etapa de anteprojeto, adequando o nível de detalhamento e desenvolvimento destas para garantir a viabilidade técnica, econômica e ambiental de sua execução (BRASIL, 2021). Os requisitos mínimos para a elaboração do projeto básico e o ND do modelo BIM podem ser observados no Quadro 6.

Quadro 6 – Elementos obrigatórios para elaboração de projeto básico e o nível de desenvolvimento do modelo BIM desta etapa.

PROJETO BÁSICO	
Itens obrigatórios	ND Modelo BIM
<ul style="list-style-type: none"> Levantamentos topográficos e cadastrais, sondagens e ensaios geotécnicos, ensaios e análises laboratoriais, estudos socioambientais e demais dados e levantamentos necessários para execução da solução escolhida; Soluções técnicas globais e localizadas, suficientemente detalhadas, de forma a evitar a necessidade de reformulações ou variantes quanto à qualidade, ao preço e ao prazo inicialmente definidos; Identificação dos tipos de serviços a executar e dos materiais e equipamentos a incorporar à obra, bem como das suas especificações, de modo a assegurar os melhores resultados para o empreendimento e a segurança executiva na utilização do objeto, para os fins a que se destina, considerados os riscos e os perigos identificáveis, sem frustrar o caráter competitivo para a sua execução; Informações que possibilitem o estudo e a definição de métodos construtivos, de instalações provisórias e de condições organizacionais para a obra, sem frustrar o caráter competitivo para a sua execução; subsídios para montagem do plano de licitação e gestão da obra, compreendidos a sua programação, a estratégia de suprimentos, as normas de fiscalização e outros dados necessários em cada caso; Orçamento detalhado do custo global da obra, fundamentado em quantitativos de serviços e fornecimentos propriamente avaliados. 	<p>ND 300 a 350: o modelo é projetado de maneira a permitir a aferição de parâmetros e elementos, possibilitando a coordenação da construção.</p>

Fonte: Adaptado, (BRASIL, 2021); (ABDI, 2017).



3.5.3 Projeto Executivo

O projeto executivo é definido como o conjunto de elementos necessários e suficientes para a plena execução da obra, subsidiado pelas informações levantadas no projeto básico. Além disto, o projeto executivo deverá conter a identificação de serviços, materiais e equipamentos que serão incorporados à obra, bem como suas respectivas especificações técnicas (BRASIL, 2021).

O nível de desenvolvimento do modelo BIM no projeto executivo alcança o ND 400, sendo suficientemente desenvolvido com informações e detalhes que possibilitam a fabricação, montagem e a construção da obra. Em todas as etapas do projeto, seja anteprojeto, projeto básico ou executivo, é possível encontrar uma mistura de elementos com diferentes níveis de desenvolvimento no modelo BIM, sendo comum a presença de elementos ND 200 a ND 350 dentro de um modelo ND 400. Portanto, o ND do modelo ao qual se associa cada etapa de projeto diz respeito ao máximo de desenvolvimento do modelo naquela etapa de projeto (ABDI, 2017).



4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Revisão Bibliométrica de Fundamentação do Estudo

A seleção das bases de periódicos foi realizada seguindo o critério de abrangência, compatibilidade com a área de estudo (engenharia), ferramentas de organização (filtros), ferramenta de exportação de dados e índices de confiabilidade das bases. As bases escolhidas para a obtenção dos dados foram o *Scopus* e o *Web of Science*, os indicadores destas bases podem ser observados na Tabela 3, a seguir:

Tabela 3 – Indicadores das bases de periódicos utilizados.

Indicadores	Web of Science	Scopus
Revistas indexadas	21.762	45.189
Nº de revistas (engenharia/ciências)	3.585	13.315
Nº de títulos ativos (engenharia/ciências)	9.298	802.107
Métricas de autores, revistas e títulos	Sim	Sim
Critério de seleção para indexar na base	Sim	Sim
Ferramentas de organização e filtros	Sim	Sim
Ferramenta de exportação de dados	Sim	Sim

Fonte: (Scopus, 2024); (Web of Science, 2024).

As bases de periódicos Web of Science e Scopus são as que possuem maior acervo e melhores indicadores de confiabilidade, abrangendo uma grande quantidade de revistas indexadas e títulos relacionados à área da engenharia. Observando-se a Tabela 3, nota-se que os números da base de periódicos Scopus é superior quando comparado ao Web of Science (WOS), entretanto, alguns artigos de grande impacto são exclusivos desta base, dessa forma, considerou-se no presente trabalho estas duas bases para a elaboração da revisão bibliométrica de fundamentação do estudo.

4.1.1 Método Utilizado para Filtrar as Informações da Análise Bibliométrica

O método utilizado para filtrar as informações nas bases de periódicos Scopus e Web of Science consistiu primeiramente na definição das palavras-chave, seguido pelos filtros de tipo de documento (artigos e artigo de revisões) e filtro de ano de



publicação (2004 a 2024). Os procedimentos realizados na seleção das informações nas bases *Scopus* e *Web of Science* podem ser observados nos tópicos a seguir.

Para a base de periódicos *Scopus*, seguiu-se os seguintes passos:

- *Scopus* – Buscadores: Article Title, Abstract, Keywords;
- *Scopus* – Palavras-Chave: “*landfill AND leachate*”, “*leachate AND treatment*”, “*municipal AND leachate*”;
- Número de resultados inicial (n_0): 3.124 documentos encontrados;
- Filtro-01: artigos e artigo de revisões
- Número de resultados após filtro-01 (n_1): 2.551 documentos encontrados;
- Filtro-02: publicados entre 2004 e 2024;
- Número de resultados após filtro-02 (n_2): 2.276 documentos encontrados;

Para a base de periódicos *Web of Science*, seguiu-se o seguinte procedimento:

- *Web of Science* – Buscadores: *Topics* (equivalente ao “*Article Title, Abstract, Keywords*” do *Scopus*);
- *Web of Science* – Palavras-Chave: “*landfill AND leachate*”, “*leachate AND treatment*”, “*municipal AND leachate*”;
- Número de resultados inicial (n_0): 1.700 documentos encontrados;
- Filtro-01: artigos e revisões
- Número de resultados após filtro-01 (n_1): 1.588 documentos encontrados;
- Filtro-02: publicados entre 2004 e 2024;
- Número de resultados após filtro-02 (n_2): 1.459 documentos encontrados;

4.1.2 Tratamento das Informações no Rstudio

O tratamento das informações coletadas nas bases *Web of Science* e *Scopus* foi realizado por meio do *Software RStudio* e análise bibliométrica dos dados foi executada pelo pacote *Biliometrix* e *Biblioshiny*. As etapas constituintes do tratamento de dados são:



- Etapa 01: inicialmente foi realizada a limpeza da memória do RStudio utilizando o comando `rm(list=ls(all=TRUE))`;
- Etapa 02: com a memória devidamente limpa, instalou-se os pacotes de tratamento de dados do RStudio através dos comandos `install.packages("tidyverse")` e `install.packages("bibliometrix")`;
- Etapa 03: os pacotes foram ativados utilizando os comandos `library(bibliometrix)` e `library(tidyverse)`;
- Etapa 04: para realização do tratamento de dados, deve-se indicar o caminho do diretório dos arquivos baixados no Scopus e Web os Science com os comandos `setwd("C:/R_PROJ")`, `getwd()` e `dir()`;
- Etapa 05: a importação e organização dos dados baixados no Scopus em *dataframe* foi realizada por meio do comando `SCP <- convert2df(file = "scopus.csv", dbsource = "scopus", format = "csv")`;
- Etapa 06: a importação e organização dos dados baixados no Web of Science em *dataframe* foi realizada por meio do comando `WOS1 <- convert2df(file = "WOS1.txt", dbsource = "wos", format = "plaintext")`. Como o *Web of Science* possui uma limitação de 1.000 arquivos por vez, este procedimento foi realizado de forma análoga para o arquivo WOS2.txt;
- Etapa 07: após a criação dos *dataframes* das bases *Scopus* e *Web of Science*, realizou-se a união destes e a remoção dos arquivos duplicados por meio do comando `U <- mergeDbSources(WOS1, WOS2, SCP, remove.duplicated = TRUE)`. Após a união das bases e remoção dos arquivos duplicados (852 arquivos duplicados), obteve-se um $n_3 = 2.883$ documentos;
- Etapa 08: realizada a união das bases e a remoção dos arquivos repetidos, o documento foi salvo no formato "rds" por meio do comando `saveRDS(U, file = "dadosbibliometricos_LT.rds")`;
- Etapa 09: tendo o arquivo "dadosbibliometricos_LT.rds" em mãos, executa-se os comandos `biblioshiny()`, `library(dplyr)`, `library(ggplot2)` para ativação da interface "*Biblioshiny*", sendo redirecionado via *browser* (*Google Chrome* ou *Firefox*) para a página nativa da interface;
- Etapa 10: ativada a interface, foi realizado o upload do arquivo "dadosbibliometricos_LT.rds" e iniciada a análise bibliométrica. As principais análises



realizadas foram: palavras mais frequentemente utilizadas, documentos mais citados, correlação entre as palavras-chave, revistas mais relevantes sobre o tema e produção científica anual. O resumo das etapas de tratamento de dados no *RStudio* pode ser observado no Quadro 7, a seguir:

Quadro 7 – Quadro resumo das etapas de tratamento de dados no *RStudio* para análise bibliométrica.

Etapa	Descrição	Comando <i>RStudio</i>
01	Limpeza da memória do <i>RStudio</i>	<code>rm(list=ls(all=TRUE))</code>
02	Instalação dos pacotes de tratamento de dados	<code>install.packages("tidyverse")</code>
		<code>install.packages("bibliometrix")</code>
03	Ativação dos pacotes	<code>library(bibliometrix)</code>
		<code>library(tidyverse)</code>
04	Indicação do caminho do diretório dos arquivos baixados no <i>Scopus</i> e <i>Web of Science</i>	<code>setwd("C:/R_PROJ")</code>
		<code>getwd()</code>
		<code>dir()</code>
05	Importação e organização das informações do <i>Scopus</i> em <i>dataframes</i> no <i>RStudio</i>	<code>SCP <- convert2df(file = "scopus.csv", dbsource = "scopus", format = "csv")</code>
06	Importação e organização das informações do <i>Web of Science</i> em <i>dataframes</i> no <i>RStudio</i>	<code>WOS1 <- convert2df(file = "Wos1.txt", dbsource = "wos", format = "plaintext")</code>
07	Unificação das informações das bases em um único <i>dataframe</i> e remoção dos documentos duplicados	<code>U <- mergeDbSources(WOS1, WOS2, WOS3, WOS4, WOS5, WOS6, SCP, remove.duplicated = TRUE)</code>
08	Salvar o documento no formato "rds"	<code>saveRDS(U, file = "dadosbibliometricos_LT.rds")</code>
09	Ativação da interface online <i>Biblioshiny</i>	<code>biblioshiny()</code>
		<code>library(dplyr)</code>
		<code>library(ggplot2)</code>
10	Upload do arquivo "dadosbibliometricos_LT.rds" e início da análise bibliométrica e geração de gráficos no <i>Biblioshiny</i> .	

Fonte: Autor, 2024.

Finalizada a etapa de organização dos dados, os 100 artigos mais citados no período de 2004 e 2024 foram selecionados para verificação de aderência com o tema (tratamento de lixiviado e lixiviado de aterro sanitário), resultando em um n4= 45 documentos, que por sua vez, irão compor o referencial teórico do presente estudo. Outras referências como resoluções, portarias, leis e decretos foram considerados,



além de outros autores relacionados com o tema para complementação do referencial teórico.

4.2 Descrição do Empreendimento

No presente tópico serão apresentadas as principais características da estação de tratamento de lixo que será implantada no Centro de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do consórcio intermunicipal formado pelos municípios de Castanhal, Inhangapi, Santa Isabel do Pará, Santa Maria do Pará e São Francisco do Pará (CONCISSS).

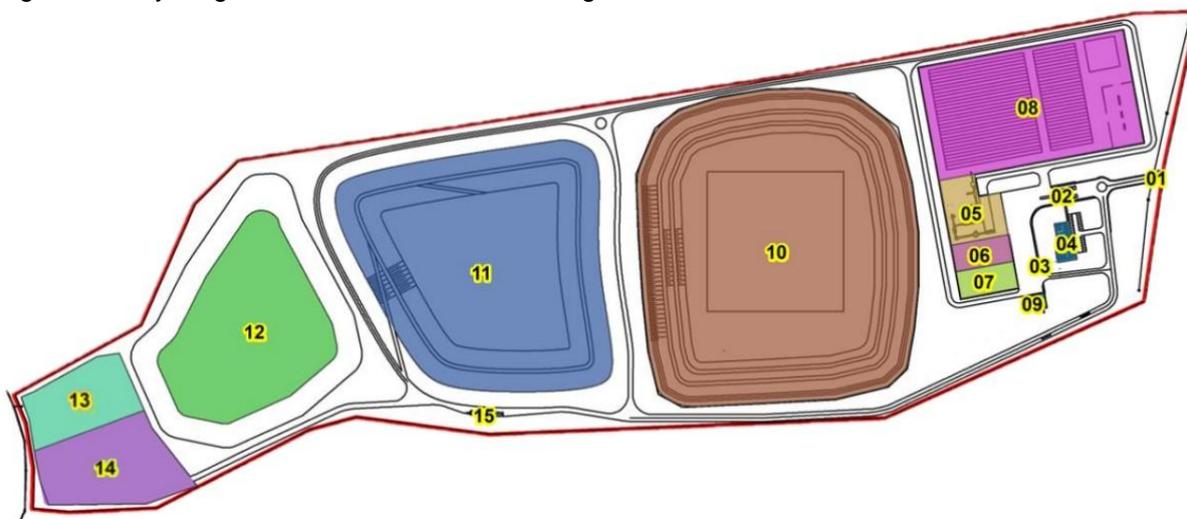
4.2.1 Localização do Empreendimento

O empreendimento está localizado no município de Castanhal, no estado do Pará, entre as coordenadas geográficas 1°19'59,79" S e 47°57'32,20" W e está inserida na sub-bacia do Igarapé Apeú. O CGIRS será construído sobre o lixão do município de Castanhal, tendo a etapa de encerramento do lixão existente no escopo de implantação do novo empreendimento. O acesso é feito a partir da cidade de Castanhal, pela Rodovia BR-316, e posteriormente acessando o Ramal da Boa Vista até chegar ao empreendimento.

O CGIRS conta com uma infraestrutura composta pelas unidades de: portaria, portaria com balança, posto de combustível, administrativo, tratamento mecanizado biológico (TMB), unidade de combustíveis derivados de resíduos (CDR), unidade de triagem, pavilhão de compostagem, oficina mecânica, célula de confinamento, célula de rejeitos, célula de resíduos da construção e demolição civil (RDC), pátio de RDC, estação de tratamento de lixiviados (ETL). A localização das unidades que compõem o CGIRS do CONCISSS pode ser observada na Figura 5.



Figura 5 – Layout geral do Centro de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do CONCISSS.



Legenda: (1) portaria, (2) portaria com balança, (3) posto de combustível, (4) administrativo, (5) TMB, (6) usina de combustíveis derivados de resíduos (CDR), (7) unidade de triagem, (8) pavilhão de compostagem, (9) oficina mecânica, (10) célula de confinamento, (11) célula de rejeitos, (12) célula de resíduos da demolição e construção civil (RDC), (13) pátio de resíduos da demolição e construção civil (RDC), (14) estação de tratamento de lixiviados (ETL), (15) Lava rodas.

O centro tecnológico de tratamento dos resíduos compreende as unidades de Tratamento Mecanizado Biológico (TMB), Usina de Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR), unidade de triagem e unidade de compostagem de revolvimento, descritos pelos números 5, 6, 7 e 8 como pode ser observado na Figura 5.

O TMB é a unidade responsável pelo pré-tratamento dos RSU, separando-os em 3 frações, sendo os orgânicos, os recicláveis secos e o refugo, tendo a sua destinação a saber:

- Fração orgânica: será destinada para o galpão de compostagem, onde ficará por 60 dias (30 dias de degradação ativa + 30 dias de maturação) para a geração do composto orgânico. Em virtude da separação da fração orgânica do resíduo, há um notável abatimento da carga orgânica no lixiviado da célula de rejeitos;
- Recicláveis secos: passarão para a unidade de triagem para a separação do resíduo em papel (papelão e papel cartão), plástico (PET, PEAD, PP), embalagens tetrapak e metais (ferro magnéticos e alumínio), sendo posteriormente destinados à comercialização;



➤ Refugo: representa a porção dos resíduos não aproveitáveis dos recicláveis, sendo destinados para a usina de CDR onde serão separados, triturados e prensados na forma de fardos ou briquetes para sua comercialização.

Os rejeitos gerados em cada etapa supracitada serão destinados à célula de rejeitos, localizada na área 11. O lixiviado gerado nas áreas 11, 10 e 12 serão destinados à ETL, representado pela numeração 14 na Figura 5.

4.2.2 Características Gerais da Estação de tratamento de lixiviados (ETL)

A ETL do CGIRS do consórcio do CONCISSS será responsável pelo tratamento do lixiviado gerado nas células de rejeito, célula de confinamento, célula de RDC e do esgoto sanitário gerado no CGIRS. Ao final do projeto, a ETL contará com área construída de 4.258 m² e área total de 5.395 m², com vazão mínima, média e máxima de tratamento igual a 143,54 m³/d, 263,71 m³/d e 500 m³/d, respectivamente.

A estação de tratamento de lixiviado é composta pela combinação de métodos convencionais (tratamento físico-químico) e não convencionais (osmose reversa) de tratamento. O tratamento físico-químico é composta pelas unidades de torre de arraste, mistura rápida, mistura lenta, coagulação, floculação, decantação, condicionamento de lodo, desaguamento de lodo via leito de secagem e desaguamento de lodo mecanizado via decanter centrífugo. O tratamento via osmose reversa é composto por 2 unidades de osmose reversa com capacidade nominal de 250 m³/d, totalizando capacidade máxima da estação de 500 m³/d de lixiviado.

Grande parte do efluente tratado (permeado da osmose reversa) será destinado para reuso dentro do CGIRS do CONCISSS para fins não potáveis (lavagem de pisos, máquinas pesadas, umectação de vias, entre outros) e a fração restante será lançada em corpo receptor.

A fração sólida gerada nos decantadores e o concentrado da osmose reversa serão submetidos ao processo de condicionamento e posteriormente ao desaguamento. A torta de lodo gerada será encaminhada para as células de rejeitos para aterramento e o líquido retornará para o tratamento físico-químico.



4.3 Etapas da ETL do CGIRS do Consórcio CONCISSS

A estação de tratamento de lixiviados do CGIRS do consórcio CONCISSS foi dividida em 2 etapas, sendo a primeira etapa referente ao cenário baixa carga (início de projeto) e a segunda etapa correspondente ao cenário alta carga (projeto pleno/final de projeto). A descrição das condições e dos parâmetros adotados em cada etapa podem ser observados nos tópicos a seguir.

4.3.1 Cenário de Baixa Carga

O cenário de baixa carga corresponde ao início da operacionalização do CGIRS, com o encerramento do lixão existente (célula de confinamento) e o começo do recebimento dos resíduos na célula de rejeitos.

Nesta etapa a vazão e a concentração do lixiviado são as menores em função dos seguintes fatores:

- a) O volume de deposição de resíduos de início de projeto na célula de rejeitos é menor;
- b) Somente a primeira etapa da frente de serviço da célula de rejeitos estará ativa;
- c) Haverá a utilização de cobertura temporária (lonas de PEBD) nas frentes de serviço para minimização de geração de lixiviados pela ação das chuvas;
- d) A unidade de tratamento mecanizado biológico (TMB) separa a fração orgânica presente nos resíduos (etapa de triagem), restando apenas o rejeito para deposição na célula;
- e) A composição dos resíduos do lixão existente (célula de confinamento) se encontra em grande parte na forma de cinzas em função da ação dos catadores locais que ateavam fogo nos resíduos para diminuição de seu volume, dessa forma, o lixiviado gerado na célula de confinamento representa uma pequena parcela da carga orgânica afluyente à ETL.

Em virtude da menor carga orgânica afluyente à ETL, o arranjo das unidades de tratamento do cenário baixa carga é mais simplificado, sendo: caixa de divisão e distribuição de vazão (CDDV), tanque de equalização de lixiviado bruto (TQELB),

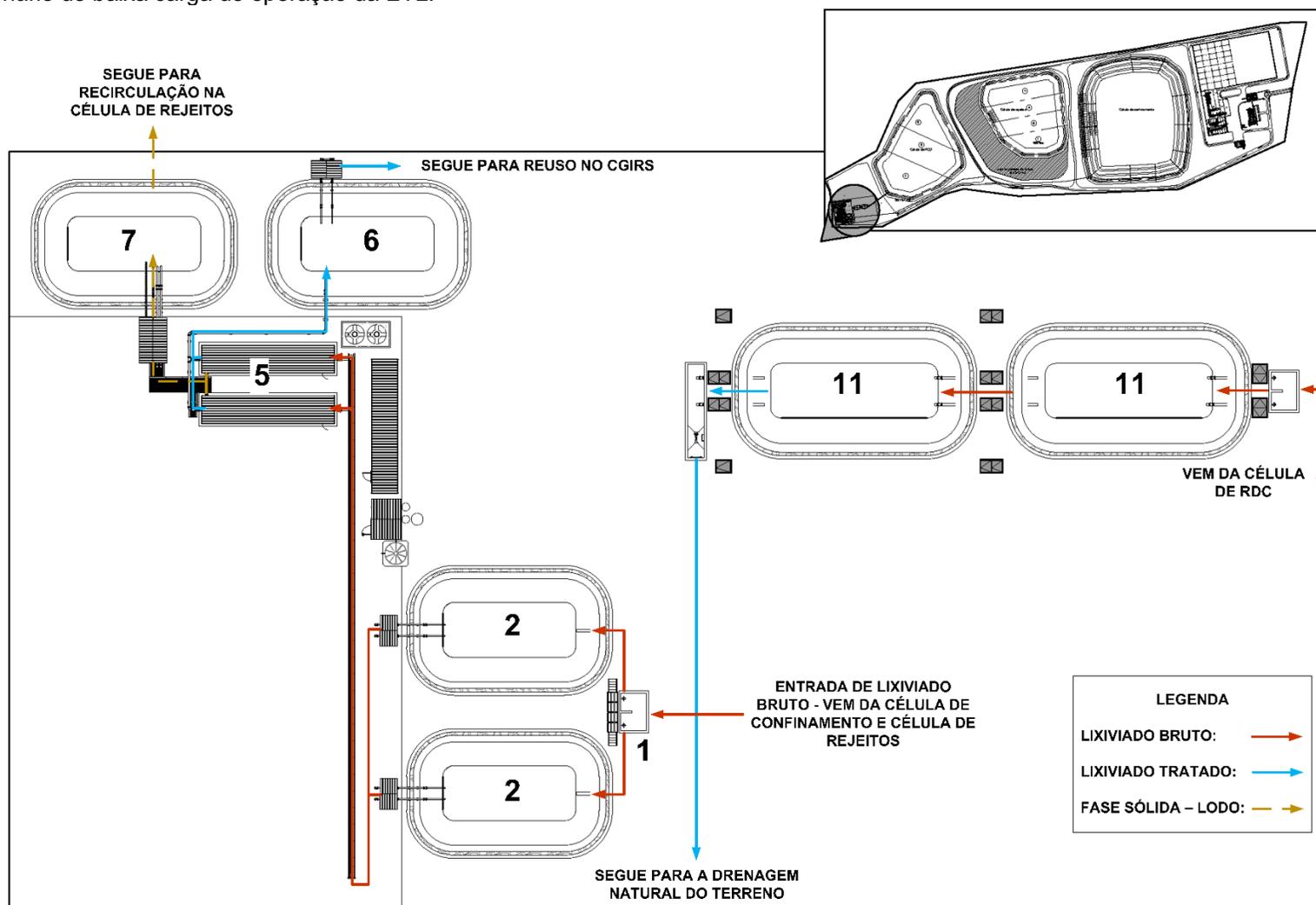


tratamento por membrana de osmose reversa (OR), tanque de equalização de permeado (TQEP), tanque de equalização do concentrado (TQEC) e tanque de sedimentação horizontal (TSH).

O fluxograma da ETL no cenário baixa carga, bem como a disposição das unidades de tratamento que a constituem podem ser observadas na Figura 6.



Figura 6 – Cenário de baixa carga de operação da ETL.



Legenda: 1) CDDV; 2) TQELB; 5) OR; 6) TQEP; 7) TQEC; 11) TSH.



4.3.2 Cenário de Alta Carga

O cenário de alta carga representa a etapa de operação com a capacidade plena do CGIRS, recebendo 100% dos resíduos gerados nos municípios que compõem o consórcio CONCISS.

Nesta etapa a vazão e a concentração do lixiviado são as maiores em função dos seguintes fatores:

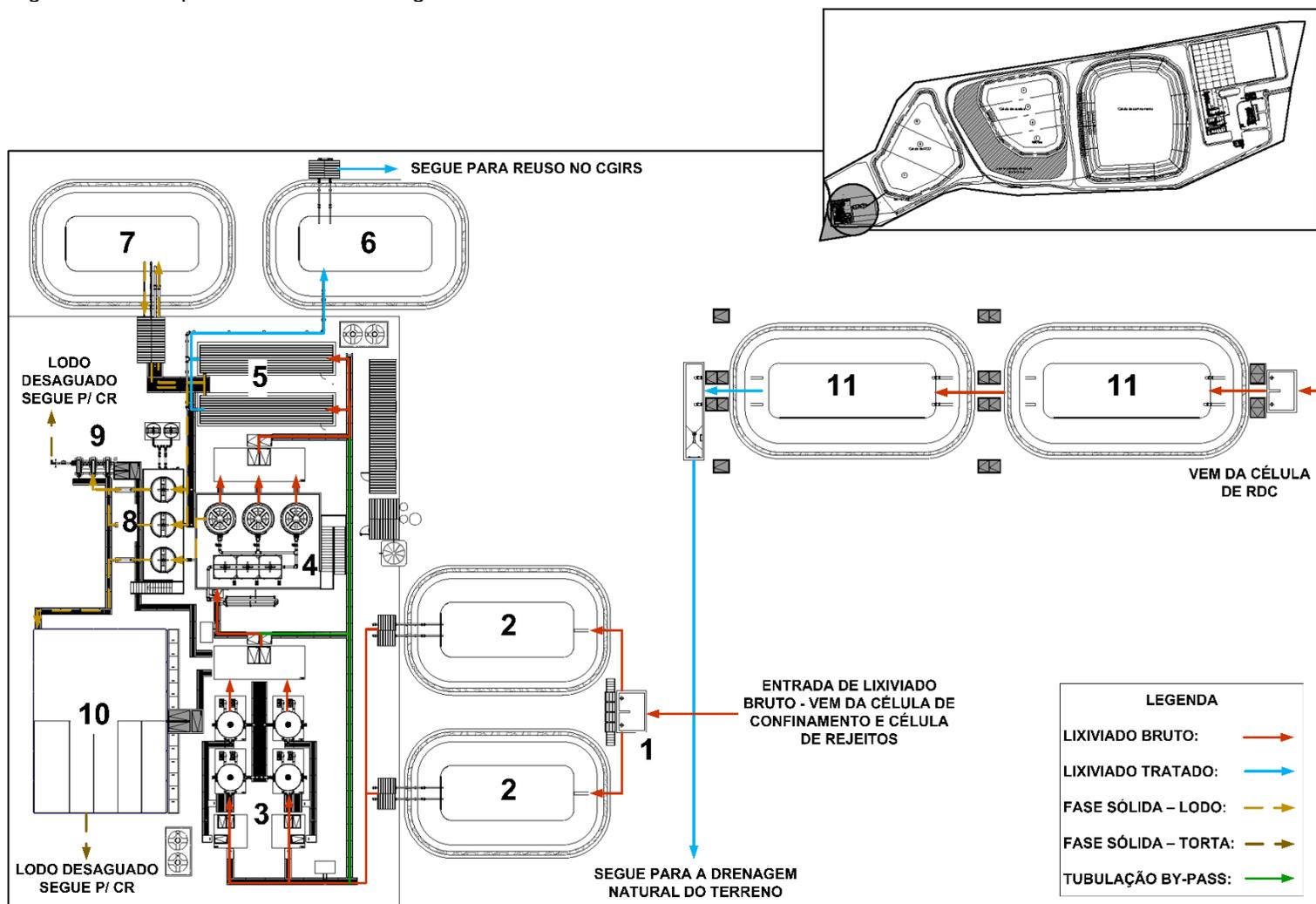
- a) O volume de deposição de resíduos considerado no período será a de final de projeto, atingindo a capacidade máxima do CGIRS;
- b) A capacidade máxima de ocupantes (operadores, funcionários internos e externos) do CGIRS será atingida e conseqüentemente haverá maior contribuição de esgotos à ETL;
- c) Haverá maior recebimento do chorume advindo dos galpões de compostagem, onde cerca de 50% do volume inicial do resíduo é reduzido na forma de lixiviado e gases; e
- d) Haverá mais frentes de serviço em operação, com maior área disponível para a ação das chuvas e geração de lixiviados.

Em decorrência da maior carga orgânica afluyente à ETL, o arranjo das unidades de tratamento do cenário alta carga é mais complexo, onde se tem a adição de novas unidades, atuando no pré-tratamento da osmose reversa para abatimento da carga orgânica, no desaguamento da fração sólida gerada e na remoção dos compostos voláteis presentes no lixiviado. Nesta etapa temos a disposição de 11 unidades de tratamento, sendo: caixa de divisão e distribuição de vazão (CDDV); tanque de equalização de lixiviado bruto (TQELB); torre de air stripping (TA); tratamento físico-químico (FQ); osmose reversa (OR); Tanque de equalização de permeado (TQEP); tanque de equalização de concentrado (TQEC); unidade de condicionamento de lodo (UCL); desaguamento de lodo mecanizado tipo decanter centrífugo (DC); leito de secagem (LS); tanque de sedimentação horizontal (TSH).

O fluxograma da ETL no cenário alta carga, bem como a disposição das unidades de tratamento que a constituem podem ser observadas na Figura 7.



Figura 7 – Fluxograma da ETL para o cenário alta carga.



Legenda: 1) CDDV; 2) TQELB; 3) TA; 4) FQ; 5) OR; 6) TQEP; 7) TQEC; 8) UCL; 9) DC; 10) LS; 11) TSH.



4.4 Descrição das Unidades de Tratamento

A estação de tratamento de lixiviado (ETL) é composta por tanque de equalização de lixiviado bruto, torres de arraste, unidade de coagulação por misturador estático e misturador hidráulico tipo chicana, floculador mecânico, decantador Dortmund, osmose reversa, tanque de equalização de permeado, tanque de equalização de concentrado, unidade de condicionamento lodo, unidade de leito de secagem e unidade de desaguamento mecanizado por centrífuga tipo decanter. As principais características e os parâmetros de projeto adotados nas unidades que compõem a estação de tratamento de lixiviado serão apresentadas nos tópicos a seguir.

4.4.1 Tanque de Equalização de Lixiviado Bruto (TQLB)

O tanque de equalização de lixiviado bruto (TQLB) é responsável por receber toda a contribuição de lixiviado e esgoto sanitário gerado no CGIRS, equalizando esta vazão afluyente em dois tanques escavados em formato trapezoidal com volume útil unitário de 171,50 m³, volume útil total de 343,0 m³ e relação 1:2 na inclinação dos taludes.

A área lateral interna, bem como o fundo do tanque de equalização será impermeabilizado com uma camada de argila e geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) para impedir qualquer tipo de vazamento ou contato do lixiviado com o solo.

De acordo com Metcalf & Eddy (2016), os principais parâmetros de projeto utilizados no dimensionamento do tanque de equalização foram os seguintes:

- Vazão máxima afluyente de lixiviado bruto: 770 m³/d ~ 38,5 m³/h;
- Altura útil do tanque: 2,0 m;
- Borda livre: 0,25 m;
- Horas de operação por dia: 20 hrs;
- Vazão equalizada: 420 m³/d ~30 m³/h;
- Relação comprimento-largura: 2;
- Inclinação do talude: 2:1.



Segundo Metcalf & Eddy (2016), o dimensionamento do tanque de equalização de lixiviado bruto pode ser realizado por meio das equações 4 a 13.

$$V_{TE} = (Q_{LB} - Q_{ETL}) \times t_{TE} \quad (4)$$

$$h_{eq} = H_T - B_L \quad (5)$$

$$A_{TQE} = \frac{V_{TE}}{h_{eq}} \quad (6)$$

$$B_{eq} = \left(\frac{A}{L/B} \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$L_{eq} = B_{eq} \times L/B \quad (8)$$

$$L_F = L_{eq} - \left(d \times \frac{h_{eq}}{2} \right) \quad (9)$$

$$B_F = B_{eq} - \left(d \times \frac{h_{eq}}{2} \right) \quad (10)$$

$$L_{NA} = L_{eq} + \left(d \times \frac{h_{eq}}{2} \right) \quad (11)$$

$$B_{NA} = B_{eq} + \left(d \times \frac{h_{eq}}{2} \right) \quad (12)$$

$$TDH = \frac{V_{TE}}{Q_{LB}} \quad (13)$$

Em que:

V_{TE} – Volume do tanque de equalização (m³);

Q_{ETL} – Vazão de tratamento da ETL (m³/h);

Q_{LB} – Vazão de lixiviado bruto afluente (m³/h);

t_{TE} – Tempo para equalização (h);

h_{eq} – Altura útil do tanque de equalização (m);

H_T – Altura total do tanque de equalização (m);

B_L – Borda livre (m);

L/B – Relação comprimento-largura (m);

A_{TQE} – Área do tanque de equalização (m²);

L_{eq} – Comprimento do tanque de equalização (m);



B_{eq} – Base do tanque de equalização (m);

d – Inclinação do talude (-);

L_F – Comprimento do tanque de equalização no fundo (m);

B_F – Base do tanque de equalização no fundo (m);

L_{NA} – Comprimento do tanque de equalização no nível d'água (m);

B_{NA} – Base do tanque de equalização no nível d'água (m); e

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica (d).

Os tanques de equalização que serão instalados na ETL do CGIRS podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 – Tanque de equalização de lixiviado bruto.



Objetivando maior flexibilidade operacional, o tanque de equalização de permeado e concentrado da osmose reversa terão o mesmo volume do tanque de equalização de lixiviado bruto, tendo o seu dimensionamento análogo ao que foi apresentado nas equações 04 a 13.



4.4.2 Unidade de Torre de Arraste (TA)

O tratamento físico-químico via torre de arraste tem como objetivo a remoção de compostos voláteis por meio da injeção de ar no lixiviado, saturando a massa líquida e conseqüentemente diminuindo a fração molar e a pressão parcial do soluto (amônia, sulfeto e compostos orgânicos voláteis), transcendendo o seu valor de equilíbrio na interface gás-líquido, arrastando-o para fora do lixiviado (HOWE *et al.*, 2016; METCALF; EDDY, 2016).

A unidade de tratamento físico-químico via torre de arraste é composta por 4 torres em polipropileno com diâmetro, munidas de meio de contato (recheio) constituído por anéis de *rasching* em polietileno, 2 inspeções de 0,6 m para acesso e manutenção das unidades, e sistema de supressão de espumas e aerossóis localizados na porção superior da torre próximo à saída de ar.

Segundo Howe *et al.* (2016) e Metcalf & Eddy (2016) os principais parâmetros de projeto utilizados no dimensionamento das torres de arraste são os seguintes:

- Número de unidades: 4,0;
- Vazão máxima de lixiviado bruto afluyente: 770,0 m³/d;
- Temperatura: 28°C;
- Massa específica do lixiviado: 996,23 kg/m³;
- Massa específica do ar: 1,172 kg/m³;
- Viscosidade do lixiviado: 8,328*10⁻⁴;
- Viscosidade do ar: 1,862*10⁻⁵;
- Fator de arraste: 3,5;
- Constante universal dos gases: 0,083145 L.bar/mol.K;
- Constante da variação padrão da entalpia para amônia a 20°C: 36,12;
- Constante de equilíbrio da amônia a 20°C: 1.526;
- Concentração de amônia afluyente: 100 mg/L;
- Eficiência de remoção de amônia: 75%;
- Valor numérico de "y" da curva de Eckert: 0,015;
- Fator de compactação do anel de *Rasching*: 30 m⁻¹;
- Diâmetro nominal do anel de *Rasching*: 0,0762 m;
- Área total da superfície específica do anel de *Rasching*: 72 m²/m³;



- Material do recheio: polietileno;
- Tensão superficial do lixiviado a 28°C: 0,0715 N/m;
- Tensão superficial crítica do anel de *Rasching*: 0,033 N/m;
- Volume molar da amônia: 0,0267 L/mol;
- Peso molecular da amônia: 17,03 g/mol;
- Peso molecular do ar: 29 g/mol;
- Pressão atmosférica ao nível do mar: $1 \cdot 10^5$ N/m²;
- Ponto de ebulição da amônia: -33,4 °C;
- Energia de tração molecular do ar: 78,60;
- Coeficiente de difusão da amônia na fase líquida: $2,360 \cdot 10^{-9}$;
- Coeficiente de difusão da amônia na fase gasosa: $2,279 \cdot 10^{-5}$;
- Constante empírica: 275 N.s/m⁴;
- Pressão ambiente: 101.325 N/m²;
- Constante da potência de parada do soprador: 0,283;
- Eficiência do soprador: 60%; e
- Eficiência da bomba: 80%.

De acordo com Howe *et al.*, (2016) e Metcalf & Eddy (2016), as principais equações utilizadas no dimensionamento das torres de arraste são:

$$Q_{LB-NTAR} = \frac{Q_{LB}}{N_{TAR}} \quad (14)$$

$$H_{YC-NH_3} = K_C \cdot e^{\left(\frac{-\Delta H_{dist}^a}{T \times R}\right)} \quad (15)$$

$$C_{EF} = \frac{(C_{AF} \times (100 - E_{R-NH_3}))}{100} \quad (16)$$

$$\left(\frac{Q_G}{Q_L}\right)_{Min} = \frac{(C_{AF} - C_{EF})}{(H_{YC-NH_3} \times C_{AF})} \quad (17)$$

$$\left(\frac{Q_G}{Q_L}\right)_{Proj} = \left(\frac{Q_G}{Q_L}\right)_{Min} \times S \quad (18)$$

$$Q_{G-Proj} = \left(\frac{Q_G}{Q_L}\right)_{Proj} \times Q_{LB-NTAR} \quad (19)$$



$$S_{NH3} = Q_{G-PROJ} \times \frac{H_{YC-NH3}}{Q_{LB-NTAR}} \quad (20)$$

$$\left(\frac{G_m}{L_m}\right) = \left(\frac{Q_G}{Q_L}\right)_{PROJ} \times \frac{\rho_{Ar}}{\rho_L} \quad (21)$$

$$X = \left(\frac{1}{\left(\frac{G_m}{L_m}\right)}\right) \times \left(\left(\frac{\rho_{Ar}}{(\rho_L - \rho_{Ar})}\right)^{0,5}\right) \quad (22)$$

$$G_m = \left(\frac{y \times \rho_{Ar} \times (\rho_L - \rho_{Ar})}{\left(\left(\frac{C_f}{3,28}\right) \times \mu_L^{0,1}\right)^{0,5}}\right) \quad (23)$$

$$L_m = \left(\frac{G_m}{\left(\left(\frac{Q_G}{Q_L}\right)_{PROJ} \times \frac{\rho_{Ar}}{\rho_L}\right)}\right) \quad (24)$$

$$A_{TA} = Q_{LB-NTAR} \times \frac{\rho_L}{L_m} \quad (25)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times A_{TA}}{\pi}} \quad (26)$$

$$a_w = a_t \left\{ 1 - \exp \left[-1,45 \times \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L}\right)^{0,75} \times \left(\frac{L_m}{a_t \times \mu_L}\right)^{0,1} \times \left(\frac{L_m^2 \times a_t}{\rho_L^2 \times g}\right)^{-0,05} \times \left(\frac{L_m^2}{\rho_L \times a_t \times \sigma_L}\right)^{0,2} \right] \right\} \quad (27)$$

$$k_L = 0,0051 \times \left(\frac{L_m}{a_w \times \mu_L}\right)^{2/3} \times \left(\frac{\mu_L}{\rho_L \times D_L}\right)^{-0,5} \times (a_t \times d_p)^{0,4} \times \left(\frac{\rho_L}{\mu_L \times g}\right)^{-1/3} \quad (28)$$

$$k_g = 5,23 \times (a_t \times D_G) \times \left(\frac{G_m}{a_t \times \mu_G}\right)^{0,7} \times \left(\frac{\mu_G}{\rho_G \times D_G}\right)^{1/3} \times (a_t \times d_p)^{-2} \quad (29)$$

$$\frac{1}{(K_L a)_{onda}} = \frac{1}{k_L \times a_w} + \frac{1}{k_G \times a_w \times H_{YC}} \quad (30)$$

$$K_L a_{onda-FS} = (K_L a)_{onda} \times FS \quad (31)$$

$$K_L a_{onda-FS} = (K_L a)_{onda} \times FS \quad (32)$$

$$L_{TA} = \frac{Q_{LB-NTAR}}{A \times K_L a} \left(\frac{S}{S-1}\right) \times \ln \left[\frac{1 + (C_o/C_e) \times (S-1)}{S} \right] \quad (33)$$



$$Q_{m-Ar} = Q_{G-PROJ} \times \rho_{Ar} \quad (34)$$

$$\Delta P_{LOSS} = \left(\frac{Q_{G-PROJ}}{A} \right)^2 \times k_p \quad (35)$$

$$P_{in} = P_a + [(\Delta P/L) \times L] + \Delta P_{LOSS} \quad (36)$$

$$P_{Sopr} = \left(\frac{G_{me} \times R \times T_{Ar}}{MW \times \eta_a \times E_{Sopr}} \right) \times \left[\left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)^{0,283} - 1 \right] \quad (37)$$

$$P_{Bomba} = \frac{\rho_L \times Q_{LB-NTAR} \times L_{TA} \times g}{E_{CMB}} \quad (38)$$

$$P_{Total} = P_{Sopr} + P_{Bomba} \quad (39)$$

$$E_{ESP} = \frac{P_{Total}}{Q_{LB-NTAR}} \quad (40)$$

Em que:

$Q_{LB-NTAR}$ – Vazão de lixiviado bruto unitária da torre de arraste (m^3/d);

Q_{LB} – Vazão de lixiviado bruto total (m^3/d);

N_{TAR} – Número de torres de arraste (-);

H_{YC-NH_3} – Constante de Henry da amônia em função da temperatura (-);

K_c – Constante de equilíbrio da amônia (-);

$\Delta H^{0}_{dist^a}$ – Variação da entalpia da amônia a $20^\circ C$ (-);

T – Temperatura de projeto (K);

R – Constante universal dos gases (L.bar/mol.K);

C_{EF} – Concentração efluente de amônia (mg/L);

C_{AF} – Concentração afluente de amônia (mg/L);

E_{R-NH_3} – Eficiência de remoção da amônia (%);

$(Q_G/Q_L)_{Min}$ – Razão mínima de vazão de ar e vazão de lixiviado (-);

$(Q_G/Q_L)_{Proj}$ – Razão de vazão de ar e vazão de lixiviado de projeto (-);

S – Fator de arraste (-);

S_{NH_3} – Fator de arraste da amônia (-);

(G_m/L_m) – Razão de taxa de aplicação superficial mássica de ar e taxa de aplicação superficial mássica de lixiviado (kg.ar/kg.lixiviado);

ρ_{Ar} – Massa específica do ar (kg/m^3);

ρ_L – Massa específica do lixiviado (kg/m^3);



- x – Valor do eixo “x” da curva de Eckert (-);
 G_m – Taxa de aplicação superficial mássica de ar (kg.ar/m².s);
 L_m – Taxa de aplicação superficial mássica de lixiviado (kg.lixiviado/m².s);
 A_{TA} – Área da torre de arraste (m²);
 D – Diâmetro da torre de arraste (m);
 a_w – Área superficial específica molhada do material de compactação (m²/m³);
 a_t – Área total da superfície específica do material de compactação (m²/m³);
 d_p – Diâmetro nominal do material de compactação (m);
 D_G – Coeficiente de difusão da amônia na fase gasosa (m²/s);
 D_L – Coeficiente de difusão da amônia na fase líquida (m²/s);
 g – Constante gravitacional (m/s²);
 μ_L – Viscosidade do lixiviado (kg/m.s);
 μ_G – Viscosidade do ar (kg/m.s);
 σ_L – Tensão superficial do lixiviado (kg/s²);
 σ_c – Tensão superficial crítica do material de compactação (kg/s²);
 K_{La} – Constante da taxa de transferência de massa do lado líquido global (s⁻¹);
 K_L – Coeficiente da taxa de transferência de massa na fase líquida (m/s);
 K_G – Coeficiente da taxa de transferência de massa na fase gasosa (m/s);
 a – Área disponível para a transferência de massa dividida pelo volume do vaso (m²/m³);
 FS – Fator de segurança (-);
 L_{TA} – Comprimento da torre de arraste (m);
 Q_{m-Ar} – Vazão mássica de ar (kg/s);
 ΔP_{LOSS} – Variação da queda de pressão (N/m²);
 k_p – Constante empírica da queda de pressão (N.s²/m⁴);
 P_{in} – Pressão de entrada de ar na torre (N/m²);
 P_{out} – Pressão de saída de ar na torre (N/m²);
 P_a – Pressão ambiente (N/m²);
 P_{Sopr} – Potência do soprador (kW);
 G_{me} – Vazão mássica de ar (kg.ar/s);
 M_W – Massa molecular do ar (g/mol);
 n_a – constante de potência de parada do soprador para o ar (-);



E_{Sopr} – Eficiência do soprador (%);

T_{Ar} – Temperatura do ar (K);

P_{Bomba} – Potência da bomba (W);

E_{CMB} – Eficiência do conjunto moto-bomba (%);

P_{Total} – Potência total (kW);

E_{ESP} – Consumo de energia específica (kWh/m³).

As unidades de torre de arraste que serão instaladas na ETL do CGIRS podem ser observadas na Figura 9.

Figura 9 – Unidade de tratamento de torre de arraste.



4.4.3 Unidade de Tratamento Físico-Químico – Coagulação

A etapa de coagulação tem como função a desestabilização das partículas coloidais por meio da inserção de eletrólitos, condicionando-as para sua posterior remoção nas unidades de tratamento subsequentes (ABNT, 1992; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; FERREIRA FILHO, 2017). A mistura rápida na ETL é realizada hidráulicamente através do misturador estático *in-line* de 3 elementos de agitação.



Segundo Ferreira Filho (2017) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), os principais parâmetros de projeto a se considerar no dimensionamento do misturador estático (ME) *in-line* são:

- Vazão máxima de lixiviado bruto afluyente: 770 m³/d ~ 38,5 m³/h;
- Tempo de detenção hidráulica no misturador estático: 1,0 a 3,0 segundos;
- Perda de carga admissível no misturador estático: 0,6 a 0,9 m;
- Diâmetro do misturador: 100 mm;
- Material do misturador estático: Aço Inox 304; e
- Fabricante do misturador: Komax.

Segundo Ferreira Filho (2017), as principais equações relacionadas ao dimensionamento do misturador estático são:

$$v_{fp} = \frac{Q_{LB}}{A_{ME}} \quad (41)$$

$$Re_{fp} = \frac{v_{fp} \times D_{ME} \times \rho_L}{\mu_L} \quad (42)$$

Em que:

v_{fp} – Velocidade de final de plano (m/s);

Q_{LB} – Vazão máxima de lixiviado afluyente (m³/s);

A_{ME} – Área da secção transversal do misturador estático (m²);

Re_{fp} – Número de Reynolds de final de plano (-);

D_{ME} – Diâmetro do misturador estático (m);

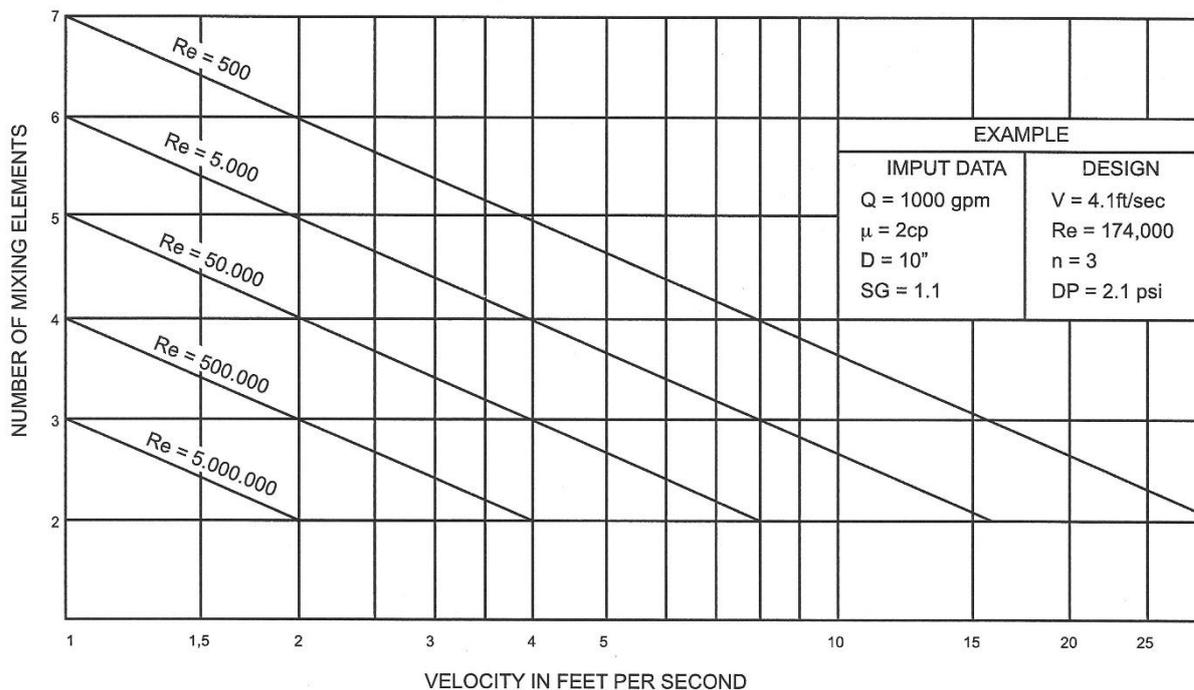
ρ_L – Massa específica do lixiviado (kg/m³); e

μ_L – Viscosidade do lixiviado (kg/m.s).

De posse da velocidade de fim de plano no ME e do número de Reynolds, utiliza-se dos gráficos apresentados na Figura 10 e Figura 11 para determinação do número de elementos de mistura e da perda de carga, respectivamente.

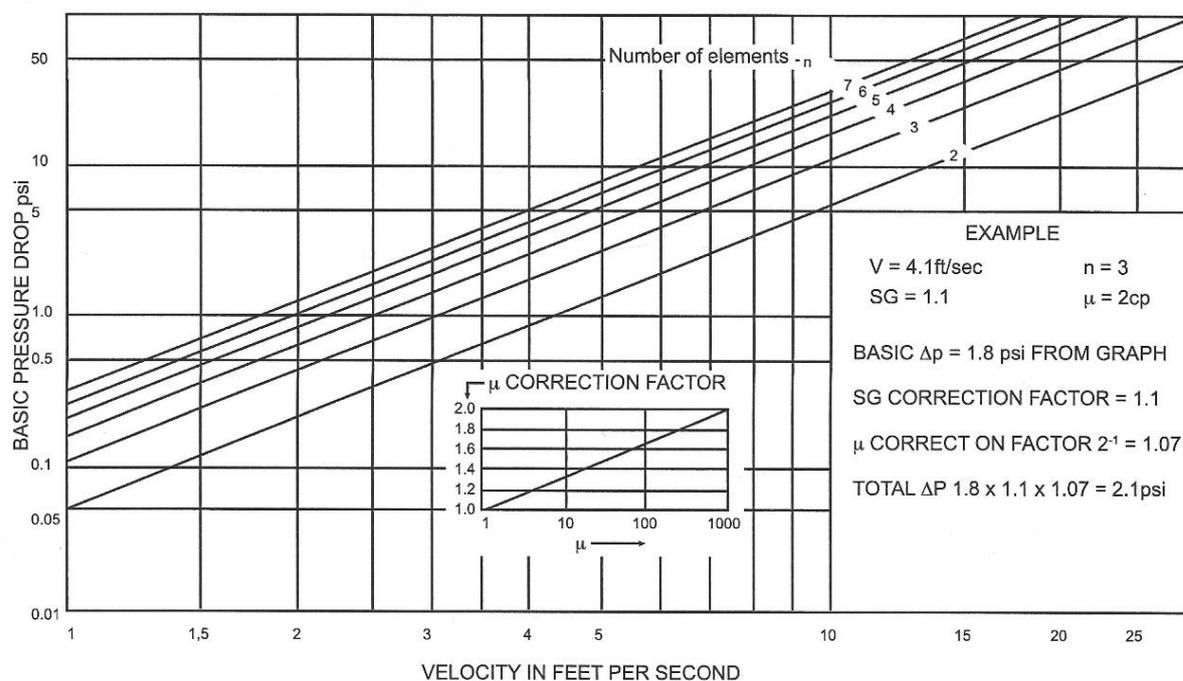


Figura 10 – Gráfico de determinação do número de elementos de mistura.



Fonte: (FERREIRA FILHO, 2017).

Figura 11 – Curva de perda de carga do misturador estático.

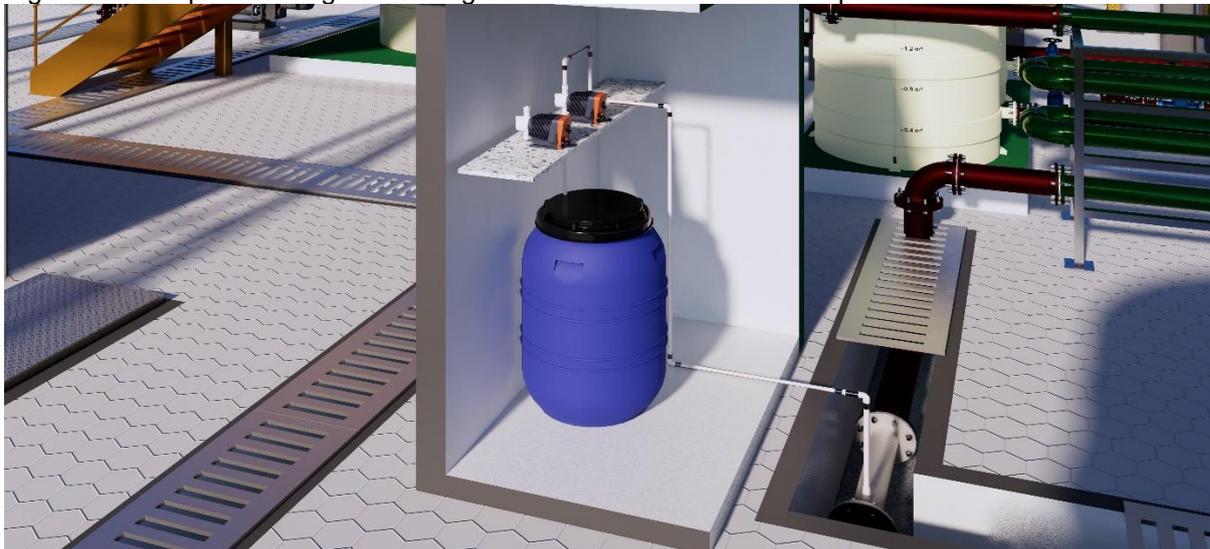


Fonte: (FERREIRA FILHO, 2017).

O ME que será instalado na ETL do CGIRS na etapa de coagulação pode ser observado na Figura 12.



Figura 12 – Etapa de dosagem de coagulante e unidade de mistura rápida



De forma auxiliar ao misturador estático, instalou-se uma unidade de mistura hidráulica por tubulação tipo chicana para aumentar o desempenho de mistura e o tempo de contato com o coagulante inserido. O misturador hidráulico tipo chicana será construído em tubo PEAD de 150 mm flangeado e estrutura de apoio em aço inox 304.

De acordo com Di Bernardo *et al.* (2017) e Ferreira Filho (2017) os principais parâmetros de projetos relacionados ao dimensionamento do misturador hidráulico tipo chicana são:

- Temperatura do lixiviado: 30°C;
- Massa específica do lixiviado: 995,67 kg/m³;
- Viscosidade do lixiviado: 799*10⁻⁶ N.s/m²;
- Material da tubulação: PEAD;
- Coeficiente de rugosidade “C” para tubulações velhas: 137,5;
- Diâmetro externo da tubulação: 160 mm;
- Espessura da tubulação de PEAD: 9,5 mm; e
- Comprimento da tubulação: 27 m.



Segundo Di Bernardo *et al.* (2017) e Ferreira Filho (2017), as principais equações relacionadas ao dimensionamento do misturador hidráulico tipo chicana são:

$$v_{tv} = \frac{4 \times Q_{LB}}{\pi \times D^2} \quad (43)$$

$$Re_{tv} = \frac{v_{tv} \times D_i \times \rho_L}{\mu_L} \quad (44)$$

$$\Delta t_{tv} = \frac{L_{ME}}{v_{tv}} \quad (45)$$

$$J = 10,643 \times Q^{1,85} \times C^{-1,85} \times D_i^{-4,87} \quad (46)$$

$$G = \sqrt{\frac{g \times \rho_L}{\mu_L} \times v_{tv} \times J} \quad (47)$$

Em que:

v_{tv} – Velocidade no tubo velho (m/s);

Q_{LB} – Vazão máxima de lixiviado afluyente (m³/s);

ρ_L – Massa específica do lixiviado (kg/m³);

μ_L – Viscosidade do lixiviado (kg/m.s);

Re_{tv} – Número de Reynolds para o tubo velho (-);

D_i – Diâmetro interno do misturador hidráulico tipo chicana (m);

g – Constante gravitacional (m/s²);

J – Perda de carga unitária (m/m);

G – Gradiente de velocidade (s⁻¹);

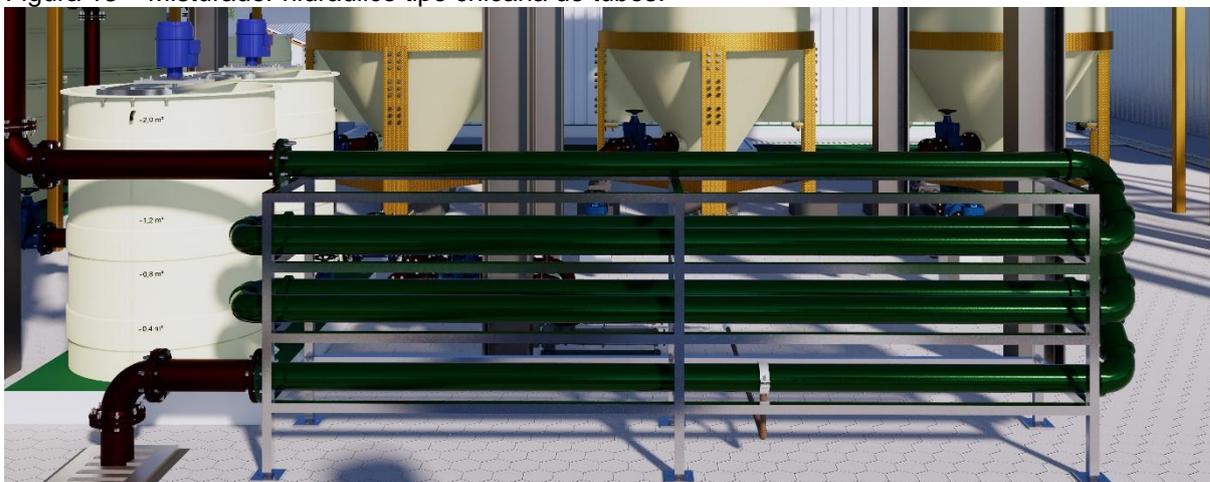
L – Comprimento da tubulação do misturador hidráulico tipo chicana (m); e

Δt_{tv} – Tempo de percurso do misturador hidráulico tipo chicana (s).

O misturador hidráulico tipo chicana que será instalada na ETL do CGIRS pode ser observado na Figura 13.



Figura 13 – Misturador hidráulico tipo chicana de tubos.



4.4.4 Unidade de Tratamento Físico-Químico – Flocculação

A unidade de flocculação é responsável por realizar a agregação das partículas coloidais, aumentando o seu tamanho físico para que sejam removidas por meio de processos e técnicas de separação física, dentre eles, a sedimentação gravitacional, filtração e a flotação por ar dissolvido (ABNT, 1992; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; FERREIRA FILHO, 2017).

A etapa de flocculação na ETL é realizada de forma mecanizada por meio de floclador mecânico tipo turbina com 3 câmaras em série, sendo construído inteiramente em aço inox AISI 304.

Segundo Di Bernardo *et al.* (2017), Ferreira Filho (2017) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), os principais parâmetros de projeto relacionados ao dimensionamento do floclador mecânico tipo turbina são:

- Vazão máxima de lixiviado bruto: 770 m³/d ~38 m³/h;
- Temperatura do lixiviado: 30°C;
- Massa específica do lixiviado: 995,67 kg/m³;
- Viscosidade do lixiviado: 799*10⁻⁶ N.s/m²;
- Material das câmaras de flocculação: aço inox AISI 304 L;
- Dimensional das câmaras de flocculação: L x B x H= 2,0 m x 2,0 m x 2,0 m;
- Borda livre da câmara de flocculação: 0,20 m;



- Tempo de detenção hidráulica mínimo: ≥ 10 min;
- Tempo de detenção hidráulica máximo: ≤ 40 min;
- Altura útil: 1,80 m;
- Número de agitadores: 3,0;
- Relação entre a largura da turbina e o diâmetro equivalente da câmara:
 $0,35 \text{ m} \leq X \leq 0,60 \text{ m}$;
- Relação da distância entre o fundo da câmara até a turbina e a altura útil da câmara: $0,33 \text{ m} \leq Y \leq 0,50 \text{ m}$;
- Velocidade máxima periférica na primeira câmara: 2 m/s a 3 m/s;
- Velocidade máxima periférica na última câmara: $\leq 0,60$ m/s;
- Tipo de turbina: turbina de fluxo axial com 4 pás a 45° ($K_t = 1,2$ a $1,5$);
- Gradientes: 1ª câmara= 70 s^{-1} , 2ª câmara= 35 s^{-1} , 3ª câmara= 10 s^{-1} ; e
- Fator de segurança: 20%.

Segundo Di Bernardo *et al.* (2017) e Ferreira Filho (2017), as principais equações relacionadas ao dimensionamento do floculador mecânico tipo turbina são:

$$V_{u-CF} = L_{CF} \times B_{CF} \times H_{u-CF} \quad (48)$$

$$V_{TF} = V_{CF} \times n_{CF} \quad (49)$$

$$TDH_F = \frac{V_{TF}}{Q_{LB}} \quad (50)$$

$$P_{Máx-CF} = V_{u-CF} \times \mu_L \times G_1^2 \quad (51)$$

$$P_{Mín-CF} = V_{u-CF} \times \mu_L \times G_3^2 \quad (52)$$

$$D_e = 1,13 \times \sqrt{L_{CF} \times B_{CF}} \quad (53)$$

$$X = \frac{D_{AG}}{D_e} \quad (54)$$

$$n_{Máx} = \left(\frac{P_{Máx-CF}}{K_t \times \rho_L \times D_{AG}^5} \right) \quad (55)$$

$$n_{Mín} = \left(\frac{P_{Mín-CF}}{K_t \times \rho_L \times D_{AG}^5} \right) \quad (56)$$

$$V_{P-Máx} = \left(\frac{n_{Máx} \times \pi \times D_{AG}}{60} \right) \quad (57)$$



$$V_{P-Min} = \left(\frac{n_{Min} \times \pi \times D_{AG}}{60} \right) \quad (58)$$

Em que:

V_{U-CF} – Volume útil da câmara de floculação (m^3);

L_{CF} – Comprimento da câmara de floculação (m);

B_{CF} – Largura da câmara de floculação (m);

H_{U-CF} – Altura útil da câmara de floculação (m);

V_{TF} – Volume total da unidade de floculação (m^3);

n_{CF} – Número de câmaras de floculação (-);

TDH_F – Tempo de detenção hidráulica do floclador (min);

Q_{LB} – Vazão máxima de lixiviado bruto afluente (m^3/d);

$P_{Máx}$ – Potência máxima do agitador (W);

$P_{Mín}$ – Potência mínima do agitador (W);

ρ_L – Massa específica do lixiviado (kg/m^3);

μ_L – Viscosidade do lixiviado ($kg/m.s$);

G_1 – Gradiente da câmara 1;

G_3 – Gradiente da câmara 3;

D_e – Diâmetro equivalente (m);

K_t – Número de potência (-);

$n_{Mín}$ – Rotação mínima do agitador (RPM);

$n_{Máx}$ – Rotação máxima do agitador (RPM);

D_{AG} – Diâmetro do agitador (m);

$V_{P-Máx}$ – Velocidade periférica máxima (m/s);

$V_{P-Mín}$ – Velocidade periférica mínima (m/s).

O floclador mecânico que será instalada na ETL do CGIRS pode ser observado na Figura 14.



Figura 14 – Unidade de floculação mecanizada tipo turbina.



4.4.5 Unidade de Decantação – Decantador Dortmund

A unidade de decantação tem como função realizar a separação das fases sólido-líquido por meio da sedimentação gravitacional de partículas floculentas formadas na etapa de floculação (ABNT, 2011; FERREIRA FILHO, 2017; NUVOLARI *et al.*, 2011).

A etapa de decantação é composta por 3 decantadores Dortmund (DD) construídos em polipropileno reforçado com estrutura da base em aço carbono com acabamento em pintura epóxi amarela. O diâmetro de entrada e saída do decantador é de 150 mm flangeada. Na porção inferior do decantador, tem-se 2 válvulas de descarga, sendo uma acoplada diretamente na bomba helicoidal para descarga do lodo e a outra é destinada para limpeza da unidade.

De acordo com Nuvolari *et al.* (2011), Ferreira Filho (2017) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011), os principais parâmetros de projeto relacionados com o dimensionamento do decantador Dortmund, são:

- Vazão máxima de lixiviado bruto afluente: 770 m³/d ~ 38,5 m³/h;
- Vazão média de lixiviado bruto afluente: 500 m³/d ~ 25,0 m³/h;
- Temperatura do lixiviado bruto: 30°C;
- Massa específica do lixiviado: 995,67 kg/m³;
- Viscosidade do lixiviado: 799*10⁻⁶ N.s/m²;
- Material das câmaras de floculação: aço inox AISI 304 L;



- Número de decantadores: 3,0;
- Altura do cilindro: 3,90 m;
- Formato do decantador: cilíndrico na zona de decantação e tronco de cone na zona de acumulação do lodo;
 - Taxa de aplicação superficial: 90 m³/m².d;
 - Tempo de detenção hidráulica para a vazão média: c 3,0 h;
 - Tempo de detenção hidráulica para a vazão máxima: ≥ 1,0 h;
 - Taxa de escoamento no vertedor para a vazão média: ≤ 500 m³/m².d;
 - Inclinação das paredes do poço de acúmulo de lodo: 1,5 m na vertical e 1,0 m na horizontal;
 - Dimensional da base inferior do tronco de cilindro: mínimo de 0,60 m;
 - Número de calhas de coleta de água decantada: 4,0;
 - Fator de segurança para o fosso de acúmulo de lodo: 1,5;
 - Tipo de vertedor da calha de coleta: triangular;
 - Distância entre os vértices do vertedor: 0,13 m; e
 - Largura da calha de coleta do clarificado: 0,22 m.

Segundo Nuvolari *et al.* (2011), Ferreira Filho (2017) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011), as principais equações relacionadas ao dimensionamento do decantador Dortmund, são:

$$A_{D-u} = \frac{TAS}{\frac{Q_{LB}}{n_D}} \quad (59)$$

$$D_{D-u} = \left(\frac{4 \times A_{D-u}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (60)$$

$$P_{D-u} = 2 \times \pi \times \left(\frac{D_{D-u}}{2} \right) \quad (61)$$

$$V_{D-u} = \theta \times \left(\frac{Q_{LB}}{n_D} \right) \quad (62)$$

$$H_{Cone} = \left(\frac{D_{D-u}}{2} - \frac{D_{D-b}}{2} \right) \times 1,5 \quad (63)$$

$$H_{Cone-2/3} = H_{Cone} \times \frac{2}{3} \quad (64)$$



$$H_{\text{Cone-1/3}} = H_{\text{Cone}} \times 1/3 \quad (65)$$

$$D_{D-u,1/3} = D_{D-u} - (0,444 \cdot H_{\text{Cone}}) \quad (66)$$

$$V_{\text{Cone}} = \frac{\pi \times H_{\text{Cone}}}{3} \times \left[\left(\frac{D_{D-u}}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_{D-b}}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_{D-u}}{2} \times \frac{D_{D-b}}{2} \right) \right] \quad (67)$$

$$V_{\text{Cone-2/3}} = \frac{\pi \times H_{\text{Cone-2/3}}}{3} \times \left[\left(\frac{D_{D-u,1/3}}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_{D-b}}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_{D-u,1/3}}{2} \times \frac{D_{D-b}}{2} \right) \right] \quad (68)$$

$$V_{\text{Cone-1/3}} = V_{\text{Cone}} - V_{\text{Cone-2/3}} \quad (69)$$

$$V_{\text{Cil}} = V_{D-u} - V_{\text{Cone-1/3}} \quad (70)$$

$$H_{\text{Cil}} = \frac{V_{\text{Cil}}}{A_{D-u}} \quad (71)$$

$$H_{DT} = H_{\text{Cil}} + H_{\text{Cone}} \quad (72)$$

$$V_{D-u,A} = (H_{\text{Cil}} \times A_{D-u}) + V_{\text{Cone-1/3}} \quad (73)$$

$$\theta_{\text{Máx}} = \frac{V_{D-u,A}}{\frac{Q_{LB}}{n_D}} \quad (74)$$

$$\theta_{\text{Méd}} = \frac{V_{D-u,A}}{\frac{Q_{LB-Méd}}{n_D}} \quad (75)$$

$$V_{\text{Lodo}} = V_{\text{Cone-2/3}} \times FS \quad (76)$$

$$q = \frac{Q_{LB}}{n_C \times L_C \times n_{L-C}} \quad (77)$$

$$n_V = \frac{n_C \times L_C \times n_{L-C}}{d_V} \quad (78)$$

$$Q_V = \frac{Q_{LB}}{n_V} \quad (79)$$

$$h_V = \left(\frac{Q_V}{1,46} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (80)$$

$$h_c = \left[\left(\frac{Q_{LB}}{b} \right)^2 \cdot \frac{1}{g} \right]^{1/3} \quad (81)$$

Em que:

A_{D-u} – Área do decantador unitária (m²);



- TAS – Taxa de aplicação superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$);
- Q_{LB} – Vazão máxima de lixiviado bruto afluente (m^3/d);
- n_D – Número de decantadores (-);
- D_{D-u} – Diâmetro unitário do decantador (m);
- P_{D-u} – Perímetro unitário do decantador (m);
- V_{D-u} – Volume unitário de decantador (m^3);
- θ – Tempo de detenção hidráulica (h);
- H_{Cone} – Altura do cone (m);
- D_{D-b} – Diâmetro do decantador na base (m);
- $H_{Cone-2/3}$ – Altura de 2/3 do cone (m);
- $H_{Cone-1/3}$ – Altura de 1/3 do cone (m);
- V_{Cone} – Volume do cone (m^3);
- $V_{Cone-2/3}$ – Volume de 2/3 do cone (m^3);
- $V_{Cone-1/3}$ – Volume de 1/3 do cone (m^3);
- V_{Cil} – Volume do cilindro (m^3);
- H_{Cil} – Altura do cilindro (m);
- H_{DT} – Altura total do decantador (m);
- $\theta_{Máx}$ – Tempo de detenção hidráulica para a vazão máxima (h);
- $\theta_{Méd}$ – Tempo de detenção hidráulica para a vazão média (h);
- V_{Lodo} – Volume de lodo (m^3);
- FS – Fator de segurança (-);
- q – Taxa de escoamento linear nas calhas de coleta do clarificado ($\text{L}^3\text{T}^{-1}\text{L}^{-1}$);
- n_v – Número de vertedores (-);
- n_c – Número de calhas (-);
- L_c – Comprimento das Calhas (m);
- n_{L-c} – Número de lados da calha (-);
- n_{L-c} – Distância entre os vértices do vertedor triangular (-);
- Q_v – Vazão unitária do vertedor (L/s);
- h_v – Altura da lâmina d'água sobre a crista do vertedor triangular (m);
- h_c – Altura crítica (m);
- b – Largura da calha de coleta do clarificado (m);
- g – Constante gravitacional (m/s^2).



A unidade de decantação que será instalada na ETL do CGIRS pode ser observada na Figura 15.

Figura 15 – Unidade de decantação tipo decantador Dortmund.



4.4.6 Unidade de Condicionamento de Lodo

O condicionamento de lodo tem como principal função viabilizar o processo de separação sólido-líquido na unidade de desaguamento. No presente projeto, o condicionamento do lodo será realizado de forma química pela inserção de polímeros e polieletrólitos para melhoramento das características do lodo em termos de sua densidade (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2014; WANG; SHAMMAS; HUNG, 2007).

Segundo Andreoli *et al.* (2014) e Wang *et al.* (2007) os principais parâmetros relacionados ao dimensionamento da unidade de condicionamento de lodo são:

- Vazão máxima de lodo afluente: 273,98 m³/d;
- Gradiente de agitação: 70s⁻¹ a 10s⁻¹;
- Tipo de descarga: mecanizada;
- Número de descargas por dia: 12;
- Diâmetro da unidade: 2 m;
- Número de unidades: 3;



- Diâmetro da tubulação de descarga: 150 mm;
- Altura total: 2,90 m;
- Fator de segurança: 1,2;
- Borda livre: 0,30 m.

De acordo com Andreoli *et al.* (2014) e Wang *et al.* (2007) as principais equações relacionadas ao dimensionamento da unidade de condicionamento de lodo são:

$$Q_{L-u} = \frac{Q_{LT}}{n_u} \quad (82)$$

$$A_u = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (83)$$

$$H_u = H_T - B_L \quad (84)$$

$$V_{U-u} = A_u \times H_u \quad (85)$$

$$V_{UT} = V_{U-u} \times n_u \quad (86)$$

$$N_d = \frac{Q_{LT}}{V_{uT}} \quad (87)$$

$$P_{Máx} = V_{u-CF} \times \mu_L \times G_{Máx}^2 \quad (88)$$

$$P_{Máx} = V_{u-CF} \times \mu_L \times G_{Mín}^2 \quad (89)$$

Em que:

Q_{LT} – Vazão de lodo afluyente total (m³/d);

Q_{L-u} – Vazão de lodo unitária (m³/d);

n_u – Número de unidades (-);

A_u – Área unitária (m²);

D – Diâmetro da unidade (m);

H_u – Altura útil (m);

B_L – Borda livre (m);

H_T – Altura total (m);

N_d – Número de descargas;

V_{U-u} – Volume útil unitário (m³);



V_{UT} – Volume útil total (m^3);

$P_{Máx}$ – Potência máxima do agitador (W);

$P_{Mín}$ – Potência mínima do agitador (W).

A unidade de condicionamento de lodo que será instalada no CGIRS pode ser observada na Figura 16.

Figura 16 – Unidade de condicionamento de lodo (UCL).



4.4.7 Unidade de Desaguamento de Lodo Tipo Leito de Secagem (LS)

O leito de secagem tem como função o desaguamento do lodo por meio da disposição deste sobre as camadas drenantes para remoção do líquido intersticial presente no lodo (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2014).

A unidade de leito de secagem que será instalada no CGIRS é composta por 3 leitões com área unitária de $52,45 m^2$ e área total de $157,36 m^2$. Com relação as camadas drenantes, estas foram substituídas pelo bloco drenante em polipropileno, sendo uma alternativa mais vantajosa em termos logísticos e operacionais em relação às camadas drenantes convencionais. Cada bloco possui abertura filtrante de 12% com desenho anti-entupimento e encaixe fácil do tipo macho e fêmea, além de ser resistente à corrosão e aos raios UV. As dimensões de comprimento, largura e altura são de 0,30 m, 0,30 m e 0,05 m, respectivamente.



Segundo Andreoli *et al.* (2014) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011), os principais parâmetros de projeto relacionados ao dimensionamento do leito de secagem são:

- Vazão de lodo afluyente: 5,42 m³/d;
- Concentração de sólidos suspensos totais (SST) no lodo afluyente: 25.000 mg/L;
- Tempo de ciclo: 10 dias;
- Taxa de aplicação de sólidos: ≤ 15 kgSST/m²;
- Número de leitos de secagem: 3,0;
- Comprimento do leito de secagem: 10,25 m.

De acordo com Andreoli *et al.* (2014) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011), as principais equações relacionadas ao dimensionamento do leito de secagem são:

$$M_{LS} = \frac{[SS_T] \times Q_{Lodo}}{1000} \quad (90)$$

$$V_{Lodo} = Q_{Lodo} \times t_c \quad (91)$$

$$M_{LST} = M_{LS} \times t_c \quad (92)$$

$$A_{LS} = \frac{M_{LST}}{TAS} \quad (93)$$

$$A_{LS-u} = \frac{A_{LS}}{n_{LS}} \quad (94)$$

$$B_{LS-u} = \frac{A_{LS-u}}{L_{LS-u}} \quad (95)$$

$$H_{LS} = \frac{V_{Lodo}}{A_{LS}} \quad (96)$$

Em que:

M_{LS} – Massa de lodo seco (kgSST/d);

Q_{Lodo} – Vazão de lodo (m³/d);

t_c – Tempo de ciclo (d);

V_{Lodo} – Volume de lodo (m³);

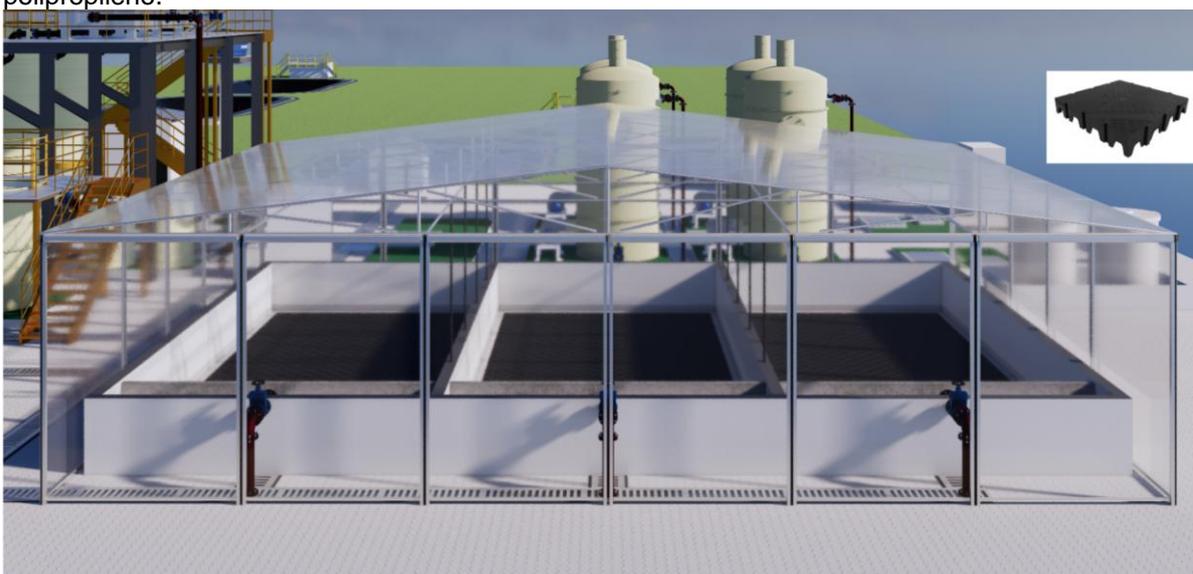
TAS – Taxa de aplicação de sólidos (kgSST/m²)



- A_{LS} – Área do leito de secagem (m^2);
 A_{LS-u} – Área do leito de secagem unitária (m^2);
 n_{LS} – Número de leitos de secagem (m^2);
 B_{LS} – Largura do leito de secagem (m);
 L_{LS} – Comprimento do leito de secagem (m)
 H_{LS} – Altura de lodo no leito de secagem (m).

A unidade de leito de secagem e o bloco drenante utilizado podem ser observados na Figura 17.

Figura 17 – Unidade de desaguamento de lodo tipo leito de secagem com bloco drenante em polipropileno.



4.4.8 Unidade de Desaguamento de Lodo Mecanizado Tipo Decanter Centrífugo

O decanter centrífugo utiliza a força centrífuga para a separação da fase líquida das partículas de lodo. A velocidade de rotação pode variar de equipamento para equipamento, mas geralmente encontra-se na faixa de 800 rpm a 2.000 rpm, resultando em uma força aplicada de 1.500 a 4.000 vezes a força de aceleração da gravidade (WANG; SHAMMAS; HUNG, 2007).



Segundo Wang *et al.* (2007), os principais parâmetros de projeto relacionados ao dimensionamento do decanter centrífugo são:

- Vazão lodo afluente: 268,55 m³;
- Número de decanter centrífugo: 2;
- Concentração de sólidos totais do lodo: 25.000 mg/L;
- Dosagem de polímero: 4 g/kgST;
- Taxa de captura de sólidos: 90%;
- Teor de sólidos da torta: 25%;
- Massa específica do lodo: 1090 kg/m³.

Conforme Wang *et al.* (2007), as principais equações relacionadas ao dimensionamento do decanter centrífugo são:

$$Q_{\text{Lodo-u}} = \frac{Q_{\text{Lodo-T}}}{n_{\text{DC}}} \quad (97)$$

$$Q_{\text{ML-u}} = Q_{\text{Lodo-u}} \times \frac{[\text{ST}]_{\text{AF}}}{1000} \quad (98)$$

$$M_{\text{P-u}} = \frac{Q_{\text{ML-u}} \times [\text{D}]_{\text{P}}}{1000} \quad (99)$$

$$Q_{\text{ML+P-u}} = (Q_{\text{ML-u}} + M_{\text{P-u}}) \times \frac{\text{TCS}}{100} \quad (100)$$

$$V_{\text{Torta-u}} = \frac{(Q_{\text{ML+P-u}} \times 100)}{[\text{TS}]_{\text{T}} \times \rho_{\text{Lodo}}} \quad (101)$$

$$V_{\text{Torta-T}} = V_{\text{Torta-u}} \times n_{\text{DC}} \quad (102)$$

$$Q_{\text{M,CL-u}} = \left(1 - \frac{\text{TCS}}{100}\right) \times Q_{\text{ML+P-u}} \quad (103)$$

$$Q_{\text{CL-u}} = Q_{\text{Lodo-u}} - V_{\text{Torta-u}} \quad (104)$$

$$Q_{\text{CL-T}} = Q_{\text{CL-u}} \times n_{\text{DC}} \quad (105)$$

$$[\text{ST}]_{\text{CL}} = \frac{Q_{\text{M,CL-u}} \times 1000}{Q_{\text{CL-u}}} \quad (106)$$

Em que:

$Q_{\text{Lodo-u}}$ – Vazão unitária de lodo (m³/d);

$Q_{\text{Lodo-T}}$ – Vazão de lodo total (m³/d);



- n_{DC} – Número de decanter centrífugo (-);
 Q_{ML-u} – Vazão mássica unitária de lodo (kg/d);
 $[ST]_{AF}$ – Concentração de sólidos totais afluyente (mg/L);
 M_{P-u} – Massa de polímero unitária (kg/d);
 $[D]_P$ – Dosagem de polímero (g/kgST);
 Q_{ML+P-u} – Vazão mássica unitária de lodo + polímero (kg/d);
 TCS – Taxa de captura de sólidos (%);
 ρ_{Lodo} – Massa específica do lodo (kg/m³);
 $[TS]_T$ – Teor de sólidos da torta (%);
 $V_{Torta-u}$ – Volume unitário de torta (m³/d);
 $V_{Torta-T}$ – Volume de torta total (m³/d);
 $Q_{M,CL-u}$ – Vazão unitária mássica do clarificado (kg/d);
 Q_{CL-u} – Vazão unitária de clarificado (m³/d);
 Q_{CL-u} – Vazão total de clarificado (m³/d);

A unidade de desaguamento de lodo mecanizada tipo decanter centrífugo pode ser observada na Figura 18.

Figura 18 – Unidade de desaguamento de lodo mecanizado tipo decanter centrífugo.





4.4.9 Tanque de sedimentação de Fluxo horizontal

A unidade de sedimentação de fluxo horizontal é responsável pela remoção de partículas cuja velocidade de sedimentação é maior ou igual a taxa de escoamento superficial na unidade (velocidade horizontal) (DAVIS, 2017; FERREIRA FILHO, 2017; HOWE *et al.*, 2016).

O tanque de sedimentação receberá o efluente gerado pela lixiviação dos resíduos da demolição e construção civil (RDC). A célula de RDC projetada no CGIRS receberá apenas os resíduos inertes para deposição, dessa forma, admitiu-se neste contexto que a contribuição de matéria orgânica seria muito baixa no lixiviado gerado e, portanto, o tanque de sedimentação seria suficiente para a remoção dos sólidos em suspensão.

A impermeabilização da área lateral e do fundo do tanque de sedimentação será realizada com uma camada de argila e geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) para impedir qualquer tipo de vazamento ou contato do lixiviado com o solo. Além disto, o tanque de sedimentação é munido de 18 válvulas de manobra para a realização do by-pass para fins de flexibilidade operacional em momentos de parada ou manutenção.

Segundo Ferreira Filho (2017) e Howe *et al.* (2016), os principais parâmetros de projeto relacionados ao dimensionamento do tanque de sedimentação horizontal, são:

- Vazão máxima afluente: 349,30 m³/d;
- Perfil do tanque de sedimentação: trapezoidal;
- Base maior do tanque: 8,20 m;
- Base menor do tanque: 3,37 m;
- Altura útil: 1,70 m;
- Comprimento da diagonal do talude: 3,45 m;
- Velocidade média de fluxo horizontal: < 0,0025 m/s;
- Taxa de aplicação superficial: 20 m³/m².d;
- Número de tanques de sedimentação: 2,0;
- Razão de comprimento e largura: 4:1;
- Borda livre: 0,60 m;



- Altura de lodo: 0,70 m;
- Altura do desnível: 0,10 m;
- Temperatura: 28°C;
- Viscosidade dinâmica: 0,836 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Número de Reynolds: < 20.000.

Conforme Ferreira Filho (2017) e Howe *et al.* (2016), as principais equações relacionadas ao dimensionamento do tanque de sedimentação horizontal, são:

$$A_m = \frac{(B+b) \times H_u}{2} \quad (107)$$

$$P_m = 2 \times d \quad (108)$$

$$v_{m-f} = \frac{Q_{L-RDC}}{A_m} \quad (109)$$

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} \quad (110)$$

$$A_{s-r} = \frac{Q_{L-RDC}}{TAS} \quad (111)$$

$$r = \frac{L \times n_{TQ}}{B} \quad (112)$$

$$H_T = B_L + H_u + H_{Lodo} + H_{Des} \quad (113)$$

$$F_r = \frac{v_{m-f}^2}{g \times R_h} \quad (114)$$

$$TDH = \frac{\left(\frac{(B+b) \times (H_u + H_{Lodo})}{2} \right) \times L}{Q_{L-RDC}} \quad (115)$$

Em que:

A_m – Área molhada (m^2);

B – Base maior (m);

b – Base menor (m);

H_u – Altura útil (m);

P_m – Perímetro molhado (m);

v_{m-f} – Velocidade média de fluxo (m/s);



- Q_{L-RDC} – Vazão de lixiviado de RDC (m^3/d);
 R_h – Raio hidráulico (m);
 A_{S-r} – Área superficial requerida (m^2);
 TAS – Taxa de aplicação superficial ($m^3/m^2.d$);
 r – Razão comprimento e largura (-);
 L – Comprimento do tanque de sedimentação (m);
 n_{TQ} – Número de tanques de sedimentação (-);
 H_T – Altura total (m);
 H_{Lodo} – Altura de lodo (m);
 H_{Des} – Altura do desnível (m);
 Fr – Número de Froud (-);
 g – Constante gravitacional (m/s^2);
 TDH – Tempo de detenção hidráulica (h).

O tanque de sedimentação que será implantado na ETL do CGIRS pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Tanque de sedimentação do lixiviado gerado na célula de RDC.





4.4.10 Unidade de Osmose Reversa (OR)

A osmose reversa é a principal unidade tratamento da ETL, sendo responsável por grande parte da eficiência de remoção da matéria orgânica e dos demais contaminantes presentes no lixiviado. O tratamento via osmose reversa consiste no uso de membranas semipermeáveis operadas em alta pressão para separação de duas soluções, o concentrado e o permeado (QASIM; ZHU, 2018; WISZNIOWSKI *et al.*, 2006).

Segundo Qazim e Zhu (2018), os principais parâmetros relacionados ao dimensionamento de uma osmose reversa são:

- Capacidade máxima de tratamento: 770 m³/d;
- Vazão de lixiviado bruto afluente: 500 m³/d;
- Número de unidades: 2,0;
- Taxa de recuperação de lixiviado (dados do fabricante): 65%;
- Eficiência de remoção (dados do fabricante): 95%;
- Concentração de sólidos totais dissolvidos (STD) afluente: 3.500 mg/L;

e

- Pressão de operação (dados do fabricante): 8.200 kPa.

Conforme Qazim e Zhu (2018), as principais equações relacionadas ao dimensionamento de uma osmose reversa são:

$$C_P = \frac{100\% - E}{r} \times C_{AF} \quad (116)$$

$$Q_P = \frac{r}{100\%} \times Q_{LB} \quad (117)$$

$$Q_C = Q_{LB} - Q_P \quad (118)$$

$$C_C = \frac{E}{100 - r} \times C_{AF} \quad (119)$$

$$P_W = \Delta P_a \times Q_{AF} \quad (120)$$

Em que:

C_P – Concentração de STD do permeado (mg/L);

C_{AF} – Concentração de STD afluente (mg/L);



CC – Concentração de STD do concentrado (mg/L);

E – Eficiência de remoção de STD (mg/L);

r – Taxa de recuperação (%);

Q_{LB} – Vazão de lixiviado afluente (m^3/d);

Q_C – Vazão de concentrado (m^3/d);

Q_P – Vazão de permeado (m^3/d);

P_w – Potência unitária de tratamento (m^3/d).

A unidade de osmose reversa instalada no CGIRS do CONCISSS pode ser observada na Figura 20, a seguir.

Figura 20 – Unidade de tratamento por membrana tipo osmose reversa.



4.5 Avaliação das Alternativas de Tratamento de Lixiviado pelo Método de Ponderação Simples (SAW)

O SAW é o método semiquantitativo mais comumente utilizado nos modelos de tomada de decisão de multicritérios, consistindo na atribuição de pesos às características de cada alternativa a ser avaliada para tomada de decisão (ABRAMS *et al.*, 2018).



O método de ponderação simples foi utilizado no presente estudo para utilizado como ferramenta auxiliadora no planejamento e expansão da ETL ao longo do horizonte de projeto, identificando os critérios mais relevantes que necessitarão de maior planejamento e alocação de recursos.

A aplicação do método SAW é estruturada em 3 principais etapas, sendo: normalização da matriz de decisão para possibilitar a comparação entre as alternativas, aplicação dos pesos aos atributos e a compilação dos valores para a geração dos índices de tomada de decisão (TAHERDOOST, 2023).

A normalização dos valores da matriz de dados é realizada considerando o atributo como uma característica positiva (quanto maior o valor, melhor) ou negativa (quanto menor o valor, melhor), sendo representada pelas equações 121 e 122, respectivamente (TAHERDOOST, 2023).

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{r_{ij}}{\max_{r_{ij}}^j} \quad (121)$$

Em que:

\tilde{r}_{ij} – Atributo normalizado;

r_{ij} – Elemento a ser normalizado;

$\max_{r_{ij}}$ – Maior valor observado entre os elementos de um mesmo atributo.

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{j}{\min_{r_{ij}}^j} \quad (122)$$

Em que:

\tilde{r}_{ij} – Atributo normalizado;

r_{ij} – Elemento a ser normalizado;

$\min_{r_{ij}}$ – Menor valor observado entre os elementos de um mesmo atributo.

As alternativas a serem avaliadas foram divididas em duas, sendo a alternativa 01 representando o arranjo de tratamento de lixiviado no cenário baixa carga e a



alternativa 02 correspondendo ao arranjo de tratamento de lixiviado no cenário alta carga. A composição das alternativas avaliadas são as seguintes:

- Alternativa 01: caixa de divisão e distribuição de vazão + tanque de equalização de lixiviado bruto + osmose reversa (munida de lavador de gases) + tanque de equalização de concentrado + tanque de equalização de permeado + recirculação de concentrado para a célula de rejeitos + tanque de sedimentação horizontal; e
- Alternativa 02: caixa de divisão e distribuição de vazão + tanque de equalização de lixiviado bruto + torre de arraste (*air stripping*) + coagulação-floculação-decantação + osmose reversa + tanque de equalização de concentrado + tanque de equalização de permeado + unidade de condicionamento de lodo + leito de secagem + desaguamento mecanizado por centrífuga + tanque de sedimentação horizontal.

Para a avaliação das alternativas de tratamento de lixiviado nos cenários de alta carga e baixa carga foram considerados os seguintes critérios a saber:

- Consumo de energia;
- Custo de implantação
- Complexidade operacional;
- Área de ocupação; e
- Resiliência operacional.

Para cada critério avaliado foram atribuídos níveis de relevância na concepção de uma ETL, gerando assim, os pesos que variam de 1 a 10. Os valores dos atributos de cada critério foram divididos na seguinte sequência: baixo (1), médio (2) e alto (3), sendo aplicados somente para complexidade operacional, resiliência operacional e custo de implantação. O consumo de energia elétrica das duas alternativas foi obtido multiplicando-se a potência de cada equipamento com o seu número de horas de funcionamento, a área ocupada, por sua vez, foi obtida por meio do modelo BIM no software *REVIT*.

Os valores dos pesos e dos atributos de cada critério foram obtidos por meio da aplicação de um questionário estruturado fechado, desenvolvido por meio de formulário digital (*Google Forms*), envolvendo profissionais e especialistas da área.



De posse dos dados, o valor do peso e dos atributos foi obtido por meio do cálculo das medidas de tendência central, média e moda, respectivamente.

A matriz de avaliação das alternativas de tratamento de lixiviado pode ser observada no Quadro 8.

Quadro 8 – Matriz de avaliação das alternativas de tratamento de lixiviado.

Critérios	Pesos	Alternativa 01	Alternativa 02
Consumo de energia			
Custo de implantação			
Complexidade operacional			
Área de ocupação			
Resiliência operacional			
Índice			

Após a construção da matriz de avaliação, calcula-se o índice de viabilidade das alternativas por meio da Equação 123 a seguir:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (123)$$

Em que:

P_i – Peso da observação i (-);

X_i – Valor da observação i (-);

Σ – Somatório; e

I – Índice (-).

A partir do índice gerado é possível identificar qual alternativa possui maior viabilidade, tendo em vista que quanto mais próximo de 1, mais viável será a solução proposta. Embora este índice seja utilizado como forma de seleção da melhor alternativa de tratamento e exclusão das demais, no presente trabalho este será utilizado como ferramenta auxiliadora no planejamento e expansão da ETL ao longo do horizonte de projeto.



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente tópico serão discutidos os principais resultados obtidos no estudo de alternativas de tratamento de lixiviado e as aplicações do BIM no processo de concepção destas.

5.1 Alternativa de Tratamento de Lixiviado 01 – Cenário Baixa Carga

No cenário baixa carga, tanto a vazão quanto a concentração de poluentes são reduzidas em função da menor quantidade de resíduos e conseqüentemente da menor geração de lixiviado. As principais características das unidades de tratamento da alternativa 01 obtidas no dimensionamento podem ser observadas no Quadro 9.

Quadro 9 – Principais características das unidades de tratamento da Alternativa 01.

Unidade de tratamento	Características da unidade	Parâmetros operacionais
TQELB	Nº de unidades: 2 Volume útil: 171,50 m ³ Volume total: 343,0 m ³ Inclinação do talude: 1:2 Altura útil: 1,75 m; LXB: 14,0 m X 7,0 m.	Vazão máxima: 500 m ³ /d; Vazão equalizada efluente: 420 m ³ /d; Tempo de detenção hidráulica: 0,34 d; Horas de operação: 14 h/d
OR	Número de estágios: 3,0; Nº de unidades: 2,0; Tensão: 400 V; Potência unitária OR: 33 kW Potência total do sistema: 100 kW; LXB: 12,20 m X 2,44 m.	Capacidade máxima total: 770 m ³ /d; Capacidade máxima unitária: 250 m ³ /d; Vazão de lixiviado afluente: 500 m ³ /d; Vazão de permeado: 325 m ³ /d; Vazão de concentrado: 175 m ³ /d; Pressão nominal: 25 bar a 82 bar; Eficiência de remoção STD: 50% – 80%.
TQEP/TQEC	Nº de unidades: 1,0; Volume útil: 171,50 m ³ Inclinação do talude: 1:2 Altura útil: 1,75 m; LXB: 14,0 m X 7,0 m.	Vazão máxima TQEP: 325 m ³ /d; Vazão máxima TQEC: 175 m ³ /d; Tempo de detenção hidráulica TQEP: 0,52 d; Tempo de detenção hidráulica TQEC: 0,98 d; Horas de operação: 14 h/d
TSH	Número de unidades: 2,0; LXB: 18,20 m X 8,20 m; Altura útil: 1,70 m Altura total: 3,10 m Borda livre: 0,60 m; Altura de lodo: 0,60 m.	Vazão máxima: 349,30 m ³ /d Taxa de aplicação superficial: ≤ 20 m ³ /m ² .d; Velocidade de fluxo horizontal: 0,000411 m/s; Número de Reynolds: 470,88; Tempo de detenção hidráulica: 17,36 h.

Legenda: TQELB – Tanque de equalização de lixiviado bruto; OR – Osmose reversa; TQEP – Tanque de equalização de permeado; TQEC – Tanque de equalização de concentrado; TSH – Tanque de sedimentação horizontal.



Observando-se o Quadro 9, nota-se que a alternativa 01 (cenário baixa carga) consiste predominantemente na utilização da unidade de osmose reversa para a remoção da carga de poluentes presentes no lixiviado. Esse fato está associado à menor concentração de poluentes afluente à ETL neste cenário, não sendo necessário o pré-tratamento do lixiviado.

As unidades que compõem esta etapa foram dimensionadas para a vazão do horizonte de final de plano para proporcionar maior flexibilidade e resiliência operacional. Além disso, em casos de parada parcial/total da ETL para manutenção, pode-se realizar a recirculação do lixiviado bruto para a célula de rejeitos, sem prejuízos à operação.

Os tanques de equalização de lixiviado bruto funcionam em paralelo como forma de redundância operacional para maior flexibilidade operacional e possuem capacidade de equalização de um pico de vazão de até 770 m³/d. O volume total de equalização de lixiviado bruto é de 343 m³ com um tempo de detenção hidráulica de 0,34 dias para uma vazão nominal de 500 m³/d. O efluente equalizado dos tanques é bombeado para a OR por meio de duas estações elevatórias com capacidade de bombeamento máximo de 40 m³/h. Cada estação elevatória é munida de 2 conjuntos moto-bomba tipo centrífuga na configuração 1+1, sendo 1 atuante e 1 reserva.

A unidade de tratamento por membrana é composta por 2 módulos de osmose reversa de 3 estágios, funcionando em paralelo com capacidade máxima unitária de 385 m³/d e capacidade total instalada de 770 m³/d. Cada módulo possui sua unidade de pré-tratamento (interna) composta por filtro de bolsa de 0,2 mm, pré-filtros de areia pressurizado, dosagem de anti-incrustante, e microfiltração 5 µm.

A eficiência de remoção de sólidos totais dissolvidos é de 80% com variação da pressão entre os 3 estágios de 25 bar a 82 bar (dados do fabricante). A razão de geração de permeado é de 65% da vazão afluente (325 m³/d), e a de concentrado é da ordem de 35% (175 m³/d). O permeado e o concentrado serão bombeados para os seus respectivos tanques de equalização.

O efluente tratado gerado será reutilizado para atendimento das demandas de uso não potável dentro do próprio CGIRS (lavagem de piso, supressão de poeiras, lavagem de máquinas pesadas, entre outros), diminuindo-se a quantidade de efluente



a ser lançado no corpo hídrico. A fração concentrada produzida no tratamento será recirculada para a célula de rejeitos por meio de estação elevatória.

A disposição das unidades, bem como os fluxos de vazão líquida e sólida afluente e efluente podem ser observadas na Figura 21.



A alternativa 01 de tratamento possui uma área construída de 2.693 m² e analisando-se a Figura 21, é possível observar que seu arranjo de tratamento é mais simplificado, contando somente com a unidade de osmose reversa para a remoção dos poluentes do lixiviado bruto da célula de confinamento e célula de rejeitos. A vazão máxima de lixiviado bruto afluente à ETL no cenário baixa carga é de 500 m³/d, e para este mesmo cenário a produção de efluente tratado (permeado) é de 325 m³/d e a fração sólida (concentrado) é da ordem de 175 m³/d, com taxa de recirculação de 40% (70 m³/d) para a célula de rejeitos.

A amônia remanescente no efluente tratado será removida pelo lavador de gases com meio de contato e fluxo contracorrente presente na saída da unidade de OR, com eficiência estimada de 75% de remoção. Em casos de parada temporária para manutenção da ETL, pode-se realizar o *by-pass* do lixiviado bruto para recircular 100% de sua vazão.

O tanque de sedimentação horizontal recebe apenas o lixiviado gerado pelos resíduos inertes da demolição e construção civil, tendo-se como vazão máxima de lixiviado bruto afluente de 349,30 m³/d, vazão de lixiviado tratado de 334,60 m³/d e recirculação para a célula de RDC de 14,70 m³/d de lodo sedimentado. Em virtude da composição do lixiviado de RDC ser predominantemente inerte, o efluente tratado gerado nos tanques de sedimentação horizontal será encaminhado para a drenagem natural do terreno. O efluente tratado poderá ser utilizado em casos de emergência para supressão de chamas em incêndios de pequeno a médio porte dentro do CGIRS.

5.2 Alternativa de Tratamento de Lixiviado 02 – Cenário Alta Carga

A alternativa 02 de tratamento de lixiviado corresponde a solução adotada para o cenário alta carga, onde a geração de resíduos, concentração de poluentes e a produção de lixiviado atingem o valor máximo do horizonte de projeto. As unidades que compõem esta etapa foram dimensionadas para a realizar o abatimento da carga afluente para posterior tratamento na OR, considerando a vazão máxima para proporcionar maior flexibilidade e resiliência operacional.

As principais características das unidades de tratamento da alternativa 02 obtidas no dimensionamento podem ser observadas no Quadro 10.



(Continua)

Quadro 10 – Principais características das unidades de tratamento da Alternativa 02.

Unidade de tratamento	Características da unidade	Parâmetros operacionais
TQELB	Nº de unidades: 2; Volume útil: 171,50 m ³ ; Volume total: 343,0 m ³ ; Inclinação do talude: 1:2; Altura útil: 1,75 m; LXB: 14,0 m X 7,0 m.	Vazão máxima: 500 m ³ /d; Vazão equalizada efluente: 420 m ³ /d; Tempo de detenção hidráulica: 0,34 d; Horas de operação: 14 horas/dia.
TA	Nº de unidades: 4; Nº de sopradores por torre: 2; Nº de válvulas de limpeza por torre: 1; Supressão de espumas: sim; Diâmetro: 2,30 m; Altura útil: 3,0 m; Altura total: 6,18 m.	Vazão máxima unitária: 192,50 m ³ /d; Vazão máxima total: 770 m ³ /d; Vazão de ar: 7,05 m ³ /s; Potência unitária: 11,83 kW; Potência total: 47,67 kW; Eficiência de remoção de amônia: 75%; Temperatura: 28 °C.
ME	Nº de unidades: 1 Material: aço inox AISI 304; Número de elementos: 3,0; Diâmetro nominal: 100,0 mm; Diâmetro do acesso: ¾"; Comprimento: 0,762 m.	Vazão máxima: 770 m ³ /d; Tempo de detenção hidráulica: 0,56 s; Velocidade: 1,36 m/s; Perda de carga: 0,84 m.
MHC	Nº de unidades: 1; Material: PEAD Flangeado; Diâmetro nominal: 150 mm; Comprimento: 27 m.	Vazão máxima: 770 m ³ /d; Tempo de detenção hidráulica: 39,42 s; Velocidade: 0,68 m/s; Perda de carga: 0,1 m; Gradiente: 172,94 s ⁻¹ .
FM	Nº de unidades: 1,0; Nº de câmaras: 3,0; Material: aço inox AISI 304; DN entrada/saída: 150 mm; Diâmetro do rotor: 0,85 m; LXBXH: 2,0 m X 2,0 m X 2,0 m.	Vazão máxima: 770 m ³ /d; TDH – vazão máxima: ≤ 40 min; TDH – vazão mínima: ≥ 10 min Gradiente: 70 s ⁻¹ a 10 s ⁻¹ ; Potência máx. – mín.: 33,83 W – 0,58 W; Rotação máxima: 23,34 RPM; Rotação mínima: 6,0 RPM.
DD	Nº de unidades: 2+1; Nº de calhas vertedoras: 4/unid.; Material: PPR; DN entrada/saída: 150 mm; Diâmetro: 2,40 m; Altura total: 5,30 m.	Vazão unitária máxima: 385 m ³ /d; Vazão total: 770 m ³ /d; Vazão de lodo decantado: 14,95 m ³ /d; TDH – vazão média: ≤ 3,0 h; TDH – vazão máxima: ≥ 1,0 h; Taxa de aplicação superficial: 90 m ³ /m ² .d; Taxa de escoamento no vertedor: 500 m ³ /m ² .d.
OR	Número de estágios: 3,0; Nº de unidades: 2,0; Tensão: 400 V; Potência unitária: 33 kW; Potência total do sistema: 100 kW; LXB: 12,20 m X 2,44 m.	Capacidade máxima unitária: 385 m ³ /d; Capacidade máxima total: 770 m ³ /d; Vazão de lixiviado afluente: 500 m ³ /d; Vazão de permeado: 315,3 m ³ /d; Vazão de concentrado: 169,8 m ³ /d; Pressão nominal: 25 bar a 82 bar; Eficiência de remoção: 50% – 80%.
TQEP/TQEC	Nº de unidades: 1,0; Volume útil: 171,50 m ³ ; Inclinação do talude: 1:2; Altura útil: 1,75 m; LXB: 14,0 m X 7,0 m.	Vazão máxima TQEP: 325 m ³ /d; Vazão máxima TQEC: 175 m ³ /d; Tempo de detenção hidráulica TQEP: 0,52 d; Tempo de detenção hidráulica TQEC: 0,98 d; Horas de operação: 14 h/d.



(Continuação)

Quadro 10 – Principais características das unidades de tratamento da Alternativa 02.

Unidade de tratamento	Características da unidade	Parâmetros operacionais
UCL	Nº de unidades: 3,0; Válvula de descarga: 2/unid.; Material: PPR; Volume útil: 8,2 m ³ ; Volume total: 24 m ³ ; Altura total: 2,90 m; Diâmetro: 2,00 m.	Vazão máxima: 273,98 m ³ /d; Dosagem de polímero: 4 a 8 g/kgSST; Nº de descargas: 12/dia; Gradiente: 70 a 10s ⁻¹ .
LS	Nº de unidades: 3,0; Área útil: 52,45 m ² ; LXBXH (LS): 10,24 m x 5,12 m; Altura de lodo: 0,35 m; Área total: 157,36 m ² ; LXBXH do bloco drenante: 0,30 m x 0,30 m x 0,05 m.	Vazão total de lodo afluente: 5,42 m ³ /d; Taxa de aplicação de sólidos: 8,70 kgSST/m ² ; Tempo de ciclo: 10 dias; Massa de sólidos retidos por ciclo: 1015,82 kg Teor de sólidos afluente: 2,5 %; Teor de sólidos da torta: 30%; Vazão de lodo: 0,01 m ³ /d.
DC	Nº de unidades: 2+1; LXBXH: 3,605 m x 0,975 m x 1,220 m; Peso estático: 3.000 kg; Peso dinâmico: 7.500 kg; Força G máxima: 2.325 G; Diâmetro de alimentação: 3"; Tensão: 380 V; Material: aço inox AISI 304; Potência: 40 CV	Vazão unitária máxima: 10,0 m ³ /h; Vazão total máxima: 20,0 m ³ /h; Vazão de lodo afluente: 179,33 m ³ /d; Vazão total de torta: 14,87 m ³ /d; Vazão total de clarificado: 164,47 m ³ /d; Teor de sólidos afluente: 2,5 %; Teor de sólidos da torta: 25%; Taxa de captura de sólidos: 90%; Horas de operação: 9,33 h/dia.
TSH	Número de unidades: 2,0; LXB: 18,20 m X 8,20 m; Altura útil: 1,70 m; Altura total: 3,10 m; Borda livre: 0,60 m; Altura de lodo: 0,60 m.	Vazão máxima: 349,30 m ³ /d; Taxa de aplicação superficial: ≤ 20 m ³ /m ² .d; Velocidade de fluxo horizontal: 0,000411 m/s; Número de Reynolds: 470,88; Tempo de detenção hidráulica: 17,36 h.

Legenda: TQELB – Tanque de equalização de lixiviado bruto; TA – Torre de arraste; ME – Misturador estático; MHC – Misturador hidráulico chicanado; FM – Floculador mecânico; DD – Decantador Dortmund; OR – Osmose reversa; TQEP – Tanque de equalização de permeado; TQEC – Tanque de equalização de concentrado; UCL – Unidade de condicionamento de lodo; LS – Leito de secagem; DC – Decanter centrífugo; TSH – Tanque de sedimentação horizontal.

Analisando-se o Quadro 10, é possível observar que a alternativa 02 (cenário alta carga) possui um arranjo de tratamento mais completo, sendo constituída por 11 unidades de tratamento. Em virtude da maior carga de poluentes neste cenário, realizou-se a adição do tratamento físico-químico (torre de arraste, coagulação e floculação) e da unidade de decantação para o pré-tratamento do lixiviado, atenuando a concentração de poluentes afluentes à OR.



Além disso, foram concebidas unidades de desaguamento de lodo para a minimização do volume da fase sólida que retornará à célula de rejeitos, aumentando a sua vida útil e diminuindo a geração de lixiviados.

O tanque de sedimentação horizontal, bem como os tanques de equalização de lixiviado bruto, concentrado e permeado mantiveram-se com as mesmas características da alternativa 01, tendo em vista que estes foram dimensionados para a máxima vazão da ETL.

No que diz respeito à remoção dos compostos voláteis presentes no lixiviado, a unidade de torre de arraste é composta por 4 torres em polipropileno com diâmetro de 2,30 metros, altura útil de 3,0 metros e altura total de 6,18 metros. Cada torre é munida de meio de contato (recheio) constituído por anéis de *rasching* em polipropileno, 2 inspeções de 0,6 m para acesso e manutenção das unidades e sistema de supressão de espumas e aerossóis localizados na porção superior da torre próximo à saída de ar.

Em termos de capacidade operacional, a vazão máxima unitária é de 192,50 m³/d, totalizando capacidade máxima instalada de 770 m³/d para uma eficiência de 75% na remoção de amônia. A vazão de ar unitária para o arraste dos compostos voláteis é de 7,05 m³/s e a potência unitária do soprador para injeção de ar é de 11,83 kW. Após o processo de arraste, o lixiviado segue para a unidade de coagulação (misturador estático e misturador hidráulico chicanado) e floculação (floculador mecânico) por meio de estação elevatória.

A unidade de coagulação é constituída pelo misturador estático de 3 elementos de agitação em aço inox AISI 304, com diâmetro de 100 mm, flangeado, comprimento de 0,762 metros e acesso roscável de ¾" para inserção de coagulante. A vazão máxima afluyente ao misturador estático é de 770 m³/d, com tempo de detenção hidráulica de 0,56 s, velocidade de 1,36 m/s e perda de carga de 0,84 m. O lixiviado coagulado segue para o misturador hidráulico chicanado para complementação do tempo de mistura do com o coagulante.

O misturador hidráulico tipo chicana será construído em tubo PEAD com diâmetro de 150 mm, flangeado com comprimento total de 27 metros, tendo como vazão máxima afluyente de 770 m³/d, tempo de detenção hidráulica de 36,42 s,



velocidade de 0,68 m/s e gradiente de $172,94 \text{ s}^{-1}$. Após a etapa de coagulação, o lixiviado segue para a etapa de floculação.

O floculador mecânico possui capacidade máxima tratamento de $770 \text{ m}^3/\text{d}$ de lixiviado, com tempo de detenção hidráulica ≤ 50 minutos para a vazão máxima e ≥ 10 minutos para a vazão mínima. Esta unidade é composta por 3 câmaras de agitação em aço inox AISI 304, com agitação do tipo fluxo axial e escalonamento dos seguintes gradientes: $G_1= 70 \text{ s}^{-1}$, $G_2= 35 \text{ s}^{-1}$ e $G_3= 10 \text{ s}^{-1}$. A potência máxima e mínima dos agitadores é de 33,83 W e 0,58 W, respectivamente. O dimensional da câmara de floculação em termos de comprimento, largura e altura é de 2,0 m x 2,0 x 2,0 m. O lixiviado floculado segue por gravidade para a unidade de decantação para a separação das fases.

O decantador Dortmund instalado na ETL possui diâmetro de 2,40 m na zona de decantação, altura do cilindro de 3,90 metros, altura do tronco de cone de 1,40, totalizando altura útil de 5,30 metros. Em termos de capacidade operacional, a vazão máxima unitária do decantador Dortmund é de $385 \text{ m}^3/\text{d}$, considerando 2 unidades em funcionamento e 1 reserva, resultando em um total de $770 \text{ m}^3/\text{d}$ de capacidade instalada. A taxa de aplicação superficial do decantador é de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, com tempo de detenção hidráulica ≤ 3 horas para vazão média e ≥ 1 hora para a vazão máxima. Cada decantador possui 4 calhas vertedoras para coleta do clarificado com taxa de escoamento $\leq 500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$.

Os sólidos decantados nesta unidade correspondem ao volume de $14,95 \text{ m}^3/\text{d}$, e são conduzidos mecanicamente por meio de bombas helicoidais para a unidade de condicionamento de lodo. A fração líquida segue por gravidade para a estação elevatória de clarificado, sendo posteriormente bombeada para a unidade de tratamento de membrana de osmose reversa.

A unidade de tratamento por membrana é composta por 2 módulos de osmose reversa de 3 estágios, funcionando em paralelo com capacidade unitária de $250 \text{ m}^3/\text{d}$ e capacidade total instalada de $500 \text{ m}^3/\text{d}$. Cada módulo de OR possui sua unidade de pré-tratamento composta por filtro de bolsa de 0,2 mm, pré-filtros de areia pressurizado, dosagem de anti-incrustante e microfiltração 5 μm .

A pressão de operação entre os 3 estágios da OR varia de 25 bar a 82 bar, para uma eficiência de remoção entre 50% a 80% de sólidos totais dissolvidos. A



vazão afluyente à OR é de 485 m³/d, com uma taxa de recuperação de permeado de 65% (315,3 m³/d) e geração de concentrado de 35% (169,8 m³/d). O permeado e o concentrado seguem para os seus respectivos tanques de equalização, sendo o primeiro para o reuso dentro do CGIRS e o segundo para a unidade de condicionamento para posterior desaguamento e destinação final na célula de rejeitos.

A unidade de condicionamento de lodo será composta por 3 tanques em polipropileno com volume útil unitário de aproximadamente 8,20 m³ e volume total de 24,6 m³. O sistema de homogeneização da UCL é constituído por agitadores do tipo turbina de fluxo axial, controlados por inversor de frequência para atingir gradientes de mistura entre 70 s⁻¹ a 10 s⁻¹. A vazão máxima afluyente de lodo a ser condicionado é de 184,75 m³/d, dessa forma, serão realizadas aproximadamente 12 bateladas de condicionamento de lodo por dia. Com o lodo devidamente condicionado, este segue para o desaguamento no leito de secagem e no decanter centrífugo.

A unidade de desaguamento por leito de secagem é composta por 3 leitos com área unitária de 52,45 m² e área total de 157,36 m². Em termos de capacidade, a vazão total de lodo afluyente à unidade é de 5,42 m³/d, com um teor de sólidos de 2,5%, resultando em uma taxa de aplicação de sólidos suspensos de 8,70 kgSST/m² para um tempo de ciclo de secagem de 10 dias. O meio drenante do leito de secagem é constituído por 1.740 peças de bloco drenante em polipropileno, com 12% de abertura filtrante e desenho anti-entupimento. A massa de sólidos retidos ao final do ciclo de secagem é de aproximadamente 1.015,82 kg, para um teor de sólidos final de 30%.

Cada leito de secagem possui inclinação de fundo de 1,5% em direção à 2 canaletas para coleta do líquido drenado, este, por sua vez, possui inclinação de 1,5% em direção ao coletor principal que conduz a fração líquida até a estação elevatória de clarificado para retornar ao tratamento físico-químico.

O desaguamento de lodo mecanizado da ETL é composto por 3 unidades de decanter centrífugo dispostas em paralelo e funcionando na configuração 2 +1 (atuando + reserva). A capacidade máxima unitária de processamento de lodo pré-condicionado é de 10 m³/h e a capacidade máxima total é de 20 m³/h, para um teor de sólidos afluyente de 2,5% e 9,33 horas de operação por dia.

Considerando uma taxa de captura de sólidos de 90% e teor de sólidos final de 25%, o volume de torta gerado foi de 14,87 m³/d. A torta gerada será armazenada



temporariamente em caçamba estacionária para posterior destinação na célula de rejeitos. A vazão de clarificado obtida foi de 164,5 m³/d com um teor de sólidos remanescente de 0,25%, esta fração será conduzida para a estação elevatória de clarificado para retornar ao tratamento físico-químico.

O layout da ETL na alternativa de tratamento de lixiviado 02 e o fluxo das vazões afluente e efluente às unidades pode ser observado na Figura 22.



A alternativa 02 de tratamento possui uma área construída de 4.258 m² e conta com a disposição de 11 unidades para o tratamento da fase líquida e sólida afluente à ETL, como pode ser observado na Figura 22.

O arranjo das unidades de tratamento neste cenário possui maior robustez em relação a alternativa 01, destacado principalmente pela atuação da etapa de pré-tratamento do lixiviado, que, por sua vez, é realizado pelas unidades de torre de arraste, coagulação-floculação e unidade de decantação, reduzindo em até 75% da concentração de amônia e 50% da carga de sólidos suspensos afluente à OR, minimizando a possibilidade de sobrecargas e aumentando a vida útil das membranas.

O fluxo de tratamento da alternativa 02 inicia-se com a equalização da vazão afluente de 500 m³/d de lixiviado bruto em dois tanques escavados de 171,50 m³ cada. Com o lixiviado devidamente equalizado, este é conduzido por meio de estação elevatória para 4 unidades de torre de arraste com capacidade unitária máxima de 192,5 m³/d para a dessorção de compostos voláteis presentes no lixiviado. Nesta etapa, estima-se a remoção de 75% da amônia presente no lixiviado, considerando uma concentração de entrada de 100 mg/L de N-NH₃.

Finalizado o processo de arraste, o lixiviado segue através de estação elevatória para a unidade de coagulação (misturador estático e misturador hidráulico chicanado) e para a unidade de floculação mecanizada para realizar a desestabilização da partícula coloidal e a agregação destas em focos, respectivamente. O lixiviado floculado segue por gravidade para o decantador Dortmund para a separação das fases, gerando 485 m³/d de clarificado e 14,95 m³/d de lodo decantado.

A vazão de 485 m³/d de lixiviado clarificado do decantador segue por meio de estação elevatória para duas unidades de OR para remoção dos poluentes remanescentes no efluente, e o volume de 14,95 m³/d segue para a unidade de condicionamento de lodo para posterior desaguamento.

A geração de permeado e concentrado na unidade de OR foi da ordem de 315,3 m³/d e 169,3 m³, respectivamente, sendo encaminhados para os tanques de equalização correspondentes. O permeado produzido será utilizado para reuso no CGIRS para finalidades de uso não potáveis, enquanto o concentrado será conduzido



via estação elevatória até a unidade de condicionamento de lodo para o seu subsequente desaguamento.

A unidade de condicionamento de lodo recebe uma vazão total de 184,25 m³/d, que serão processados em 12 bateladas ao longo de 9,33 horas de operação por dia. Com o lodo devidamente condicionado, 179,33 m³/d seguem para a unidade de desaguamento mecanizado e 5,42 m³/d é destinado para desaguamento no leito de secagem. A vazão de clarificado e de torta de lodo obtido nesses dois processos de desaguamento é de 169,91 m³/d e 14,88 m³/d. A fração clarificada retornará para a etapa de coagulação e floculação para a remoção dos sólidos remanescentes e a torta de lodo será destinada para aterramento na célula de rejeitos.

Em caso de sobrecarga hidráulica ou parada parcial/total de alguma unidade de tratamento da alternativa 02, pode-se realizar o by-pass do lixiviado bruto, retornando-o para a célula de rejeitos até que a operação da ETL seja reestabelecida.

5.3 Matriz de Avaliação das Alternativas de Tratamento de Lixiviado

O índice de viabilidade gerado pela matriz de avaliação das alternativas de tratamento de lixiviado foi desenvolvido de maneira a auxiliar no planejamento e expansão da ETL no cenário alta carga, proporcionando uma visão geral das duas alternativas de tratamento. O resultado da matriz de avaliação das alternativas de tratamento de lixiviado no cenário alta carga e baixa carga obtida pela aplicação do método SAW, pode ser observado no Quadro 11.

Quadro 11 – Matriz de avaliação de dados da alternativa de tratamento 01 e 02 pelo método SAW.

Crítérios	Pesos	Alternativa 01*	Alternativa 02*
Consumo de energia (kWh/dia)	8,00	1,00	0,77
Custo de implantação	8,67	1,00	0,67
Complexidade operacional	8,00	1,00	0,67
Área de ocupação (m ²)	7,67	1,00	0,63
Resiliência operacional	7,00	0,67	1,00
Índice		0,94	0,74



Analisando-se o Quadro 11, foi possível observar que a alternativa de tratamento 01 (0,94) possui maior viabilidade em relação a alternativa 02 (0,74), sendo diretamente influenciada por 3 critérios, que são: o custo de implantação, consumo de energia e área ocupada. A alternativa 01 por ser uma solução para o horizonte de início de plano, possui os melhores valores para estes 3 critérios, além disso o peso dos dois primeiros atributos são os maiores do rol, maximizando o seu índice.

O peso relativo à área ocupada é de 7,67, sendo inferior ao do custo de implantação 8,67 e consumo de energia elétrica 8,00, no entanto, a área ocupada pela alternativa 01 é 1,58 vezes menor em relação a alternativa 02, sobressaindo-se também neste quesito.

Embora a alternativa 02 tenha apresentado menor índice de viabilidade de implantação em relação a alternativa 01, a diferença entre os índices foi de 0,20 pontos. Além disso, no cenário alta carga a alternativa 01 não apresentaria o desempenho necessário para garantir o atendimento aos padrões de reuso e lançamento de efluentes. Com o avanço do horizonte de projeto a expansão da ETL para a alternativa 02 é inevitável, principalmente em função da robustez e resiliência operacional proporcionada por este arranjo de tratamento no cenário em que a carga de poluentes será a máxima.

Dessa forma, é possível concluir por meio do índice de viabilidade que o custo de implantação, área ocupada e consumo de energia elétrica são os critérios que necessitarão de maior nível de planejamento e alocação de recursos na expansão da ETL para o cenário alta carga. É importante salientar que esta análise atua de maneira complementar às análises mais profundas, realizadas na etapa de orçamento executivo.

5.4 Aplicação do Conceito BIM na Concepção das Alternativas de Tratamento 01 e 02.

Com a aplicação do conceito BIM no presente trabalho, foi possível obter a modelagem das soluções propostas, a extração das informações presentes no modelo (quantitativos de peças e acessórios, materiais, áreas, entre outros) e a identificação e resolução de inconsistências dentro modelo, resultando em uma maior precisão sob



os dados que subsidiam as demais etapas do projeto, como o orçamento e a especificação técnica. Os resultados obtidos na modelagem das alternativas de tratamento de lixiviado podem ser observadas nos tópicos a seguir.

5.4.1 Quantitativo das Alternativas de Tratamento de Lixiviado 01 e 02

No presente tópico serão discutidos os principais resultados obtidos na quantificação das conexões, tubulações, materiais, equipamentos hidráulicos e unidades de tratamento das alternativas de tratamento 01 e 02.

Os principais quantitativos obtidos quanto ao sistema hidráulico da ETL para a alternativa 01 de tratamento, pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 – Quantitativo das tubulações e conexões hidráulicas da alternativa de tratamento de lixiviado 01.

<Quantitativo de Conexões Hidráulicas - Alternativa 01>			
A	B	C	
Descrição	Tamanho	Quantidade	
CONJUNTO DE PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS, EM AÇO, GALVANIZADO A FOGO, CONFORME NBR 7675, PARA FLANGE PN10	80 mmø-80 mmø	97	
CONJUNTO DE PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS, EM AÇO, GALVANIZADO A FOGO, CONFORME NBR 7675, PARA FLANGE PN10	150 mmø-150 mmø	94	
CONJUNTO DE PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS, EM AÇO, GALVANIZADO A FOGO, CONFORME NBR 7675, PARA FLANGE PN10	200 mmø-200 mmø	65	
Curva de 45° com bolsas com junta JGS, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	200 mmø-200 mmø	6	
Curva de 45° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	80 mmø-80 mmø	6	
Curva de 45° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mmø-150 mmø	3	
Curva de 90° com bolsas com junta JGS, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	200 mmø-200 mmø	6	
Curva de 90° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	80 mmø-80 mmø	14	
Curva de 90° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mmø-150 mmø	23	
Curva de 90° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	200 mmø-200 mmø	4	
Flange	80 mmø-80 mmø	2	
Flange	150 mmø-150 mmø	12	
Flange	200 mmø-200 mmø	2	
Redução concêntrica com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mmø-80 mmø	3	
Tê com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	80 mmø-80 mmø-80 mmø	1	
Tê com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mmø-150 mmø-80 mmø	3	
Tê com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mmø-150 mmø-150 mmø	5	
Tê com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	200 mmø-200 mmø-200 mmø	8	

<Quantitativo de Tubulações - Alternativa 01>			
A	B	C	D
Descrição	Material	Diâmetro	Comprimento (m)
TUBO K7, COM FLANGES PN10 NORMA NBR15420 PARA O TRANSPORTE DE ESGOTO OU ÁGUA DE REÚSO	Ferro Fundido Nodular com Pintura Epoxy Vermelha	80,0 mm	41,57
TUBO K7, COM FLANGES PN10 NORMA NBR15420 PARA O TRANSPORTE DE ESGOTO OU ÁGUA DE REÚSO	Ferro Fundido Nodular com Pintura Epoxy Vermelha	150,0 mm	127,95
TUBO K7, COM FLANGES PN10 NORMA NBR15420 PARA O TRANSPORTE DE ESGOTO OU ÁGUA DE REÚSO	Ferro Fundido Nodular com Pintura Epoxy Vermelha	200,0 mm	154,83
TUBO K7, PONTA E BOLSA, JUNTA JGS, NORMA NBR15420, PARA O TRANSPORTE DE ESGOTO OU ÁGUA DE REÚSO	Ferro Fundido Nodular com Pintura Epoxy Vermelha	200,0 mm	26,47

<Quantitativo de Tubos de Drenagem>		
A	B	C
Descrição	Diâmetro	Contagem
Tubo de concreto armado de seção circular para transporte de águas pluviais e esgoto sanitário, DN= 800 mm; H= 1,0 m; NBR 8890/2008.	800,00 mm	40



Analisando-se a Figura 23, é possível observar que para a alternativa de tratamento de lixiviado 01 foram listadas 82 peças hidráulicas com diâmetro nominal entre 80 mm e 200 mm para tubulações com conexão ponta e bolsa e flange e flange, 257 unidades de porcas, parafusos e arruelas, 19 unidades de flanges, comprimento total de tubulação para estes mesmos diâmetros foi de 350,82 m e 40 unidades de tubo de concreto para drenagem de 800 mm de diâmetro. Ainda na Figura 23, podemos observar que há a descrição do material, pressão nominal e a norma de construção de cada conexão e tubulação listada.

O quantitativo das unidades de tratamento, equipamentos hidráulicos e válvulas especiais da alternativa 01 de tratamento, pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 – Quantitativo das unidades de tratamento, equipamentos hidráulicos e válvulas especiais da alternativa de tratamento 01.

<Unidades de Tratamento de Lixiviado - Alternativa 01>		
A	B	
Descrição	Contagem	
Lavador de gases em PEAD com meio de contato para remoção de compostos voláteis - Q _{máx} = 500 m ³ /d, DN= 0,45 m, H=5,30 m.	1	
Tanque de equalização escavado com seção trapezoidal e impermeabilização em geomembrana de PEAD 1,5 mm - Q= 385 m ³ /d, V= 171 m ³ , H= 1,75 m, L= 14,0 m, B= 7,0 m	4	
Tanque de sedimentação horizontal escavado com seção trapezoidal e impermeabilização em geomembrana de PEAD 1,5 mm - LXBXH=18,20 X 8,20 X 1,70 m, Q= 349,30 m ³ /d.	2	
Unidade de osmose reversa de 3 estágios - Q _{máx} = 385 m ³ /d, P= 100 kW, 230/400V, PN= 25 - 50 bar.	2	

<Quantitativo de Equipamentos Hidráulicos - Alternativa 01>		
A	B	C
Descrição	Modelo	Contagem
Bomba helicoidal Nemo NM045BY - Q _{máx} = 20 m ³ /h, P= 2,2 kW, PN= 24 bar.	NM045BY	2
Conjunto moto-bomba centrífuga horizontal em aço inox AISI 316, P=2,2 kW, 220/380V, 60Hz - Q _{máx} = 108 m ³ /h	ESHF 80-160/22A/P46PSNA	6
Medidor de vazão eletromagnético flange-flange - Q _{máx} = 80 L/s, Q _{min} = 0,24 L/s, DN= 150 mm, Precisão= +_ 0,15%, 24V, P=0,09 kW.	FT-3000	2
Medidor de vazão para canal aberto tipo Calha Parshall em (PRFV). W= 3"; Q _{máx} = 193,68 m ³ /h; Q _{min} = 2,88 m ³ /h.	SANE-W3	1
Sensor de nível ultrassônico compacto com proteção IP68 - DN= 2", Range= 0,25 - 5,0 m, Precisão= +_ 0,2%.	SGP-380-4	5
Tanque de armazenamento de produtos químicos em polipropileno com válvula de segurança - D= 1,62 m, H= 2,307 m.	TPQ-D1620-H2307	2

<Quantitativo de Válvulas - Alternativa 01>		
A	B	C
Descrição	Tamanho	Quantidade
Válvula de gaveta com cunha de borracha, junta flangeada PN 10, corpo longo e volante - Euro 21	80 mmø-80 mmø	12
Válvula de gaveta com cunha de borracha, junta flangeada PN 10, corpo longo e volante - Euro 21	150 mmø-150 mmø	12
Válvula de gaveta com cunha de borracha, junta flangeada PN 10, corpo longo e volante - Euro 21	200 mmø-200 mmø	18
Válvula de retenção em ferro fundido, PN 10, NBR 15420 para transporte de esgoto ou água de reuso, flange-flange.	80 mmø-80 mmø	14



Conforme ilustrado na Figura 24, verifica-se que no modelo gerado para a alternativa 01 de tratamento de lixiviado foram listadas 4 unidades de tratamento com a sua descrição (dimensões, capacidade de tratamento, material e potência) e contagem, sendo: 2 tanques de equalização de lixiviado bruto, 1 lavador de gases, 2 unidades de osmose reversa, 1 tanque de equalização de permeado, 1 tanque de equalização de concentrado e 2 tanques de sedimentação de fluxo horizontal, gerando-se um montante de 9 elementos deste arranjo.

Na Figura 24, temos também a quantificação dos equipamentos hidráulicos de armazenamento, bombeamento, medição de nível e medição de vazão com sua descrição (capacidade, precisão, potência, material e modelo) e contagem, constituídas por: 2 unidades de bomba helicoidal, 6 conjuntos moto-bomba centrífuga, 2 medidores de vazão eletromagnético, 5 sensores de nível ultrassônico, 1 tanque de armazenamento de produto químico e 1 Calha Parshall. Adicionalmente, temos a listagem das válvulas de gaveta e válvulas de retenção que totalizam 56 unidades para diâmetros que variam de 80 mm a 200 mm.

O quantitativo gerado da ETL no modelo da alternativa 02 de tratamento foi consideravelmente superior em relação à alternativa 01, em virtude do maior número de unidades e maior complexidade relacionada ao seu arranjo de tratamento.

A listagem das tubulações e conexões da alternativa 02 de tratamento com a descrição e quantificação dos itens pode ser observado na Figura 25.



Figura 25 – Quantitativo das tubulações e conexões hidráulicas da alternativa de tratamento de lixiviado 02.

<Quantitativo de Conexões Hidráulicas - Alternativa 02>			
A	B	C	
Descrição	Tamanho	Quantidade	
CONJUNTO DE PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS, EM AÇO, GALVANIZADO A FOGO, CONFORME NBR 7675, PARA FLANGE PN10	80 mm-80 mm	305	
CONJUNTO DE PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS, EM AÇO, GALVANIZADO A FOGO, CONFORME NBR 7675, PARA FLANGE PN10	100 mm-100 mm	115	
CONJUNTO DE PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS, EM AÇO, GALVANIZADO A FOGO, CONFORME NBR 7675, PARA FLANGE PN10	150 mm-150 mm	322	
CONJUNTO DE PORCAS, PARAFUSOS E ARRUELAS, EM AÇO, GALVANIZADO A FOGO, CONFORME NBR 7675, PARA FLANGE PN10	200 mm-200 mm	65	
Curva de 45° com bolsas com junta JGS, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	200 mm-200 mm	6	
Curva de 45° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	80 mm-80 mm	8	
Curva de 45° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mm-150 mm	3	
Curva de 90° com bolsas com junta JGS, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	200 mm-200 mm	6	
Curva de 90° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	80 mm-80 mm	56	
Curva de 90° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	100 mm-100 mm	20	
Curva de 90° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mm-150 mm	89	
Curva de 90° com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme norma NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	200 mm-200 mm	4	
Flange	80 mm-80 mm	15	
Flange	100 mm-100 mm	6	
Flange	150 mm-150 mm	24	
Flange	200 mm-200 mm	2	
Redução concêntrica com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	100 mm-80 mm	8	
Redução concêntrica com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mm-80 mm	1	
Redução concêntrica com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mm-100 mm	9	
Tê com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	80 mm-80 mm-80 mm	19	
Tê com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	100 mm-100 mm-100 m	2	
Tê com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mm-150 mm-80 mm	3	
Tê com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mm-150 mm-100 m	4	
Tê com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	150 mm-150 mm-150 m	15	
Tê com flanges PN 10, em ferro fundido dúctil, conforme normas NBR 15420, ISO 7186 e EN 598, para transporte de esgoto e água de reúso	200 mm-200 mm-200 m	8	

<Quantitativo de Tubulações - Alternativa 02>			
A	B	C	D
Descrição	Material	Diâmetro	Comprimento (m)
TUBO K7, COM FLANGES PN10 NORMA NBR15420 PARA O TRANSPORTE DE ESGOTO OU ÁGUA DE REÚSO	Ferro Fundido Nodular com Pintura Epoxy Vermelha	80,0 mm	104,84
TUBO K7, COM FLANGES PN10 NORMA NBR15420 PARA O TRANSPORTE DE ESGOTO OU ÁGUA DE REÚSO	Ferro Fundido Nodular com Pintura Epoxy Vermelha	100,0 mm	40,07
TUBO K7, COM FLANGES PN10 NORMA NBR15420 PARA O TRANSPORTE DE ESGOTO OU ÁGUA DE REÚSO	Ferro Fundido Nodular com Pintura Epoxy Vermelha	150,0 mm	301,73
TUBO K7, COM FLANGES PN10 NORMA NBR15420 PARA O TRANSPORTE DE ESGOTO OU ÁGUA DE REÚSO	Ferro Fundido Nodular com Pintura Epoxy Vermelha	200,0 mm	154,83
TUBO K7, PONTA E BOLSA, JUNTA JGS, NORMA NBR15420, PARA O TRANSPORTE DE ESGOTO OU ÁGUA DE REÚSO	Ferro Fundido Nodular com Pintura Epoxy Vermelha	200,0 mm	26,47

<Quantitativo de Tubos de Drenagem>		
A	B	C
Descrição	Diâmetro	Contagem
Tubo de concreto armado de seção circular para transporte de águas pluviais e esgoto sanitário, DN= 800 mm; H= 1,0 m; NBR 8890/2008.	800,00 mm	40

Conforme apresentado na Figura 25, é possível observar que para a alternativa de tratamento de lixiviado 02 foram listadas 261 peças hidráulicas com diâmetro nominal entre 80 mm e 200 mm para tubulações com conexão ponta e bolsa e flange e flange, 807 unidades de porcas, parafusos e arruelas, 47 unidades de flanges, comprimento total de tubulação para estes mesmos diâmetros foi de 626,67 m e 40 unidades de tubo de concreto para drenagem de 800 mm de diâmetro.

Analisando-se o quantitativo gerado das conexões hidráulicas e tubulações para as duas alternativas de tratamento, observa-se um aumento de 757 itens de conexões hidráulicas e um acréscimo de 275,55 metros de tubulação na alternativa de tratamento 02 em relação a alternativa 01, correspondendo em termos percentuais a um incremento de 211,45% e 78,35% respectivamente.



No que diz respeito ao quantitativo gerado das unidades de tratamento, equipamentos hidráulicos e válvulas especiais alternativa 02, a Figura 26 ilustra o resultado obtido na modelagem.

Figura 26 – Quantitativo das unidades de tratamento, equipamentos hidráulicos e válvulas especiais da alternativa de tratamento 02.

<Unidades de Tratamento de Lixiviado - Alternativa 02>		
A	B	
Descrição	Contagem	
Decantador Dortmund em polipropileno reforçado - Q= 385 m³/d, D= 2,40 m, H= 5,30 m.	3	
Floculador mecânico tipo turbina de fluxo axial em aço inox AISI 316, LXBXH= 6,15 m X 2,10 m X 2,40 m, 3 câmaras de agitação, Pmáx= 33,83 W, Q= 770 m³/d.	1	
Leito de secagem coberto com lona encerada transparente e meio drenante em bloco de polipropileno - A= 51,89, Qmáx= 5,42 m³/d.	3	
Misturador estático em aço inox 316 - DN= 100 mm, N° de elementos= 3,0, L= 0,762 m.	3	
Misturador hidráulico chicanado em polietileno de alta densidade - Q= 120 m³/h, LXBXH= 4,70 X 0,83 m X 1,25 m, DN= 150 mm	1	
Tanque de equalização escavado com secção trapezoidal e impermeabilização em geomembrana de PEAD 1,5 mm - Q= 385 m³/d, V= 171 m³, H= 1,75 m, L= 14,0 m, B= 7,0 m	4	
Tanque de homogeneização de lodo em polipropileno reforçado com agitador mecânico tipo turbina de fluxo axial - Pmáx= 38,37 W, D= 2,0 m X H= 2,90 m.	3	
Tanque de sedimentação horizontal escavado com secção trapezoidal e impermeabilização em geomembrana de PEAD 1,5 mm - LXBXH=18,20 X 8,20 X 1,70 m, Q= 349,30 m³/d.	2	
Torre de arraste em polipropileno reforçado - Qmáx= 192,5 m³/d, D= 2,30 m, H= 6,18 m	4	
Unidade de desaguamento de lodo mecanizado tipo decanter centrífugo - Q= 10,0 m³/h, P= 40 Cv, 380V.	3	
Unidade de osmose reversa de 3 estágios - Qmáx= 385 m³/d, P= 100 kW, 230/400V, PN= 25 - 50 bar.	2	

<Quantitativo de Equipamentos Hidráulicos - Alternativa 02>		
A	B	C
Descrição	Modelo	Contagem
Bomba dosadora de diafragma vario D básica (VAMD) - Qmáx= 50L/h, PN= 10 bar.	VMAD12042PVT070S000	4
Bomba dosadora helicoidal Nemo NM008 - Qmáx= 25 L/h, P= 0,12kW, PN= 12bar.	NM008	4
Bomba helicoidal Nemo NM045BY - Qmáx= 20 m³/h, P= 2,2 kW, PN= 24 bar.	NM045BY	8
Conjunto moto-bomba submersível para efluente - P= 1,6 kW, DN= 80 mm, Qmáx= 12,0 m³/h, Hman= 7,0 m.	NP 3085 MT 3 - Adaptive 463	10
Conjunto moto-bomba submersível para efluente - P= 2,2 kW, DN= 150 mm, Qmáx= 40,0 m³/h, Hman= 7,0 m.	NP 3085 MT 3 - Adaptive 463	4
Conjunto moto-bomba centrífuga horizontal em aço inox AISI 316, P=2,2 kW, 220/380V, 60Hz - Qmáx= 108 m³/h	ESHF 80-160/22A/P46PSNA	6
Medidor de vazão eletromagnético flange-flange - Qmáx= 80 L/s, Qmin= 0,24 L/s, DN= 80 mm, Precisão= +_ 0,15%, 24V, P=0,09 kW.	FT-3000	7
Medidor de vazão eletromagnético flange-flange - Qmáx= 80 L/s, Qmin= 0,24 L/s, DN= 150 mm, Precisão= +_ 0,15%, 24V, P=0,09 kW.	FT-3000	3
Medidor de vazão para canal aberto tipo Calha Parshall em (PRFV). W= 3"; Qmáx= 193,68 m³/h; Qmin= 2,88 m³/h.	SANE-W3	1
Sensor de nível ultrassônico compacto com proteção IP68 - DN= 2", Range= 0,25 - 5,0 m, Precisão= +_ 0,2%.	SGP-380-4	11
Soprador centrífugo de alta pressão - Q= 3,5 m³/s, P=6,0 kW, DN= 200 mm	SAP-P6-200	8
Tanque de armazenamento de produtos químicos em polipropileno com válvula de segurança - D= 1,62 m, H= 2,307 m.	TPQ-D1620-H2307	4
Tanque de preparo de polímero em polipropileno reforçado e agitador tipo turbina de fluxo axial - DXH= 1,25 m X 1,76 m, P= 2,0 Cv.	TPP-D1250-H1760-P2	4

<Quantitativo de Válvulas - Alternativa 02>		
A	B	C
Descrição	Tamanho	Quantidade
VÁLVULA BORBOLETA BIEXCENTRICA COM FLANGES PN10, ACIONAMENTO POR VOLANTE E COM MECANISMO DE REDUÇÃO TIPO C	150 mmø-150 mmø	3
Válvula de gaveta com cunha de borracha, junta flangeada PN 10, corpo longo e volante - Euro 21	80 mmø-80 mmø	34
Válvula de gaveta com cunha de borracha, junta flangeada PN 10, corpo longo e volante - Euro 21	100 mmø-100 mmø	13
Válvula de gaveta com cunha de borracha, junta flangeada PN 10, corpo longo e volante - Euro 21	150 mmø-150 mmø	39
Válvula de gaveta com cunha de borracha, junta flangeada PN 10, corpo longo e volante - Euro 21	200 mmø-200 mmø	18
Válvula de retenção em ferro fundido, PN 10, NBR 15420 para transporte de esgoto ou água de reuso, flange-flange.	80 mmø-80 mmø	18

Como demonstrado na Figura 26, observa-se que na alternativa 02 de tratamento de lixiviado foram listadas 11 unidades de tratamento com a sua descrição (dimensões, capacidade de tratamento, material e potência) e contagem, sendo: 2 tanques de equalização de lixiviado bruto, 1 tanque de equalização de concentrado, 1



tanque de equalização de permeado, 2 unidades de osmose reversa, 3 decantadores Dortmund, 1 floculador mecânico, 3 leitos de secagem, 3 unidades de misturador estático, 1 misturador hidráulico chicanado, 3 tanques de condicionamento e homogeneização de lodo, 4 torres de arraste, 3 unidades de decanter centrífugo e 2 tanques de sedimentação de fluxo horizontal, totalizando 29 elementos deste arranjo.

Comparando-se o quantitativo gerado das alternativas de tratamento, nota-se que houve um aumento de 7 unidades e 20 elementos na alternativa 02 em relação a alternativa 01, correspondendo a um incremento percentual de 222,22%.

Ainda na Figura 26, foram listados 13 equipamentos hidráulicos da alternativa 02, constituídos por: 4 bombas dosadoras de diafragma, 4 bombas dosadoras tipo helicoidal, 8 bombas tipo helicoidal para transporte de lodo, 14 conjuntos moto-bomba submersíveis, 6 conjunto moto-bomba centrífuga horizontal, 1 Calha Parshall, 11 sensores de nível ultrassônico, 10 medidores de vazão eletromagnético, 8 sopradores centrífugo, 4 tanques de armazenamento de produto químico 4 tanques de preparo de polímero, totalizando 74 elementos e representando um aumento de 311,11% em relação a alternativa 01. Além disso, temos a listagem das válvulas de gaveta, válvula borboleta e válvulas de retenção que totalizam 125 unidades para diâmetros que variam de 80 mm a 200 mm, evidenciando um aumento percentual de 123,21% comparação com a alternativa 01.

De modo geral, o quantitativo da alternativa de tratamento 02 apresentou um aumento superior a 100% na maioria dos itens analisados, exceto nas tubulações. Esse incremento está atrelado à fase a que esta alternativa de tratamento pertence (alta carga), o que implica em uma maior demanda de unidades de tratamento e, conseqüentemente, uma maior estrutura e recursos mais expressivos para garantir o seu funcionamento.

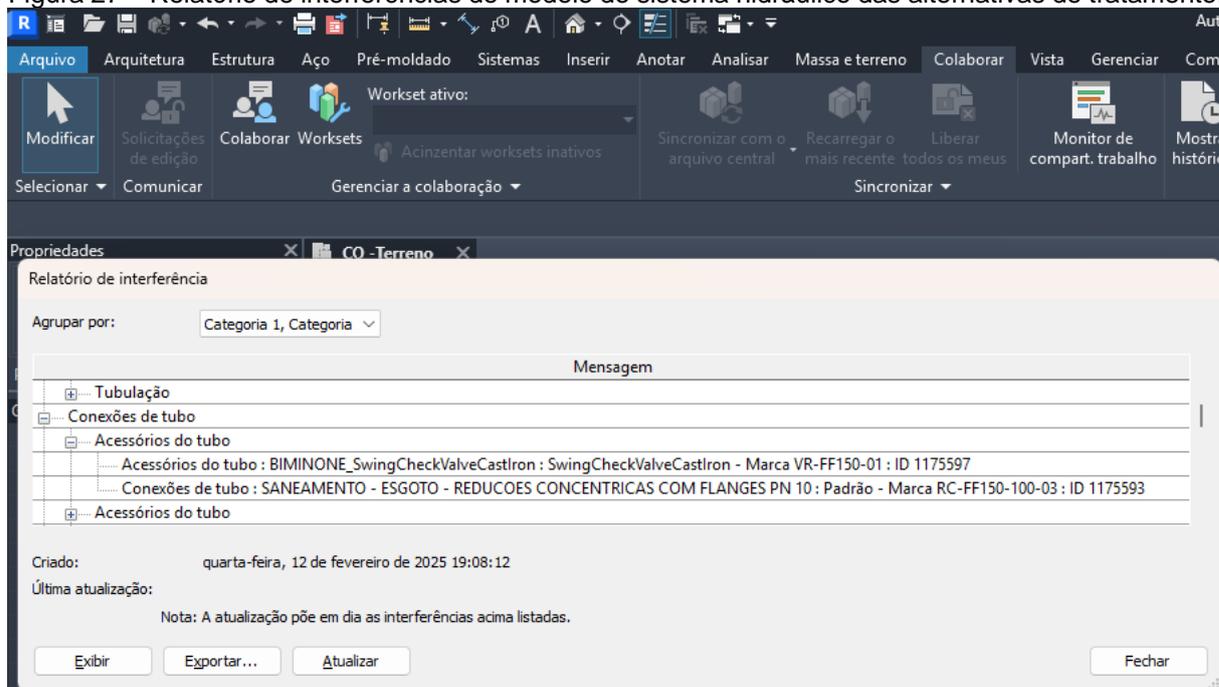
5.4.2 Identificação e Correção das Inconsistências do Modelo das Alternativas de Tratamento de Lixiviado 01 e 02

A verificação das inconsistências na modelagem das alternativas de tratamento teve como foco o sistema hidráulico do modelo, mapeando as interferências entre



tubos, conexões e acessórios hidráulicos. O relatório de interferências obtido pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 – Relatório de interferências do modelo do sistema hidráulico das alternativas de tratamento.



Conforme ilustrado na Figura 27, o relatório de interferência obtido identifica quais são os dois ou mais elementos que estão causando interferência entre si, exibindo no modelo o local da interferência para a sua resolução. Além disso, para que se tenha um controle sobre as retificações realizadas, os relatórios anteriores ficam disponíveis para consulta dentro do modelo.

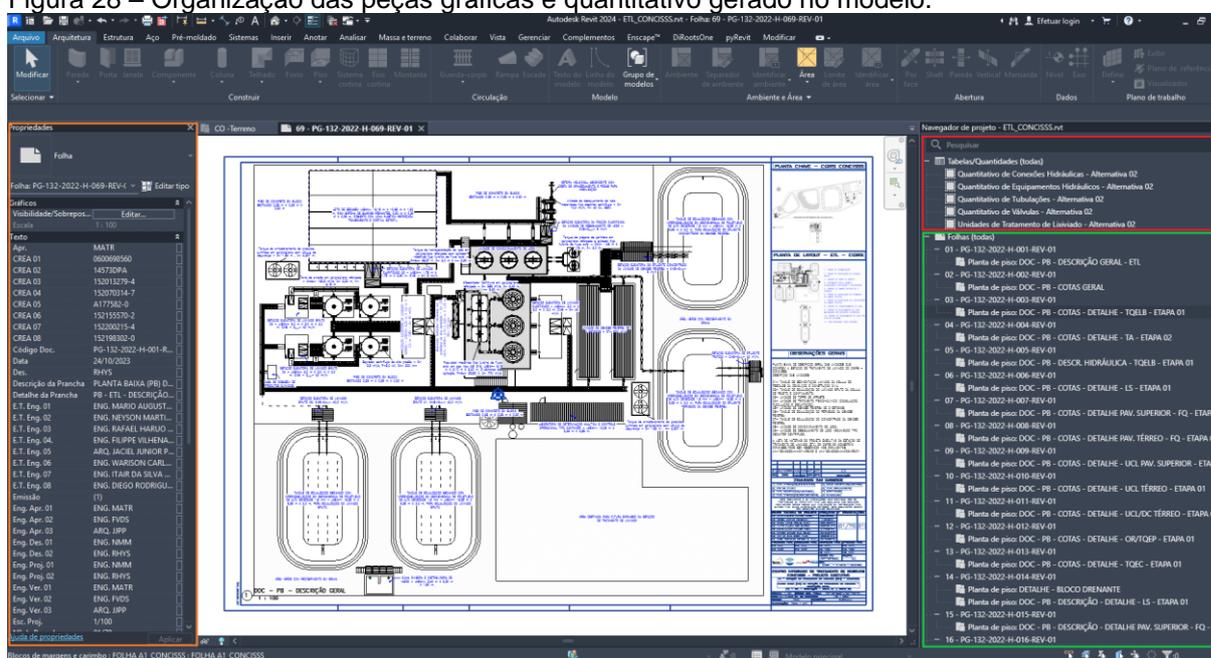
Analisando-se o modelo da alternativa 01 e 02 foram identificadas e corrigidas 64 interferências no sistema hidráulico. A retificação realizada consistiu no reposicionamento de tubulações, ajuste nas conexões e substituição de alguns acessórios hidráulicos, mantendo o desempenho e a integridade do modelo.



5.4.3 Resultado da Modelagem da Alternativa 01 e Alternativa 02 de Tratamento de Lixiviado

A modelagem das alternativas de tratamento de lixiviado resultou em um montante de 70 peças gráficas (planta baixa, cortes e vistas), 10 tabelas de quantitativo e 8 imagens 3D renderizadas. A organização das peças gráficas geradas pode ser observada na Figura 28.

Figura 28 – Organização das peças gráficas e quantitativo gerado no modelo.



Como demonstrado na Figura 28, os quantitativos (linha vermelha) e as peças gráficas geradas (linha verde) ficam organizadas no modelo na forma de lista, podendo ser acessados posicionando o cursor sobre item e realizando a seleção em dois cliques para a sua visualização no centro da tela. Todas as 70 peças gráficas geradas no modelo foram desenvolvidas e detalhadas a nível de documentação em tamanho A1, tendo as suas propriedades (linha laranja) descritas ao lado esquerdo na forma de lista.

Como resultado da modelagem, foram geradas 8 imagens 3D renderizadas, sendo 4 imagens da alternativa 01 e 4 imagens da alternativa 02, podendo ser observadas na Figura 29 e Figura 30, respectivamente.



Figura 29 – Vistas 3D da ETL para a alternativa de tratamento de lixiviado 01.

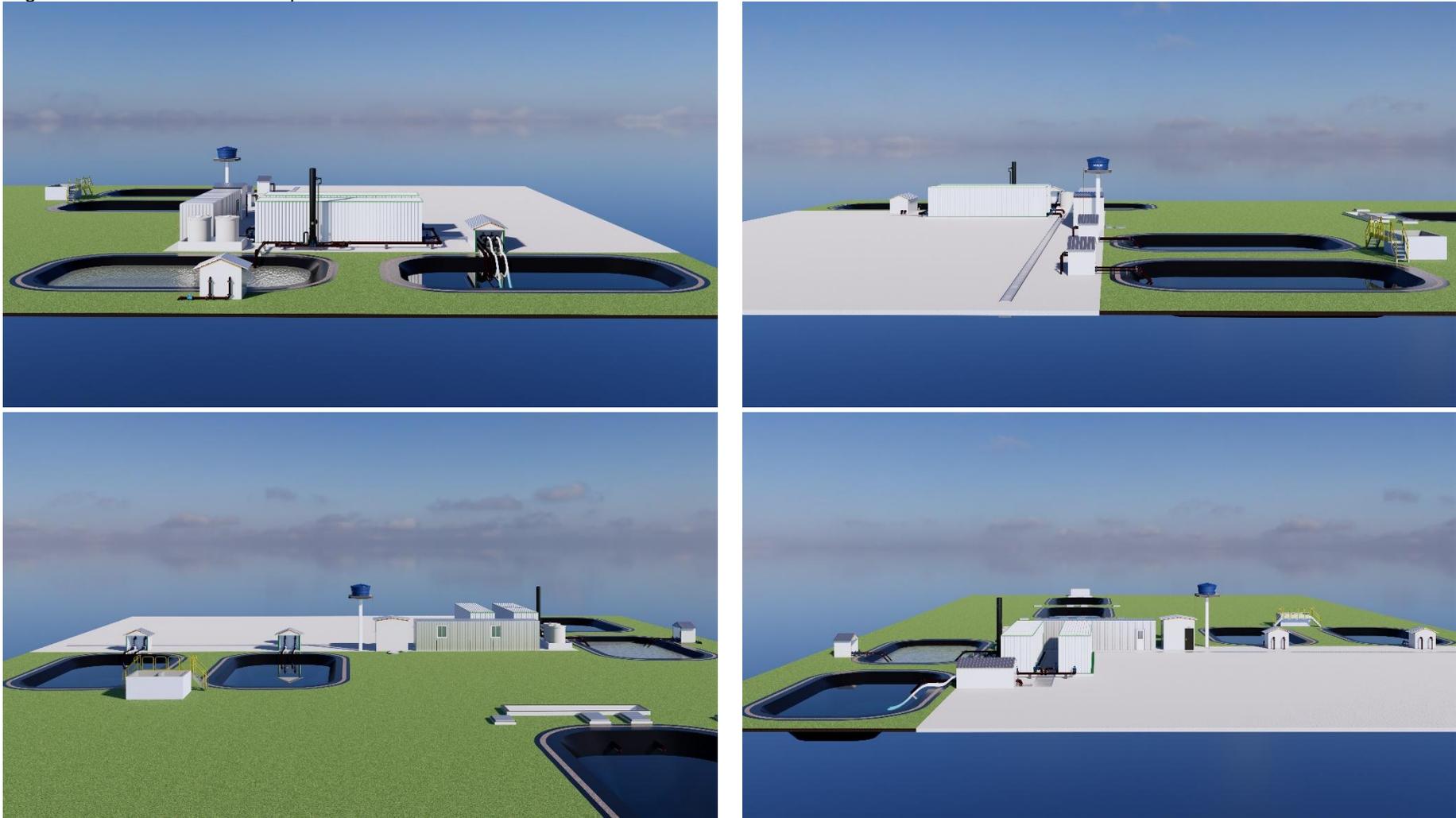
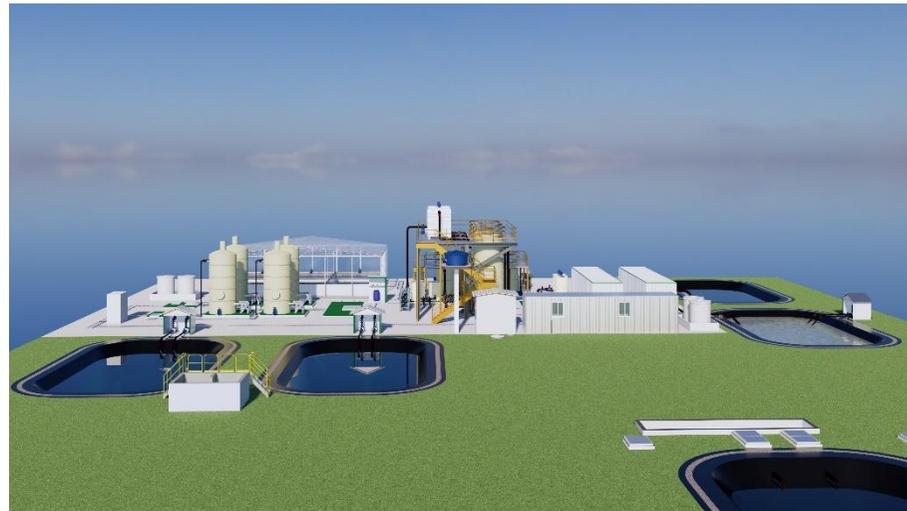




Figura 30 – Vistas 3D da ETL para a alternativa de tratamento de lixiviado 02.





5.5 Padrões de Lançamento de Lixiviado no Estado do Pará e em Diferentes Países do Mundo

No Estado do Pará, o lançamento do lixiviado tratado assim como o seu tratamento são etapas que representam um grande desafio ao setor público-privado, mobilizando esforços e gerando grandes discussões acerca desta temática. O enrijecimento das resoluções e normativas que regulamentam o lançamento de efluentes contribui significativamente com a manutenção deste cenário.

No Pará, a generalização do uso do padrão de lançamento da Resolução CONAMA 430/2011 de efluente tratado de esgoto sanitário/industrial para o lixiviado tratado, bem como a ausência de Resoluções estaduais específicas para lixiviado de RSU evidencia a deficiência existente em sua regulamentação. Além disso, com o cumprimento do calendário de fechamento de lixões e aterros controlados definido pela política nacional de resíduos sólidos, estima-se que haja um crescimento no número de lançamentos de lixiviado tratado ao longo dos próximos anos, ratificando a necessidade de atualização ou criação de uma nova resolução.

Países da Europa, Ásia e América já possuem normas específicas para o lançamento de lixiviado tratado, apresentando níveis de diferenciação entre os valores máximos permitidos para os diferentes tipos lixiviados tratados gerados por diferentes tipos de aterros sanitários. Dessa forma, realizou-se a comparação entre os padrões de lançamento de lixiviado tratado utilizado no Estado do Pará com os padrões internacionais, sendo ambos provenientes de aterro sanitário de RSU, objetivando a verificação da ocorrência de parâmetros similares, considerando também o valor máximo permitido destes.

A ocorrência de parâmetros similares monitorados no lançamento de lixiviado no Brasil e nos demais países podem ser observados na Tabela 4.



Tabela 4 – Ocorrência de parâmetros similares de lançamento de lixiviado no Brasil e em diferentes países do mundo.

CONAMA 430/2011	BRA	CHN	IND	AUS	JPN	USA	FRA
Matéria orgânica	1	1	1		1	1	1
Orgânicos	10	0	1	7	5	4	2
Inorgânicos	8	0	2	1	4	2	3
Metais	13	5	7	7	9	7	8
Série Nitrogenada	1	1	1	0	0	1	1
Série de Sólidos	2	0	0	0	0	0	0
Físico	1	0	0	0	0	0	0
Derivados do Enxofre	1	0	0	0	0	0	0
pH	1	0	1	1	1	1	1
Total de Parâmetros	38	7	13	16	20	16	16
Parâmetros com o Mesmo VMP da CONAMA 430/2011	-	0	2	1	1	0	0

Fonte: adaptado, (BRASIL, 2011); (CHINA, 2008); (EPA, 2016); (USA, 2000); (INDIA, 2016); (ENVIRONMENT AGENCY, 2003);(UNITED STATES FORCES; JAPAN, 2022).

A Resolução CONAMA nº 430/2011 possui 38 parâmetros divididos em: matéria orgânica (1), parâmetros orgânicos (10), parâmetros inorgânicos (8), metais (13), série nitrogenada (1), série de sólidos (2), parâmetros físicos (1), derivados do enxofre (1) e pH (1). Observando-se a Tabela 4, nota-se que o Japão, Austrália, França e Estados Unidos, foram os países que mais se aproximaram do Brasil, apresentando um percentual de parâmetros similares regulamentados de 52,63%, 42,11%, 42,11% e 42,11%, respectivamente. Entretanto, o número de parâmetros que possuem valores máximos permitidos iguais aos padrões regulamentados no Brasil apresenta-se de forma reduzida, tendo a Índia com dois parâmetros, seguido pela Austrália e Japão com apenas um parâmetro, destacando a necessidade de requalificação ou mesmo a criação de uma regulamentação exclusiva para os lixiviados gerados por aterro sanitário no Estado do Pará, seguindo o mesmo caminho dos países analisados neste estudo.



6 CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho de dissertação de mestrado foi apresentado um estudo exploratório sobre a utilização do BIM para a concepção de diferentes alternativas de tratamento de lixiviado, tendo como fundamentação a literatura técnica especializada e os 45 artigos científicos mais citados do mundo, abordando o conceito BIM e sua aplicação nos projetos de engenharia, a origem/geração de lixiviados e sua composição físico-química, e os diferentes tipos de arranjo de tratamento de lixiviados.

Com os resultados obtidos na matriz de avaliação de dados foi possível observar que embora a alternativa 01 (0,94) tenha apresentado o melhor índice de viabilidade de implantação em relação a alternativa 02 (0,74), no cenário alta carga a alternativa 01 não apresentaria o desempenho necessário para garantir o atendimento aos padrões de reuso e lançamento de efluentes.

Em virtude do avanço do horizonte de projeto, a expansão da ETL para a alternativa 02 é inevitável, principalmente em função da robustez e resiliência operacional proporcionada por este arranjo de tratamento no cenário em que a carga de poluentes será a máxima. Além disso, foi possível concluir que os critérios que mais necessitam de maior planejamento e alocação de recursos são aqueles relacionados ao consumo de energia elétrica, custo de implantação e área ocupada.

Por meio da aplicação do BIM na concepção das alternativas 01 e 02 de tratamento de lixiviado foi possível avaliar os quantitativos do sistema hidráulico e das unidades de tratamento, evidenciando a diferença existente entre as duas alternativas. A alternativa 02 (alta carga) superou em 100% a alternativa 01 (baixa carga) em praticamente todos os itens listados, exceto as tubulações (acréscimo de 78,35%). Esta informação é de suma importância no planejamento de expansão da ETL, principalmente no que diz respeito a alocação de recursos na transição de um cenário para o outro. Além disso, como produto da utilização do BIM, foi possível identificar as inconsistências existentes na modelagem do sistema hidráulico das duas alternativas, possibilitando a sua correção e garantindo maior fidelidade entre o projeto e sua posterior execução.

Através dos resultados obtidos no estudo comparativo dos padrões de lançamento de efluente tratado do Estado do Pará com os padrões de lançamento de



lixiviado tratado nos países da Europa, Ásia e América foi possível concluir que embora alguns parâmetros regulamentados da CONAMA 430/2011 estejam presentes também nas regulamentações de lixiviado tratado dos países da Europa, Ásia e América, os valores máximos permitidos observados são predominantemente distintos, evidenciando a necessidade de requalificação da Resolução CERH nº 10, de 03 de setembro de 2010 ou mesmo a criação de uma regulamentação exclusiva para o lixiviado gerado em aterro sanitário de RSU, dada a sua importância e capacidade de poluição do meio ambiente.

Por fim, fica claro que os resultados apresentados neste trabalho de dissertação de mestrado representam uma grande contribuição na utilização do BIM em projetos de engenharia e sua disseminação, ratificando a narrativa do BIM como um caminho promissor na forma de conceber e gerenciar projetos de engenharia, principalmente na região Norte do País, onde a sua utilização ainda é incipiente.



REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Processo de Projeto BIM**: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. 1. ed. Brasília – DF, 2017. v. 182 p.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Mapeamento da Maturidade BIM no Brasil**. 2. ed. Brasília – DF: Grant Thornton, 2022. v. 10–30 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216**: Projeto de Estação de Tratamento de Água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Elaboração de Projetos Hidráulico-Sanitários de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários. 1. ed. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004-1**: Resíduos Sólidos: Classificação – Parte 1. Rio de Janeiro, 2004.

ABRAMS, W.; GHONEIM, E.; SHEW, R.; LAMASKIN, T.; AL-BLOUSHI, K.; HUSSEIN, S.; ABUBAKR, M.; AL-MULLA, E.; AL-AWAR, M.; EL-BAZ, F. Delineation of groundwater potential (GWP) in the northern United Arab Emirates and Oman using geospatial technologies in conjunction with Simple Additive Weight (SAW), Analytical Hierarchy Process (AHP), and Probabilistic Frequency Ratio (PFR) techniques. **Journal of Arid Environments**, v. 157, p. 77–96, out. 2018.

AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS. **Level of Development Specification**. 1. ed. [s.l.] BIMForum, 2023. v. 1195 p.

ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. Von; FERNANDES, F. **Lodo de Esgotos**: tratamento e disposição final. 2. ed. Belo Horizonte – MG: Editora UFMG, 2014. v. 6444 p.



BAUMGARTEN, G.; SEYFRIED, C. F. Experiences and new developments in biological pretreatment and physical post-treatment of landfill leachate. **Water Science and Technology**, v. 34, n. 7–8, p. 445–453, 1 out. 1996.

BRASIL, **Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020**. Estabelece a utilização do Building Information Modelling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia [...]. Brasília: Presidência da República [2020]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10306.htm. Acesso em 31 mar. 2024.

BRASIL, **Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021**. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília: Presidência da República [2021]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14133.htm. Acesso em 31 mar. 2024.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; ZANTA, V. M.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. **Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para Pequenas Comunidades**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003. v. 1288 p.

CHINA, **GB16889-2008, 2008-07-01**: Standard for pollution control on the landfill site of municipal solid waste. China Popular Republic, 2008.

COSTA, A. M.; ALFAIA, R. G. de S. M.; CAMPOS, J. C. Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 110–116, fev. 2019.

DAVIS, M. **Tratamento de águas para abastecimento e residuárias: Princípios e Práticas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 824 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 3. ed. São Carlos - SP: Editora Cubo, 2017. v. 31–1246 p.

EGGEN, T.; MOEDER, M.; ARUKWE, A. Municipal landfill leachates: A significant source for new and emerging pollutants. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 21, p. 5147–5157, 1 out. 2010.



ENVIRONMENT AGENCY. **Guidance on Monitoring of Landfill Leachate, Groundwater and Surface Water**. 1. ed. Almondsbury: Environment Agency, 2003. v. 1287 p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AUTHORITY. **Environmental Guidelines: Solid waste landfills**. 2. ed. State of New South Wales – AUSTRALIA: NSW Environment Protection Authority (EPA), 2016. v. 195 p.

FAN, H.; SHU, H.-Y.; YANG, H.-S.; CHEN, W.-C. Characteristics of landfill leachates in central Taiwan. **Science of The Total Environment**, v. 361, n. 1–3, p. 25–37, maio 2006.

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de Água: Concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 463 p.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLOUS, G. **Princípios de Tratamento de Água**. 1. ed. São Paulo: Cengage, 2016. v. 1624 p.

INDIA, **S.O. 1357(E), 2016-04-08**: The Solid Waste Management Rules. New Delhi, India, 2016.

JIA, X.; LI, K.; WANG, B.; ZHAO, Z.; HOU, D.; WANG, J. Membrane cleaning in membrane distillation of reverse osmosis concentrate generated in landfill leachate treatment. **Water Science and Technology**, v. 85, n. 1, p. 244–256, 1 jan. 2022.

KAMARUDDIN, M. A.; YUSOFF, M. S.; RUI, L. M.; ISA, A. M.; ZAWAWI, M. H.; ALROZI, R. An overview of municipal solid waste management and landfill leachate treatment: Malaysia and Asian perspectives. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 35, p. 26988–27020, 25 dez. 2017.



KULIKOWSKA, D.; KLIMIUK, E. The effect of landfill age on municipal leachate composition. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 13, p. 5981–5985, set. 2008.

KURNIAWAN, T. A.; LO, W.; CHAN, G.; SILLANPÄÄ, M. E. T. Biological processes for treatment of landfill leachate. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 12, n. 11, p. 2032, 2010.

KURNIAWAN, T. A.; LO, W.-H.; CHAN, G. Y. S. Degradation of recalcitrant compounds from stabilized landfill leachate using a combination of ozone-GAC adsorption treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 137, n. 1, p. 443–455, set. 2006a.

KURNIAWAN, T.; LO, W.; CHAN, G. Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v. 129, n. 1–3, p. 80–100, 28 fev. 2006b.

LABIADH, L.; FERNANDES, A.; CIRÍACO, L.; PACHECO, M. J.; GADRI, A.; AMMAR, S.; LOPES, A. Electrochemical treatment of concentrate from reverse osmosis of sanitary landfill leachate. **Journal of Environmental Management**, v. 181, p. 515–521, out. 2016.

LUO, H.; ZENG, Y.; CHENG, Y.; HE, D.; PAN, X. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. **Science of The Total Environment**, v. 703, p. 135468, fev. 2020.

METCALF, W.; EDDY, C. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 5. ed. New York, NY: McGraw Hill, 2016. v. 10–1980 p.

MOODY, C. M.; TOWNSEND, T. G. A comparison of landfill leachates based on waste composition. **Waste Management**, v. 63, p. 267–274, maio 2017.



- MOR, S.; RAVINDRA, K.; DAHIYA, R. P.; CHANDRA, A. Leachate Characterization and Assessment of Groundwater Pollution Near Municipal Solid Waste Landfill Site. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 118, n. 1–3, p. 435–456, jul. 2006.
- MORAES, P. B.; BERTAZZOLI, R. Electrodegradation of landfill leachate in a flow electrochemical reactor. **Chemosphere**, v. 58, n. 1, p. 41–46, jan. 2005.
- MUKHERJEE, S.; MUKHOPADHYAY, S.; HASHIM, M. A.; SEN GUPTA, B. Contemporary Environmental Issues of Landfill Leachate: Assessment and Remedies. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 5, p. 472–590, 4 mar. 2015.
- NAVEEN, B. P.; MAHAPATRA, D. M.; SITHARAM, T. G.; SIVAPULLAIAH, P. V.; RAMACHANDRA, T. V. Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. **Environmental Pollution**, v. 220, p. 1–12, jan. 2017.
- NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES. **National BIM Guide for Owners**. 1. ed. Washington – DNC: NIBS, 2017. v. 137 p.
- NUVOLARI, A.; MARTINELLI, A.; TELLES, D. D.; RIBEIRO, J. T.; MIYASHITA, N. J.; RODRIGUES, R. B.; ARAUJO, R. de. **Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. São Paulo - SP: Blucher, 2011. v. 1.565 p.
- ÖMAN, C. B.; JUNESTEDT, C. Chemical characterization of landfill leachates – 400 parameters and compounds. **Waste Management**, v. 28, n. 10, p. 1876–1891, 2008.
- QASIM, S. R.; ZHU, G. **Wastewater Treatment and Reuse: Theory and Design Examples**. Broken Sound Parkway – NW: Taylor & Francis Group, 2018. v. 2.747 p.
- RAGHAB, S. M.; ABD EL MEQUID, A. M.; HEGAZI, H. A. Treatment of leachate from municipal solid waste landfill. **HBRC Journal**, v. 9, n. 2, p. 187–192, 17 ago. 2013.



RENOU, S.; GIVAUDAN, J. G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN, P. Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, n. 3, p. 468–493, 11 fev. 2008.

SACKS, R.; EASTMAN, C.; LEE, G.; TEICHOLZ, P. **BIM Handbook**: a guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers. 3. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2018. v. 11–659 p.

SALEM, Z.; HAMOURI, K.; DJEMAA, R.; ALLIA, K. Evaluation of landfill leachate pollution and treatment. **Desalination**, v. 220, n. 1–3, p. 108–114, mar. 2008.

SLACK, R. J.; GRONOW, J. R.; VOULVOULIS, N. Household hazardous waste in municipal landfills: contaminants in leachate. **Science of The Total Environment**, v. 337, n. 1–3, p. 119–137, jan. 2005.

TAHERDOOST, H. Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW) as a MultiAttribute Decision-Making Technique: A Step-by-Step Guide. **Journal of Management Science & Engineering Research**, v. 6, n. 1, p. 21–24, 16 fev. 2023.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Solid Waste**. New York – NY: McGraw-Hill Company, 2002. v 1, 2 ed. 834 p.

TIZAOUI, C.; BOUSELMI, L.; MANSOURI, L.; GHRABI, A. Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems. **Journal of Hazardous Materials**, v. 140, n. 1–2, p. 316–324, fev. 2007.

UNITED STATES FORCES; JAPAN. **Japan Enviromental Governing Standards**. 1. ed. Japan, 2022. v. 4401 p.



UNITED STATES OF AMERICA, **445.21 – 40 CRF Ch. I**: Effluent limitations attainable by the application of the best practicable control technology currently available (BPT), Washington – DC, 2000.

VYMAZAL, J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 1, p. 1–17, jan. 2009.

WANG, H.; WANG, Y.; LI, X.; SUN, Y.; CHEN, D. Removal of Humic Substances from Reverse Osmosis (RO) and Nanofiltration (NF) Concentrated Leachate Using Continuously Ozone Generation-Reaction Treatment Equipment. **Waste Management**, v. 56, p. 271–279, 29 jul. 2016.

WANG, L. K.; SHAMMAS, N. K.; HUNG, Y.-T. **Biosolids Treatment Processes**. Totowa – NJ: Humana Press Inc., 2007. v. 6.832 p.

WISZNIOWSKI, J.; ROBERT, D.; SURMACZ-GORSKA, J.; MIKSCH, K.; WEBER, J. V. Landfill leachate treatment methods: A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 4, n. 1, p. 51–61, 8 abr. 2006.

WU, Y.; ZHOU, S.; QIN, F.; YE, X.; ZHENG, K. Modeling physical and oxidative removal properties of Fenton process for treatment of landfill leachate using response surface methodology (RSM). **Journal of Hazardous Materials**, v. 180, n. 1–3, p. 456–465, 15 ago. 2010.

ZHOU, B.; YU, Z.; WEI, Q.; LONG, H.; XIE, Y.; WANG, Y. Electrochemical oxidation of biological pretreated and membrane separated landfill leachate concentrates on boron doped diamond anode. **Applied Surface Science**, v. 377, p. 406–415, jul. 2016.

ZHU, S.; CHENG, G.; QUAN, X.; JIANG, Z.; CHEN, H.; CHENG, Z.; QIU, F. Comparative study on COD removal from reverse osmosis concentrate using two physicochemical combined processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 342, p. 130861, mar. 2022.