



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Fabício Natan Fischer

Implementação e partida operacional de wetlands construídos empregados no
gerenciamento de lodo de tanque séptico

Florianópolis - SC

2026

Fabício Natan Fischer

Implementação e partida operacional de wetlands construídos empregados no
gerenciamento de lodo de tanque séptico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Prof. Pablo Heleno Sezerino Dr.

Florianópolis - SC

2026

Fischer, Fabricio Natan

Implementação e partida operacional de wetlands
construídos empregados no gerenciamento de lodo de tanque
séptico / Fabricio Natan Fischer ; orientador, Pablo
Heleno Sezerino, 2026.

134 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Unidade de gerenciamento de
lodo. 3. Lodo primário. 4. Wetlands Construídos. 5.
Saneamento descentralizado. I. Sezerino, Pablo Heleno. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Fabrcio Natan Fischer

Implementao e partida operacional de wetlands construidos empregados no
gerenciamento de lodo de tanque septico

O presente trabalho em nvel de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 21 de janeiro de
2026, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Andr Aguiar Battistelli Dr.
ENS/CTC/UFSC

Gabriel Vasconcellos Dr.
Wetlands Construidos

Certificamos que esta e a versao original e final do trabalho de conclusao que foi julgado
adequado para obtencao do titulo de Mestre em Engenharia Ambiental.

Insira neste espaco a
assinatura digital

Prof.(a) Alexandra Rodrigues Finotti Dra.

Coordenadora do Programa de Pds-Graduacao em Engenharia Ambiental

Insira neste espaco a
assinatura digital

Prof. Pablo Heleno Sezerino Dr.
Orientador

Florianopolis - SC

2026

RESUMO

A limpeza programada de tanques sépticos é a principal atividade de manutenção para garantir a eficácia desses sistemas de tratamento de esgoto descentralizado e evitar impactos ambientais. Nesse cenário, os Wetlands Construídos para Lodo de Tanque Séptico (WCLTS) surgem como uma Solução Baseada na Natureza (SbN) eficiente e sustentável, integrando-se como componente estratégico de uma Unidade de Gerenciamento de Lodo de Tanque Séptico (UGLTS). O objetivo geral deste trabalho é avaliar as etapas de implementação e o início de operação de uma UGLTS do tipo WCLTS a partir de estratégias operacionais distintas. A infraestrutura da UGLTS compreende tanques de recebimento, sistema de bombeamento e os módulos WCLTS M1 e M2 que possuem 60 m² cada, com maciço filtrante composto por camadas de areia grossa e brita, plantados com macrófitas *Salix spp.* O regime operacional diferencia-se entre os módulos: o M1 opera com maciço filtrante saturado e recirculação do efluente drenado, enquanto o M2 funciona com drenagem livre e fluxo vertical unidirecional. A implantação da UGLTS englobou atividades de engenharia civil, como terraplanagem, e impermeabilização com geomembrana, entre outras, concluindo-se com o plantio das macrófitas em setembro de 2024. As fases operacionais incluíram testes hidráulicos iniciais, uma etapa de *start up* com lodo diluído em esgoto tratado para aclimação e, por fim, a operação continuada apenas com lodo séptico bruto, realizadas ao longo de 2025. As avaliações conduzidas abrangeram testes de vazão de alimentação, monitoramento analítico de parâmetros físico-químicos e a aferição semanal da altura do lodo acumulado na superfície dos WCLTS. Como resultados, o tempo médio para o abastecimento do volume de 7.000 L de lodo em cada módulo WCLTS foi estabelecido entre 20 e 23 minutos por ciclo. Observou-se que o desenvolvimento das macrófitas *Salix spp.* reduziu a necessidade de remoção de plantas invasoras, sendo necessária a poda da parte aérea para manter a funcionalidade do sistema. No comparativo de desempenho, o módulo M1 apresentou resultados superiores, atingindo 95% de remoção de DQO e 76% de Sólidos Totais (ST), enquanto o M2 alcançou 90% de remoção de DQO, mas apenas 56% de ST. O acúmulo de lodo foi superior no M2 (6,0 a 13,0 cm) em comparação ao M1 (1,5 a 6,0 cm) devido à maior frequência de alimentação de lodo bruto (em média de 4,52 kgST/m².5 meses no M2 e 6,76 kgST/m².5 meses no M1). Infere-se, como conclusão a partir da operação continuada por 5 meses dos módulos WCLTS, que a estratégia de saturação do maciço filtrante e recirculação do efluente líquido drenado apresenta melhor desempenho de tratamento, comparativamente à estratégia de drenagem livre, embora isto conduza para uma operação mais apurada (com mais etapas).

Palavras-chave: Unidade de gerenciamento de lodo; Lodo primário; *Salix viminalis*; Wetlands Construídos; Operação e manutenção; Saneamento descentralizado.

ABSTRACT

The scheduled cleaning of septic tanks is the main maintenance activity to ensure the effectiveness of these decentralized wastewater treatment systems and to prevent environmental impacts. In this context, Constructed Wetlands for Septic Tank Sludge (CWSTS) emerge as an efficient and sustainable Nature-Based Solution (NBS), integrating as a strategic component of a Septic Tank Sludge Management Unit (STSMU). The general objective of this study is to evaluate the implementation stages and the initial operation of a CWSTS-type STSMU based on different operational strategies. The STSMU infrastructure comprises receiving tanks, a pumping system, and the CWSTS modules M1 and M2, each with an area of 60 m², containing a filter bed composed of layers of coarse sand and gravel, planted with macrophytes of the genus *Salix* spp. The operational regime differs between the modules: M1 operates with a saturated bottom and recirculation of the drained effluent, while M2 operates with free drainage and unidirectional vertical flow. The implementation of the UGLTS included civil engineering activities, such as earthmoving and geomembrane waterproofing, among others, concluding with the planting of macrophytes in September 2024. The operational phases included initial hydraulic tests, a start-up stage using sludge diluted with treated wastewater for acclimation, and finally continuous operation using only raw septic sludge, carried out throughout 2025. The evaluations conducted included influent flow tests, analytical monitoring of physicochemical parameters, and weekly measurements of the height of sludge accumulated on the CWSTS surface. As results, the average time required to feed a volume of 7,000 L of sludge into each CWSTS module was established between 20 and 23 minutes per cycle. It was observed that the development of *Salix* spp. macrophytes reduced the need for removal of invasive plants, although pruning of the aerial parts was necessary to maintain system functionality. In the performance comparison, module M1 showed superior results, achieving 95% removal of COD and 76% removal of Total Solids (TS), while M2 achieved 90% COD removal but only 56% TS removal. Sludge accumulation was higher in M2 (6.0 to 11.0 cm) compared to M1 (1.5 to 6.0 cm) due to the higher frequency of raw sludge feeding (on average 4.52 kgTS/m²·5 months in M2 and 6.76 kgTS/m²·5 months in M1). It is inferred, as a conclusion from the continuous operation of the CWSTS modules over five months, that the strategy of filter bed saturation combined with recirculation of the drained liquid effluent presents better treatment performance compared to the free drainage strategy, although it requires more refined operation (with more steps).

Keywords: Sludge management unit; Primary sludge; *Salix viminalis*; Constructed wetlands; Operation and maintenance; Decentralized sanitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática das parcelas de lodo e <i>septage</i> no interior de tanque séptico.....	13
Figura 2: Representação da rede de serviços de coleta e transporte de lodo de Tanques Sépticos.....	18
Figura 3: Esquema representativo de um módulo wetland construído para tratamento de lodo de tanque séptico (WCL _{TS}).....	21
Figura 4: Representação da localização da UGL _{TS}	26
Figura 5: Representação esquemática da UGL _{TS} , com destaque para os módulos (M1 e M2) de WCL _{TS}	27
Figura 6: Representação esquemática do perfil vertical do maciço filtrante dos módulos M1 e M2 de WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	28
Figura 7: Representação esquemática da configuração operacional dos módulos M1 e M2 de WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	29
Figura 8: Representação esquemática da configuração operacional do módulo M1 de WCL _{TS} componente da UGL _{TS}	30
Figura 9: Representação esquemática da configuração operacional do módulo M2 de WCL _{TS} componente da UGL _{TS}	30
Figura 10: Representação gráfica da evolução temporal das ações de implantação e operação da UGL _{TS}	32
Figura 11: Fluxograma das etapas de implantação da UGL _{TS}	33
Figura 12: Representação esquemática da configuração hidráulica da UGL _{TS}	34
Figura 13 – Representação esquemática e descritiva do procedimento operacional de diluição do lodo séptico com esgoto tratado aplicados nos WCL _{TS}	38
Figura 14 Fluxograma representativo das etapas de recebimento de lodo de Tanque Séptico na UGL _{TS}	41
Figura 15: Foto representativa de caminhão limpa fossa descarregando lodo na caixa de recebimento da UGL _{TS}	41
Figura 16 Representação do procedimento operacional de controle dos registros nos módulos WCL _{TS}	42
Figura 17: Fluxograma representativo da operação e coleta de amostras no WCL _{TS} M1 componente da UGL _{TS}	44

Figura 18: Fluxograma representativo da operação e coleta de amostras no WCL _{TS} M2 componente da UGL _{TS}	44
Figura 19: Representação esquemática do roteiro de operação dos módulos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	45
Figura 20: Imagem representativa do medidor de vazão ultrassônico portátil (<i>Handheld Ultrasonic Flow Meter</i>) utilizado na UGL _{TS}	47
Figura 21: Imagem representativa da medição do acúmulo de lodo na superfície dos módulos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	48
Figura 22: Imagens fotográficas das etapas construtivas da UGL _{TS} , destacando o espaço temporal das atividades.	51
Figura 23: Curva Granulométrica da areia grossa componente do maciço filtrante dos módulos WCL _{TS}	52
Figura 24: Ilustração representativa da distribuição das mudas de <i>Salix</i> spp. plantadas nos módulos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	54
Figura 25: Imagens fotográficas capturadas durante o plantio das macrófitas <i>Salix</i> spp. nos módulos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	54
Figura 26: Imagem fotográfica capturada durante o plantio das macrófitas <i>Salix</i> spp. pelos pesquisadores do GESAD/UFSC nos módulos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	55
Figura 27: Imagem fotográfica capturada durante a remoção manual de espécies vegetais invasoras nos módulos WCL _{TS}	56
Figura 28: Imagem fotográfica capturada durante o procedimento de corte da parte aérea das macrófitas <i>Salix</i> spp. nos módulos WCL _{TS}	57
Figura 29 Imagem fotográfica capturada durante a execução dos testes hidráulicos de vazão de alimentação junto aos módulos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	58
Figura 30: Representação gráfica da vazão de alimentação (com esgoto tratado) dos módulos WCL _{TS} M1 e M2, bem como de recirculação no M1.	61
Figura 31: Representação gráfica da vazão de alimentação (com lodo de tanque séptico diluído em esgoto tratado) dos módulos WCL _{TS} M1 e M2.	64
Figura 32: Imagem fotográfica capturada durante a ação de adaptação provisória no sistema de bombeamento de alimentação de lodo nos módulos WCL _{TS}	66
Figura 33: Imagem fotográfica capturada evidenciando o estrangulamento observado na adaptação provisória no sistema de bombeamento/alimentação de lodo nos módulos WCL _{TS}	68

Figura 34: Imagem fotográfica capturada evidenciando o ajuste final na tubulação do sistema de bombeamento/alimentação de lodo séptico bruto nos módulos WCL _{TS} . 69	
Figura 35: Representação gráfica da vazão de alimentação (com lodo de tanque séptico bruto) dos módulos WCL _{TS} M1 e M2, bem como a vazão de recirculação no M1.	72
Figura 36: Representação gráfica das variações de vazão de Recirculação no WCL _{TS} M1, durante a operação do sistema.	73
Figura 37: Imagem fotográfica representativa da realização dos testes de vazão com equipamento digital <i>Handheld Ultrasonic Flow Meter</i>	76
Figura 38: Representação esquemática do regime operacional e campanha de monitoramento de desempenho de tratamento junto aos módulos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	84
Figura 39: Representação gráfica dos valores médios da série de sólidos medidos nos efluentes líquidos dos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	98
Figura 40: Representação gráfica dos valores médios da matéria orgânica e inorgânica nos efluentes líquidos dos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	99
Figura 41: Representação esquemática dos elementos indicadores da operação e desempenho de tratamento dos módulos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS} , ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025). ..	100
Figura 42: Representação gráfica evolutiva representativa do acúmulo de lodo na superfície do maciço filtrante dos módulos WCL _{TS} M1 e M2, ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a dezembro de 2025).	102
Figura 43: Imagens fotográficas referente ao acúmulo de lodo na superfície do maciço filtrante dos módulos WCL _{TS} M1 e M2, após a 25 ^a semana de operação continuada da UGL _{TS}	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de concentrações reportadas na literatura para o <i>septage</i>	15
Tabela 2: Síntese da caracterização físico-química do líquido percolado em wetland construído para tratamento de lodo de tanque séptico (WCL _{TS}) e o respectivo desempenho, sob distintas características operacionais e territoriais.	24
Tabela 3: Parâmetros analisados e os métodos empregados no monitoramento do desempenho dos módulos WCL _{TS} componentes da UGL _{TS}	49
Tabela 4: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados no módulo WCL _{TS} M1.	59
Tabela 5: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados no módulo WCL _{TS} M2.	59
Tabela 6: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados no módulo WCL _{TS} M1 – Recirculação.	60
Tabela 7: Valores obtidos de tempos de infiltração do líquido percolado através do maciço filtrante dos módulos WCL _{TS} após aplicação de lodo.	62
Tabela 8: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados durante o <i>Start up</i> no módulo WCL _{TS} M2.	63
Tabela 9: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados após substituição da bomba no módulo WCL _{TS} M1.	66
Tabela 10: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados após substituição da bomba no módulo WCL _{TS} M2.	67
Tabela 11: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados durante a operação continuada no módulo WCL _{TS} M1.	70
Tabela 12: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados durante a operação continuada no módulo WCL _{TS} M2.	70
Tabela 13: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados durante a operação continuada do sistema de recirculação no módulo WCL _{TS} M1.	71
Tabela 14: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados com equipamento digital <i>Handheld Ultrasonic Flow Meter</i>	75
Tabela 15: Valores referentes ao volume de drenado alimentado no WCL _{TS} M1 durante o processo de Recirculação, estimado pela Vazão Média da Recirculação de 53L/min.	77

Tabela 16: Valores médios obtidos no monitoramento analítico dos módulos WCL _{TS} durante o período de <i>start up</i> .	81
Tabela 17: Valores obtidos no monitoramento analítico do lodo bruto alimentado no WCL _{TS} M1 ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025).	85
Tabela 18: Valores obtidos no monitoramento analítico do lodo bruto alimentado no WCL _{TS} M2 ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025).	88
Tabela 19: Valores obtidos no monitoramento analítico do efluente líquido drenado no WCL _{TS} M1 ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025).	91
Tabela 20: Valores obtidos no monitoramento analítico do efluente líquido recirculado no WCL _{TS} M1 ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025).	93
Tabela 21: Valores obtidos no monitoramento analítico do efluente líquido drenado no WCL _{TS} M2 ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025).	94
Tabela 22: Valores registrados referentes ao acúmulo de lodo na superfície do maciço filtrante dos módulos WCL _{TS} M1 e M2, ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a dezembro de 2025).	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	6
2.1	OBJETIVO GERAL	6
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1	ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO BRASIL	7
3.1.1	Sistemas descentralizados de esgotamento sanitário	8
3.2	LODO DE TANQUE SÉPTICO	11
3.2.1	Serviço de Coleta e Transporte de Lodo de Tanques Sépticos	16
3.3	WETLANDS CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE LODO.....	18
3.3.1	Tratamento de Lodo de Tanque Séptico em Wetlands Construídos	20
4	METODOLOGIA	25
4.1	PROJETO DE PESQUISA & DESENVOLVIMENTO + INOVAÇÃO (P&D+I)	25
4.2	COMPOSIÇÃO DA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE LODO DE TANQUE SÉPTICO.....	27
4.3	EVOLUÇÃO TEMPORAL RELATIVO À IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DA UGLTS E DOS MÓDULOS WCLTS.....	31
4.4	ACOMPANHAMENTO DAS ATIVIDADES DE IMPLEMENTAÇÃO DA UGL _{TS}	33
4.5	CONFIGURAÇÃO E TESTES HIDRÁULICOS NA UGL _{TS}	33
4.6	PROCEDIMENTOS DE PARTIDA OPERACIONAL (<i>START UP</i>)	37
4.6.1	Primeiras alimentações com lodo de tanque séptico bruto nos módulos WCL_{TS}	39
4.7	OPERAÇÃO CONTINUADA DOS MÓDULOS WCL _{TS} COMPONENTES DA UGL _{TS}	40
4.7.1	Monitoramento do acúmulo de lodo na superfície dos módulos WCL_{TS}	47
4.7.2	Remoção de espécies de plantas invasoras nos módulos WCL_{TS}	48
4.7.3	Monitoramento analítico do afluente e efluente dos módulos WCL_{TS} ..	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1	IMPLANTAÇÃO DA UGL _{TS}	50

5.2	CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA DE AREIA COMPONENTE DO MACIÇO FILTRANTE.....	52
5.3	PLANTIO DAS MACRÓFITAS.....	53
5.4	REMOÇÃO DE ESPÉCIES VEGETAIS INVASORAS NOS MÓDULOS WCL _{TS}	55
5.5	CORTE DA PARTE AÉREA DAS MACRÓFITAS.....	57
5.6	TESTES HIDRÁULICOS DE VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO DOS MÓDULOS WCL _{TS} COM ESGOTO TRATADO DA ETE CANASVIEIRAS	57
5.7	TEMPO DE INFILTRAÇÃO NOS MÓDULOS WCL _{TS}	61
5.8	TESTES HIDRÁULICOS DE VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO DOS MÓDULOS WCL _{TS} DURANTE A FASE DE <i>START UP</i> DA UGL _{TS}	62
5.9	AJUSTES OPERACIONAIS NO SISTEMA HIDRÁULICO DA UGL _{TS}	65
5.10	TESTES HIDRÁULICOS DE VAZÃO DURANTE A OPERAÇÃO DOS MÓDULOS WCL _{TS}	69
5.11	TESTE DE VAZÃO UTILIZANDO O EQUIPAMENTO HANDHELD ULTRASONIC FLOW METER	74
5.12	VOLUME DE DRENADO ALIMENTADO NO WCL _{TS} M1 A PARTIR DO SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO	77
5.13	VALORES DE CONCENTRAÇÃO E TAXAS DE APLICAÇÃO AFLUENTE APLICADOS NOS MÓDULOS WCL _{TS} DURANTE O <i>START UP</i> DA UGL _{TS}	79
5.14	MONITORAMENTO ANALÍTICO DO LODO AFLUENTE E EFLUENTES LÍQUIDOS DOS MÓDULOS WCL _{TS} DURANTE A OPERAÇÃO CONTINUADA DA UGL _{TS}	83
5.14.1	Lodo Bruto alimentado no módulo WCL_{TS} M1	84
5.14.2	Lodo Bruto alimentado no módulo WCL_{TS} M2	87
5.14.3	Efluente líquido drenado no módulo WCL_{TS} M1.....	90
5.14.4	Efluente líquido após a recirculação no módulo WCL_{TS} M1	92
5.14.5	Efluente líquido drenado no módulo WCL_{TS} M2.....	94
5.15	DESEMPENHO DE TRATAMENTO NOS MÓDULOS WCL _{TS} DURANTE A OPERAÇÃO CONTINUADA DA UGL _{TS}	96
5.16	MONITORAMENTO DO ACÚMULO DE LODO NA SUPERFÍCIE DOS MÓDULOS WCL _{TS} COMPONENTES DA UGL _{TS}	100
6	CONCLUSÃO	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

APÊNDICE A.....	113
APÊNDICE B.....	116
APÊNDICE C.....	118
APÊNDICE D.....	120

1 INTRODUÇÃO

O acesso adequado ao tratamento de esgoto ainda representa um desafio em muitos municípios brasileiros, principalmente nas áreas periurbanas e rurais. De acordo com o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), o atendimento adequado ao esgotamento sanitário pode ocorrer por dois principais modais: o modal 1, que consiste na coleta de esgoto sanitário por redes de esgoto e tratamento em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), promovendo a centralização dos serviços; e o modal 2, que envolve sistemas descentralizados no lote de cada domicílio ou estabelecimento, com soluções como fossas sépticas seguidas de unidades complementares, com disposição no solo empregando sumidouros e valas de infiltração ou, ainda, lançamento de esgoto tratado em redes pluviais ou corpos d'água superficiais (BRASIL, 2013).

A implementação do modal 1 em todas as regiões é considerada impraticável devido aos desafios técnicos, financeiros e ambientais, como topografia desfavorável, distâncias elevadas dos centros urbanos e altos custos de implantação de redes de esgoto e ETEs. Assim, para atender a população localizada em áreas onde o sistema centralizado não está presente recomenda-se, segundo PLANSAB, a implementação do modal 2 ou, ainda, implementação das diretrizes estabelecidas no Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR), que tem como objetivo garantir o acesso adequado ao saneamento em áreas rurais e de difícil acesso (BRASIL, 2019).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), em Santa Catarina a realidade do saneamento básico apresenta desafios significativos, especialmente nos municípios de menor porte populacional. Dentre os municípios catarinenses, 59% destes possuem população inferior a 10.000 habitantes, com uma distribuição equilibrada entre zonas rurais e urbanas, sendo 50% da população residente em áreas rurais e os outros 50% em áreas urbanas. No entanto, a implantação de sistemas convencionais de esgotamento sanitário com redes coletoras seguidas de ETEs abrange um montante de 34,8% dos municípios catarinenses (TCESC, 2024). Diante do contexto catarinense, a universalização dos serviços de esgotamento sanitário deve ocorrer por meio da coexistência entre sistemas convencionais centralizados e sistemas descentralizados.

O cenário do esgotamento sanitário no Brasil, de acordo com o IBGE (2022), apresenta uma participação expressiva de soluções no lote, onde 17,4% dos

domicílios utilizam fossas sépticas como forma de tratamento, uma realidade que se torna ainda mais preponderante no estado de Santa Catarina, alcançando a marca de 56,14% dos domicílios. Para garantir a eficácia dessas soluções, a NBR 17.076 (ABNT, 2024) define as diretrizes de construção e operação adequada dos tanques sépticos, estabelecendo a coleta programada de lodo como a principal atividade de manutenção do sistema. É fundamental, no entanto, realizar a distinção técnica entre o material sedimentado e o coletado: enquanto o lodo séptico, ou lodo primário, é o subproduto estabilizado no fundo do tanque proveniente do tratamento anaeróbio do esgoto doméstico, o material efetivamente removido pelos caminhões auto-vácuo é tecnicamente denominado *septage*.

O *septage* diferencia-se por ser uma mistura composta não apenas pelo lodo primário, mas também pela espuma acumulada na superfície e por uma parcela de efluente líquido. A Resolução ANA 192/2024 validou o tratamento descentralizado com Fossas Sépticas e sua cadeia de serviços associada, ou seja, limpeza programada, tratamento e destinação final, como uma solução adequada para o esgotamento sanitário. Dessa forma, a operação de coleta programada e o tratamento de lodo de tanque séptico (*septage*) passam a contribuir oficialmente para os índices de universalização do saneamento básico, legitimando a infraestrutura de fossas sépticas como parte integrante do sistema de gestão de efluentes.

Ainda neste contexto, o Programa Brasileiro de Saneamento Básico (PROSAB, 2009) reforçou que os sistemas descentralizados, como tanques sépticos seguidos de filtros anaeróbios, necessitam de limpeza periódica para manter sua eficiência operacional, ou seja, a remoção do lodo de tanque séptico em excesso acumulada. O serviço de remoção do lodo acumulado, normalmente realizado por empresas especializadas conhecidas como “limpa fossa”, é essencial para garantir a eficiência e a durabilidade do sistema. A logística de transporte e destinação final do lodo representa um dos principais desafios operacionais e de custo. O lodo acumulado nos tanques sépticos apresenta elevada carga orgânica, com mais de 70% de matéria orgânica, nutrientes, micro-organismos e alto teor de água, tornando necessária uma disposição ambientalmente adequada (JÚNIOR et al., 2015).

Torna-se, portanto, evidente a necessidade de incorporar a rede de serviços associada aos sistemas descentralizados de esgoto no lote, de onde elencam-se as etapas de contenção do esgoto no lote (unidades de tratamento), esvaziamento e transporte do lodo destas unidades (realizados por demanda ou de forma

programada), seguido de tratamento deste lodo e disposição final com a potencialidade de reúso (DOMINGUEZ, 2024).

O tratamento do lodo de tanque séptico e correlatos, via de regra, dá-se pela demanda do usuário, o qual contrata um serviço específico para o esvaziamento e transporte, o qual direciona este lodo para o tratamento junto a uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) ou uma unidade dedicada, denominada de Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL). Diferentes alternativas tecnológicas podem ser empregadas na UGL, abrangendo desde métodos físicos de desidratação mecânica, como centrífugas e prensas desaguadoras, até processos químicos de estabilização alcalina ou leitos de secagem convencionais. Nesse cenário, destaca-se o emprego da ecotecnologia dos wetlands construídos (WCs) como uma solução baseada na natureza (SbN).

Os WCs apresentam-se, portanto, como uma solução eficiente e sustentável para o tratamento de lodo de tanques sépticos, utilizando processos naturais para a remoção de poluentes e redução da umidade do lodo. Segundo Nikolić, Milićević e Milenković (2009), esses sistemas são ambientes projetados para otimizar a interação entre poluentes, vegetação e microrganismos presentes na área alagada. Estudos pioneiros realizados na França por Liénard e Payrastra (1996), demonstraram a eficácia dos WCs para a desidratação e mineralização do lodo, inspirando pesquisas subsequentes, como as de Koottatep et al. (2004), Suntti, Magri e Philippi (2011) que evidenciaram reduções significativas na umidade do lodo e elevadas taxas de remoção de matéria orgânica no efluente líquido.

O estudo conduzido por Santos et al. (2024) avaliou experimentalmente o desempenho de WCs para o tratamento de lodo proveniente de tanques sépticos, testando diferentes taxas de aplicação de sólidos e níveis de saturação de fundo em um sistema de bancada plantado com *Canna x generalis*, alcançando eficiências de remoção de 93% para matéria orgânica (DQO), 97% para fósforo ortofosfato e 98% para nitrogênio (NTK).

No cenário nacional, o Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), vêm estudando a utilização dos WCs no tratamento de lodo de tanque séptico, tornando referência na utilização desta SbN.

Ao longo das últimas décadas o GESAD estabeleceu uma linha de pesquisa sólida sobre o uso de WCs para o gerenciamento de lodo. O marco inicial dessa

trajetória pode ser identificado com o trabalho de Suntti (2010), que investigou o potencial de WCs plantados com *Zizaniopsis bonariensis* especificamente para o desaguamento de lodo de tanque séptico. Sua pesquisa foi fundamental para validar a tecnologia em condições de clima subtropical, testando taxas de aplicação de sólidos variando de 125 e 250 kg ST.m⁻².ano⁻¹, concluindo que o sistema é eficaz na redução de volume e mineralização do lodo, sendo que a menor taxa apresentou melhor desempenho operacional.

Avançando na otimização da tecnologia, Käfer (2015) expandiu o escopo das pesquisas ao submeter os sistemas a condições de alta taxa de carregamento (média de 300 kg ST.m⁻².ano⁻¹) e introduzir a recirculação do líquido percolado como estratégia de polimento do efluente. Utilizando espécies como *Typha domingensis* e *Cyperus papyrus*, o estudo demonstrou que, mesmo sob altas cargas, os WCs mantiveram elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e sólidos, além de produzirem um lodo estabilizado com potencial agrônomo, atendendo a parâmetros normativos para biossólidos.

Mais recentemente, a pesquisa do GESAD voltou-se para a aplicabilidade técnica e econômica dessa solução em escala de gestão pública. Dominguez (2024) sistematizou indicadores para a implementação de Unidades de Gerenciamento de Lodo (UGL) no contexto de Santa Catarina, desenvolvendo um projeto de engenharia em escala real. Ao comparar WCs com leitos de secagem convencionais, o estudo concluiu que os wetlands apresentaram menores custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX), consolidando a tecnologia como uma alternativa viável e econômica para o gerenciamento descentralizado de lodo em municípios de pequeno porte. Essa trajetória de desenvolvimento tecnológico evidencia o compromisso do GESAD que, há mais de 15 anos, dedica-se ao estudo aprofundado desta temática, validando e aprimorando os wetlands construídos desde as investigações experimentais em escala piloto até a sua consolidação em escala plena.

Embora a aplicação de WCs esteja amplamente difundida para o tratamento de águas residuárias, a utilização desta tecnologia para o desaguamento e mineralização de lodo de tanque séptico ainda apresenta lacunas científicas significativas, especialmente no que tange à fase de implementação e partida operacional (*start-up*) e sobre as rotinas operacionais de módulos em escala real.

Nesse contexto, a relevância deste trabalho reside na avaliação da implantação e da fase inicial de operação (*start-up*) de UGL wetlands para lodo de

tanque séptico, considerando duas estratégias operacionais distintas, quais sejam: (i) operação de módulo wetland com maciço filtrante saturado e recirculação do drenado e (ii) operação de módulo wetland com drenagem livre sem recirculação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar as etapas de implementação e o início de operação de uma Unidade de Gerenciamento de Lodo de Tanque Séptico do tipo Wetlands Construídos a partir de estratégias operacionais distintas.

2.2 Objetivos específicos

- Sistematizar a implantação da unidade de gerenciamento de lodo, documentando as etapas construtivas e destacando o comportamento hidrodinâmico de partida operacional;
- Estabelecer procedimento operacional junto a unidade de tratamento de lodo de tanque séptico empregando wetland construído;
- Avaliar, ao longo dos primeiros cinco meses de operação, o desempenho de tratamento de lodo de tanque séptico em dois módulos wetland construídos operados de forma distinta: (i) operação com maciço filtrante saturado e recirculação do drenado e (ii) drenagem livre sem recirculação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Esgotamento Sanitário no Brasil

O PLANSAB define as diretrizes para a gestão integrada dos serviços de saneamento no Brasil, com o propósito de alcançar a universalização do acesso. O plano estabelece que toda a população brasileira deve ter acesso aos serviços essenciais de saneamento, priorizando as comunidades em situação de maior vulnerabilidade. Esses serviços abrangem o fornecimento de água potável, esgotamento sanitário, manejo e disposição final de resíduos sólidos, bem como a drenagem de águas pluviais. O PLANSAB enfatiza a necessidade de uma abordagem integrada e coordenada entre os diferentes componentes do saneamento, visando otimizar a eficácia das ações e garantir resultados sustentáveis, considerando a interdependência entre os serviços prestados (BRASIL, 2014).

De acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a média nacional de coleta de esgoto no ano-base de 2022 foi de 56%, enquanto os 100 maiores municípios do Brasil apresentaram uma média superior, atingindo 77,81%. No Brasil, apenas 5 municípios alcançaram 100% de cobertura nos serviços de esgotamento sanitário, e outros 35 municípios atingiram índices superiores a 90%, cumprindo as metas estabelecidas pelo Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020).

Para assegurar o tratamento adequado dos esgotos à população, define-se no PLANSAB dois modais de atendimento. O modal 1 refere-se à coleta dos efluentes sanitários por meio de redes coletoras, conduzindo-os para tratamento em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), promovendo uma gestão centralizada do sistema. Por outro lado, o modal 2 adota uma abordagem descentralizada, na qual o tratamento do esgoto é realizado diretamente no local de geração, ou seja, em nível de cada imóvel ou estabelecimento. Essa modalidade é composta por fossas sépticas seguidas de unidades complementares, com disposição no solo empregando sumidouros e valas de infiltração ou, ainda, lançamento de esgoto tratado em redes pluviais ou corpos d'água superficiais, garantindo conformidade com as exigências ambientais e operacionais locais (BRASIL, 2014).

Ainda no âmbito do PLANSAB, diversos programas são desenvolvidos com o intuito de alcançar as metas estabelecidas para a universalização do saneamento.

Entre eles, destaca-se o Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR), que tem como objetivo promover o acesso universal aos serviços de saneamento básico em áreas rurais e isoladas. A implementação desse programa baseia-se em princípios como equidade, abrangência, cooperação interdisciplinar, sustentabilidade dos serviços existentes e participação ativa das comunidades locais. A execução do PNSR é de responsabilidade da Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), que atua na coordenação e viabilização das ações necessárias para a efetivação das medidas previstas.

De acordo com dados da Organização Mundial da Saúde (WHO/UNICEF, 2020), a cada dez pessoas que relatam condições inadequadas de saneamento, sete vivem em regiões rurais. Nessas áreas, quase metade da população ainda enfrenta práticas sanitárias inadequadas, como o uso de banheiros compartilhados e a defecação a céu aberto. Em 2022, a zona rural brasileira abrigava aproximadamente 25 milhões de habitantes, correspondendo a 12,6% da população total (IBGE, 2022).

Dados do IBGE (2022) revelam que apenas 63,2% dos domicílios brasileiros estão conectados à rede geral ou possuem fossa séptica ligada à rede. Dados do IBGE (2017) revelam que apenas 8% dos domicílios rurais estão conectados às redes coletoras de esgoto, enquanto 13% não possuem qualquer tipo de tratamento.

3.1.1 Sistemas descentralizados de esgotamento sanitário

Os sistemas descentralizados de tratamento de esgoto são soluções viáveis e eficazes para a promoção da saúde pública e a proteção ambiental, oferecendo alternativas adaptáveis às características locais. Contrariando a percepção equivocada de que os sistemas descentralizados são sinônimos de soluções paliativas ou de menor qualidade, esses sistemas complementam as infraestruturas centralizadas e desempenham um papel fundamental na universalização do saneamento básico (SERAFIM; DIAS, 2013; LIBRALATO; GHIRARDINI; AVEZZÙ, 2011).

Os sistemas descentralizados podem ser projetados para atender tanto domicílios individuais quanto pequenos agrupamentos de residências ou estabelecimentos comerciais, sendo classificados em soluções unifamiliares ou semicoletivas (MASSOUD; TARHINI; NASR, 2009). A escolha da tecnologia mais adequada deve considerar fatores como características dos efluentes, disponibilidade

de espaço, tipo de solo e profundidade do lençol freático, garantindo assim maior eficiência e segurança ambiental (MARTINETTI, 2015).

Apesar das vantagens associadas aos sistemas descentralizados, como a flexibilidade de implantação e os custos relativamente menores em comparação às soluções centralizadas, há desafios que demandam atenção. Aspectos ambientais, como a potencial contaminação do solo e dos corpos hídricos, requerem planejamento criterioso e medidas de mitigação. Além disso, os custos operacionais e de manutenção, juntamente com a necessidade de capacitação técnica da população local, são fatores críticos para o sucesso desses sistemas (SAMPAIO, 2011).

De acordo com Silva (2017), a implementação de soluções descentralizadas deve ser pautada em uma abordagem holística e adaptativa, considerando as especificidades de cada comunidade e garantindo não apenas a proteção ambiental, mas também a inclusão social e a equidade no acesso ao saneamento. Dentre as tecnologias descentralizadas, destaca-se o sistema de fossa séptica e filtro anaeróbio, amplamente utilizado devido à sua eficiência e simplicidade operacional.

No estado de Santa Catarina, 55% dos municípios possuem até 10.000 habitantes, totalizando 162 cidades com características que dificultam a viabilidade técnica e econômica da implantação de sistemas convencionais de tratamento de esgoto, que envolvem redes coletoras e ETE (DOMINGUEZ, 2024). A dispersão da população entre áreas urbanas e rurais, a topografia acidentada e os recursos financeiros limitados são desafios críticos que impactam a expansão da infraestrutura de saneamento convencional. Além disso, de acordo com o IBGE (2022), outros 35% dos municípios catarinenses possuem entre 10 mil e 50 mil habitantes, reforçando a necessidade de soluções descentralizadas e adaptáveis à realidade local.

Diante desse cenário, a adoção de sistemas descentralizados, como fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios, tem se mostrado uma alternativa eficiente e viável para pequenos municípios. Contudo, para garantir a sustentabilidade desses sistemas, é essencial a operação programada de caminhões limpa-fossa para a remoção do lodo e seu encaminhamento para unidades especializadas de tratamento. A combinação de tecnologias descentralizadas, logística adequada para coleta do lodo e unidades de tratamento especializadas representa uma alternativa eficaz para superar os desafios do saneamento básico em Santa Catarina (DOMINGUEZ, 2024).

A correta operação dos sistemas descentralizados de esgotamento sanitário é fundamental para garantir sua eficiência e longevidade, sendo a remoção periódica

do lodo acumulado como a principal medida de manutenção. A falta da limpeza programada pode resultar na obstrução dos dispositivos, na liberação inadequada de efluentes no solo e corpos hídricos, comprometendo a saúde pública e o meio ambiente (FUNASA, 2014).

No estado de Santa Catarina, 56,14% dos domicílios utilizam fossa séptica para tratamento de esgoto (IBGE, 2022). Diante desse cenário onde mais da metade dos domicílios catarinenses utiliza fossas sépticas, a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) implementou o programa intitulado "Esgotamento Sobre Rodas" como uma solução técnica e operacional voltada para a universalização do saneamento em municípios de pequeno porte, especificamente aqueles com até 15 mil habitantes, onde a implantação de redes coletoras convencionais é inviável técnica ou economicamente. O programa substitui a infraestrutura fixa de tubulações subterrâneas pela logística rodoviária, operando através de um ciclo que se inicia com vistorias técnicas para assegurar a existência de estrutura que permita a inspeção e esvaziamento do tanque séptico, seguidas pelo agendamento da coleta periódica e transporte do lodo via caminhões limpa-fossa. Essa estratégia garante que o lodo séptico seja retirado com segurança e encaminhado para tratamento adequado em uma ETE existente na região, ou em uma UGL dedicada, reduzindo riscos à saúde pública e eliminando o descarte irregular no meio ambiente.

A Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) deu um passo estratégico na modernização do saneamento descentralizado em Santa Catarina com a implantação da Unidade de Gerenciamento de Lodo de Tanque Séptico (UGL_{TS}) no município de Descanso. Esta unidade utiliza a ecotecnologia de wetlands construídos em escala real para o tratamento de lodos provenientes da limpeza programada de sistemas individuais, alinhando-se às metas de universalização do marco legal do saneamento. A adoção dessa Solução Baseada na Natureza reforça o pioneirismo da companhia na busca por tecnologias de baixo custo operacional e alta eficiência para o contexto de pequenas comunidades e áreas rurais do estado.

Nesse cenário, o estudo da partida operacional e do desempenho desse sistema torna-se fundamental para a consolidação da tecnologia. A investigação detalhada das estratégias de alimentação, do comportamento das macrófitas e das eficiências de remoção de carga orgânica e sólidos permite otimizar as rotinas de manutenção e operação. Assim, o monitoramento técnico rigoroso da unidade de Descanso não apenas valida a eficácia do tratamento, mas serve como um modelo

de referência para a expansão e replicação de unidades de gerenciamento de lodo similares em outras regiões de Santa Catarina.

A adoção de sistemas individuais de tratamento de esgoto, como fossas sépticas, não é uma exclusividade do estado de Santa Catarina, mas sim uma realidade difundida no cenário nacional que impõe a necessidade imperativa de estruturação de uma cadeia de serviços de saneamento eficiente. A gestão do lodo acumulado nestes sistemas varia conforme o modelo administrativo adotado em cada unidade federativa.

No Rio Grande do Sul, a prestadora de serviço de saneamento AEGEA/CORSAN exemplifica um modelo de gestão integral com o serviço de 'Limpeza de Fossa Séptica Programada', que centraliza desde a notificação ao usuário até a execução e cobrança via fatura, assemelhando-se às práticas da CASAN. Em contraste, Minas Gerais apresenta um modelo híbrido sob gestão da prestadora de serviço de saneamento COPASA/COPANOR, onde a gestão direta do lodo ocorre em sistemas rurais simplificados (COPANOR), enquanto grandes centros urbanos ainda dependem da descentralização via empresas privadas. Similarmente, no Paraná, a prestadora de serviço de saneamento SANEPAR, apesar de seu robusto programa rural, opera a gestão de lodo urbano majoritariamente através do credenciamento de empresas privadas para descarte em suas estações, sem a aplicação de um serviço público de coleta programada universal porta a porta. Esses cenários reforçam que a viabilidade das soluções individuais depende intrinsecamente da institucionalização de programas de saneamento que garantam a limpeza programada e, em seguida, o tratamento adequado do lodo séptico.

3.2 Lodo de Tanque Séptico

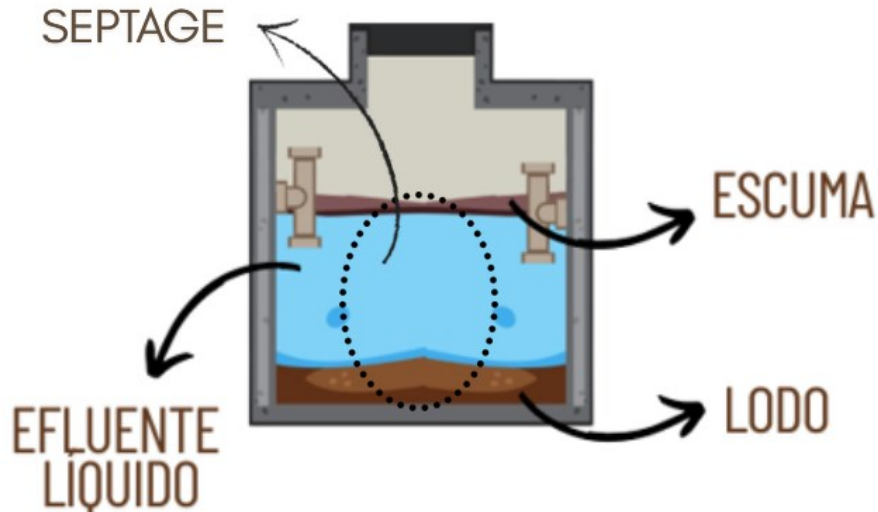
O tanque séptico (TS) é um reator largamente utilizado para o tratamento primário de esgotos, sendo uma solução eficiente quando corretamente dimensionado e implantado. Segundo a FUNASA (2014), seu funcionamento baseia-se nos processos de sedimentação e digestão anaeróbia, que ocorrem no interior do sistema. O projeto, dimensionamento e o posicionamento dos defletores de entrada e saída, bem como a manutenção do sistema, são critérios essenciais para garantir a eficiência do tratamento.

Durante sua operação, os sólidos sedimentáveis se acumulam no fundo do tanque, formando o lodo, que passa por processos de estabilização microbiológica ao longo do tempo. O lodo gerado no tanque séptico é rico em matéria orgânica (acima de 70%), nutrientes e microrganismos, além de conter mais de 95% de água. A sua composição pode variar significativamente em função do tempo de retenção no tanque e da frequência de limpeza. Se a limpeza for realizada com intervalos muito espaçados, o lodo pode atingir um estágio mais avançado de digestão anaeróbia, reduzindo sua carga orgânica. Além disso, a composição do lodo pode sofrer variações em função dos hábitos alimentares, culturais e higiênicos da população que gera os esgotos tratados no sistema (FUNASA, 2014).

A remoção periódica do lodo do tanque séptico é essencial para evitar sobrecarga do sistema e garantir sua eficiência a longo prazo. Conforme orientações da FUNASA (2014), o acúmulo excessivo pode comprometer a capacidade de retenção do tanque, resultando em menor tempo de tratamento e possível lançamento de efluentes com elevada carga poluidora. O lodo removido deve ser destinado adequadamente, pois sua disposição irregular pode gerar impactos ambientais, como contaminação do solo e dos corpos d'água, além de emissões de odores desagradáveis. Dada sua composição rica em nutrientes, há um potencial para o reaproveitamento do lodo na agricultura, desde que passe por processos adequados de estabilização e sanitização, garantindo segurança ambiental e de saúde pública (FUNASA, 2014).

O lodo de tanque séptico, ou "septage", refere-se ao acúmulo de resíduos fecais e materiais decantados armazenados em tanques sépticos, compostos principalmente por gordura, água e sedimentos resultantes da digestão anaeróbia do esgoto. Esse material é formado por três partes principais: o lodo depositado no fundo do tanque, a espuma flutuante e o líquido contido no interior do tanque, os quais são bombeados por caminhões auto-vácuo (popularmente denominados de limpa-fossa) durante a limpeza do sistema (INGNUNZA et al., 2015; CARVALHO, 2015).

Figura 1: Representação esquemática das parcelas de lodo e *septage* no interior de tanque séptico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos sistemas tratamento de esgoto do tipo tanques sépticos, o lodo é formado por um processo de separação dos sólidos e líquidos do esgoto, que ocorre por meio de decantação e sedimentação. A camada de espuma, composta por matéria flutuante, se forma na parte superior do tanque, enquanto os sólidos mais pesados se depositam no fundo, criando a camada de lodo de fundo. Essa combinação de esgoto e lodo é distinta tanto dos esgotos convencionais quanto dos lodos secundários, o que torna seu tratamento e manejo um desafio. A limpeza regular dos tanques sépticos, incluindo a remoção de resíduos de caixas de gordura, é crucial para garantir a eficácia do sistema, evitando a sobrecarga e os impactos ambientais (CARVALHO, 2015; INGNUNZA et al., 2015).

Ribeiro et al. (2025) realizaram análise de 24 amostras provenientes de caminhões limpa-fossa, destacando que o lodo apresentou um pH médio de 6,8 e concentrações médias de 10.815 mg/L e 8.956 mg/L para Sólidos Totais (ST) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), respectivamente. Um indicador observado foi a relação entre Sólidos Voláteis e Sólidos Totais (SV/ST) de 0,58, valor que evidencia um grau favorável de mineralização e estabilização da matéria orgânica, confirmando a aptidão do material para o desaguamento em wetlands verticais.

Suntti (2010) caracterizou um lodo de tanque séptico com elevado grau de estabilização, apresentando uma relação de Sólidos Voláteis/Sólidos Totais (SV/ST)

de 0,43, reflexo de um longo tempo de retenção na unidade de origem (superior a 10 anos). O material analisado apresentou umidade média de 98% e concentração média de Sólidos Totais (ST) de 18.676 mg/L, além de teores de nitrogênio (NTK) na ordem de 386 mg/L, evidenciando a necessidade de manejo específico devido à carga poluidora concentrada. Käfer (2015) trabalhou com uma matriz mais concentrada e com maior fração orgânica, indicativa de um lodo mais "fresco". A caracterização revelou uma média de ST de 31.073 mg/L e uma DQO média de 35.518 mg/L. A relação SV/ST obtida nesse estudo foi, também, de 0,58, demonstrando que o resíduo possuía maior carga de matéria orgânica ativa e menor grau de mineralização prévia.

Conforme Dominguez (2024) que realizou a caracterização de 37 amostras de lodo diretamente em caminhões limpa-fossa, o estudo confirmou a extrema heterogeneidade do *septage* recebido em estações de tratamento: enquanto 49% das cargas apresentaram concentrações de ST de até 2.200 mg/L (indicando alta diluição), cerca de 30% das amostras atingiram concentrações de até 6.000 mg/L, com alguns picos superando significativamente esses valores. Essa variação crítica foi balizada com dados históricos da operadora local, que indicavam uma média de 6.217 mg/L de ST, ressaltando o desafio de padronizar o recebimento desse material em Unidades de Gerenciamento de Lodo (UGL).

A partir os dados obtidos por Suntti (2010), Käfer (2015), Dominguez (2024), e Ribeiro et al.(2025), todos os estes oriundos de estudos do GESAD/UFSC, apresenta-se na Tabela 1 uma compilação de dados referentes às caracterizações de *septage*, destacando-se a extrema heterogeneidade do lodo de tanque séptico em cada uma das referências. Essa alta variabilidade ocorre porque o material coletado pelos caminhões limpa-fossa constitui uma mistura de lodo digerido do fundo do tanque, espuma do topo e esgoto líquido do meio, sofrendo ainda influência dos diferentes hábitos dos usuários e, principalmente, da frequência da remoção do lodo. Evidenciam-se valores máximos de DQO de 95.000 mg/L em Käfer (2015) e de Sólidos Totais superando 100.000 mg/L em Dominguez (2024), indicando que o lodo se comporta como um resíduo de altíssima carga, muito superior ao esgoto doméstico bruto. Esses valores extremos podem ser resultantes de tanques sépticos que não realizam a coleta programada, acarretando uma idade de lodo acumulado muito superior à recomendada pelas normativas. Por outro lado, os valores mínimos encontrados, como a DQO de aproximadamente 228 mg/L em Dominguez (2024),

sugerem que em algumas coletas o caminhão limpa-fossa pode ter coletado lodo diluído com água de chuva e infiltração, resultando em uma carga muito diluída.

Tabela 1: Valores de concentrações reportadas na literatura para o *septage*.

Parâmetro	Unidade	Valor Mínimo Encontrado	Valor Máximo Encontrado
Sólidos Totais (ST)	mg/L	838	101.341
Sólidos Totais Voláteis (STV)	mg/L	271	35.458
Sólidos Totais Fixos (STF)	mg/L	1.853	40.835
Sólidos Suspensos (SS)	mg/L	1.690	63.456
Sólidos Sedimentáveis (SSed)	mg/L	7	950
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	228	94.500
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	mg/L	95	1.340
Nitrogênio Amoniacal (N-NH₄⁺)	mg/L	66	526
Potencial Hidrogeniônico (pH)	-	5,3	8
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /L	301	968

Fonte: Elaborado a partir de Suntti (2010); Käfer (2015); Dominguez (2024); Ribeiro et al. (2025).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece por meio da NBR 17076:2024 as diretrizes técnicas para o projeto, construção, operação e manutenção de sistemas de tanques sépticos, substituindo as normas anteriores NBR 7229:1993 e NBR 13969:1997. A norma determina que o dimensionamento do tanque séptico deve considerar o número de usuários e o consumo de água, incluindo margens de segurança para garantir a capacidade de retenção e tratamento adequado. Além disso, exige a realização de um teste de estanqueidade antes da entrada em operação, assegurando que não haja vazamentos que comprometam a eficiência do sistema. Reforça, também, a proibição da entrada de águas pluviais no tanque séptico, evitando sobrecarga e comprometimento da digestão anaeróbia dos sólidos sedimentados (ABNT, 2024).

Ainda, a NBR 17076:2024 atualiza as diretrizes para o tratamento e disposição final do lodo, garantindo maior segurança ambiental e sanitária. A norma prevê que o lodo acumulado nos tanques sépticos deve ser removido periodicamente para evitar a saturação do sistema e a redução da eficiência do tratamento. Esse lodo pode ser destinado a aterros sanitários, compostagem ou aplicação agrícola, desde que siga critérios rigorosos de qualidade e segurança. Além disso, reforça-se a necessidade de um planejamento adequado para a operação e manutenção dos sistemas, garantindo sua durabilidade e funcionamento eficiente ao longo do tempo.

Vale destacar que, segundo a norma, a periodicidade da limpeza das fossas sépticas constitui um dos parâmetros fundamentais do projeto (ABNT, 2024).

A escolha do método mais adequado para o tratamento do lodo de tanque séptico depende de fatores como custos operacionais, disponibilidade de espaço, viabilidade técnica e conformidade com a legislação ambiental. De acordo com o Programa Brasileiro de Saneamento Básico (PROSAB), a implantação de centrais específicas para o tratamento desse resíduo, ou seja, unidades de gerenciamento de lodo (UGL), pode ser uma alternativa viável para municípios com grande concentração de fossas sépticas (ANDREOLI, 2009). A utilização de wetlands construídos para o tratamento de lodo de fossas e tanques sépticos também foi avaliada em estudos do PROSAB 4 (FLORENCIO et. al, 2006).

3.2.1 Serviço de Coleta e Transporte de Lodo de Tanques Sépticos

A remoção periódica do lodo acumulado nos tanques sépticos é essencial para garantir a eficiência do sistema de saneamento descentralizado e prevenir impactos ambientais adversos. Sem a devida remoção, o acúmulo excessivo do lodo pode comprometer a capacidade de tratamento do tanque, resultando no lançamento inadequado de efluentes e na contaminação de corpos hídricos e do solo (DOMINGUEZ, 2024). Nesse contexto, a existência de serviços especializados para coleta e transporte do lodo é fundamental, garantindo um gerenciamento adequado desde a remoção até o tratamento e destinação final.

Os serviços de remoção são realizados por caminhões auto-vácuo (popularmente denominados de limpa-fossa), equipados com sistemas de sucção que permitem a extração eficiente do lodo dos tanques sépticos. O controle dos caminhões limpa-fossa no Brasil tem evoluído com a implementação nacional do Manifesto de Transporte de Resíduos e Rejeitos (MTR) conforme a Lei nº 15.251/2010, e a adoção de leis estaduais que exigem rastreamento via GPS, dificultando o descarte irregular de efluentes no meio ambiente, como por exemplo, em Santa Catarina, onde a Lei nº 17.082/2017 exige que os caminhões estejam equipados com dispositivos de rastreamento via GPS, assegurando a rastreabilidade e monitoramento das operações (BRASIL, 2017). Além disso, a Instrução Normativa nº 50 do Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA) estabelece critérios técnicos para

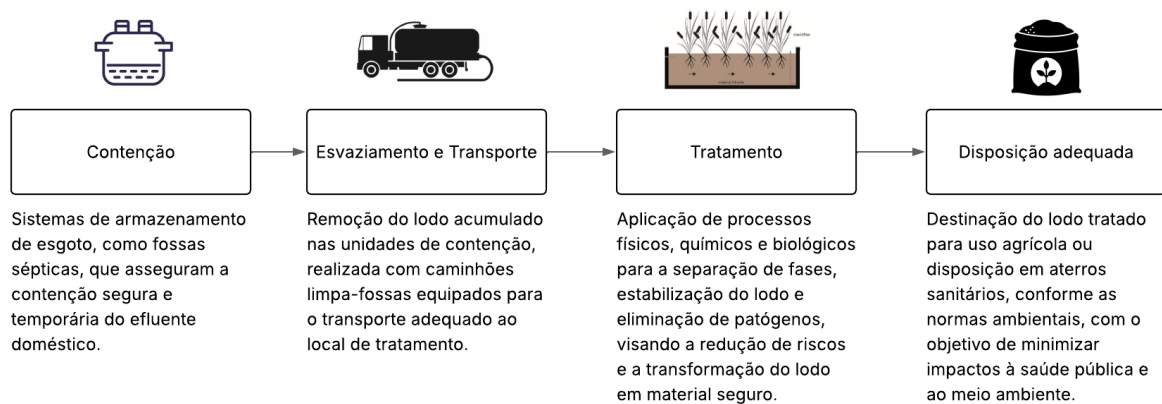
licenciamento e apresenta diretrizes para a apresentação de planos de gestão ambiental para essas operações.

Uma tendência crescente na gestão desse resíduo é a implementação da limpeza programada de tanques sépticos, um serviço que visa otimizar a operação dos caminhões limpa-fossa e reduzir custos operacionais. Conforme destaca Carvalho (2015), esse modelo permite a remoção do lodo de forma mais eficiente, evitando situações de transbordamento dos tanques e prolongando a vida útil do sistema. Além disso, a adoção desse modelo em parceria com Unidades de Gerenciamento de Lodo (UGLs) possibilita um melhor aproveitamento do material coletado, permitindo a sua estabilização e eventual reuso, como na aplicação agrícola.

O transporte do lodo no Brasil segue normas estabelecidas pelo MTR, o que garante a rastreabilidade dos resíduos, registrando sua origem, quantidade e destinação final. Com a alta taxa de utilização de tanques sépticos em Santa Catarina, que supera 56% da população atendida, a correta destinação do lodo é um fator determinante para a melhoria dos índices de cobertura de saneamento no estado (DOMINGUEZ, 2024). O reconhecimento desse modelo pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) pode impulsionar o avanço na classificação do estado em cobertura de esgotamento sanitário, desde que o lodo coletado seja devidamente tratado em ETEs ou UGL credenciadas.

Diante desse cenário, o investimento na infraestrutura de coleta e transporte de lodo de tanques sépticos é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas descentralizados de saneamento. A implementação de políticas públicas que incentivem a regulação e ampliação desses serviços, aliada ao fortalecimento da rede de serviços associada ao tratamento e destinação final do lodo, garantirá a segurança ambiental e a melhoria na qualidade de vida das populações atendidas. Na Figura 2 é possível observar uma representação da rede de serviços relacionada ao saneamento descentralizado.

Figura 2: Representação da rede de serviços de coleta e transporte de lodo de Tanques Sépticos



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Wetlands Construídos no Tratamento de Lodo

Os wetlands construídos empregados no tratamento de lodo (WCL) são sistemas projetados para promover a desidratação e mineralização do lodo por meio de processos naturais, reduzindo significativamente seu volume e promovendo a remoção de matéria orgânica e patógenos. Segundo Uggetti et al. (2010), essa tecnologia é baseada no uso de leitos preenchidos com camadas de substrato inerte e vegetação adaptada, que auxiliam na evapotranspiração da umidade e na degradação biológica do material orgânico presente no lodo.

O tipo de lodos a ser tratado em WCL são, majoritariamente, provenientes de estações de tratamento de esgoto por lodos ativados, lodos de reatores anaeróbios e lodos de caminhão limpa-fossa. A eficiência do sistema está diretamente ligada ao tempo de residência do lodo nos leitos, à periodicidade das aplicações, à capacidade de drenagem do leito e à capacidade de aeração natural promovida pelas trocas gasosas com a atmosfera e pelas macrófitas. Em condições ideais, os WCL conseguem reduzir o teor de sólidos voláteis do lodo em até 50%, promovendo uma estabilização eficiente e reduzindo os impactos ambientais associados ao descarte inadequado desse resíduo (UGGETTI et al., 2010).

Além da estabilização e redução do volume do lodo, os WCL contribuem para a retenção de nutrientes e metais pesados, proporcionando uma melhoria na qualidade do material final para possíveis reaproveitamentos, como uso agrícola ou disposição segura no solo. No entanto, é fundamental realizar monitoramentos

contínuos para garantir que os produtos finais atendam às exigências ambientais e sanitárias (UGGETTI et al., 2010).

De acordo com Stefanakis, Akrotos e Tsihrintzis (2014), o dimensionamento de wetlands construídos para tratamento de lodo (*Sludge Treatment Wetlands* – STW) fundamenta-se primordialmente na Taxa de Aplicação de Lodo (*Sludge Loading Rate* - SLR), expressada em quilogramas de matéria seca por metro quadrado ao ano ($\text{kgMS/m}^2\cdot\text{ano}$). Os autores estabelecem que a definição da SLR deve considerar as condições climáticas locais, recomendando taxas entre 50 e 60 $\text{kg MS/m}^2\cdot\text{ano}$ para regiões de clima temperado (baseado na experiência dinamarquesa) e admitindo cargas superiores, de até 75 $\text{kg MS/m}^2\cdot\text{ano}$, em climas mais quentes, como o Mediterrâneo, devido às maiores taxas de evapotranspiração.

Ainda, segundo Stefanakis, Akrotos e Tsihrintzis (2014) a vida útil operacional total de uma instalação de STW é projetada para ser de, no mínimo, 30 anos. Contudo, esse período não é contínuo, sendo segmentado em duas ou três fases operacionais distintas, cada uma com duração típica de 8 a 12 anos. A duração de cada fase é delimitada pela capacidade física de armazenamento de lodo do leito (atingimento da borda livre). Ao final de cada ciclo de 8 a 12 anos, procede-se ao esvaziamento do leito, onde a maior parte do biossólido mineralizado é removida, preservando-se apenas uma camada residual de 10 a 15 cm sobre o substrato, permitindo a regeneração natural da vegetação existente e o início imediato de uma nova fase operacional sem a necessidade de replantio.

Em comparação com os métodos convencionais de tratamento de lodo, como centrifugação e digestão anaeróbia, os WCL apresentam vantagens econômicas significativas, pois demandam menor consumo energético e manutenção simplificada. Além disso, os sistemas podem ser implantados em regiões com restrições de infraestrutura, permitindo que pequenas comunidades tratem seus resíduos de forma autônoma e ambientalmente sustentável (UGGETTI et al., 2010).

No entanto, é importante ressaltar que o desempenho dos WCL pode variar de acordo com as condições climáticas locais, o tipo de lodo tratado e a concepção do sistema, sendo necessário um planejamento técnico adequado para sua implementação. Dessa forma, os WCL representam uma alternativa promissora para a gestão sustentável de resíduos, reduzindo custos operacionais e promovendo benefícios ambientais. O contínuo aprimoramento da tecnologia e o desenvolvimento de diretrizes normativas mais detalhadas podem contribuir para a expansão do uso

desses sistemas em diferentes contextos, ampliando sua aplicabilidade no setor de saneamento básico, especialmente em áreas rurais e comunidades isoladas (UGGETTI et al., 2010).

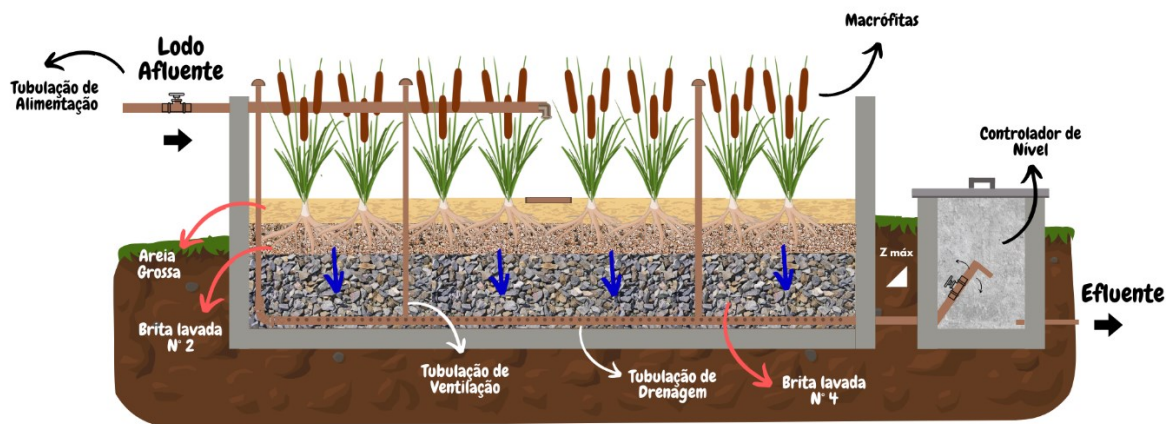
3.3.1 Tratamento de Lodo de Tanque Séptico em Wetlands Construídos

O wetland construído para tratamento de lodo de tanque séptico (WCL_{TS}) é uma tecnologia de tratamento que promove o desaguamento e a mineralização do lodo por meio de um consórcio simbiótico entre microrganismos e macrófitas, os quais estão estabelecidos junto ao maciço filtrante. Nesse sistema, o lodo é aplicado diretamente na superfície do módulo de tratamento, de forma intermitente e alternada, com distintas cargas aplicadas, expressadas em termos de sólidos totais por área superficial por ano ou aplicação ($\text{kgST/m}^2\cdot\text{ano}$ ou $\text{kgST/m}^2\cdot\text{aplicação}$), formando assim um acúmulo de lodo na superfície, também conhecido por torta de lodo, o qual será submetido aos processos naturais de evaporação e transpiração pelas macrófitas presentes, além da drenagem vertical do líquido presente no lodo aplicado e resultante das transformações bioquímicas que ocorrem na rizosfera, sendo então coletado por um sistema de drenagem presente no fundo do módulo (Figura 3). Devido a forma operacional em WCLTS, espera-se que o lodo aplicado seja, também, higienizado, tornando-o, portanto, em um bio sólido (SEZERINO, 2025).

Segundo Stefanakis, Akratos e Tsihrintzis (2014), a conversão do lodo em bio sólido dentro de um WCL ocorre através de mecanismos integrados de desaguamento e mineralização, impulsionados pela interação entre o substrato, a vegetação e o regime operacional. O processo de desaguamento é maximizado pela evapotranspiração das plantas, que pode atingir taxas de 4 a 12 mm/dia, e pela drenagem física facilitada pelo movimento dos caules, que preserva a condutividade hidráulica do meio. Simultaneamente, a estabilização e mineralização da matéria orgânica são promovidas pela atividade bacteriana anaeróbia nas camadas mais profundas do maciço filtrante e aeróbia na camada superficial, proporcionada pela transferência de oxigênio através de trocas atmosféricas e pelo sistema radicular das macrófitas (zona rizosférica), criando microzonas aeróbias que estimulam a atividade bacteriana e duplicam a taxa de metabolismo orgânico em comparação a leitos não plantados. Os autores destacam que, após o ciclo operacional, uma etapa de repouso final (*final resting stage*), com duração de 1 a 12 meses, é mandatória para garantir a

maturidade e a estabilidade da torta de lodo desidratada na superfície do WCL. Ao término desse processo, o resíduo removido apresenta características de biossólido, com teor de Sólidos Totais (ST) superior a 40% e uma redução de matéria orgânica acima de 25%.

Figura 3: Esquema representativo de um módulo wetland construído para tratamento de lodo de tanque séptico (WCL_{TS}).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O desempenho no tratamento de lodo em WCL_{TS} apresenta alta eficiência na remoção de sólidos e nutrientes. Koottatep et al. (2002), observaram uma eficiência de remoção de ST de 76% a 88%, de DQO de 88% a 98% e de NTK de 82% a 99%, com um sistema de retenção do percolado de seis dias, permitindo a redução da umidade do lodo. A evapotranspiração, associada à ação das macrófitas, desempenhou um papel fundamental na desidratação do lodo. Além disso, outros estudos realizados por Koottatep et al. (2004) indicaram que os WCs apresentaram uma grande capacidade de acúmulo de sólidos sem comprometer a permeabilidade do maciço filtrante. Outros estudos, como o de Santos et al. (2024), destacaram que a combinação de camadas de maciços filtrantes, como areia e brita, e a utilização de macrófitas como *Canna x generalis*, resultaram em remoções superiores a 80% para parâmetros como ST, DQO e nitrogênio. O desempenho de WCL_{TS} foi ainda superior quando comparado aos sistemas convencionais de secagem de lodo, com menor necessidade de remoção lodo desaguado e custos operacionais reduzidos. Esses estudos mostram que o uso de WCL_{TS} é uma alternativa viável, eficiente e sustentável

para o tratamento de lodo de tanque séptico, com potencial para ser utilizado em diversas regiões, principalmente em contextos de tratamento descentralizado.

Conforme Santos et al. (2024), a configuração do WCL_{TS} com nível de saturação de 0,20 m demonstrou melhor desempenho em comparação aqueles sem saturação, favorecendo a remoção de nitrogênio por meio da nitrificação e desnitrificação simultâneas, além de prolongar o tempo de contato entre os poluentes e os microrganismos presentes no maciço filtrante. A presença da camada de lodo na superfície do sistema auxilia na melhoria do desempenho operacional ao longo do tempo, reduzindo problemas de entupimento e aumentando a retenção de sólidos suspensos. Esse fenômeno, conhecido como acúmulo superficial controlado, já foi observado em sistemas franceses de wetlands verticais e pode ser uma estratégia eficaz para aprimorar o funcionamento dessas unidades no contexto brasileiro (SANTOS et al., 2024).

O trabalho desenvolvido por Andrade (2015) avaliou o desempenho de WC de escoamento vertical no tratamento de lodo proveniente de tanques sépticos coletado por caminhões limpa-fossa. A pesquisa foi conduzida no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS) da UFMG/Copasa, em Belo Horizonte, utilizando uma unidade em escala real (29,1 m²) e colunas em escala piloto, ambas plantadas com capim tifton-85 (*Cynodon dactylon Pers*) sobre um meio suporte de brita de diferentes granulometrias. O sistema operou com aplicações semanais de lodo bruto, seguidas de períodos de repouso para possibilitar a estabilização e o desaguamento do material acumulado, testando ainda estratégias de recirculação do líquido percolado para aprimorar a qualidade do efluente final.

Os resultados demonstraram que o sistema é eficaz na melhoria da qualidade do líquido percolado, alcançando eficiências medianas de remoção de 70% para DBO, 72% para DQO e 46% para Sólidos Totais (ST). No que tange à matéria nitrogenada, as eficiências foram de 59% para NTK e 52% para íon amônio (N-NH₄⁺). Contudo, o tratamento não apresentou diferenças significativas na remoção de coliformes, e as estratégias de recirculação e dupla recirculação testadas não resultaram em melhorias expressivas na qualidade do efluente quando comparadas à unidade de tratamento de lodo simples (ANDRADE, 2015).

Quanto ao lodo acumulado sobre o leito, o processo de desaguamento foi considerado satisfatório, atingindo um percentual de 55% de sólidos secos, valor superior ao comumente relatado para tecnologias convencionais como leitos de

secagem ou centrifugas. O capim tifton-85 demonstrou alta resistência às variações de carga e às condições operacionais, mantendo sua produtividade e auxiliando na manutenção da porosidade do meio filtrante. Concluiu-se que o WC é uma tecnologia de baixo custo e robusta, sendo uma alternativa viável para o gerenciamento de lodo em pequenas localidades (ANDRADE, 2015)

Manjate (2016) investigou o desempenho de Sistemas Alagados Construídos de Escoamento Vertical (SAC-V), baseados no modelo francês, para o tratamento combinado ou isolado de esgoto doméstico bruto e lodo de tanques sépticos. O estudo foi conduzido utilizando unidades preenchidas com camadas de brita e areia e plantadas com a gramínea *Cynodon dactylon Pers* (Tifton 85). O foco principal da pesquisa para o gerenciamento de lodos foi a avaliação de diferentes estratégias operacionais, variando os períodos de retenção do líquido percolado dentro das unidades (0, 7 e 14 dias), visando otimizar a estabilização da matéria orgânica e a inativação de patógenos.

Os resultados demonstraram que a retenção do percolado por 7 dias na unidade de tratamento de lodo, seguida de mais 7 dias na unidade de pós-tratamento (Estratégia OS3), foi a configuração mais eficiente. Sob esta condição, o sistema alcançou eficiências medianas de remoção superiores a 90% para DBO e DQO, além de uma remoção microbiológica expressiva de cerca de 4 unidades log de *E. coli*. Quanto ao comportamento do lodo retido na superfície, o sistema apresentou excelente desempenho no desaguamento e mineralização, resultando em um lodo final com teor de sólidos totais em torno de 55%, confirmando a robustez da tecnologia para o tratamento descentralizado em regiões de clima quente (MANJATE, 2016).

Em comparação à utilização de WCs no tratamento de águas residuárias, bem como no tratamento de lodo secundário (oriundo de reatores biológicos), poucos são os estudos divulgados na literatura acerca do emprego de WCL_{TS}. Apresenta-se na Tabela 2 uma relativização de concentrações e desempenhos de tratamento sob distintas características operacionais e territoriais.

Tabela 2: Síntese da caracterização físico-química do líquido percolado em wetland construído para tratamento de lodo de tanque séptico (WCL_{TS}) e o respectivo desempenho, sob distintas características operacionais e territoriais.

Autor (ano)	País	(kgST/m ² .ano)	Concentração média em mg/L*						
			e/ou Desempenho (% de Remoção média)						
			DBO	DQO	ST	STV	SST	NTK	N-NH ₄ ⁺
Koottatep <i>et al.</i> (1999)	Tailândia	125 – 250	-	-	~ 3.000*	-	-	-	-
Paing e Voisin (2005)	França	46	104* (98)	463* (98)	-	-	143* (99)	70* (94)	-
Panuvatvanich <i>et al.</i> (2009)	Tailândia	250	283*	-	1929*	-	995*	178*	120*
Kengne <i>et al.</i> (2009)	Camarões	100	-	(96– 99)	(65 – 99)	(90 – 99)	(95– 99)	(78 – 99)	(45 – 99)
Kengne <i>et al.</i> (2009)	Camarões	200	-	(74 – 99)	(71 – 99)	(74 – 99)	(78 – 99)	(69 – 99)	(8 –99)
Kengne <i>et al.</i> (2009)	Camarões	300	-	(78 – 99)	(71 – 99)	(68 – 99)	(62 – 99)	(78 – 98)	(29 – 99)
Suntti <i>et al.</i> (2011)	Brasil	125	-	85* (95)	472* (96)	-	18* (99)	14* (96)	10* (68)
Suntti <i>et al.</i> (2011)	Brasil	250	-	507* (94)	821* (94)	-	330* (96)	39* (90)	23* (44)
Sonko <i>et al.</i> (2014)	Senegal	200	-	92* – 1853*	883* – 5228*	-	-	43* – 66*	-
Andrade (2015)	Brasil	81	(70)	(72)	(46)	(52)	-	(59)	(52)
Manjate (2016)	Brasil	32-77	(90)	(94)	(68)	(80)	-	(87)	(68)
Santos <i>et al.</i> (2024)	Brasil	15 – 48	-	348* (80– 93)	1.462* (80 –96)	-	-	5* (98)	(~ 98)

Concentração média em mg/L* / (% de Remoção média)

Fonte: Adaptado de Andrade (2015) e Dominguez (2024).

4 METODOLOGIA

4.1 Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento + Inovação (P&D+I)

A Unidade de Gerenciamento de Lodo de Tanque Séptico (UGL_{TS}) abordada no presente trabalho constitui a estrutura experimental central do Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento + Inovação (P&D+I) intitulado “Unidade de gerenciamento de lodo de tanque séptico empregando wetlands construídos”. Esta iniciativa é resultado da cooperação técnica entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) e a Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina (FEESC), formalizada pelo Termo de Convênio nº 2022/0090, Registro FEESC nº 18522 e Registro SIGPEX 202202925.

O projeto caracteriza-se como uma ação de transferência de tecnologia, viabilizada pela parceria entre o Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD) e o Grupo de Pesquisas em Recuperação de Recursos em Sistemas de Saneamento (RReSSa), ambos da UFSC, com a CASAN, cujo propósito é a aplicação do conhecimento acadêmico sobre wetlands construídos diretamente nas operações de gerenciamento de lodo pela CASAN no estado de SC. Este projeto tem como objetivo a implementação e o monitoramento contínuo desta UGL, com intuito de validar a ecotecnologia dos wetlands construídos como uma solução viável para o estado catarinense. As atividades desenvolvidas na unidade buscam consolidar parâmetros de projeto e operação que fundamentem a expansão do gerenciamento descentralizado de lodo, alinhando-se às metas de inovação e universalização do saneamento propostas pela parceria institucional. No Apêndice A encontram-se de forma resumida as etapas que compuseram a formalização e implementação deste Projeto de P&D+I, as quais estão de forma detalhada apresentada no trabalho de Dominguez (2024).

A UGL_{TS} está localizada no interior das dependências da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Canasvieiras, pertencente a CASAN, situada na Av. Luiz Boiteux Piazza, no bairro Cachoeira do Bom Jesus, em Florianópolis, SC (Figura 4).

Figura 4: Representação da localização da UGLTs.

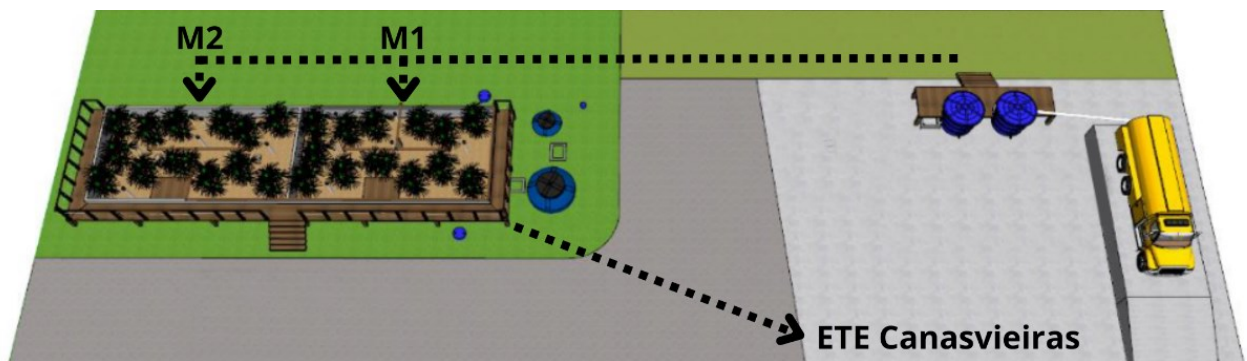


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Composição da Unidade de Gerenciamento de Lodo de Tanque Séptico

A UGL_{TS} é composta por equipamentos acessórios como tanques de recebimento do lodo, sistema de bombeamento do lodo bruto, tanques de acúmulo de efluente drenado e caixas de passagem para coleta de amostras e medição de vazão, além de dois módulos de wetlands construídos para tratamento de lodo de tanque séptico WCL_{TS} (Figura 5).

Figura 5: Representação esquemática da UGL_{TS}, com destaque para os módulos (M1 e M2) de WCL_{TS}.



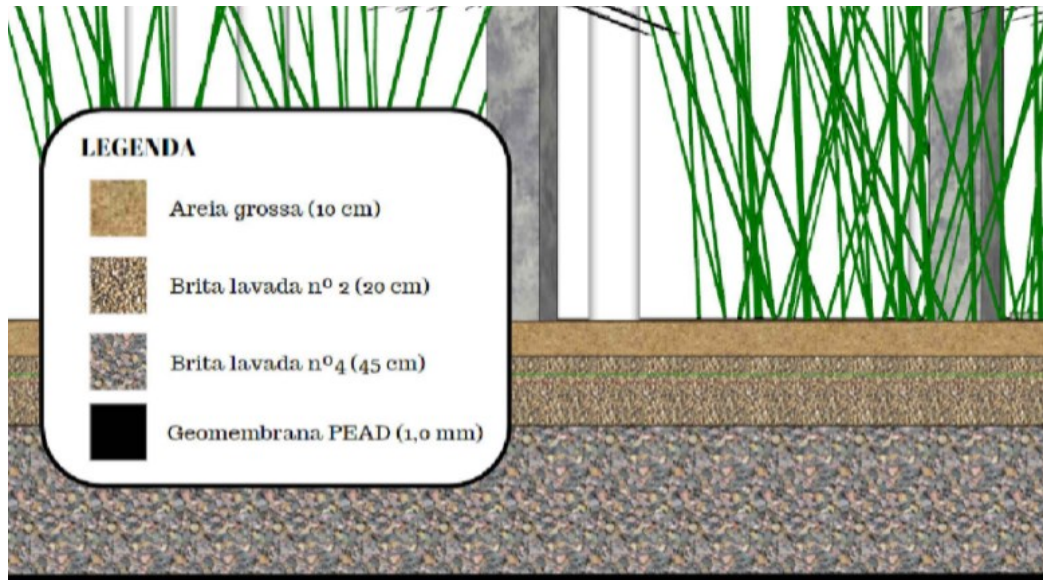
Fonte: Adaptado de Dominguez (2024).

Os módulos WCL_{TS} possuem uma área superficial total de 120 m². Cada módulo, denominado de M1 e M2, possui 60 m², sendo que ambos foram preenchidos com um maciço filtrante composto por camadas intercaladas, na ordem de superfície para o fundo (Figura 6), de 10 cm de areia grossa (\varnothing 1,2 a 2 mm), 20 cm de brita 2 (\varnothing 19 a 25 mm) e 45 cm de brita 4 (\varnothing 50 a 76 mm), plantados com macrófitas (*Salix* spp). Os módulos WCL_{TS} foram construídos sobre a superfície do solo em estrutura de alvenaria (blocos de concreto armado) e impermeabilizados com geomembrana de PEAD (polietileno de alta densidade) seguida de uma camada de manta geotêxtil (tipo Bidim) para proteção mecânica, assegurando a estanqueidade dos mesmos.

Os módulos M1 e M2 de WCL_{TS} componentes da UGL_{TS} operam de forma intermitente, com regime de alimentação e repouso distintas entre si. O procedimento operacional inicia-se com o recebimento do lodo de tanque séptico, por meio da descarga do material oriundo de caminhões “limpa-fossa” selecionados. O sistema de recebimento deste lodo é composto por dois reservatórios de acumulação e equalização de 7.500 litros cada, totalizando 15.000 litros. Nesta unidade, o lodo

passa por um gradeamento grosseiro realizado através de um cesto perfurado, que é submetido à limpeza manual periódica para evitar a entrada de sólidos grosseiros, como tecidos e pedras, visando a proteção dos componentes do sistema.

Figura 6: Representação esquemática do perfil vertical do maciço filtrante dos módulos M1 e M2 de WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}.

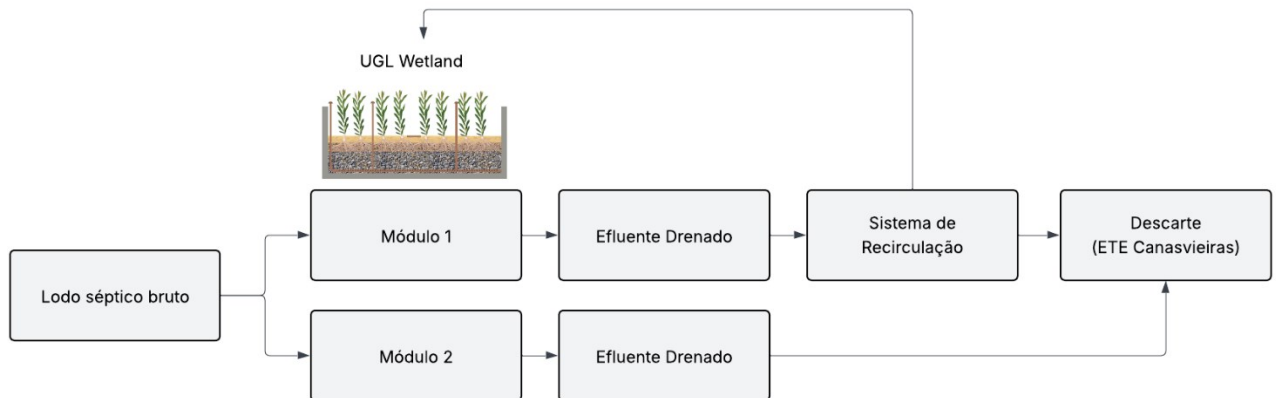


Fonte: Adaptado de Dominguez (2024).

Para o abastecimento dos módulos wetlands, utiliza-se uma bomba submersível (marca/modelo: Sulzer Robusta 300T), acionada de forma manual no quadro de comando componente da UGL_{TS}. A distribuição do fluxo de lodo em cada módulo wetland é controlada por um arranjo de registros manuais, cuja configuração específica está descrita no item 4.5, permitindo selecionar qual módulo será alimentado através de suas duas entradas, definidas como A e B, ou seja, cada módulo possui duas linhas de alimentação, totalizando uma densidade de 1 ponto de alimentação a cada 30 m².

Os WCL_{TS} operam de forma distinta entre si. O Módulo 1 (M1) caracteriza-se pela aplicação do lodo de tanque séptico na superfície, sendo operado com maciço filtrante saturado e implementação de recirculação da porção líquida do lodo drenada. Em contrapartida, o Módulo 2 (M2) atua em regime de drenagem livre e fluxo vertical, sem a recirculação do efluente, permitindo a percolação e saída imediata do líquido através do meio filtrante, conforme o esquema apresentado na Figura 7.

Figura 7: Representação esquemática da configuração operacional dos módulos M1 e M2 de WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}.



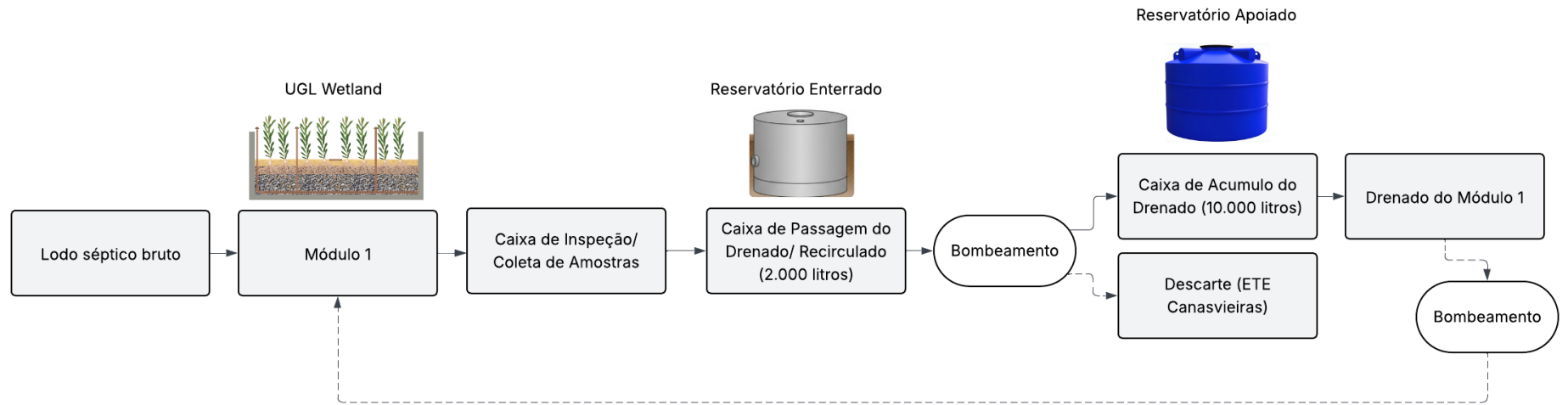
Fonte: Elaborado pelo autor.

Adicionalmente, a UGL_{TS} dispõe de um conjunto de bombeamento e armazenamento projetado para possibilitar a recirculação do efluente drenado do Módulo 1, permitindo que o efluente já tratado no *wetland* retorne ao sistema para polimento final. Após permear o meio filtrante, o líquido passa por uma caixa de inspeção (para coleta de amostras do drenado) e segue para um reservatório de acumulação enterrado de 2.000 litros, denominado Caixa de Passagem do Drenado/Recirculado. No interior deste tanque, uma bomba submersível (Bomba Vibratória Schneider VIPO-900 1 Polegada Sapo) direciona o fluxo para a Caixa de Acúmulo do Recirculado de 10.000 litros.

A partir deste reservatório maior, uma bomba dedicada (Bomba Centrífuga Monoestágio Schneider BC-91 S) realiza a alimentação do Módulo 1 com o material drenado, mediante a combinação dos registros, seguindo o mesmo processo, porém ao invés de direcionar o material recirculado para a Caixa de Acúmulo de drenado, por meio de manobra de registros é direcionado a saída do sistema, ou seja, para a ETE Canasvieiras (Figura 8).

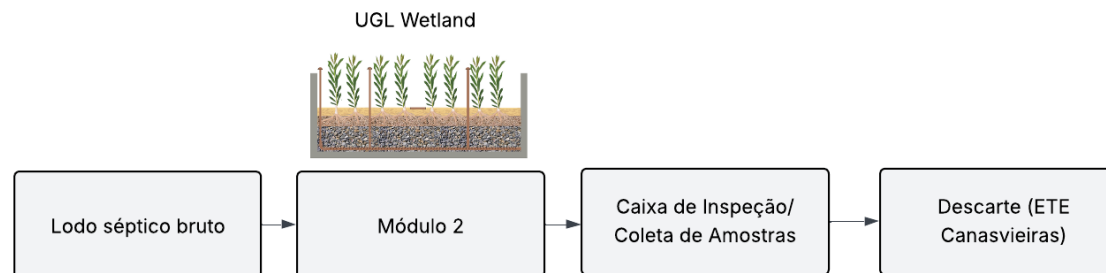
Por outro lado, o Módulo 2 opera em fluxo unidirecional, não possuindo sistema de recirculação. O efluente passa pelo maciço filtrante, seguindo pela caixa de inspeção para coleta de amostras e segue diretamente para a saída. Ao final do processo, o efluente tratado de ambos os módulos é direcionado para a ETE Canasvieiras (CASAN), onde é integrado ao sistema de tratamento convencional (Figura 9).

Figura 8: Representação esquemática da configuração operacional do módulo M1 de WCL_{TS} componente da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9: Representação esquemática da configuração operacional do módulo M2 de WCL_{TS} componente da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Evolução temporal relativo à implantação e operação da UGL_{TS} e dos módulos WCL_{TS}

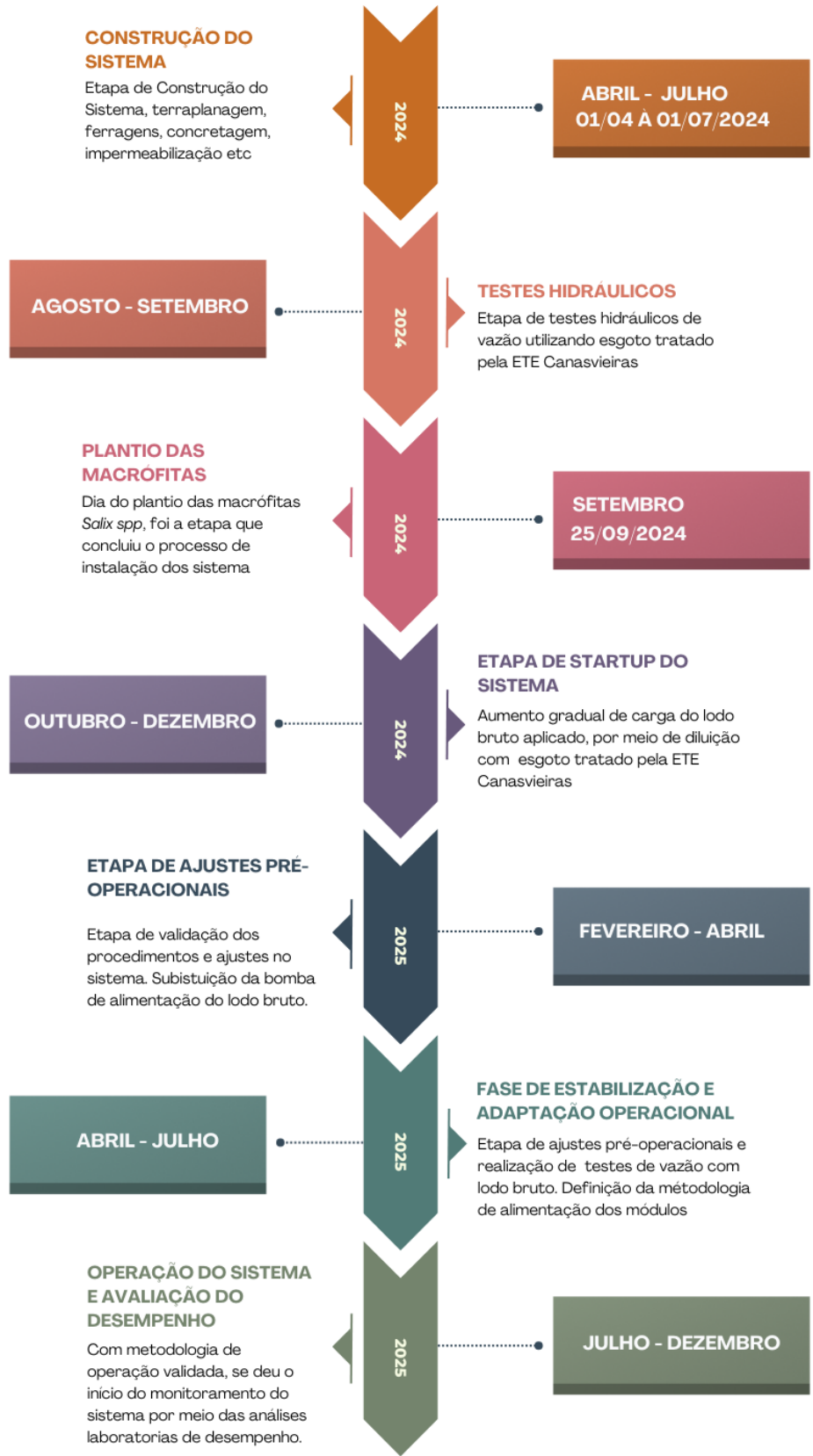
A fase inicial da UGL_{TS}, decorrida entre abril e julho de 2024, foi dedicada à implantação da unidade englobando as atividades de engenharia civil, como terraplanagem, montagem de ferragens, concretagem das estruturas, impermeabilização da estrutura, assentamento do maciço filtrante. Sequencialmente, de agosto a setembro de 2024, foram executados os testes hidráulicos, utilizando esgoto tratado proveniente da ETE Canasvieiras para a verificação das vazões e estanqueidade do sistema.

A conclusão da implantação dos módulos WCL_{TS} foi marcada pelo plantio das macrófitas (*Salix* spp.) em 25 de setembro de 2024. O sistema entrou, então, em etapa de *startup* no último trimestre do ano (de outubro a dezembro de 2024), caracterizada pelo aumento gradual da carga de lodo bruto aplicado, mediante diluição com esgoto tratado, visando a aclimatação do meio.

O ano de 2025 iniciou-se com a etapa de ajustes pré-operacionais (de fevereiro a abril de 2025), destinada à validação de procedimentos e manutenção corretiva, incluindo a substituição da bomba de alimentação de lodo bruto. Entre abril e julho de 2025, ocorreu a fase de estabilização e adaptação operacional, onde se realizaram testes de vazão com lodo bruto e a definição final da metodologia de alimentação e operação da UGL_{TS}. Por fim, o período de julho a dezembro de 2025 consolidou a operação do sistema e avaliação de desempenho. Com a metodologia operacional validada, iniciou-se o monitoramento oficial da eficiência do tratamento através de análises laboratoriais de desempenho do sistema.

Os aspectos marcantes da evolução temporal referente à implantação da UGL_{TS}, estão descritos graficamente na Figura 10.

Figura 10: Representação gráfica da evolução temporal das ações de implantação e operação da UGLTs.

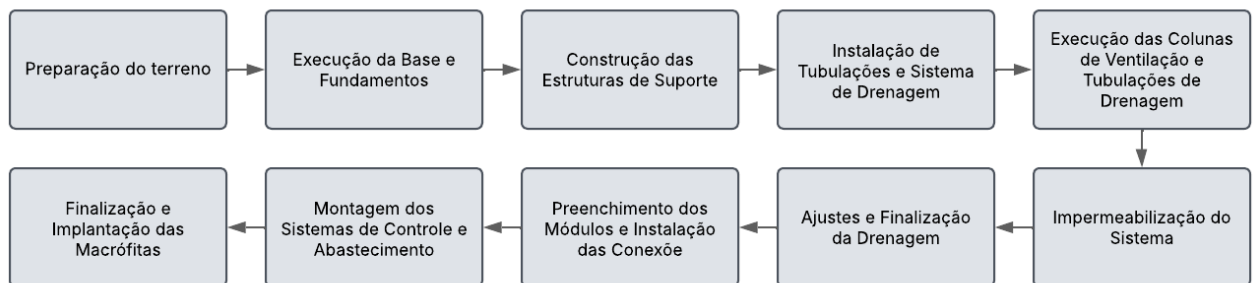


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Acompanhamento das atividades de implementação da UGL_{TS}

A metodologia empregada para o acompanhamento da implementação da UGL_{TS} consistiu na inspeção visual sistemática, com foco na verificação da conformidade da execução em relação ao projeto original, descrito por Domingues (2024) (Vide <https://tede.ufsc.br/teses/PGEA0782-D.pdf>). Foram avaliados aspectos construtivos como a movimentação do solo, construção do módulo, instalação de tubulações, disposição do meio filtrante e conexões hidráulicas (Figura 11).

Figura 11: Fluxograma das etapas de implantação da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além das observações *in loco*, fotografias documentais foram capturadas em todas as etapas da obra, permitindo um registro detalhado do avanço da construção. A utilização de fotografias, também, possibilitou comparações ao longo do tempo, evidenciando modificações e ajustes realizados durante o processo. Disponível para consulta em Domingues (2024).

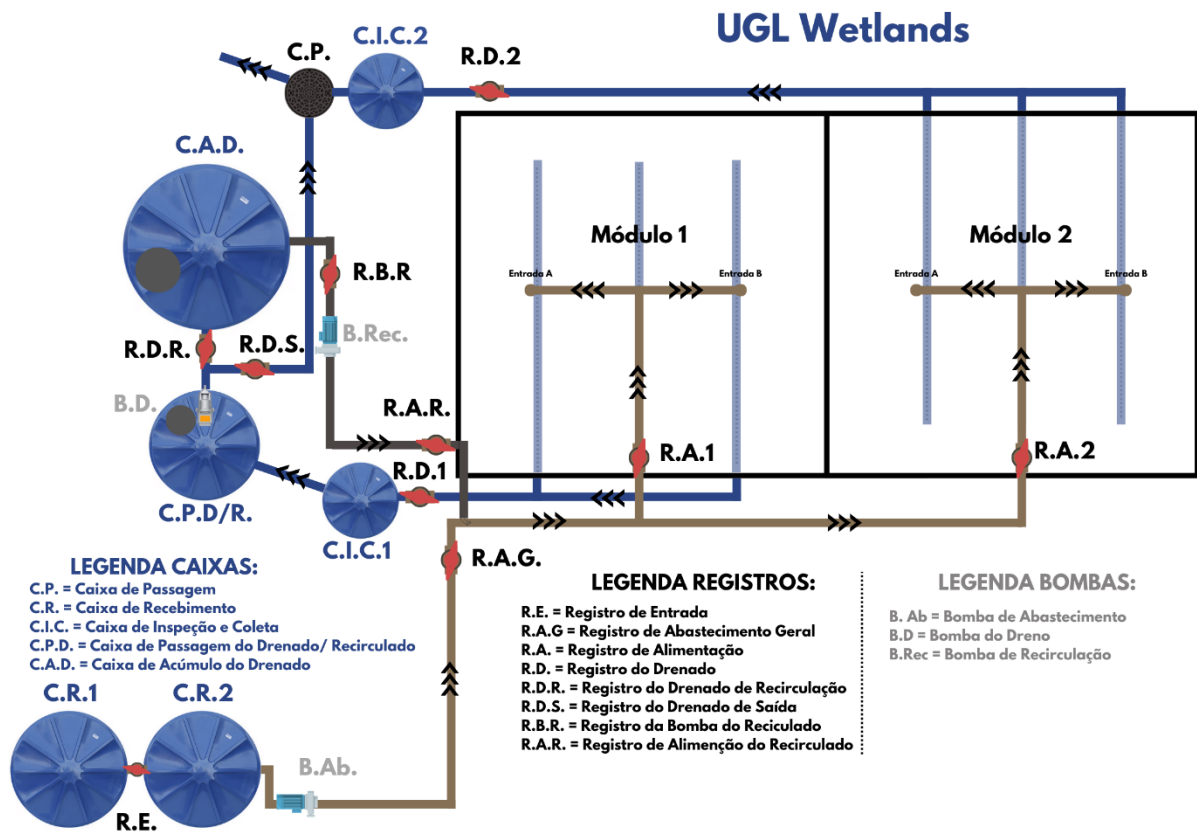
4.5 Configuração e testes hidráulicos na UGL_{TS}

A configuração hidráulica da UGL_{TS} é composta por reservatórios (caixas de recebimento, caixas de passagem, e caixas de acúmulo do recirculado), pelos módulos WCL_{TS} (M1 e M2), por registros e por bombeamentos (Figura 12).

Os testes hidráulicos de vazão realizados envolveram o abastecimento das caixas de recebimento CR1 e CR2 com esgoto tratado proveniente da ETE Canasvieiras. Após o abastecimento, os registros foram configurados para direcionar o fluxo de esgoto para um dos módulos WCL_{TS} (M1 e M2). Cada módulo possui duas

entradas de afluente, denominadas entrada A e entrada B. Salienta-se que os módulos foram concebidos como células fisicamente segregadas, operando de forma estanque e sem comunicação entre si.

Figura 12: Representação esquemática da configuração hidráulica da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os testes hidráulicos seguiram uma metodologia sistemática para garantir a precisão dos dados obtidos, contando com a participação de dois pesquisadores, utilizando balde volumétrico com capacidade de 20 litros e cronômetro digital, para medir o tempo necessário para o enchimento do balde volumétrico.

Inicialmente, foi realizada a verificação do nível de água nas caixas de recebimento (CR1 e CR2), assegurando que o volume disponível fosse suficiente para o teste. Em seguida, a bomba de abastecimento foi acionada, direcionando o fluxo de efluente para apenas um dos módulos do sistema por um período de 30 minutos.

O efluente foi conduzido ao módulo selecionado pelas duas entradas disponíveis, denominadas entradas A e B. Dentro do módulo, a coleta de dados foi conduzida da seguinte maneira:

- o primeiro participante, equipado com os Equipamentos de Proteção Individuais (EPIs) necessários (*face shield*, botas, luvas e jaleco), posicionava um balde volumétrico sob uma das entradas (A ou B);
- o segundo participante utilizava um cronômetro para registrar o tempo necessário para o enchimento do balde;
- os tempos medidos eram anotados cuidadosamente para análise posterior.

Cada medição foi realizada em triplicata para cada entrada (A e B), resultando em um mínimo de 6 medições por ciclo de abastecimento. As medições foram iniciadas após um período de 10 minutos de operação contínua, garantindo a estabilização da vazão no sistema. A repetição sistemática do procedimento assegurou maior precisão e confiabilidade nos dados obtidos. Com base nas medições realizadas, foi calculada a média da vazão de entrada do efluente em cada módulo, permitindo uma análise consistente do desempenho hidráulico do sistema.

A partir desses dados obtidos, foi possível calcular quanto de esgoto tratado foi abastecido em cada módulo neste período de 30 minutos e, também, qual seria o tempo necessário para o abastecimento de 7.000 litros de lodo, ou seja, o volume de projeto.

A fórmula para calcular o tempo total necessário (T_{total}) em minutos para abastecer 7.000 litros a partir do tempo medido em segundos para 40 litros (T_{med}) pode ser expressa conforme a equação 1.

$$T_{total} = \frac{T_{med} (s) \times 7.000 (L)}{40 (L) \times 60 (s)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

T_{total} : tempo total necessário para abastecer 7.000 litros (em minutos);

T_{med} : tempo medido para abastecer 40 litros (em segundos);

40: volume de referência em litros;

60: conversão de segundos para minutos.

A partir da equação 1 determina-se o tempo total necessário para abastecer o volume de projeto com base no tempo registrado para 40 litros. É importante destacar que, embora o balde volumétrico tenha capacidade de 20 litros, o

abastecimento ocorre simultaneamente em duas entradas do módulo (A e B), resultando no dobro do volume coletado no balde durante cada medição. As medições são realizadas em ambas as entradas, sendo realizadas 3 medições na entrada A e 3 na entrada B, ou seja, em triplicata, totalizando 6 aferições de tempo por módulo. O valor utilizado para o cálculo do tempo total de abastecimento corresponde à média dessas 6 medições, garantindo maior precisão nos resultados.

Além disso, outro dado importante obtido nos testes hidráulicos é a Vazão (Q) em litros por minutos. O cálculo da vazão de abastecimento considerando o tempo registrado para o abastecimento de 40 litros, deu-se conforme a equação 2.

$$Q (L/min) = \frac{40 (L) \times 60 (s)}{T_{med}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Q : vazão de abastecimento em litros por minuto.

T_{med} : tempo medido para abastecer 40 litros (em segundos);

40: volume de referência em litros;

60: conversão de segundos para minutos.

Ressalta-se que não foi realizada a caracterização físico-química do esgoto tratado proveniente da ETE Canasvieiras, uma vez que este material foi empregado exclusivamente para a execução dos testes hidráulicos e como veículo de diluição na etapa subsequente de *start up*.

Concomitantemente aos testes hidráulicos de vazão de alimentação, realizou-se o monitoramento do tempo de infiltração do líquido percolado nos módulos WCL_{TS}. Os módulos foram submetidos a ciclos de alimentação com duração de 30 minutos, sendo que o monitoramento do tempo de percolação consistiu no registro do intervalo de tempo compreendido entre o término da alimentação e a total infiltração da lâmina líquida superficial.

Para assegurar a precisão dos dados e isolar variáveis climáticas, os ensaios foram conduzidos estritamente em condições de tempo seco, garantindo que os leitos drenantes não estivessem saturados por precipitação pluviométrica recente ou em curso.

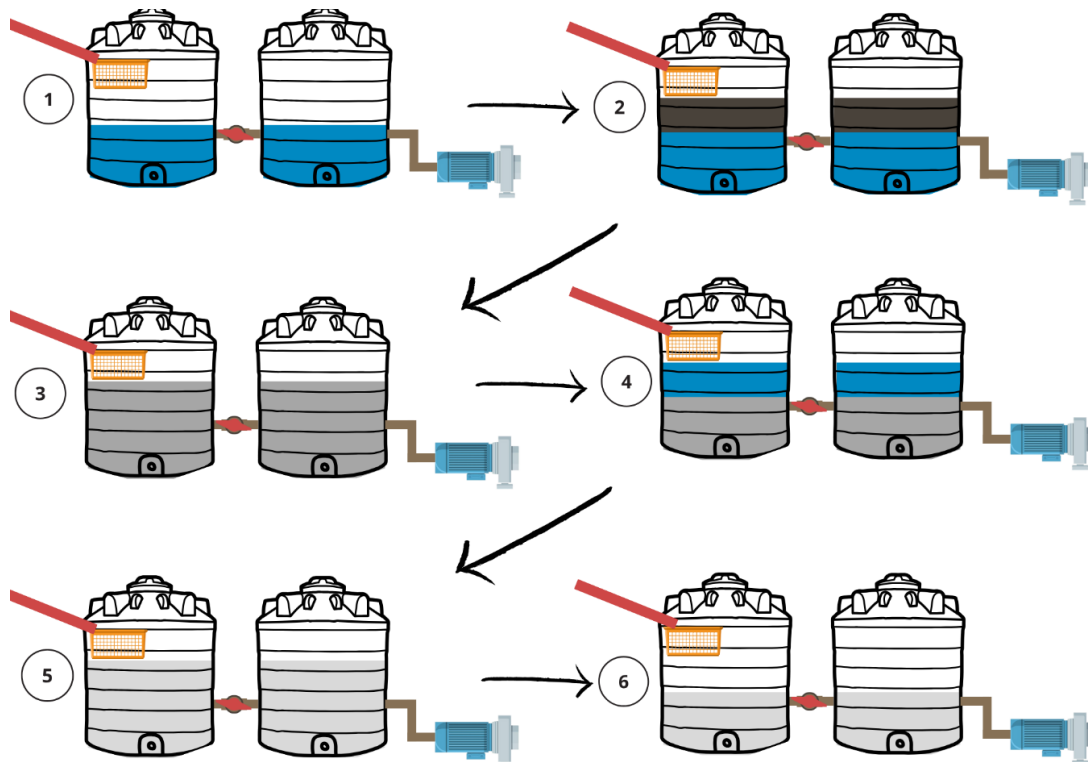
4.6 Procedimentos de partida operacional (*start up*)

O procedimento de partida operacional do sistema, denominado "*Start up*", teve início com a introdução de lodo proveniente de tanques sépticos, em uma estratégia que incluiu a diluição com esgoto tratado da ETE Canasvieiras. Essa abordagem foi adotada para promover um aumento gradual da carga orgânica afluyente e de nutrientes aos módulos WCL_{TS}, permitindo que as macrófitas recém-plantadas da espécie *Salix* spp., popularmente conhecido como vime, se adaptassem de forma progressiva às condições do meio.

A fase de partida (*start-up*) é crítica para o estabelecimento da comunidade microbiana e da vegetação. Kadlec & Wallace (2009) recomendam iniciar a operação com cargas orgânicas reduzidas (ex: 30% a 50% da carga de projeto) ou com efluente diluído, visto que um sistema recém-implantado ainda não possui a maturidade biológica necessária para desempenhar as funções de tratamento definitivas. Os autores alertam que a introdução imediata de fluxos com alta carga de poluentes é contraindicada, pois expõe a vegetação jovem a riscos severos, como estresse por deficiência de oxigênio e toxicidade química. Para evitar o colapso precoce do sistema, Kadlec e Wallace (2009) recomendam a estratégia de aumento gradual de carga (*ramp-up*), iniciando-se a operação com águas de melhor qualidade e transitando progressivamente para o efluente bruto. Esse procedimento, conhecido como aclimação, permite o desenvolvimento gradual do biofilme aderido ao meio suporte. Sem essa adaptação, a taxa de acumulação de sólidos excede a taxa de hidrólise biológica, podendo levar à colmatagem prematura da zona de entrada.

O processo de aclimação deu-se inicialmente, com a mistura lodo somado ao esgoto tratado proveniente da ETE Canasvieiras (em uma proporção de 50/50) sendo direcionada para o abastecimento do WCL_{TS} M1. Após o abastecimento, as caixas de recebimento (CR1 e CR2) foram novamente completadas com esgoto tratado proveniente da ETE Canasvieiras, permitindo a preparação do volume necessário para o abastecimento do WCL_{TS} M2. Em seguida, o M2 foi abastecido utilizando o volume restante da mistura. Após essa etapa, foi realizada a seleção de um novo caminhão limpa-fossa, contendo lodo proveniente de tanques sépticos residenciais. O sistema foi novamente completado com essa nova carga de lodo e esgoto tratado, repetindo o procedimento de abastecimento nos módulos (Figura 13).

Figura 13: Representação esquemática e descritiva do procedimento operacional de diluição do lodo séptico com esgoto tratado aplicados nos WCL_{TS}.



1. Preenchimento Inicial das caixas de recebimento (CR1 e CR2)

As caixas de recebimento (CR1 e CR2) foram inicialmente preenchidas parcialmente com esgoto tratado (água de reuso) proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Canasvieiras. Esse volume inicial serviu como base para a diluição do lodo séptico nos ciclos seguintes.

2. Adição de lodo de Tanque Séptico residencial

Após a etapa inicial, as caixas de recebimento (CR1 e CR2) foram abastecidas com lodo de tanque séptico residencial, formando uma mistura de esgoto tratado e lodo séptico.

3. Abastecimento do Módulo Selecionado

A mistura preparada nas caixas de recebimento foi utilizada para abastecer o módulo WCL_{TS} escolhido (M1 ou M2). Desta maneira a carga orgânica foi inserida de forma controlada, garantindo que o sistema se adaptasse progressivamente às novas condições.

4. Diluição do material nos WCL_{TS}

Após o abastecimento do módulo, o volume restante do sistema foi completado com esgoto tratado, promovendo a diluição da mistura já inserida no módulo.

5. Abastecimento do Segundo Módulo

Esta mistura de esgoto tratado e lodo séptico foi utilizada para abastecer o segundo módulo do sistema.

6. Reinício do Processo

Com a conclusão do ciclo de abastecimento nos módulos, uma nova carga de lodo de tanque séptico residencial foi coleta de outro caminhão limpa-fossa. Esse lodo foi adicionado às caixas de recebimento (CR1 e CR2), reiniciando o ciclo e garantindo a continuidade do processo de *start up* da UGL_{TS}. Foram realizados 5 ciclos de coleta de lodo séptico bruto e 4 ciclos de diluição do lodo séptico, resultando em 13 aplicações de lodo diluído no sistema, sendo 7 no M1 e 6 aplicações no M2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A adaptação das macrófitas à carga em um sistema de WCs é um processo fundamental para garantir a eficiência do tratamento de efluentes. Segundo GESAD (2019), em um sistema de WC, após o transplante das macrófitas, foi realizado um período de duas semanas de alimentação com água para verificar como as plantas se adaptavam às novas condições.

Para cada abastecimento realizado nos módulos, foram registrados os valores de vazão de entrada e o volume total de abastecimento, seguindo a mesma metodologia empregada nos testes hidráulicos com esgoto tratado. Adicionalmente, foram coletadas amostras do material introduzido nos módulos para análise laboratorial.

As medições de vazão de alimentação foram realizadas em triplicata para cada entrada (A e B), totalizando ao menos 6 medições por ciclo, iniciadas após 10 minutos de operação para estabilização do sistema. Esse procedimento garantiu precisão e confiabilidade nos dados, permitindo o cálculo da vazão média de entrada nos módulos.

4.6.1 Primeiras alimentações com lodo de tanque séptico bruto nos módulos WCL_{TS}

A fase inicial de operação da UGL_{TS} compreendeu 2 etapas distintas de monitoramento e ajustes no sistema periférico. O período preliminar, compreendido entre 18 de fevereiro e 01 de abril de 2025, caracterizou-se como uma fase de validação e ajustes pré-operacionais e manutenção corretiva. Durante este intervalo, foram realizadas 3 campanhas de alimentação de lodo bruto utilizando o conjunto motobomba modelo Auto-aspirante Schneider Bca-40. Contudo, o equipamento demonstrou inadequabilidade técnica para o bombeamento de lodo bruto, resultando em ineficiências operacionais que exigiram sua substituição. Desta forma, este período foi destinado prioritariamente à adequação do sistema para assegurar a estabilidade das etapas subsequentes.

A operação efetiva, em regime contínuo, iniciou-se no período de 08 de abril a 01 de julho de 2025, marcado pela instalação da nova unidade de bombeamento modelo Sulzer Robusta 300T. Nesta etapa, foram executados novos testes hidráulicos de vazão para calibração hidráulica, dando início à aplicação do regime de alimentação semanal de projeto de 7 m³ de lodo bruto em cada módulo WCL_{TS}. Vale

ressaltar que as medições de vazão foram realizando durante a alimentação rotineira do sistema, ou seja, durante o abastecimento dos 7.000 litros de lodo planejada operacionalmente.

No que tange à configuração hidráulica dos WCL_{TS}, ambos os módulos operaram sob regime saturado nesta etapa, mantendo-se os registros de drenagem (RD1 e RD2) fechados para promover a manutenção de uma lâmina líquida interna. Nesta etapa, o M1 já operava com sistema de recirculação, adotando-se uma frequência de alimentação de lodo bruto quinzenal, sendo que nas semanas intercalares o M1 recebia o próprio efluente drenado (percolado), caracterizando o processo de recirculação. Em contrapartida, o M2 operou sem recirculação, recebendo cargas semanais de lodo bruto. A alimentação de lodo bruto seguiu o volume de projeto definido de 7.000 litros de lodo (representativo de 40 kg.ST/m².ano, considerando 52 aplicações anuais).

4.7 Operação continuada dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}

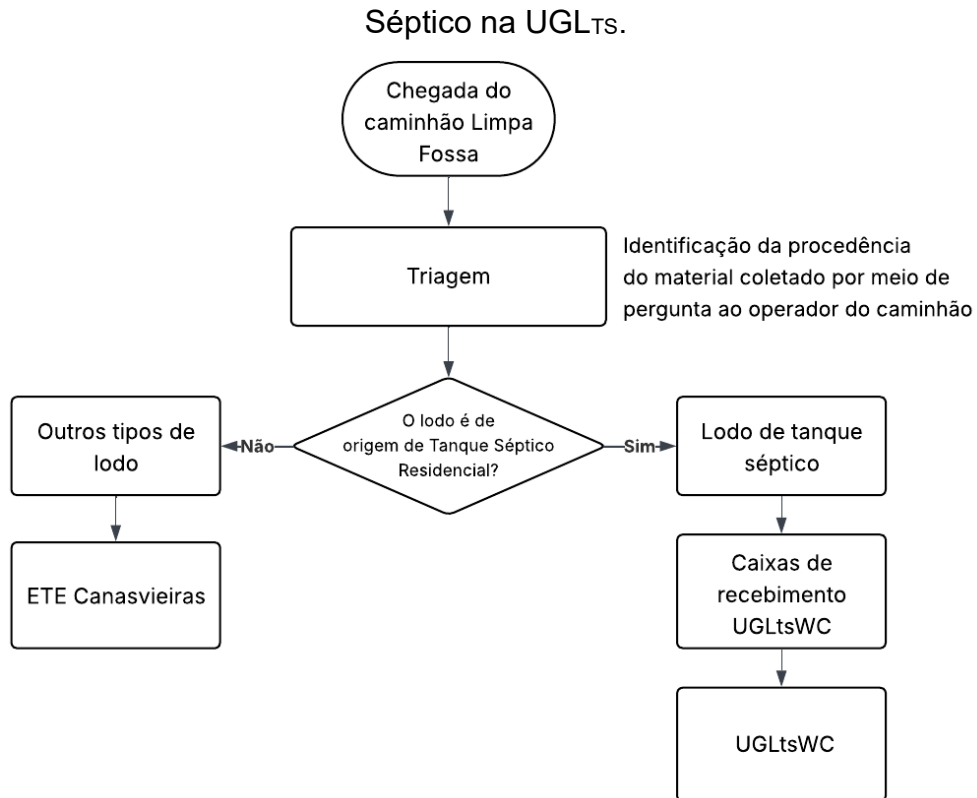
A operação continuada dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}, inicia-se com a coleta periódica de lodo de tanque séptico, a qual é realizada a partir da seleção de caminhões limpa-fossa, que descarregam o material nas caixas de recebimento. Após o correto arranjo dos registros para realizar a alimentação no módulo escolhido, a bomba de abastecimento é acionada, onde o tempo de alimentação é controlado para garantir a alimentação do módulo em questão com o volume de projeto.

O tempo de alimentação de lodo séptico nos módulos WCL_{TS}, ou seja, tempo em que a bomba de alimentação está acionada, é baseada nos resultados obtidos a partir de medições realizadas durante os testes hidráulicos de vazão após a substituição do sistema de bombeamento e medições periódicas realizadas bimestralmente. Com base nos resultados desses testes, o tempo médio calculado para abastecer o volume de projeto de um módulo WCL_{TS} foi estabelecido entre 20 e 23 minutos. Esse tempo é fundamental para garantir que a quantidade de lodo proveniente dos tanques sépticos abastecida seja igual a cada ciclo de abastecimento.

O procedimento de recebimento do lodo de Tanque Séptico inicia-se com uma triagem junto aos operadores do caminhão para identificar a procedência do material coletado (Figura 14). Uma vez confirmada que a origem são Tanques Sépticos

residenciais (casas ou condomínios), o veículo é devidamente selecionado e direcionado para realizar a descarga no sistema de recebimento de lodo da UGL_{TS} Wetlands (Figura 15).

Figura 14: Fluxograma representativo das etapas de recebimento de lodo de Tanque Séptico na UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15: Foto representativa de caminhão limpa fossa descarregando lodo na caixa de recebimento da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez que o caminhão chega ao local de operação a segunda etapa envolve a combinação correta dos registros do sistema (Figura 16). Essa combinação é essencial para direcionar o lodo de forma precisa ao módulo selecionado, assim, é definido qual módulo WCL_{TS} será alimentado, seguindo o roteiro previamente estabelecido. O processo de abastecimento do sistema é realizado ao longo de um período de 20 a 23 minutos, conforme o tempo médio previamente calculado por meio dos testes de vazão realizados periodicamente. Durante esse tempo de alimentação, o lodo é introduzido de forma contínua.

Figura 16: Representação do procedimento operacional de controle dos registros nos módulos WCL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir de 01 de julho de 2025, foram implementados ajustes operacionais no WCL_{TS} M2, marcando o início oficial da operação do sistema e do cronograma de monitoramento por meio de análises laboratoriais. Nesta nova configuração, o M2 passou a operar em regime de drenagem livre (com o registro R.D.2 permanentemente aberto), permitindo que, após a alimentação semanal de lodo bruto, o fluido percole pelo meio filtrante e seja drenado imediatamente. Em contrapartida, o WCL_{TS} M1 manteve suas condições operacionais inalteradas, preservando o regime

de saturado (registro R.D.1 fechado) e a estratégia de recirculação do percolado na semana subsequente à alimentação com lodo bruto.

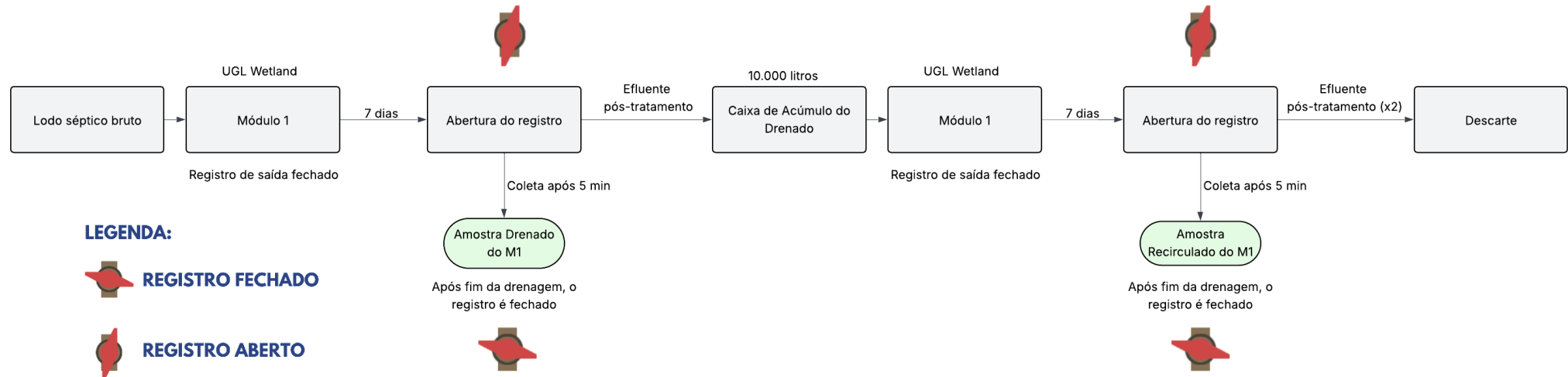
Durante a operação dos módulos de WCL_{TS}, são realizadas coletas periódicas de amostras do drenado na saída do M1 e M2, ou seja, nas caixas de inspeção e coleta, a fim de avaliar a eficiência do tratamento. A comparação entre os módulos M1 e M2, que operam com diferentes configurações (M1 com recirculação e maciço filtrante saturado e M2 sem recirculação e com drenagem livre), permite avaliar o desempenho de cada sistema de forma independente.

Durante a operação da UGL_{TS} foram realizadas a coleta de 10 amostras de lodo bruto, coletadas diretamente na entrada de lodo em cada módulo, antes do lodo ser introduzido no WCL_{TS}. Além disso, foram coletadas 10 amostras do efluente drenado nos módulos (5 amostras do M1 e 5 amostras do M2, além de 5 amostras do efluente recirculado proveniente do M1). Essas amostras são fundamentais para a análise da eficiência do tratamento nos diferentes módulos, permitindo comparações entre os sistemas com diferentes estratégias operacionais, com recirculação e maciço filtrante saturado, e sem recirculação com drenagem livre.

A coleta das amostras de efluente drenado no M1 foi realizada após uma semana de alimentação com lodo bruto, cerca de 5 minutos após abertura do registro (R.D.1), ou seja, o líquido percolado permaneceu no interior do sistema por uma semana. Após uma semana de retenção no maciço filtrante saturado o líquido percolado do sistema foi recirculado no mesmo M1. Por exemplo, no M1 a alimentação de lodo ocorre na terça-feira da primeira semana. Na terça-feira da segunda semana, o registro de saída (R.D.1), que estava fechado durante o período de abastecimento e de repouso, é aberto, permitindo a saída do líquido drenado. Nesse momento, após 5 minutos de drenagem, é realizada a coleta da amostra. Esse líquido drenado é acumulado e direcionado por meio da bomba submersível para a caixa de acúmulo do drenado (CAD) de 10 mil litros e, então, novamente alimentado no mesmo M1 (Figura 17).

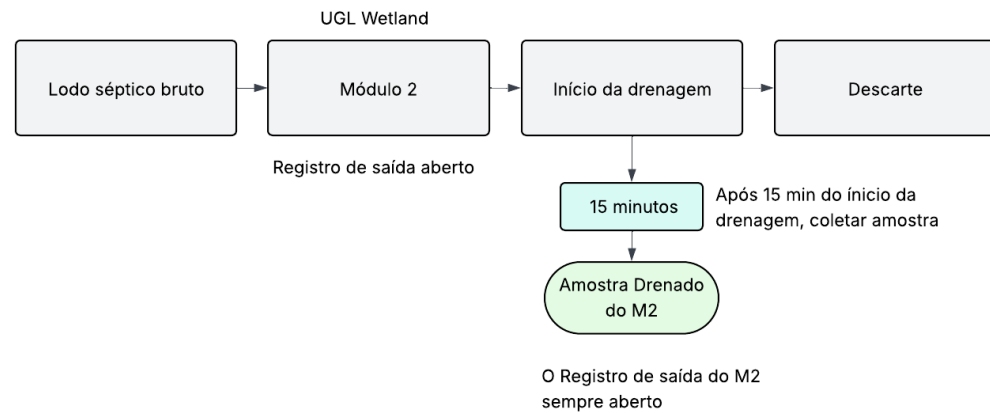
Já no M2, o registro de saída do módulo (R.D.2) está sempre aberto, ou seja, o módulo opera com livre drenagem, assim a coleta de drenado do M2 foi realizada após 15 min do início da drenagem. Por exemplo, a alimentação de lodo ocorre na terça-feira, sendo que opera com livre drenagem, assim, no mesmo dia, o percolado começa a drenar e, após 15 minutos do início da drenagem, é realizada a coleta da amostra (Figura 18).

Figura 17: Fluxograma representativo da operação e coleta de amostras no WCL_{TS} M1 componente da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

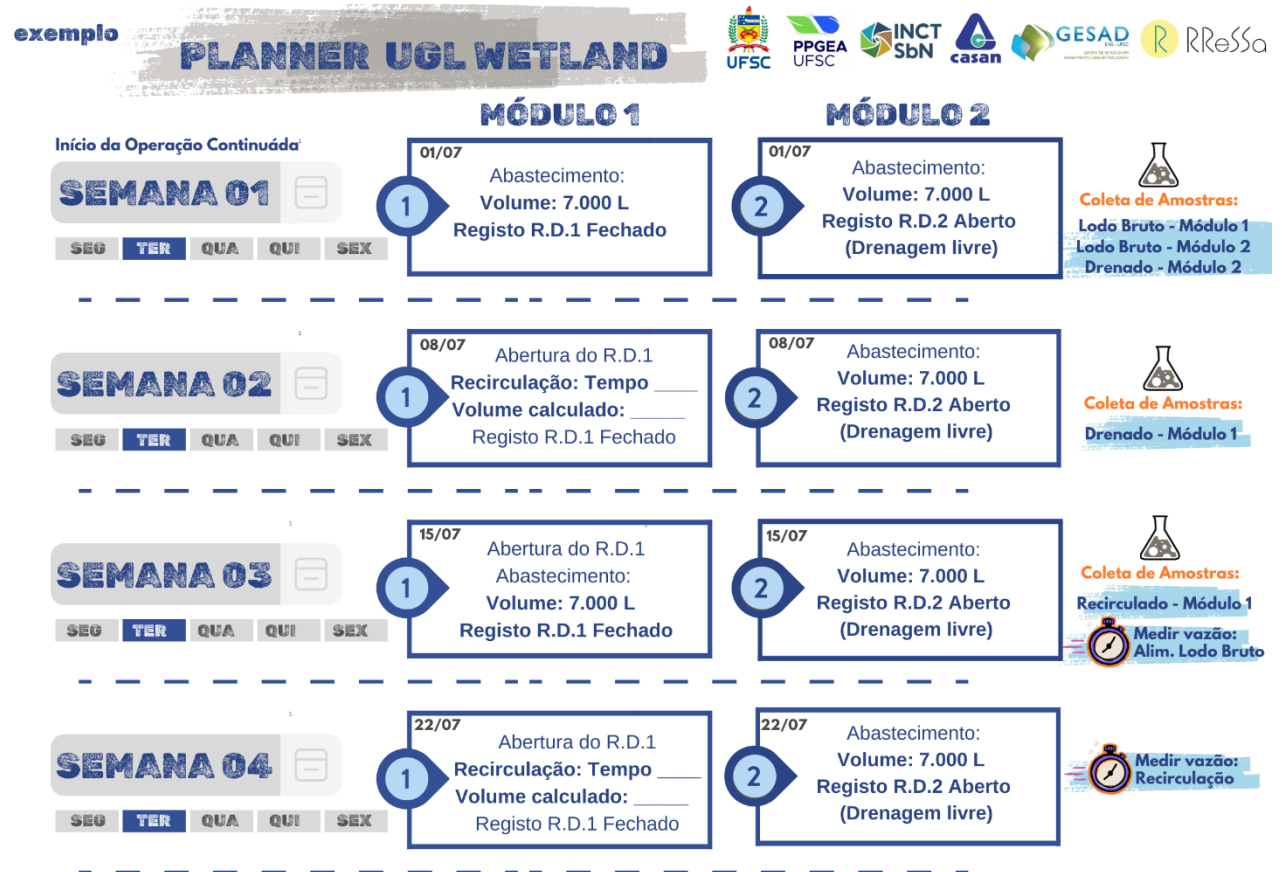
Figura 18: Fluxograma representativo da operação e coleta de amostras no WCL_{TS} M2 componente da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A rotina operacional, portanto, deu-se de forma diferenciada nos módulos WCL_{TS}, representando desta forma regime de alimentação diferenciada entre M1 e M2 (Figura 19).

Figura 19: Representação esquemática do roteiro de operação dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além das coletas de amostras, também foram realizadas medições de vazão bimestrais nos módulos WCL_{TS} e no sistema de recirculação do M1. Essas medições são essenciais para garantir que as vazões estejam dentro dos parâmetros esperados e que o sistema esteja recebendo a carga orgânica de forma adequada. Caso os testes de vazão indiquem variações em relação à vazão calculada durante os testes hidráulico de vazão, ajustes poderão ser feitos no tempo de abastecimento para assegurar que o volume de projeto de 7.000 litros (calculado a partir da carga aplicada de 40 kg.ST/m².ano) seja corretamente atingido. Esses ajustes são necessários para manter a eficiência do tratamento e garantir que o sistema continue funcionando de

maneira otimizada, proporcionando resultados consistentes ao longo da operação do sistema.

A cada mês de operação foram realizadas junto aos WCL_{TS}:

- 1 coleta de efluente bruto alimentado no M1;
- 1 coleta de drenado do M1;
- 1 coleta de efluente bruto alimentado no M2;
- 1 coleta de drenado do M2;
- 1 coleta de drenado recirculado (M1);

A cada dois meses de operação foram realizadas junto aos WCL_{TS}:

- 1 medição de vazão na alimentação do M1;
- 1 medição de vazão na alimentação do M2;
- 1 medição de vazão no sistema de recirculação.

A verificação das vazões durante a fase operacional manteve rigorosamente a metodologia hidráulica descrita anteriormente para os testes com esgoto tratado, fundamentada no método volumétrico com utilização de balde graduado e cronômetro digital. Estas aferições foram realizadas com periodicidade bimestral, repetindo-se o protocolo de medições em triplicata nas entradas A e B de cada módulo após a estabilização do fluxo, visando monitorar possíveis oscilações no bombeamento e assegurar a precisão do abastecimento do volume de projeto por meio do tempo de bombeamento.

Procedeu-se uma aferição complementar das medições volumétricas manuais, por meio de campanha de monitoramento instrumental. Utilizou-se um medidor de vazão ultrassônico portátil (*Handheld Ultrasonic Flow Meter*), disponibilizado pela CASAN, equipado com transdutores externos não intrusivos do tipo *clamp-on*, instalados diretamente sobre as tubulações externas dos módulos.

A metodologia de medição baseou-se no princípio do Tempo de Trânsito (*Transit-Time Principle*). Esta técnica consiste na emissão de pulsos ultrassônicos através da parede da tubulação, calculando a vazão a partir da diferença temporal entre um sinal emitido a favor do fluxo e outro contra o fluxo. O equipamento opera com acuidade metrológica de $\pm 1\%$ e repetibilidade de 0,2% para velocidades de fluxo superiores a 0,2 m/s, possuindo compensação automática para diferentes fluidos, adequando-se às características acústicas do efluente de recirculação e do lodo.

Para a execução das leituras, o arranjo instrumental foi configurado de acordo com o diâmetro e o tipo de fluido de cada linha, foram empregados transdutores modelo M1, instalados com espaçamento de 10,2 cm e configurados segundo a metodologia de reflexão em "W" para as aferições de vazão na linha de alimentação de lodo bruto. Já na linha de recirculação, utilizaram-se transdutores modelo S1, posicionados com espaçamento de 5,9 cm, adotando-se a metodologia de reflexão em "V". Esta etapa metodológica teve por objetivo confrontar os dados obtidos manualmente com a leitura eletrônica (Figura 20).

Figura 20: Imagem representativa do medidor de vazão ultrassônico portátil (*Handheld Ultrasonic Flow Meter*) utilizado na UGL_{TS}.



Fonte: Capturada pelo autor.

4.7.1 Monitoramento do acúmulo de lodo na superfície dos módulos WCL_{TS}

O monitoramento da dinâmica de acumulação de lodo na superfície dos módulos foi realizado por meio de medição direta da altura da camada de lodo. Vale ressaltar que medição foi realizada em apenas 1 ponto fixo em cada módulo, onde a fita métrica instalada para acompanhamento da altura de lodo está localizada aproximadamente 2 metros do ponto de alimentação. Para tanto, foi instalada uma

escala graduada (fita métrica) fixada à coluna de ventilação de cada módulo experimental. A leitura da altura da coluna de lodo acumulado foi executada semanalmente por meio de inspeção visual, permitindo o acompanhamento da evolução temporal da camada de lodo depositada, popularmente chamada de torta de lodo (Figura 21).

Figura 21: Imagem representativa da medição do acúmulo de lodo na superfície dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}.



Fonte: Capturada pelo autor.

4.7.2 Remoção de espécies de plantas invasoras nos módulos WCL_{TS}

O controle de espécies invasoras nos módulos WCL_{TS} foi estabelecido como uma atividade de manutenção contínua, executada ininterruptamente desde a etapa inicial de plantio das macrófitas até a fase de operação plena do sistema.

O procedimento baseou-se no monitoramento frequente dos módulos WCL_{TS}, onde a identificação de espécies não nativas ou oportunistas ocorria por meio de inspeção visual. Uma vez detectada a presença de vegetação invasora, procedia-se à remoção manual imediata, visando impedir a competição por nutrientes e luz com as espécies cultivadas. Para a execução segura destas intervenções, utilizou-se de

Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) adequados, compreendendo protetor facial (*face shield*), luvas, jaleco e macacão impermeável, garantindo a integridade física durante o manejo direto no leito.

4.7.3 Monitoramento analítico do afluente e efluente dos módulos WCL_{TS}

Durante a etapa de *start up* e da operação continuada da UGL_{TS}, amostras mensais de lodo bruto e efluentes dos módulos WCL_{TS} (drenado e recirculado no M1; drenado no M2) foram coletadas diretamente nos pontos de admissão (entradas) dos módulos, assegurando a representatividade do lodo efetivamente alimentado no sistema. Para a coleta, utilizaram-se recipientes de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com capacidade de 2 litros, devidamente acondicionados em caixas térmicas para preservar a integridade das características físico-químicas durante o transporte até o Laboratório do GESAD e UFSC, onde foram realizadas as análises laboratoriais, conforme destacada na Tabela 3, vale ressaltar que para as análises laboratoriais de Nitrogênio Amoniacal e Fósforo Ortofosfato, as amostras foram filtradas previamente.

Tabela 3: Parâmetros analisados e os métodos empregados no monitoramento do desempenho dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}.

Parâmetros	Metodologia Empregada	Referência
pH	Potenciométrico (Eletrométrico)	<i>Standard Methods</i> 4500-H ⁺ B (APHA, 2005)
Demanda Química de Oxigênio (DQO em mg/L)	Digestão em refluxo fechado (Colorimétrico)	<i>Standard Methods</i> 5220 D (APHA, 2005)
Nitrogênio Amoniacal (N-NH ₄ ⁺ em mg/L)	Colorimétrico (Reagente de Nessler)	Vogel (1989)
Fósforo Ortofosfato (P-PO ₄ ³⁻ em mg/L)	Colorimétrico (Ácido Ascórbico)	<i>Standard Methods</i> 4500-P E (APHA, 2005)
Sólidos Totais (ST em mg/L)	Gravimétrico (Secagem a 103–105°C)	<i>Standard Methods</i> 2540 B (APHA, 2005)
Sólidos Totais Voláteis (STV em mg/L)	Gravimétrico (Ignição a 550°C)	<i>Standard Methods</i> 2540 E (APHA, 2005)
Sólidos Totais Fixos (STF em mg/L)	Medida indireta pela diferença entre ST e STV	

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (APHA, 2005) e (VOGEL, 1989).

Ressalta-se que após o tratamento nos módulos WCL_{TS} todos os efluentes líquidos foram destinados ao sistema de esgotamento presente na ETE Canasvieiras, não sendo, portanto, destinado ao ambiente natural.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Implantação da UGL_{TS}

A construção da UGL_{TS} foi realizada por empresa de engenharia a partir de licitação pública realizada pela CASAN, sendo acompanhada todas as fases conforme descritas resumidamente na Figura 22.

A primeira etapa consistiu na movimentação de terra para preparar o terreno para as fundações e instalações do sistema. A movimentação foi feita com retroescavadeiras, garantindo a preparação adequada do local. Após essa etapa, o nivelamento do fundo e a construção da caixa da base dos módulos WCL_{TS} e dos periféricos (base para o sistema de recebimento de lodo e do drenado/recirculado dos módulos) foram realizados, assegurando a instalação precisa do concreto e proporcionando a resistência necessária.

Seguiu-se à construção das ferragens e a concretagem dos módulos, etapas essenciais para garantir a resistência estrutural. A impermeabilização com geomembranas de PEAD e Geotêxtil foi realizada em três camadas (Geotêxtil - PEAD - Geotêxtil), garantindo a estanqueidade dos WCL_{TS}. Após a impermeabilização, foram instaladas as colunas de ventilação e as tubulações de drenagem. A etapa de preenchimento dos módulos com maciço filtrante, composta por camadas de 10 cm de areia grossa (\varnothing 1,2 a 2 mm), 20 cm de brita 2 (\varnothing 19 a 25 mm) e 45 cm de brita 4 (\varnothing 50 a 76 mm), foi executada sob acompanhamento contínuo, com pré-lavagem das britas para a remoção de particulados e assentamento mecanizado com distribuição manual.

As etapas finais incluíram a construção do painel de comandos para o controle das bombas e a construção de um deck de madeira para facilitar o acesso para monitoramento e manutenção. Ajustes adicionais, como a substituição das caixas de polietileno por um tanque de alvenaria, garantiram maior resistência e conformidade com os requisitos operacionais do sistema.

Figura 22: Imagens fotográficas das etapas construtivas da UGL_{TS}, destacando o espaço temporal das atividades.

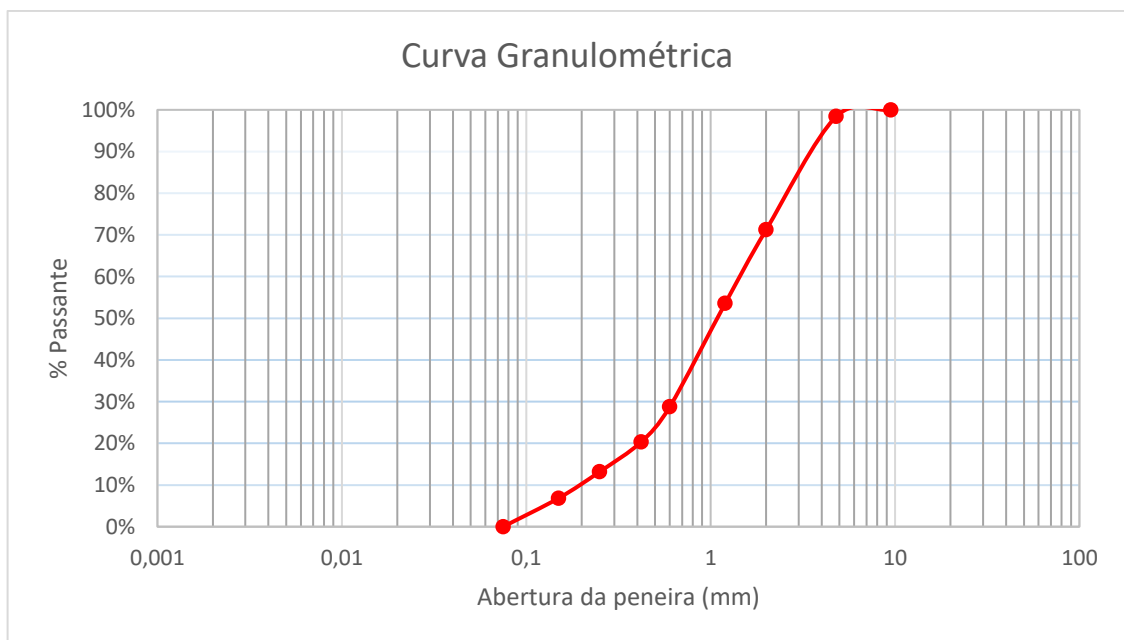
				<p>01/04/2024 Regularização do terreno</p>
				<p>08/04/2024 Realização das ferragens da base</p> <p>10/04/2024 Concretagem da base dos módulos</p>
				<p>18/04/2024 Estrutura de blocos e tubulações de drenagem</p> <p>08/05/2024 Concretagem da base dos periféricos</p>
				<p>16/05/2024 Concretagem da viga de concreto</p> <p>23/05/2024 Estrutura das caixas de recebimento do lodo</p>
				<p>04/06/2024 Impermeabilização</p> <p>06/06/2024 Preenchimento dos módulos e posicionamento das tubulações de ventilação</p>
				<p>11/06/2024 Posicionamento das tubulações e bombas</p> <p>01/07/2024 Construção do deck de madeira e ligações elétricas das bombas</p>

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 Caracterização da camada de areia componente do maciço filtrante

A caracterização física do areia grossa componente do maciço filtrante dos módulos WCL_{TS} foi realizada conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), empregando o método de peneiramento mecânico de uma amostra seca de 1.616,56 g de amostra da areia selecionada em uma série de peneiras com aberturas nominais entre 9,5 mm e 0,075 mm. O ensaio possibilitou a elaboração da curva granulométrica (Figura 23) e a definição dos parâmetros físicos do material, resultando em um diâmetro efetivo (d_{10}) de 0,2 mm, um diâmetro d_{60} de 1,48 mm e um Coeficiente de Uniformidade (U) de 7,4. Conforme pode ser observado na Figura 23 apresentada a seguir.

Figura 23: Curva Granulométrica da areia grossa componente do maciço filtrante dos módulos WCL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor

Observou-se uma divergência entre a classificação nominal do material adquirido (especificado como ϕ 1,2 a 2,0 mm) e a realidade granulométrica da amostra analisada. Os ensaios de peneiramento revelaram uma amplitude de diâmetros superior à prevista, caracterizada pela presença expressiva de grãos retidos tanto no limite superior (peneira de 2,0 mm) quanto em frações mais finas (peneira de 0,6 mm).

Essa distribuição mais ampla reflete uma menor uniformidade do material embora ainda se enquadre tecnicamente na categoria de areia grossa.

5.3 Plantio das macrófitas

O plantio das macrófitas *Salix* spp. foi a etapa que concluiu o processo de implantação dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS} e, assim, procedendo-se o início do funcionamento pleno do sistema.

O plantio das macrófitas foi realizado por uma equipe técnica composta por seis participantes, e o processo foi concluído em aproximadamente quatro horas. Ao todo, foram plantadas 1008 mudas, sendo 460 da espécie *Salix viminalis*, 22 da *Salix smithiana* e 22 da *Salix Mathusdana* tortuosa por módulo.

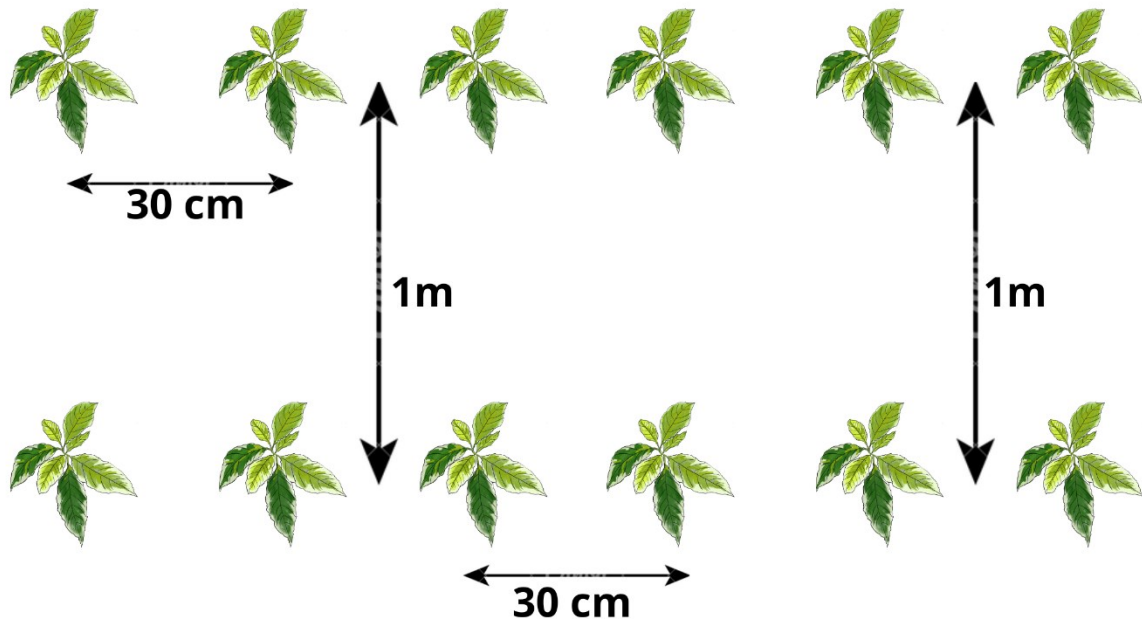
As plantas foram fornecidas pelos técnicos da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) do município de Lages/SC, que levaram em consideração as condições climáticas do município, a carga de lodo e outros fatores ambientais para escolher as espécies mais adequadas. O uso de plantas fornecidas localmente e adaptadas ao clima da região é uma prática recomendada, pois garante um maior sucesso no desenvolvimento e adaptação das espécies ao ambiente dos wetlands.

As estacas de *Salix* spp. foram cortadas com diâmetros variando de 4 a 8 milímetros e com 30 centímetros de comprimento, conforme as especificações fornecidas pela equipe da EPAGRI. Essas medidas foram escolhidas para garantir o enraizamento eficiente das plantas. O processo de plantio foi planejado para garantir a uniformidade na disposição das plantas. Utilizou-se um molde fornecido pela EPAGRI para padronizar o espaçamento entre as mudas, com uma densidade de 10 mudas por metro quadrado, conforme as orientações e diretrizes técnicas estabelecidas pelo pesquisador especialista vinculado à EPAGRI, parceiro do projeto.

Para isso, as estacas foram introduzidas nos módulos WCL_{TS} com um espaçamento lateral de 1 metro e frontal de 30 centímetros, totalizando 11 mudas por coluna e 44 mudas por linha, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 24.

As profundidades das estacas foram mantidas em 13 cm expostos à superfície e 17 cm enterrados no maciço filtrante, favorecendo o enraizamento e a adaptação das plantas ao ambiente do wetland (Figura 25 e Figura 26).

Figura 24: Ilustração representativa da distribuição das mudas de *Salix* spp. plantadas nos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25: Imagens fotográficas capturadas durante o plantio das macrófitas *Salix* spp. nos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26: Imagem fotográfica capturada durante o plantio das macrófitas *Salix* spp. pelos pesquisadores do GESAD/UFSC nos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Remoção de espécies vegetais invasoras nos módulos WCL_{TS}

Embora o controle de espécies invasoras tenha sido estabelecido como uma atividade de manutenção contínua, não houve um registro quantitativo das intervenções realizadas. Observou-se, contudo, uma relação inversamente proporcional entre o crescimento das macrófitas e a necessidade de manejo, ou seja, quanto maior o desenvolvimento das macrófitas, menor a incidência de invasoras. Conseqüentemente, a frequência dessas operações foi mais intensa nas fases iniciais de desenvolvimento das plantas. Adicionalmente, as atividades de remoção manual foram executadas (Figura 27), em sua maioria, durante os períodos de espera pelo caminhão limpa-fossa para a alimentação do sistema, aproveitando-se a logística operacional para a manutenção do leito.

Figura 27: Imagem fotográfica capturada durante a remoção manual de espécies vegetais invasoras nos módulos WCL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Corte da parte aérea das macrófitas

O primeiro corte da parte aérea das macrófitas *Salix* spp. foi realizado em 19 de agosto de 2025 (11 meses após o plantio). A intervenção foi motivada pela observação de intensa perda de folhas, tendo como objetivo principal estimular o rebrotamento e renovar o vigor das macrófitas. No momento do manejo, as plantas apresentavam altura variando entre 1,6 m e 2,4 m, sendo cortadas para 15 cm a partir da base. A operação foi executada em regime de colaboração entre as equipes da EPAGRI e do GESAD/UFSC. Para a execução segura desta etapa operacionais, os pesquisadores utilizaram EPIs adequados, garantindo a integridade física durante o manejo direto no leito (Figura 28).

Figura 28: Imagem fotográfica capturada durante o procedimento de corte da parte aérea das macrófitas *Salix* spp. nos módulos WCL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Testes Hidráulicos de Vazão de Alimentação dos Módulos WCL_{TS} com Esgoto tratado da ETE Canasvieiras

Conforme descrito na linha do tempo apresentada anteriormente na Figura 10, no período de agosto a setembro de 2024 foram realizados testes hidráulicos utilizando esgoto tratado pela ETE Canasvieiras nos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}. Foram, portanto, realizadas medições da vazão de alimentação nas duas

entradas disponíveis em cada módulo WCL_{TS} , com cada medição sendo realizada em triplicata para cada entrada, garantindo maior confiabilidade e precisão nos dados. As medições realizadas permitiram calcular a média da vazão de entrada do efluente (Figura 29).

Figura 29 Imagem fotográfica capturada durante a execução dos testes hidráulicos de vazão de alimentação junto aos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS} .



Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de enchimento do balde volumétrico é o intervalo necessário para que o efluente preencha completamente o balde, sendo registrado para calcular a vazão de entrada no módulo durante os testes hidráulicos. A partir desses dados obtidos, foi possível calcular quanto de esgoto tratado foi abastecido em cada módulo neste período de 30 minutos e, também, qual seria o tempo necessário para o abastecimento de 7.000 litros de lodo, o volume de projeto.

Os testes hidráulicos de vazão de alimentação dos módulos M1 e M2 correspondem ao conjunto motobomba modelo Auto-aspirante Schneider Bca-40, sendo os resultados obtidos apresentados nas Tabela 4 e 5.

Tabela 4: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados no módulo WCL_{TS} M1.

Bomba de Abastecimento - Módulo 1 - Esgoto tratado			
Data	Média Tempo (40 litros)	Tempo necessário (volume de projeto)	Vazão (L/min)
13/08/2024	10,33	30,13	232,33
20/08/2024	10,35	30,19	231,88
26/08/2024	11,67	34,04	205,66
04/09/2024	14,37	41,91	167,01
12/09/2024	20,55	59,94	116,79
18/09/2024	26,00	75,83	92,31
24/09/2024	19,58	57,11	122,57
Média	16,12	47,02	166,94
Mediana	14,37	41,91	167,01
Desvio Padrão	5,59	16,31	53,51

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados no módulo WCL_{TS} M2.

Bomba de Abastecimento - Módulo 2 - Esgoto tratado			
Data	Média Tempo (40 litros)	Tempo necessário (volume de projeto)	Vazão (L/min)
13/08/2024	9,68	28,23	247,93
22/08/2024	12,46	36,34	192,62
28/08/2024	13,28	38,73	180,72
10/09/2024	21,15	61,69	113,48
12/09/2024	21,88	63,82	109,69
17/09/2024	17,56	51,22	136,67
23/09/2024	20,21	58,95	118,75
Média	16,60	48,43	157,12
Mediana	17,56	51,22	136,67
Desvio Padrão	4,45	12,98	47,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o tempo necessário para o abastecimento do volume de projeto apresentou um aumento progressivo ao longo dos testes hidráulicos, variando de aproximadamente 30 minutos no início para até 75 minutos (1 hora e 15 minutos) em seu pico máximo. O tempo médio de enchimento dos módulos com o volume de projeto foi de 47,02 minutos e 48,43 minutos, respectivamente para os módulo M1 e M2, indicando uma tendência de variação durante o período de monitoramento.

No sistema de recirculação, o volume teórico de projeto não foi considerado como parâmetro fixo, visto que ocorrem perdas hídricas significativas por evapotranspiração e retenção no meio filtrante. Dessa forma, determinou-se a vazão média de alimentação, permitindo calcular o volume de drenado efetivamente alimentado no módulo M1 em função do tempo de operação da bomba.

Os testes hidráulicos de vazão do sistema de recirculação no módulo M1 correspondem ao conjunto motobomba: Bomba Centrífuga Monoestágio Schneider BC-91 S, sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 6.

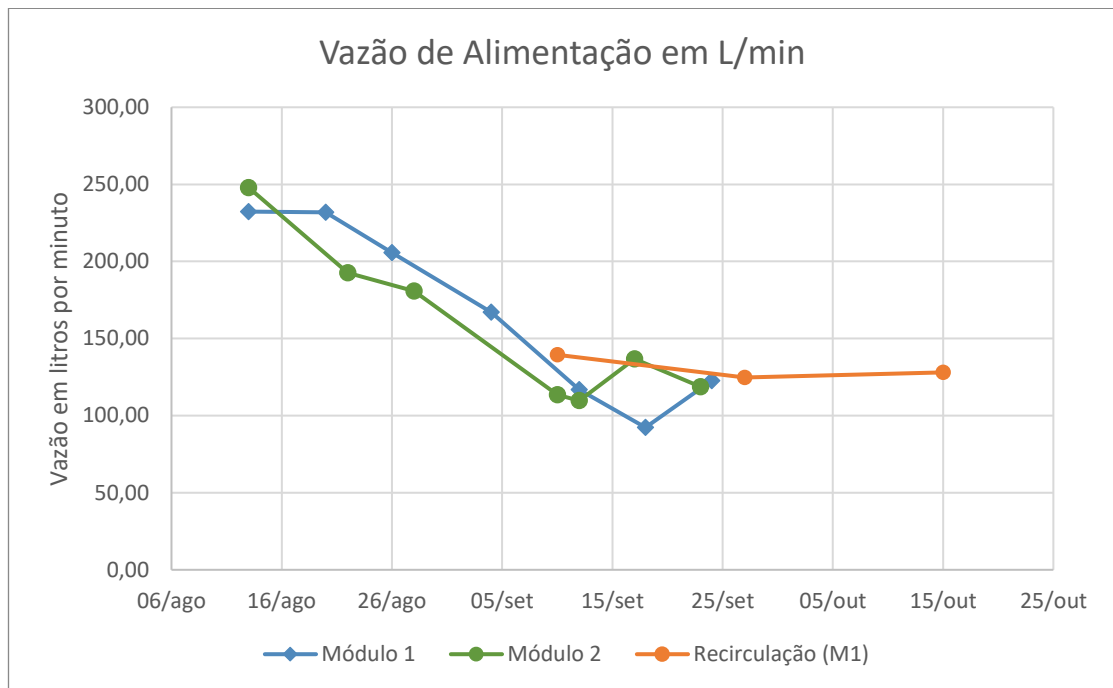
Tabela 6: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados no módulo WCL_{TS} M1 – Recirculação.

Recirculação - Módulo 1		
Data	Média Tempo (40 litros)	Vazão (L/min)
10/09/20204	17,21	139,45
27/09/2024	19,24	124,74
15/10/2024	18,74	128,07
Média	18,40	130,75
Mediana	18,74	128,07
Desvio Padrão	0,86	6,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir destes dados obtidos em campo, foi possível elaborar gráficos referentes a vazão de alimentação dos módulos WCL_{TS} com esgoto tratado pela ETE Canasvieiras, conforme destacado na Figura 30.

Figura 30: Representação gráfica da vazão de alimentação (com esgoto tratado) dos módulos WCL_{TS} M1 e M2, bem como de recirculação no M1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7 Tempo de Infiltração nos módulos WCL_{TS}

Durante os testes hidráulicos, também, foram realizados ensaios para avaliar a infiltração do esgoto tratado no sistema. Esses testes foram conduzidos exclusivamente em dias em que os leitos drenantes estavam secos, ou seja, na ausência de chuvas recentes ou em andamento. Os dados obtidos sobre a infiltração nos módulos WCL_{TS} são apresentados na Tabela 7. Vale ressaltar que esse tempo de infiltração foi medido para abastecimentos de esgoto tratado de 30 minutos, não sendo para todo o volume de projeto (7.000 litros).

Tabela 7: Valores obtidos de tempos de infiltração do líquido percolado através do maciço filtrante dos módulos WCL_{TS} após aplicação de lodo.

Data	Módulo 1	Módulo 2
16/08/2024	7 min e 10 s	x
20/08/2024	10 min e 40 s	x
22/08/2024	x	7 min e 20 s
26/08/2024	10 min e 15 s	x
10/09/2024	x	9 min e 8 s
12/09/2024	12 min e 25 s	9 min e 50 s
17/09/2024	x	17 min e 27 s
18/09/2024	11 min e 12 s	x
23/09/2024	x	12 min e 20 s
24/09/2024	9 min e 52 s	x
Média	10 min e 15 s	11 min e 13 s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o período de alimentação fixado em 30 minutos e as vazões médias obtidas nos ensaios com esgoto tratado, calculou-se o volume total aplicado em cada unidade. Para o módulo M1, com uma vazão média de 166,94 L/min, o volume afluyente foi de 5.008 litros. Já no módulo M2, sob uma vazão média de 157,12 L/min, o volume totalizou 4.716 litros.

A análise comparativa dos tempos de infiltração revela um comportamento hidráulico distinto entre as unidades. O módulo M1, mesmo recebendo uma carga volumétrica superior (aproximadamente 6% maior que o M2), apresentou um tempo médio de infiltração de 10 min e 15 s, inferior aos 11 min e 13 s registrados no módulo M2. Esse resultado indica uma maior condutividade hidráulica no M1, visto que foi capaz de percolar um volume maior de efluente em um intervalo de tempo menor. Tal disparidade sugere que o M2 pode estar apresentando uma resistência à filtração ligeiramente superior, possivelmente devido a diferenças na acomodação do meio filtrante.

5.8 Testes Hidráulicos de Vazão de Alimentação dos Módulos WCL_{TS} durante a fase de *Start up* da UGL_{TS}

A partir de 1º de outubro de 2024, iniciou-se a alimentação dos módulos WCL_{TS} com lodo proveniente de tanques sépticos, utilizando uma estratégia de diluição com esgoto tratado da ETE Canasvieiras.

Durante o processo de diluição e abastecimento, foram realizadas medições de vazão de alimentação para cada ciclo, seguindo a mesma metodologia empregada nos testes realizados com esgoto tratado. As medições foram feitas em triplicata para cada entrada (A e B), assegurando a precisão dos dados, que permitiram o cálculo da vazão média de entrada nos módulos WCL_{TS}.

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 7, oferecendo uma visão clara do desempenho hidráulico do sistema durante a operação com lodo diluído.

Tabela 7: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados durante o *Start up* no módulo WCL_{TS} M1.

Bomba de Abastecimento - Módulo 1 - Startup do sistema (lodo diluído)			
Data	Média Tempo (40 litros)	Tempo necessário (volume de projeto)	Vazão (L/min)
01/10/2024	25,21	73,53	95,20
10/10/2024	30,95	90,27	77,54
22/10/2024	36,16	105,47	66,37
30/10/2024	36,31	105,90	66,10
07/11/2024	34,6	100,92	69,36
12/11/2024	37,68	109,90	63,69
16/12/2024	41,14	119,99	58,34
Média	34,58	100,85	70,94
Mediana	36,16	105,47	66,37
Desvio Padrão	4,77	13,91	11,28

Fonte: Elaborado pelo autor.

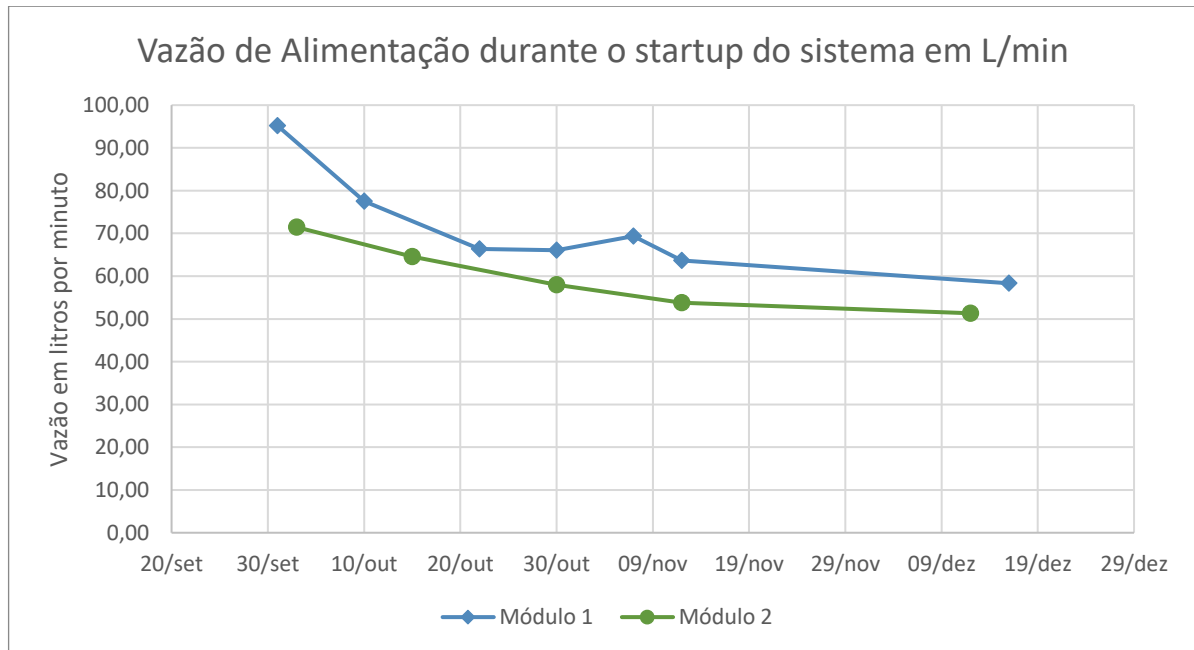
Tabela 8: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados durante o *Start up* no módulo WCL_{TS} M2.

Bomba de Abastecimento - Módulo 2 - Startup do sistema (lodo diluído)			
Data	Média Tempo (40 litros)	Tempo necessário (volume de projeto)	Vazão (L/min)
03/10/2024	33,59	97,97	71,45
15/10/2024	37,17	108,41	64,57
30/10/2024	41,38	120,69	58,00
12/11/2024	44,65	130,23	53,75
12/12/2024	46,76	136,38	51,33
Média	40,71	118,74	59,82
Mediana	41,38	120,69	58,00
Desvio Padrão	4,81	14,04	7,35

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir destes dados obtidos em campo, foi possível elaborar gráficos referentes a vazão de alimentação dos módulos durante o *start up* do sistema, ou seja, com lodo séptico diluído com esgoto tratado pela ETE Canasvieiras (Figura 31).

Figura 31: Representação gráfica da vazão de alimentação (com lodo de tanque séptico diluído em esgoto tratado) dos módulos WCL_{TS} M1 e M2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante os testes realizados com lodo diluído em esgoto tratado nos módulos WCL_{TS}, foi observado um aumento progressivo no tempo de enchimento do balde volumétrico e, conseqüentemente, a redução da vazão de alimentação, assim como o aumento no tempo de abastecimento do volume de projeto nos módulos. Nos dados do M1, o tempo médio de enchimento do balde volumétrico variou de 25,21 segundos no início de outubro de 2025 para 41,14 segundos em dezembro de 2025, refletindo um aumento gradual no tempo necessário para o abastecimento do volume de 40 litros. A mesma tendência foi observada no M2, onde o tempo médio de enchimento passou de 33,59 segundos no início de outubro de 2025 para 46,76 segundos em dezembro de 2025.

Esse aumento no tempo de enchimento, também, se refletiu no tempo total necessário para abastecer o volume de projeto, que é calculado com base na vazão de alimentação. No M1 o tempo necessário para abastecer o volume de projeto aumentou de 73,53 minutos em 1º de outubro de 2025 para 120 minutos em 16 de

dezembro de 2025, com uma média de 100,86 minutos. No M2 o tempo de abastecimento passou de 97,97 minutos em 3 de outubro de 2025 para 136,38 minutos em 12 de dezembro de 2025, com uma média de 118,38 minutos.

5.9 Ajustes Operacionais no Sistema Hidráulico da UGL_{TS}

O cronograma experimental de 2025 teve início com a Etapa de Ajustes Pré-Operacionais, compreendida entre os meses de fevereiro e abril do mesmo ano. Esta fase foi destinada à validação dos procedimentos de rotina e à execução de manutenções corretivas, marcando a partida do sistema com lodo séptico bruto. Inicialmente, foram realizadas aplicações experimentais com o volume de projeto, totalizando dois ciclos completos de alimentação no módulo M1 e três ciclos no módulo M2.

Contudo, durante estas operações, confirmou-se a inadequação técnica da motobomba Schneider BCA-40, apresentando-se ineficiente no recalque do lodo bruto para os módulos WCL_{TS}. Conforme informações técnicas da equipe de manutenção da CASAN, o equipamento sofreu falha funcional devido à incrustação e solidificação de gordura em suas partes móveis (rotor). Esta obstrução restringiu a passagem do fluido, evidenciando que a especificação técnica deste modelo não é compatível com as características do efluente. Este diagnóstico elucidou a causa da redução progressiva de vazão observada nos testes hidráulicos realizados anteriormente.

Diante disso, foi necessária a substituição do conjunto de recalque pelo modelo Sulzer Robusta 300T, processo que implicou na paralisação do sistema por aproximadamente 30 dias para trâmites de aquisição e instalação. O novo conjunto motobomba foi instalado inicialmente de forma provisória, acoplado a um mangote flexível que direcionava o lodo séptico a tubulação de alimentação do sistema, conforme representado na Figura 32.

Figura 32: Imagem fotográfica capturada durante a ação de adaptação provisória no sistema de bombeamento de alimentação de lodo nos módulos WCL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta etapa, foram conduzidos novos ensaios de vazão utilizando a nova bomba e lodo bruto. A vazão calculada para essa etapa pode ser observada na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados após substituição da bomba no módulo WCL_{TS} M1.

Nova Bomba de Abastecimento - Módulo 1 - Lodo Séptico Bruto			
Data	Média Tempo (40 litros)	Tempo necessário (volume de projeto)	Vazão (L/min)
07/04/2025	19,37	56,49	123,90
14/04/2025	18,56	54,14	129,31
Média	18,97	55,31	126,61
Mediana	18,97	55,31	126,61
Desvio Padrão	0,41	1,17	2,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados após substituição da bomba no módulo WCL_{TS} M2.

Nova Bomba de Abastecimento - Módulo 2 - Lodo Séptico Bruto			
Data	Média Tempo (40 litros)	Tempo necessário (volume de projeto)	Vazão (L/min)
07/04/2025	22,15	64,61	108,35
14/04/2025	17,35	50,61	138,33
Média	19,75	57,61	123,34
Mediana	19,75	57,61	123,34
Desvio Padrão	2,40	7,00	14,99

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a instalação do novo conjunto motobomba Sulzer Robusta 300T, verificou-se que o desempenho hidráulico inicial permaneceu significativamente abaixo da curva teórica prevista pelo fabricante. A investigação operacional identificou que a perda de rendimento não estava associada ao equipamento em si, mas às condições da instalação provisória. A utilização de uma tubulação flexível (mangote) na linha de recalque mostrou-se inadequada para o bombeamento de lodo séptico; durante a operação, a pressão do fluxo causava torções e estrangulamentos no mangote, criando uma perda de carga singular excessiva que restringia severamente a vazão de alimentação do sistema, conforme pode ser observado na Figura 33.

Figura 33: Imagem fotográfica capturada evidenciando o estrangulamento observado na adaptação provisória no sistema de bombeamento/alimentação de lodo nos módulos WCL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para mitigar as perdas de carga associadas à deformação dos condutos flexíveis, foi requisitada a intervenção da equipe de manutenção da CASAN para a adequação definitiva da linha de recalque. Em junho de 2025, procedeu-se à instalação de um sistema fixo com tubulação rígida, assegurando a integridade do fluxo e a adequação hidrodinâmica necessária para o bombeamento eficiente do lodo bruto (Figura 34). Durante o restante do mês de junho do mesmo ano, manteve-se o regime de alimentação semanal com o volume de projeto, consolidando os testes finais de comissionamento. Esse período marcou o encerramento da Fase de Estabilização e Adaptação Operacional.

Figura 34: Imagem fotográfica capturada evidenciando o ajuste final na tubulação do sistema de bombeamento/alimentação de lodo séptico bruto nos módulos WCL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.10 Testes Hidráulicos de Vazão durante a Operação dos Módulos WCL_{TS}

Em julho de 2025, iniciou-se a Fase de Operação e Monitoramento de Desempenho. É importante destacar que, a partir desta nova etapa, alterou-se o regime hidráulico do M2, que passou a operar com drenagem livre.

Ao longo desta fase operacional, instituiu-se uma rotina de monitoramento hidráulico bimestral, ou seja, a aferição da vazão de alimentação era realizada a cada 2 meses de operação (Tabelas 11, 12 e 13). Esses ensaios de vazão tiveram por objetivo a recalibração periódica do tempo de acionamento do conjunto motor-bomba,

assegurando a precisão na aplicação da carga volumétrica de projeto, estipulada em 7.000 litros de lodo séptico.

Tabela 11: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados durante a operação continuada no módulo WCL_{TS} M1.

Bomba de Abastecimento - Módulo 1 - Lodo bruto			
Data	Média Tempo (40 litros)	Tempo necessário (volume de projeto)	Vazão (L/min)
01/07/2025	7,8	22,75	307,69
16/09/2025	6,64	19,37	361,45
11/11/2025	7,82	22,81	306,91
12/12/2025	7,48	21,82	320,86
Média	7,44	21,69	324,22
Mediana	7,64	22,28	314,27
Desvio Padrão	0,48	1,40	22,19

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados durante a operação continuada no módulo WCL_{TS} M2.

Bomba de Abastecimento - Módulo 2 - Lodo bruto			
Data	Média Tempo (40 litros)	Tempo necessário (volume de projeto)	Vazão (L/min)
01/07/2025	8,69	25,35	276,18
16/09/2025	7,64	22,28	314,14
11/11/2025	7,62	22,23	314,96
12/12/2025	7,62	22,23	314,96
Média	7,89	23,02	305,06
Mediana	7,63	22,25	314,55
Desvio Padrão	0,46	1,34	16,68

Fonte: Elaborado pelo autor.

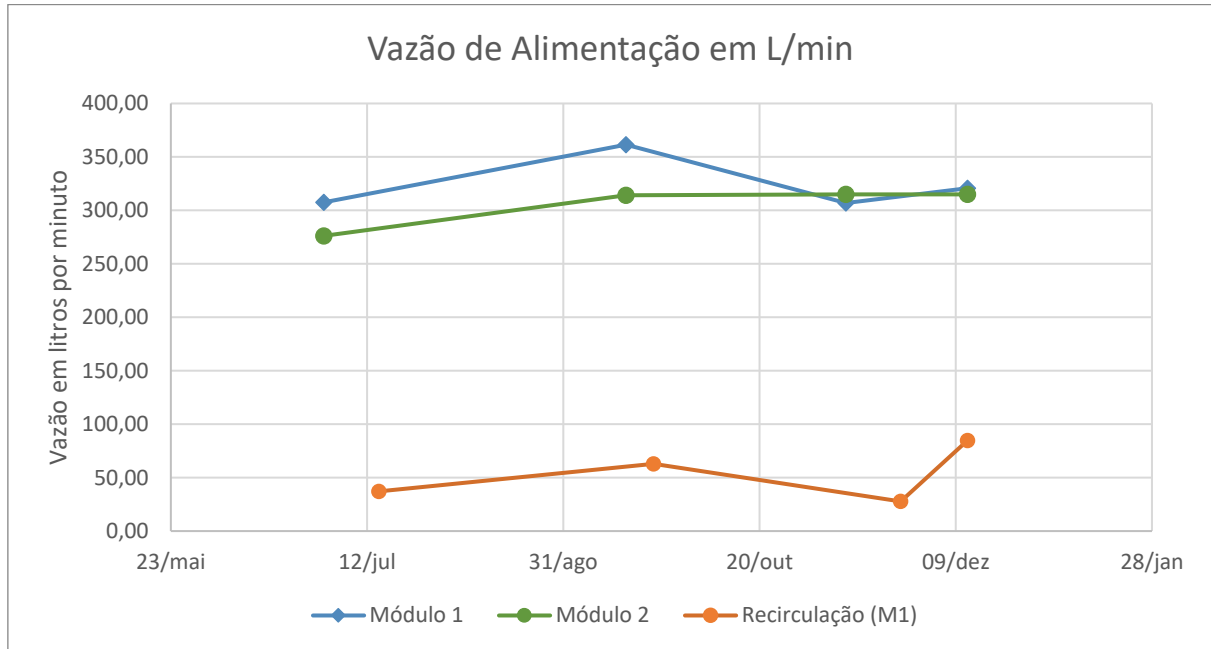
Tabela 13: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados durante a operação continuada do sistema de recirculação no módulo WCL_{TS} M1.

Bomba de Recirculação - Módulo 1 - Efluente drenado			
Data	Média Tempo (40 litros)	Tempo necessário (volume de projeto)	Vazão (L/min)
15/07/2025	64,46	188,01	37,23
23/09/2025	38,23	111,50	62,78
25/11/2025	86,58	252,53	27,72
12/12/2025	28,31	82,57	84,78
Média	54,40	158,65	53,13
Mediana	51,35	149,76	50,01
Desvio Padrão	22,80	66,49	22,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos testes de vazão bimestrais realizados durante a fase operacional permite avaliar a estabilidade do sistema de bombeamento e a consistência da aplicação das cargas hidráulicas (Figura 35). Observa-se, preliminarmente, que a substituição do conjunto motor-bomba (realizada na etapa pré-operacional) e os ajustes realizados nas tubulações resultaram em um desempenho satisfatório. As vazões médias de 324,22 L/min registradas para o M1 e 305,06 L/min para o M2 garantiram tempos de abastecimento médios de aproximadamente 21 a 23 minutos para o volume de projeto de 7.000 litros, respectivamente, demonstrando capacidade operacional adequada.

Figura 35: Representação gráfica da vazão de alimentação (com lodo de tanque séptico bruto) dos módulos WCL_{TS} M1 e M2, bem como a vazão de recirculação no M1.



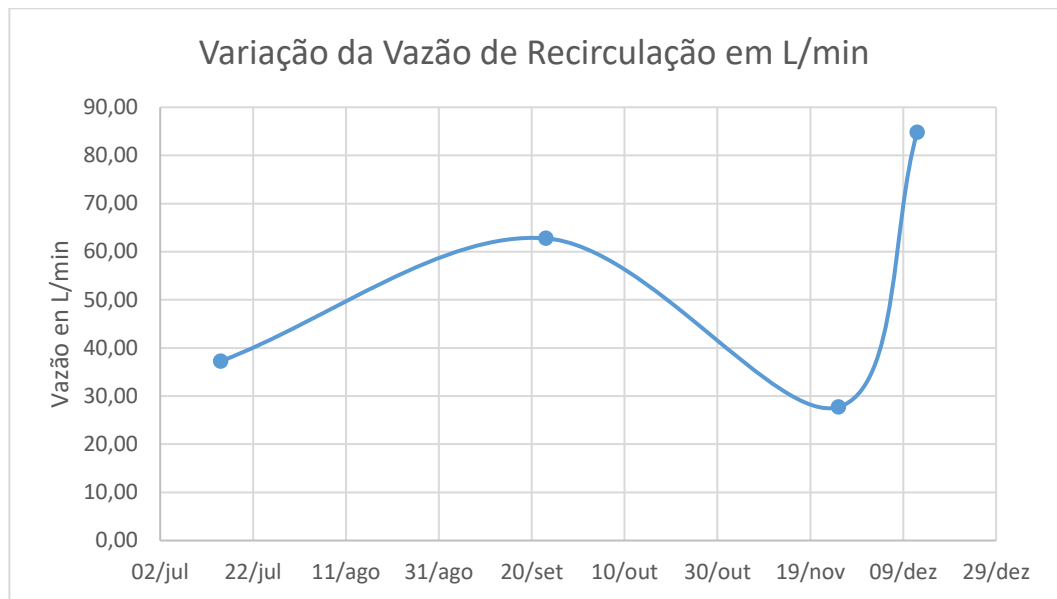
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a estabilidade dos dados através do desvio padrão, nota-se uma variabilidade aceitável para condições de campo. O M1 apresentou um desvio padrão de 22,19 L/min (coeficiente de variação $\approx 6,8\%$), enquanto que o M2 demonstrou maior estabilidade, com desvio de 16,68 L/min (coeficiente de variação $\approx 5,5\%$).

Um ponto de destaque ocorreu no monitoramento de setembro de 2025, onde registrou-se para o M1 um incremento na vazão (atingindo 361,45 L/min). No entanto, no monitoramento subsequente de novembro de 2025, o M1 retornou aos patamares próximos aos iniciais (306,91 L/min). De modo geral, os dados confirmam que o sistema de alimentação operou dentro de uma faixa de segurança, permitindo o ajuste preciso do tempo de bomba para garantir a carga volumétrica de projeto, sem os problemas de entupimento observados na fase anterior.

Diferentemente da alimentação de lodo bruto, o sistema de recirculação do efluente drenado no M1 apresentou uma flutuação hidráulica expressiva ao longo do período monitorado. A vazão média calculada foi de 53,13 L/min, porém com um desvio padrão elevado de 22,32 L/min (coeficiente de variação $\approx 42\%$), indicando alta taxa de variação entre cada uma das medições (Figura 36).

Figura 36: Representação gráfica das variações de vazão de Recirculação no WCL_{TS} M1, durante a operação do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A instabilidade observada na vazão do sistema de recirculação, caracterizada por oscilações significativas entre os monitoramentos, difere do comportamento esperado para o equipamento em questão. Visto que o efluente recalcado (drenado proveniente do M1) já foi submetido ao tratamento no WCL_{TS}, e este apresenta características muito próximas às da água, com baixa concentração de sólidos suspensos e viscosidade reduzida, minimizando a probabilidade de obstruções físicas como fator primário de variação.

Diante disso, infere-se que as flutuações de vazão podem estar correlacionadas às variações na rede de energia elétrica na unidade experimental, bem como problemas no funcionamento do inversor de frequência instalado no quadro de controle. Variações de tensão na rede de alimentação impactam diretamente a rotação do motor e, conseqüentemente, a curva de desempenho da bomba (altura manométrica *versus* vazão), gerando as discrepâncias registradas. Conforme demonstrado por Kini, Bansal e Aithal, (2006), as variações e desequilíbrios na tensão de alimentação influenciam diretamente o torque desenvolvido pelo motor de indução, alterando sua velocidade de operação e, conseqüentemente, impactando o desempenho hidráulico (como a vazão) de bombas.

Esse cenário evidencia a importância crítica da realização de aferições hidráulicas periódicas. Somente através do monitoramento sistemático da vazão in

loco é possível corrigir as distorções causadas por essas variáveis externas, permitindo o cálculo do volume de drenado efetivamente recirculado, possibilitando estimar o balanço hídrico do sistema.

5.11 Teste de Vazão Utilizando o Equipamento Handheld Ultrasonic Flow Meter

De forma complementar e verificadora às aferições volumétricas manuais, realizou-se, no dia 10 de dezembro de 2025, uma campanha de monitoramento instrumental no sistema de alimentação de lodo séptico bruto e no sistema de recirculação. Para este procedimento, utilizou-se o medidor de vazão ultrassônico portátil (*Handheld Ultrasonic Flow Meter*), fornecido pela CASAN, operando com transdutores externos não intrusivos (*clamp-on*).

A metodologia de medição fundamentou-se no princípio do Tempo de Trânsito (*Transit-Time Principle*). Esta técnica consiste na emissão de pulsos ultrassônicos através da parede da tubulação, calculando a diferença temporal entre um sinal enviado a favor do fluxo e outro contra o fluxo. A instalação do equipamento é realizada diretamente sobre a tubulação existente, do lado de fora dos módulos.

O equipamento foi configurado para garantir a máxima acuidade metrológica, operando com uma precisão de leitura de $\pm 1\%$ e repetibilidade de 0,2% para velocidades de fluxo superiores a 0,2 m/s. Além disso, o dispositivo possui capacidade de compensação para diferentes tipos de fluidos, o que é ideal para o efluente de recirculação, cujas características acústicas são similares às da água limpa. A validação por meio desta tecnologia permitiu confrontar os dados manuais com uma leitura eletrônica, minimizando incertezas experimentais associadas à medição com proveta e cronômetro.

A configuração instrumental do equipamento seguiu parâmetros específicos para maximizar a precisão da medição em cada etapa do processo. Na linha de alimentação de lodo séptico bruto, foram utilizados transdutores, posicionados com espaçamento de 10,2 cm utilizando a metodologia "W".

Para a linha de recirculação, empregaram-se transdutores modelo S1 com espaçamento de 5,9 cm utilizando a metodologia "V". A seleção destes métodos de instalação resultou de uma validação experimental prévia, onde tais arranjos demonstraram a maior proximidade aos valores de referência obtidos pelas medições

manuais, superando outras metodologias testadas. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 14: Valores obtidos a partir dos testes hidráulicos de vazão realizados com equipamento digital *Handheld Ultrasonic Flow Meter*.

Data	Bomba/ Sistema	Vazão (L/s)	Vazão (L/min)
12/12/2025	Alimentação de lodo bruto	4,4738	268,428
12/12/2025	Recirculação de Drenado	0,8701	52,206

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise comparativa apontou divergências entre os resultados da medição de vazão manual e os obtidos via equipamento digital. Na linha de alimentação de lodo séptico bruto, o monitoramento instrumental registrou uma vazão de 4,47L/s (268,423 L/min). Vale ressaltar que o ponto de medição situa-se a montante do registro de manobra que direciona o fluxo para os módulos (M1 ou M2). Ao confrontar este dado com as aferições volumétricas manuais – que apresentaram médias de 324,22 L/min para o M1 e 305,06 L/min para o M2, resultando em uma média geral de 314,64 L/min – observa-se uma divergência onde o método manual registrou valores aproximadamente 17% superiores à leitura ultrassônica. Essa diferença pode ser atribuída às características do fluido (lodo com alta densidade de sólidos) que podem atenuar o sinal ultrassônico, ou às variações instantâneas de bombeamento.

No que tange ao sistema de recirculação, o medidor ultrassônico indicou uma vazão de 0,87 L/s (52,21 L/min). Este valor demonstra uma alta correlação com a média histórica das medições manuais, estabelecida em 53,13 L/min, o que válida a calibração do equipamento para este tipo de efluente mais clarificado. Contudo, destaca-se uma discrepância significativa pontual, qual fora: na verificação manual realizada concomitantemente ao uso do equipamento (no mesmo dia 10 de dezembro de 2025), registrou-se uma vazão de 84,78 L/min. O fato de o equipamento marcar ~52 L/min enquanto a aferição manual pontual indicou ~84 L/min, em um sistema cuja média histórica é ~53 L/min, evidencia a elevada instabilidade hidráulica da recirculação.

Essa variação abrupta corrobora a hipótese de oscilações na rotação do conjunto motor-bomba, possivelmente causadas por variações de tensão na rede

elétrica, conforme discutido anteriormente, que podem gerar oscilações na vazão detectada nas aferições manuais e eletrônicas.

Em resumo pode-se observar que para o sistema de alimentação de lodo séptico bruto, a vazão medida pelo equipamento *Handheld Ultrasonic Flow Meter* se mostrou abaixo da vazão média aferida de forma manual (diferença de 17%). Já no sistema de recirculação, os valores médios aferidos de forma manual e o valor medido com o equipamento são muito próximos, porém, o sistema de recirculação apresentou grandes variações ao longo de série histórica de dados. Na Figura 37 evidenciam-se registros fotográficos capturados durante os testes.

Figura 37: Imagem fotográfica representativa da realização dos testes de vazão com equipamento digital *Handheld Ultrasonic Flow Meter*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.12 Volume de Drenado Alimentado no WCL_{TS} M1 a partir do Sistema de Recirculação

A partir da vazão do sistema de recirculação determinado por meio dos testes hidráulicos e do tempo de acionamento da bomba de recirculação, foi possível obter o volume de drenado do M1 na etapa de recirculação. Subtraindo-se este valor do volume afluyente total (7.000 L de lodo séptico bruto), foi possível estimar as perdas sistêmicas, compreendendo a retenção hidráulica no meio suporte e a taxa de evapotranspiração do WCL_{TS} (Tabela 15).

Tabela 15: Valores referentes ao volume de drenado alimentado no WCL_{TS} M1 durante o processo de Recirculação, estimado pela Vazão Média da Recirculação de 53L/min.

Semana operacional	Tempo de acionamento da bomba de Recirculação (min)	Volume alimentado (L)	Perdas (evapotranspiração / retenção no maciço filtrante (L))
2	105	5565	1435
4	48	2544	4456
6	85	4505	2495
8	70	3710	3290
11	75	3975	3025
13	160	8480	-1480
15	127	6731	269
17	107	5671	1329
19	137	7261	-261
21	60	3180	3820
23	74	3922	3078
Média	95	5049	1951
Mediana	85	4505	2495

Fonte: Elaborado pelo autor.

O monitoramento do volume efetivamente recirculado no M1, calculado a partir da vazão média de 53 L/min e dos tempos de acionamento da bomba, revelou a dinâmica de perdas hídricas do sistema. Ao longo das semanas monitoradas, o tempo médio de bombeamento foi de 95 minutos, resultando em um volume médio recirculado de 5.049 litros. Considerando a carga afluyente nominal de 7.000 litros,

estimou-se uma perda média combinada (retenção no maciço filtrante e evapotranspiração) de 1.951 litros por ciclo, o que corresponde a uma redução volumétrica de aproximadamente 28%. De acordo com Magri et al. (2016), as perdas hídricas em sistemas de wetlands construídos podem variar de 24% a 78%, decorrentes da combinação entre a evapotranspiração das macrófitas e a retenção de umidade na camada de lodo acumulada. Contudo, observou-se uma variação temporal significativa influenciada por fatores climáticos: enquanto na semana operacional 4 as perdas chegaram a 4.456 litros (indicativo de alta evapotranspiração ou retenção), nas semanas operacionais 13 e 19 registraram-se valores negativos de perda (-1.480 L e -261 L, respectivamente), evidenciando que a precipitação pluviométrica contribuiu para o aumento do volume líquido estocado no interior dos módulos WCL_{TS}, superando o volume da batelada inicial.

Para a compreensão da dinâmica hídrica no M1, os dados operacionais foram confrontados com informações climáticas locais obtidas através do pluviômetro automático do CEMADEN (Estação 420540707A), localizado em Canasvieiras, Florianópolis-SC (coordenadas [-27.432]; [-48.458]). A partir da vazão do sistema de recirculação, determinada por testes hidráulicos e do tempo de acionamento da bomba, estimou-se o volume de drenado do M1 que retornou ao sistema, permitindo mensurar as perdas sistêmicas ao subtrair esse valor do volume afluente inicial de 7.000 litros de lodo séptico bruto. Essas perdas compreendem tanto a retenção no maciço filtrante quanto a taxa de evapotranspiração das macrófitas ao longo do ciclo.

Entretanto, a análise temporal evidenciou variações significativas influenciadas pela pluviosidade, como observado na semana operacional 4, onde as perdas atingiram 4.456 litros, indicando um período de elevada demanda evaporativa ou maior retenção no leito seco. Em contrapartida, nas semanas 13 e 19, registraram-se valores negativos de perda, com volumes recirculados de 8.480 e 7.261 litros, respectivamente. Esse superávit hídrico correlaciona-se diretamente aos eventos de precipitação significativa registrados pela estação do CEMADEN, que indicou um acúmulo de 44,34 mm na semana operacional 13 (entre 17 e 23/09/2025) e de 57,34 mm na semana operacional 19 (entre 27/10 e 03/11/2025). Considerando a área superficial de 60 m², as precipitações registradas de 44,34 mm e 57,34 mm representam aportes teóricos de aproximadamente 2.660 litros e 3.440 litros de águas pluviais sobre o leito dos WCL_{TS}, respectivamente, o que justifica os incrementos volumétricos observados confirmando que o aporte de água de chuva superou as

perdas naturais do sistema, elevando o volume líquido estocado no interior dos WCL_{TS} acima da carga nominal da batelada inicial e demonstrando a influência da sazonalidade climática no balanço hídrico das unidades.

Nota-se que, embora a semana operacional 19 tenha registrado o maior índice pluviométrico acumulado, o volume efetivamente drenado foi inferior ao observado na semana operacional 13. Essa diferença pode ser atribuída à sazonalidade climática, visto que a semana operacional 19, por estar mais próxima do verão, apresentou temperaturas mais elevadas que favoreceram um incremento na taxa de evapotranspiração das macrófitas. chegasse ao sistema de drenagem para ser contabilizado na recirculação.

5.13 Valores de concentração e taxas de aplicação afluente aplicados nos Módulos WCL_{TS} durante o *Start up* da UGL_{TS}

O período de *start up* da UGL_{TS} compreendeu o intervalo entre outubro e dezembro de 2024, tendo como objetivo a aclimação gradual dos elementos atuantes nos WCL_{TS}. A estratégia operacional adotada baseou-se no incremento progressivo da carga orgânica aplicada, realizando alimentações com lodo bruto diluído com esgoto tratado proveniente da ETE Canasvieiras. Para cada alimentação realizada nos módulos foi realizada coleta de amostra para realização das análises laboratoriais, conforme descrito anteriormente.

As atividades iniciaram-se no dia 01 de outubro de 2024, com a alimentação do M1 utilizando esgoto tratado remanescente nas caixas de recebimento (C.R.), volume este residual dos testes hidráulicos de vazão anteriormente realizados, dando origem a primeira amostra de efluente analisada por meio de testes laboratoriais.

No dia 03 de outubro de 2024, procedeu-se a primeira coleta de lodo séptico de caminhão limpa-fossa, realizando uma mistura na proporção aproximada de 50% de lodo séptico e 50% de esgoto tratado nas caixas de recebimento, sendo esta mistura direcionada para a alimentação do M2. Cabe ressaltar que, como padrão operacional desta fase, todas as manobras de alimentação foram fixadas com duração de 30 minutos, e entre cada alimentação sempre restava volume morto ao fundo da caixa de aproximadamente 4000 litros, utilizado como base para as diluições com esgoto tratado e com lodo séptico bruto.

Na sequência, em 10 de outubro de 2024, as C.R. foram completadas com esgoto tratado para promover a diluição do material residual, realizando em seguida a alimentação do M1. Em 15 de outubro de 2024, realizou-se a coleta de uma nova carga de lodo séptico nas caixas de recebimento, esta mistura foi alimentada no M2. As análises laboratoriais desta amostra indicaram que o lodo coletado apresentava uma baixa concentração de carga orgânica.

Visando garantir o aumento gradual da carga orgânica, uma nova coleta de lodo séptico foi realizada em 22 de outubro de 2024, a qual foi homogeneizada com o material residual das C.R. (volume morto), procedendo-se, na sequência, à aplicação da mistura no M1. O material remanescente permaneceu nas C.R. até o dia 24 de outubro de 2024, quando foi utilizado para alimentar o M2. Observou-se que, devido a sedimentação ocorrida durante o período de espera, a fração alimentada no M2 (proveniente do fundo da caixa) apresentou uma carga orgânica levemente superior àquela aplicada anteriormente no M1.

A continuidade do processo ocorreu em 30 de outubro de 2024 com a escolha de um novo caminhão limpa fossa, ou seja, coleta de novo lodo séptico bruto, utilizando para completar o volume das C.R., essa mistura resultante foi alimentada no M1. Após a alimentação no M1, as C.R. foram completadas até seu volume máximo com esgoto tratado, ou seja, foi realizada uma diluição do lodo séptico, sendo esta mistura aplicada no M2.

O mês de novembro de 2024 seguiu com a alternância de cargas. Em 07 de novembro de 2024, realizou-se nova diluição nas C.R. com esgoto tratado para alimentação do M1. Em 12 de novembro de 2024, foi realizada nova coleta de lodo séptico até o preenchimento da capacidade total das C.R. e aplicado no M2; em seguida, promoveu-se a diluição com esgoto tratado nas C.R., alimentando-se o M1 no mesmo dia.

A etapa de *start up* foi finalizada em 16 de dezembro de 2024, com a realização de uma alimentação de lodo bruto em ambos os módulos (sem realização de caracterização analítica do lodo bruto). Após este procedimento, os registros de saída foram fechados, mantendo o sistema em período de repouso. Ao longo da fase, foram mobilizados um total de 6 caminhões limpa-fossa (5 durante o monitoramento ativo e 1 para a etapa de encerramento da fase de *start up*). O controle de carga foi exercido através de 4 operações de diluição com esgoto tratado, buscando o aumento progressivo da carga orgânica aplicada ao sistema. Embora o protocolo operacional

da etapa de *start up* do sistema tivesse o objetivo de realizar o aumento gradual da carga orgânica aplicada, o controle deste parâmetro é complexo, visto que é diretamente impactado pela heterogeneidade do lodo séptico coletado, dado que cada caminhão limpa fossa possui origem diferente e o material apresenta grande variedade.

Para cada alimentação realizada nos módulos na fase de *start up* da UGL_{TS}, realizada com lodo de tanque séptico diluído em esgoto tratado, foram coletadas amostras e procedida as análises laboratoriais, cujos valores medidos encontram-se descritos na Tabela 16.

Tabela 16: Valores médios obtidos no monitoramento analítico dos módulos WCL_{TS} durante o período de *start up* .

Afluyente bruto (mistura de lodo de tanque séptico com esgoto tratado)		
Parâmetros	Módulo 1	Módulo 2
pH	6,62 ± 0,50	6,56 ± 0,44
DQO (mg/L)	863 ± 602	938 ± 518
P-PO₄³⁻ (mg/L)	60 ± 33	56 ± 35
N-NH₄⁺ (mg/L)	88 ± 29	88 ± 15
Sólidos Totais (mg/L)	530 ± 257	555 ± 152
Sólidos Fixos (mg/L)	282 ± 129	287 ± 64
Sólidos Voláteis (mg/L)	249 ± 140	269 ± 123

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Apêndice D, encontram-se os perfis de concentração ao longo do tempo, nos quais se nota o acréscimo progressivo das concentrações de ST e DQO durante o período de *start up* .

O monitoramento do potencial hidrogeniônico (pH) da mistura afluyente aos WCL_{TS} revelou oscilações compreendidas nas faixas de 5,94 a 7,28 para o M1 e 6,06 a 7,23 para o M2.

Em relação à carga orgânica, as concentrações de DQO da mistura afluyente aos WCL_{TS} variaram de 23 mg/L a 1728 mg/L no M1 e de 188 mg/L a 1408 mg/L no M2. Embora o protocolo operacional da etapa de *start up* da UGL_{TS} preveja o aumento gradual da carga orgânica aplicada, o controle deste parâmetro é desafiado pela heterogeneidade do lodo séptico bruto coletado, considerando que se trata de um efluente real oriundo de diferentes pontos de coleta.

O monitoramento da concentração de $P-PO_4^{3-}$ na mistura de lodo séptico com esgoto tratado proveniente da ETE Canasvieiras, revelou oscilações compreendidas nas faixas de 7 mg/L a 105 mg/L para o M1 e de 2 mg/L a 107 mg/L para o M2.

O monitoramento da concentração de $N-NH_4^+$ na mistura afluenta aos WCL_{TS} indicou faixas de variação de 34 mg/L a 120 mg/L para o M1 e de 72 mg/L a 113 mg/L para o M2. Em termos médios, ambos os sistemas receberam cargas de nitrogênio amoniacal muito similares, registrando médias de 88,05 mg/L e 88,42 mg/L, respectivamente.

A análise gravimétrica da mistura de lodo séptico com esgoto tratado proveniente da ETE Canasvieiras utilizado para alimentar os módulos WCL_{TS} no período de *start up*, revelou uma ampla variação na concentração de ST, oscilando entre 154 mg/L e 818 mg/L no M1 e entre 342 mg/L e 718 mg/L no M2. Para os STF verificou-se variações de 50 a 426 mg/L para o M1 e 226 a 406 mg/L para o M2. Já os STV, indicativos de matéria orgânica biodegradável, os valores oscilaram entre 72 e 410 mg/L no M1 e entre 98 e 402 mg/L no M2.

O aumento progressivo da carga orgânica e dos nutrientes nos módulos WCL_{TS} evidencia a eficácia do processo de diluição gradual, proporcionando um acompanhamento adequado das condições operacionais do sistema à medida que as macrófitas se adaptam às novas condições ambientais.

O módulo WCL_{TS} M1 foi submetido a 6 ciclos de alimentação com vazão média de 70,94 L/min (duração de 30 min), com volume total aplicado de 12,77 m³. Considerando a concentração média afluenta de ST de 530mg/L, a massa total de sólidos depositada no leito foi de 6,77 kg, resultando em uma taxa de aplicação superficial (TAS) acumulada de 0,11 kg ST/m².

Já módulo WCL_{TS} M2, que recebeu 5 aplicações com vazão média de 59,82 L/min, o aporte volumétrico totalizou 8,97 m³. Com uma concentração média de ST de 555,40 mg/L, obteve-se uma massa de sólidos de 4,98 kg, correspondendo a uma TAS acumulada de 0,08 kg ST/m².

É importante ressaltar que as baixas taxas de aplicação de sólidos observadas decorrem da metodologia operacional adotada nesta etapa de partida, na qual o lodo séptico foi diluído com esgoto tratado nas caixas de recebimento. Essa estratégia resultou em uma mistura com teor de sólidos reduzido (na faixa de 530 a 555 mg/L), favorecendo a aclimação hidráulica do maciço filtrante e o desenvolvimento do biofilme inicial. Ressalta-se que este cálculo de TAS acumulada

não contempla a alimentação final realizada com lodo bruto, a qual marcou o encerramento da etapa de *start up*.

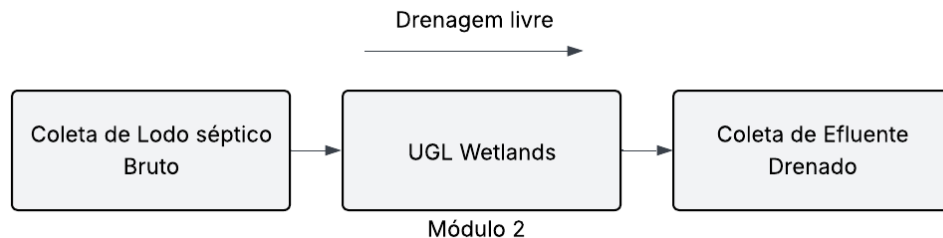
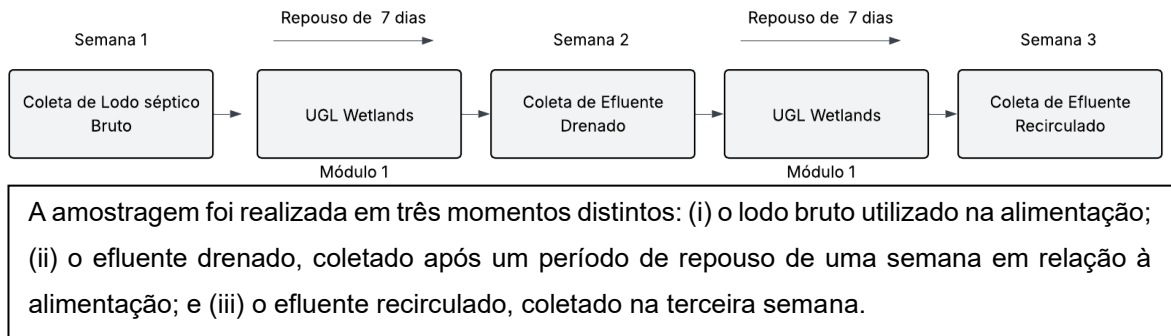
5.14 Monitoramento Analítico do Lodo Afluente e Efluentes Líquidos dos Módulos WCL_{TS} durante a Operação Continuada da UGL_{TS}

O monitoramento analítico do lodo afluente e efluentes líquidos dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS} compreendeu o período de julho a novembro de 2025, totalizando 25 semanas de operação contínua e acompanhamento analítico. Durante esta fase, estabeleceu-se uma rotina de amostragem mensal, resultando na execução de 5 campanhas de monitoramento distribuídas sequencialmente entre os meses de julho, agosto, setembro, outubro e novembro de 2025.

As análises laboratoriais tiveram como objetivo caracterizar os parâmetros de entrada e saída do efluente, ou seja, avaliar o lodo bruto antes do tratamento e o efluente final após o tratamento nos módulos WCL_{TS} empregando diferentes estratégias operacionais.

A estratégia de coleta de amostras foi definida de acordo com o regime operacional específico de cada um dos módulos, conforme representado esquematicamente na Figura 38:

Figura 38: Representação esquemática do regime operacional e campanha de monitoramento de desempenho de tratamento junto aos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS} .



Fonte: Elaborado pelo autor.

O cronograma operacional executado ao longo das 25 semanas de monitoramento está detalhado no Apêndice B. Durante este período, o programa analítico totalizou a coleta de 25 amostras, distribuídas equitativamente em 5 campanhas para cada ponto de monitoramento: lodo bruto (M1), lodo bruto (M2), efluente drenado (M1), efluente drenado (M2) e efluente recirculado (M1). Em termos operacionais, o M1 foi submetido a 12 ciclos de alimentação com lodo bruto e 12 ciclos de recirculação. Já o M2 recebeu um total de 24 alimentações de lodo séptico bruto.

5.14.1 Lodo Bruto alimentado no módulo WCL_{TS} M1

O monitoramento da qualidade do lodo bruto utilizado na alimentação do M1, realizado entre julho e novembro de 2025, revelou uma composição característica de lodos sépticos, marcada, contudo, por uma notável heterogeneidade temporal. Os

resultados analíticos e o tratamento estatístico descritivo dos dados são detalhados na Tabela 17

Tabela 17: Valores obtidos no monitoramento analítico do lodo bruto alimentado no WCL_{TS} M1 ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025).

Semana Operacional	pH	ST (mg/L)	SF (mg/L)	SV (mg/L)	DQO (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)
1 ^a	5,73	3.010	1.084	1.926	4.277	209	104
7 ^a	6,91	1.256	567	689	2.319	135	87
12 ^a	7,63	4.656	1.530	3.125	2.618	116	92
16 ^a	6,9	4.657	1.412	3.245	5.701	195	107
20 ^a	7,22	2.579	708	1871	5.738	206	151
Valor Médio	6,88	3.231	1.060	2.171	4.130	172	108
Valor máximo	7,63	4.657	1.530	3.245	5.738	209	151
Valor mínimo	5,73	1.256	567	689	2.319	116	87
Mediana	6,91	3.010	1084	1.926	4.277	195	104
Desvio Padrão	0,71	1.452	422	1.049	1.631	43	25

Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto ao Potencial Hidrogeniônico (pH), o lodo séptico bruto apresentou um comportamento tendendo à neutralidade, com valor médio de 6,88. Observou-se uma oscilação entre uma condição levemente ácida no início da operação em julho de 2025 (5,73) e básica em setembro de 2025 (7,63), estabilizando-se em 7,22 na última coleta, em novembro de 2025. O desvio padrão de 0,71 indica uma relativa estabilidade química em comparação aos demais parâmetros.

A concentração de Sólidos Totais (ST) variou expressivamente, com amplitude entre 1.256 mg/L (mínimo) e 4.657 mg/L (máximo), resultando em uma média de 3.231 mg/L. A análise da fração volátil é particularmente relevante: a média de Sólidos Voláteis (SV) foi de 2.171 mg/L. A relação SV/ST média calculada é de aproximadamente 0,67 (67%), indicando que a maior parte do material sólido afluente é composta por matéria orgânica, passível de degradação biológica ou estabilização no sistema.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) acompanhou a variabilidade dos sólidos, registrando uma média de 4.130 mg/L. Observa-se que a carga orgânica do lodo séptico bruto alimentado no M1 analisado apresentou-se maior nos meses finais do monitoramento, saltando de valores na faixa de 2.000 a 2.600 mg/L (agosto/setembro de 2025) para patamares superiores a 5.700 mg/L em outubro e novembro de 2025. Esse aumento reflete diretamente no desvio padrão elevado observado para este parâmetro (1.631 mg/L).

Quanto aos nutrientes, as concentrações de Nitrogênio Amoniacal (N-NH_4^+) variaram entre 116 mg/L e 209 mg/L, com média de 172 mg/L. Já a com concentração de fósforo ortofosfato (P-PO_4^{3-}) apresentou média de 108 mg/L, com valores oscilando entre 87 e 151 mg/L.

A caracterização do lodo séptico bruto alimentado no M1 revelou um perfil de lodo bruto mais diluído, cujas concentrações situam-se abaixo dos patamares típicos reportados na literatura, reportados por Suntti (2010) e Käfer (2015), as quais reportaram médias de ST de 18.676 mg/L e 31.073 mg/L, respectivamente. Contudo, apesar da menor concentração de sólidos no lodo bruto afluente ao módulo WCL_{TS} M1, a relação SV/ST de 0,67 verificada indica uma matriz orgânica ativa e menos estabilizada do que a observada por Suntti (2010), cuja relação foi de apenas 0,43.

Esse perfil de lodo mais "fresco", aproxima-se qualitativamente da fração orgânica descrita por Ribeiro et al. (2025). Ao confrontar os resultados obtidos no monitoramento do M1 com o estudo abrangente de Dominguez (2024), que caracterizou 37 cargas de caminhões limpa-fossa, observa-se uma forte correlação quanto à heterogeneidade e aos níveis de diluição do lodo séptico. O valor médio de 3.231 mg ST L registrada na alimentação do M1 situa-se abaixo da média geral de 6.217 mg/L reportada pela autora, mas insere-se perfeitamente nas faixas de distribuição de frequência identificadas em sua pesquisa.

Ainda segundo Dominguez (2024), uma parcela significativa (49%) das amostras analisadas apresentou concentrações de ST inferiores a 2.200 mg/L, enquanto cerca de 30% das amostras situaram-se na faixa de até 6.000 mg/L. Desta forma, o lodo séptico bruto alimentado no WCL_{TS} M1 classifica-se estatisticamente neste estrato intermediário de concentração (entre 2.200 e 6.000 mg/L).

Essa comparação valida os dados experimentais obtidos por meio das análises laboratoriais, demonstrando que a concentração afluenta utilizada, embora menos concentrada que a média histórica, representa um cenário operacional real e frequente na gestão de lodos de tanques sépticos, conforme descrito por Dominguez (2024).

Ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025), as cargas aplicadas ao M1 foram significativamente elevadas em comparação com a *start up* do sistema. Considerando o histórico de 12 ciclos de alimentação, com volume de 7.000 L por evento e tempo médio de aplicação de 22 minutos, a massa total de sólidos aportada ao leito de 60 m² totalizou 271,45 kg. Consequentemente, a taxa de aplicação de sólidos (TAS) acumulada durante este período de operação foi de 4,52 kg ST/m².

5.14.2 Lodo Bruto alimentado no módulo WCL_{TS} M2

De forma análoga ao observado no WCL_{TS} M1, o monitoramento do lodo séptico bruto alimentado no WCL_{TS} M2 entre as 2^a e 20^a semanas de operação evidenciou a variabilidade característica desse tipo de efluente. Os resultados analíticos e o tratamento estatístico dos dados são detalhados na Tabela 18.

Tabela 18: Valores obtidos no monitoramento analítico do lodo bruto alimentado no WCL_{TS} M2 ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025).

Semana Operacional	pH	ST (mg/L)	SF (mg/L)	SV (mg/L)	DQO (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)
2 ^a	5,58	963	691	272	1.334	169	116
7 ^a	7,03	1.357	614	743	2.592	189	99
12 ^a	6,32	2.156	889	1.267	1.338	138	115
16 ^a	6,9	4.657	1.412	3245	5.701	195	107
20 ^a	7,25	2.948	1.060	1.888	4.187	181	117
Valor Médio	6,62	2.416	933	1.483	3.030	174	111
Valor máximo	7,25	4.657	1.412	3.245	5.701	195	117
Valor mínimo	5,58	963	614	272	1.334	138	99
Mediana	6,9	2.156	889	1.267	2.592	181	115
Desvio Padrão	0,67	1.466	319	1.154	1.897	22	7

Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto ao pH, o lodo séptico bruto alimentado no M2 apresentou um caráter levemente ácido a neutro, com média global de 6,62. Notou-se uma evolução temporal ascendente: iniciou-se com o valor mínimo de 5,58 na segunda semana de operação (julho de 2025), elevando-se gradualmente até atingir o máximo de 7,25 na vigésima semana operacional (novembro de 2025). O desvio padrão de 0,67 reflete uma oscilação moderada ao longo do período monitorado.

A concentração de Sólidos Totais (ST) demonstrou grande amplitude, variando de 963 mg/L a 4.657 mg/L, com uma concentração média de 2.416 mg/L. Ao analisar a composição desses sólidos, obteve-se uma média de Sólidos Voláteis (SV) de 1.483 mg/L. A relação SV/ST calculada para o período foi de aproximadamente 0,61 (61%),

indicando que, embora a fração orgânica seja predominante, há uma presença significativa de sólidos fixos (inorgânicos).

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) registrou média de 3.030 mg/L, apresentando um comportamento de alta dispersão (Desvio Padrão de 1.897 mg/L). Destaca-se a maior concentração deste parâmetro (5.701 mg/L) ocorreu na 16ª semana (em outubro de 2025).

O Nitrogênio Amoniacal (N-NH_4^+) manteve-se relativamente estável em comparação aos parâmetros orgânicos, oscilando entre 138 mg/L e 195 mg/L, com média de 174 mg/L. O fósforo ortofosfato (P-PO_4^{3-}) por sua vez, foi o parâmetro de menor variabilidade no estudo (Desvio Padrão de 7), com concentrações entre 99 a 117 mg/L e média de 110 mg/L.

A caracterização do lodo séptico bruto alimentado no WCL_{TS} M2 revelou um perfil de lodo bruto ainda mais diluído, em comparação ao lodo séptico bruto alimentado no WCL_{TS} M1, apresentando, também, concentrações abaixo dos valores típicos descritos na literatura. Com média de ST de 2.416 mg/L, valor que se insere perfeitamente na faixa de menor concentração descrita por Dominguez (2024) aproximando-se do limite superior do primeiro quartil descrito pela autora, segundo o qual cerca de 49% das cargas de caminhões limpa-fossa apresentam teores de sólidos inferiores a 2.200 mg/L devido à mistura com águas parasitárias ou excesso de fase líquida, distanciando-se significativamente da média histórica de 6.217 mg/L reportada na mesma referência.

Diferentemente do lodo altamente concentrado e mineralizado de Suntti (2010), o lodo séptico bruto alimentado no M2 apresentou uma relação SV/ST de 0,61, alinhando-se aos valores de 0,58 reportados tanto por Käfer (2015), quanto por Ribeiro et al. (2025). Isso sugere que, apesar da baixa concentração de sólidos observada, o lodo bruto alimentado no M2 preserva características de lodo séptico com potencial biodegradável significativo.

Quanto à parcela orgânica, a Demanda Química de Oxigênio (DQO) média de 3.030 mg/L registrada no lodo séptico bruto alimentado no M2 se mostra abaixo dos dados de Käfer (2015) e Ribeiro et al. (2025), que reportaram concentrações médias significativamente superiores, de 35.518 mg/L e 8.956 mg/L, respectivamente. Essa discrepância de magnitude — onde o lodo estudado por Käfer chega a ser mais de 11 vezes mais concentrado que o lodo séptico bruto alimentado no M2 — reforça a necessidade de caracterização específica para cada UGL. Contudo, o valor obtido

neste monitoramento encontra respaldo técnico na amplitude descrita por Dominguez (2024). Ao identificar uma variação extrema de DQO em caminhões limpa-fossa, oscilando entre um mínimo de 228 mg/L e máximos de 94.500 mg/L, Dominguez demonstra que cargas na faixa de 3.000 mg/L são ocorrências reais e frequentes, resultantes de tanques sépticos com maior diluição ou menor tempo de acumulação, validando, portanto, a representatividade da amostra do WCL_{TS} M2 dentro desse espectro inferior.

De maneira análoga ao WCL_{TS} M1, procedeu-se ao cálculo da TAS para o M2 durante o período operacional. Neste módulo, a concentração média de Sólidos Totais (ST) foi de 2.416 mg/L, com um volume de 7.000 L aplicado em 24 ciclos de alimentação realizados. Apesar da concentração de sólidos ser inferior à registrada no M1, o maior número de alimentações resultou em um aporte de massa total de 405,89 kg de sólidos. Considerando a área superficial de 60 m² e o tempo médio de alimentação de 22 minutos, a TAS acumulada para o M2 foi de 6,76 kg ST/m². Este valor indica uma aplicação de carga 50% superior ao aplicado no M1, evidenciando o impacto da frequência de alimentação no acúmulo de material sólido sobre o maciço filtrante dentro do esperado.

5.14.3 Efluente líquido drenado no módulo WCL_{TS} M1

A caracterização do efluente líquido drenado do M1, cuja amostragem foi realizada sete dias após cada alimentação com lodo séptico bruto, demonstra efetiva atividade relacionada aos processos de filtração e degradação biológica ocorridos no maciço filtrante do wetland, conforme evidenciado na Tabela 19.

Em síntese, os parâmetros analisados no efluente líquido drenado do M1 inferem a um líquido com baixa concentração de matéria orgânica e predominância de sais dissolvidos, comprovando a eficácia dos wetlands construídos como um sistema eficiente no tratamento de lodo séptico. Vale ressaltar que o efluente drenado do M1 foi armazenado e recirculado, sendo reencaminhado para alimentar novamente ao mesmo módulo em sequência, caracterizando o modo operacional de recirculação.

Tabela 19: Valores obtidos no monitoramento analítico do efluente líquido drenado no WCL_{TS} M1 ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025).

Semana Operacional	pH	ST (mg/L)	SF (mg/L)	SV (mg/L)	DQO (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)
2 ^a	5,85	833	738	95	334	76	70
8 ^a	7,15	840	741	99	132	86	25
13 ^a	6,84	611	448	163	105	51	25
17 ^a	7,29	664	484	180	185	101	44
21 ^a	7,08	856	659	197	231	138	56
Valor Médio	6,842	760	614	146	197	90	44
Valor máximo	7,29	856	741	197	334	138	70
Valor mínimo	5,85	611	448	95	105	51	25
Mediana	7,08	833	659	163	185	86	44
Desvio Padrão	0,58	114	139	47	90	32	19

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao confrontar os valores médios de concentração obtidos no efluente drenado do M1 com os dados da literatura, observa-se que o sistema apresentou um desempenho de polimento superior a diversos estudos similares. A concentração média de DQO de 197 mg/L registrada neste trabalho situa-se abaixo dos valores reportados por Paing e Voisin (2005), que encontraram 463 mg/L, e por Santos et al. (2024), que obtiveram média de 348 mg/L. O resultado também é inferior à concentração de 507 mg/L verificada por Suntti et al. (2011) quando operando com maiores taxas de aplicação (250 kg ST/m².ano).

No que tange aos Sólidos Totais (ST), a média de 760 mg/L do M1 demonstra uma retenção física eficaz, apresentando-se significativamente menor que as

concentrações entre 3.050 e 3.075 mg/L observadas por Koottatep et al. (1999), de 1.929 mg/L observadas por Panuvatvanich et al. (2009) e de 1.462 mg/L observados por Santos et al. (2024). A relação SV/ST observada no efluente líquido drenado do M1 de aproximadamente 19%, indica que o material que percola pelo maciço filtrante do wetland é predominantemente inorgânico (tendendo à mineralização).

Já em relação aos compostos nitrogenados e fosforados, nota-se concentrações médias similares às aquelas reportadas para esgoto sanitário bruto, corroborando assim para a idealização da etapa de recirculação deste efluente no mesmo módulo wetland para refinamento da etapa de tratamento.

5.14.4 Efluente líquido após a recirculação no módulo WCL_{TS} M1

A análise do efluente recirculado do M1 representa a caracterização do efluente submetido a um segundo ciclo de passagem pelo maciço filtrante. Esta etapa operacional tem como objetivo promover o polimento no efluente líquido por meio do aumento do tempo de contato do efluente com o biofilme presente no maciço e sistema radicular das macrófitas. Os resultados analíticos e o tratamento estatístico dos dados são detalhados na Tabela 20.

O efluente recirculado apresentou a maior estabilidade de pH entre as amostras analisadas, com média de 6,95 e desvio padrão de 0,39. Os valores oscilaram entre 6,30 e 7,27, mantendo-se consistentemente na faixa da neutralidade. Esta condição é ideal para o descarte ou reuso, indicando que o sistema alcançou equilíbrio químico.

A relação SV/ST foi de aproximadamente 17%, restando no efluente majoritariamente sais dissolvidos e material inerte.

O impacto positivo da recirculação é mais evidente na Demanda Química de Oxigênio (DQO). A média obtida foi de 104 mg/L, com valor mínimo chegando a 51 mg/L na primeira amostragem (em julho de 2025). Comparativamente, este valor médio é quase 50% inferior ao observado na etapa de drenagem simples (que foi de aproximadamente 197 mg/L), comprovando que a recirculação atua efetivamente como uma etapa de polimento, oxidando a matéria orgânica residual solúvel que persistiu à primeira passagem pelo módulo wetland.

Tabela 20: Valores obtidos no monitoramento analítico do efluente líquido recirculado no WCL_{TS} M1 ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025).

Semana Operacional	pH	ST (mg/L)	SF (mg/L)	SV (mg/L)	DQO (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)
3 ^a	6,3	604	566	37	51	94	29
9 ^a	7,21	740	609	131	142	80	12
14 ^a	7,08	627	533	93	82	59	24
18 ^a	7,27	683	549	133	146	98	38
22 ^a	6,88	983	755	228	101	90	27
Valor Médio	6,95	727	602	124	104	84	26
Valor máximo	7,27	983	755	228	146	98	38
Valor mínimo	6,30	604	533	37	51	59	12
Mediana	7,08	683	566	131	101	90	27
Desvio Padrão	0,39	152	89	69	40	15	9

Fonte: Elaborado pelo autor

O Nitrogênio Amoniacal (N-NH₄⁺) registrou média de 84 mg/L, com baixa variabilidade (Desvio Padrão de 15 mg/L). O fósforo ortofosfato (P-PO₄³⁻) por sua vez, apresentou concentração média de 26 mg/L. A redução do fósforo no recirculado em relação ao drenado (44 mg/L) sugere que o contato prolongado com o meio filtrante pode ter favorecido mecanismos de adsorção ou precipitação química deste nutriente.

Em síntese, a caracterização do efluente recirculado atesta que a estratégia de multi-passagem do efluente pelo módulo WCL_{TS} M1 eleva a qualidade final do efluente líquido drenado.

5.14.5 Efluente líquido drenado no módulo WCL_{TS} M2

O módulo WCL_{TS} M2 opera sob regime de drenagem livre, diferentemente do WCL_{TS} M1, onde houve retenção hidráulica prolongada e recirculação, sendo que as amostras do M2 foram coletadas logo em seguida da aplicação após 15 min do início da drenagem do efluente líquido. Os resultados analíticos e o tratamento estatístico dos dados são detalhados na Tabela 21.

Tabela 21: Valores obtidos no monitoramento analítico do efluente líquido drenado no WCL_{TS} M2 ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a novembro de 2025).

Semana Operacional	pH	ST (mg/L)	SF (mg/L)	SV (mg/L)	DQO (mg/L)	N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)
2 ^a	6,17	851	772	79	144	83	35
7 ^a	6,83	1183	656	527	119	41	17
12 ^a	7,06	948	631	317	145	57	34
16 ^a	7,25	1385	577	808	605	154	71
20 ^a	7,02	961	627	335	460	64	35
Valor Médio	6,87	1.065	653	413	294	80	38
Valor máximo	7,25	1.385	772	808	605	154	71
Valor mínimo	6,17	851	577	79	119	41	17
Mediana	7,02	961	631	335	145	64	35
Desvio Padrão	0,42	216	72	271	223	44	19

Fonte: Elaborado pelo autor

O efluente líquido apresentou um pH médio de 6,87, indicando uma tendência à neutralidade. Observou-se uma evolução progressiva na qualidade do meio: partindo de um valor levemente ácido de 6,17 na primeira amostragem (em julho de 2025), elevando-se consistentemente, atingindo 7,25 em outubro de 2025 e estabilizando-se em 7,02 em novembro de 2025.

A concentração média de Sólidos Totais (ST) no efluente foi de 1.065 mg/L, variando entre 851 mg/L e 1.385 mg/L. Ao analisar a composição, nota-se que a média de Sólidos Voláteis (SV) foi de 413 mg/L, enquanto os Sólidos Fixos (SF) predominaram com média de 653 mg/L. A relação SV/ST situou-se em torno de 39%. Este valor, superior ao observado no M1 (que foi de aproximadamente 19%), é coerente com o regime de drenagem livre, pois, o menor tempo de contato do líquido com o biofilme e a ausência de período de repouso permitem uma passagem maior de material orgânico particulado ou coloidal.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) registrou uma média global de 294 mg/L. Contudo, na 16ª semana, quando a alimentação (lodo bruto) apresentou uma concentração orgânica mais elevada (em torno de 5.700 mg/L), o efluente drenado respondeu com uma elevação para 605 mg/L. Embora represente o valor máximo da série, essa concentração ainda denota uma remoção de carga orgânica superior a 89% no evento, demonstrando a resiliência física do sistema mesmo sem tempo de detenção prolongado no interior do sistema.

O Nitrogênio Amoniacal (N-NH_4^+) apresentou média de 80 mg/L, com um pico de 154 mg/L coincidindo com o evento de alta concentração na 16ª semana. O fósforo ortofosfato (P-PO_4^{3-}) registrou média de 38 mg/L, oscilando entre 17 e 71 mg/L.

Em conclusão, os dados do M2 atestam que, mesmo operando com drenagem livre, o sistema desempenha um papel fundamental na remoção de sólidos e matéria carbonácea. Entretanto, a maior variabilidade dos resultados (especialmente DQO e Sólidos) em comparação ao M1 sugere que o tempo de detenção hidráulica apresenta grande influência na estabilidade do efluente.

A análise comparativa do efluente drenado do M2 com os dados da literatura evidencia que, mesmo operando sob regime de drenagem livre, o sistema alcançou níveis de tratamento competitivos e, em alguns casos, superiores aos reportados em outros estudos. A concentração média de DQO de 294 mg/L situa-se em um patamar de qualidade melhor do que o observado por Paing e Voisin (2005) e Santos et al. (2024), que reportaram concentrações finais de 463 mg/L e 348 mg/L,

respectivamente, e apresenta grande similaridade com os 283 mg/L obtidos por Panuvatvanich et al. (2009). Tal fato sugere que a cinética de degradação da matéria orgânica dissolvida no M2 foi eficiente, superando a expectativa para um sistema sem retenção hidráulica prolongada.

Quanto aos Sólidos Totais (ST), a média de 1.065 mg/L indica que o arraste de partículas, típico da drenagem livre, resultou em concentrações superiores às faixas (de 472 a 821 mg/L) obtidas por Suntti et al. (2011). Contudo, é notável que o desempenho do M2 ainda se mostrou superior ao de Koottatep et al. (1999), cujos efluentes variaram entre 3.050 e 3.075 mg/L, e ao de Panuvatvanich et al. (2009) e Santos et al. (2024), que registraram médias de 1.929 mg/L e 1.462 mg/L, respectivamente.

No que se refere ao Nitrogênio Amoniacal ($N-NH_4^+$), a concentração média de 80 mg/L reflete a limitação do tempo de contato para a nitrificação completa, resultando em valores superiores aos reportados de Suntti et al. (2011), mas ainda assim apresentando melhor qualidade do que o efluente de Panuvatvanich et al. (2009), que conteve apresentou concentrações de 120 mg/L.

5.15 Desempenho de Tratamento nos Módulos WCL_{TS} durante a Operação

Continuada da UGL_{TS}

Os valores determinados durante a avaliação de desempenho de tratamento de lodo de tanque séptico realizado pelos módulos WCL_{TS} , sob diferentes estratégias operacionais (M1 com maciço filtrante saturado e recirculação de drenado; M2 com drenagem livre), encontram-se no Apêndice C.

A análise comparativa entre as unidades experimentais revela um antagonismo entre a simplicidade operacional e a eficiência na qualidade do efluente. O M2 caracteriza-se por um manejo simplificado (escoamento vertical de fluxo livre e sem recirculação do efluente líquido drenado), porém com menor capacidade relativa de retenção de sólidos no maciço filtrante em comparação ao M1 (escoamento vertical com saturação e recirculação do efluente líquido drenado), que embora demande maior complexidade de gestão devido à estratégia de recirculação, apresenta desempenho superior na remoção de nutrientes e sólidos, resultando em um efluente líquido de melhor qualidade analítica.

Após 25 semanas de operação continuada, observaram-se disparidades significativas entre os módulos, tanto no que tange ao efluente líquido drenado (Figura 39 e Figura 40).

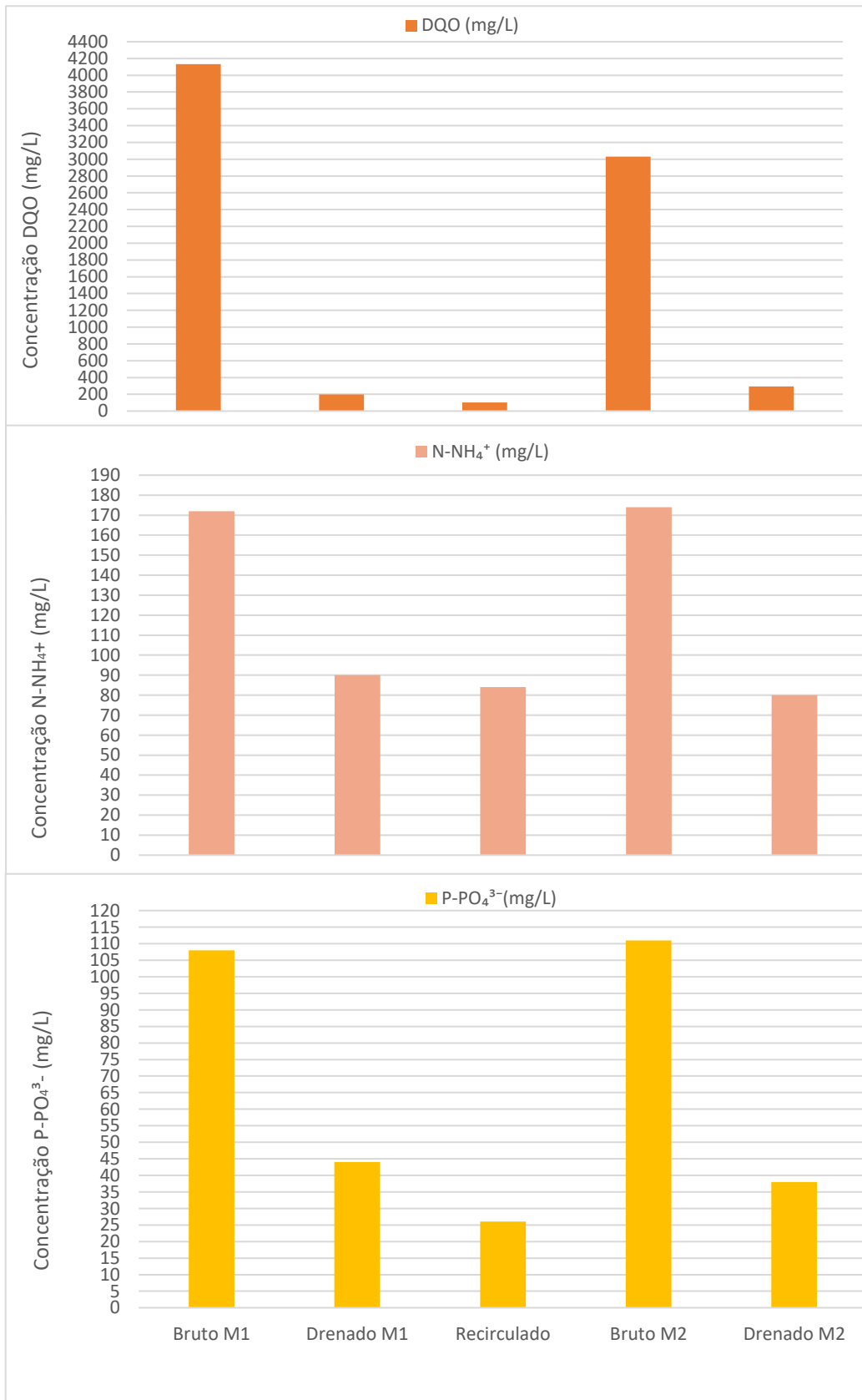
Essas variações são atribuídas às distintas cargas de lodo séptico bruto aplicadas: enquanto o M2 recebeu 24 ciclos de alimentação de lodo, o M1 foi submetido a 12 ciclos de lodo, intercalados com 12 ciclos de recirculação do efluente líquido percolado.

Figura 39: Representação gráfica dos valores médios da série de sólidos medidos nos efluentes líquidos dos WCLTs componentes da UGLTs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40: Representação gráfica dos valores médios da matéria orgânica e inorgânica nos efluentes líquidos dos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

com a espessura da camada oscilando entre 6,0 cm e 13,0 cm ao longo do período monitorado. Já o M1, que recebe lodo bruto apenas quinzenalmente (intercalando com semanas de recirculação), demonstrou uma taxa de acúmulo mais lenta e controlada. A camada de lodo neste módulo manteve-se em patamares inferiores durante todo o monitoramento, variando de 1,5 cm a 6,0 cm.

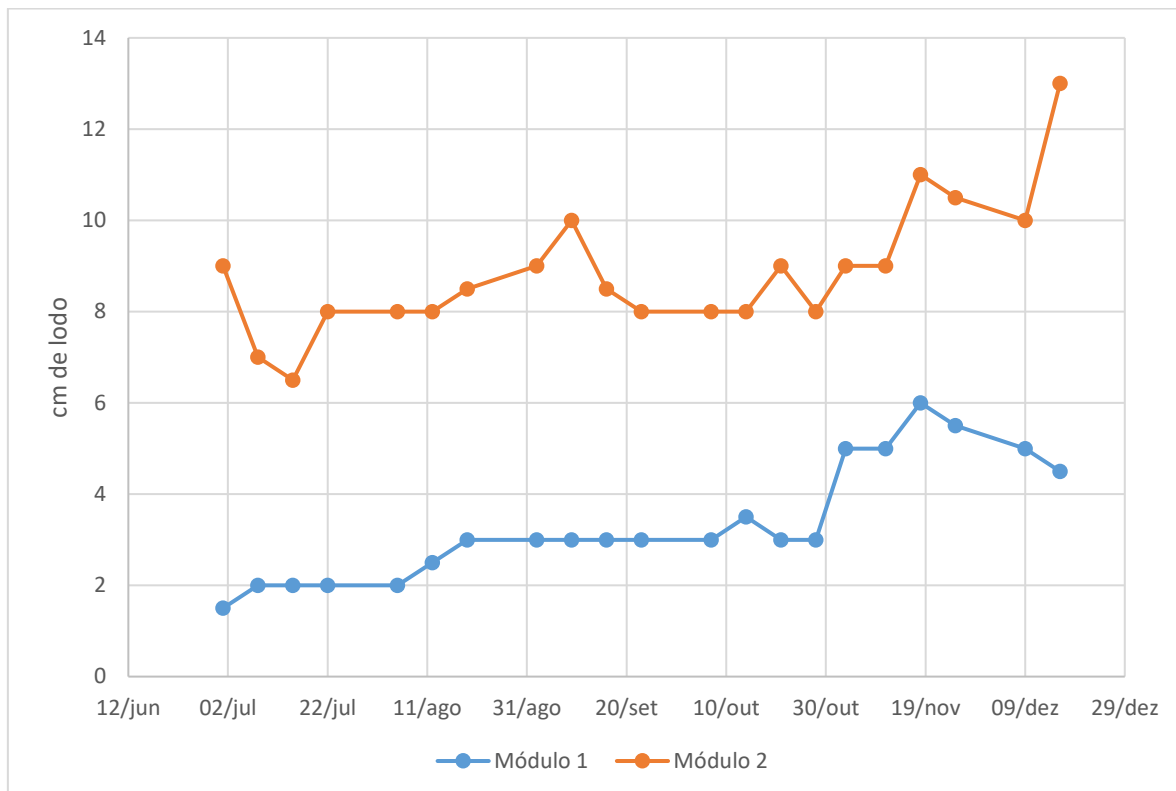
Essa diferença confirma que o maior intervalo entre as aplicações de lodo séptico bruto no M1 comparativamente ao M2, favorece a desidratação e a redução volumétrica da torta de lodo (Tabela 22, Figura 42 e Figura 43).

Tabela 22: Valores registrados referentes ao acúmulo de lodo na superfície do maciço filtrante dos módulos WCL_{TS} M1 e M2, ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a dezembro de 2025).

Camada de Lodo acumulado (cm)		
Data – ano de 2025	Módulo 1	Módulo 2
01/jul	1,5	9
08/jul	2	7
15/jul	2	6,5
22/jul	2	8
05/ago	2	8
12/ago	2,5	8
19/ago	3	8,5
02/set	3	9
09/set	3	10
16/set	3	8,5
23/set	3	8
07/out	3	8
14/out	3,5	8
21/out	3	9
28/out	3	8
03/nov	5	9
11/nov	5	9
18/nov	6	11
25/nov	5,5	10,5
09/dez	5	10
16/dez	4,5	13
Média	3,4	8,9
Mediana	3	8,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42: Representação gráfica evolutiva representativa do acúmulo de lodo na superfície do maciço filtrante dos módulos WCL_{TS} M1 e M2, ao longo do período operacional continuado (entre os meses de julho a dezembro de 2025).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43: Imagens fotográficas referente ao acúmulo de lodo na superfície do maciço filtrante dos módulos WCL_{TS} M1 e M2, após a 25ª semana de operação continuada da UGL_{TS}.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo atingiu seu objetivo geral ao descrever e avaliar a implementação e o início da operação de uma Unidade de Gerenciamento de Lodo de tanque séptico (UGL_{TS}) empregando a ecotecnologia dos wetlands construídos (WCL_{TS}). A documentação sistemática das etapas construtivas, desde a terraplanagem até o plantio das macrófitas (*Salix* spp.), permitiu acompanhar e validar a implantação do sistema, demonstrando que a tecnologia apresenta viabilidade para a replicabilidade em larga escala.

A etapa de partida operacional (*start-up*), conduzida mediante a estratégia de aclimatação com cargas progressivas de lodo diluído, mostrou-se fundamental para a adaptação da vegetação e o estabelecimento do biofilme no maciço filtrante dos módulos WCL_{TS} M1 e M2. O monitoramento dessa fase evidenciou a resiliência do sistema, que suportou o incremento gradual de carga orgânica e nutrientes, validando o protocolo de partida adotado como seguro para a integridade biológica dos módulos wetlands construídos.

No que tange a caracterização do lodo séptico bruto, os resultados revelaram que o lodo de tanque séptico recebido na UGL_{TS} apresentou concentrações variáveis e heterogêneas, com concentrações médias de Sólidos Totais (ST) variando entre 2.416 mg/L e 3.231 mg/L e DQO variando entre 3.030 mg/L a 4.130 mg/L. Esses valores, embora inferiores aos comumente citados na literatura clássica, alinham-se à realidade operacional descrita por estudos recentes no estado de Santa Catarina, confirmando que a gestão de lodos sépticos deve considerar a variabilidade característica desse tipo de efluente.

A avaliação do desempenho do WCL_{TS} M1, operando com maciço filtrante saturado e tempo de detenção hidráulica de sete dias, demonstrou bons resultados atuando como barreira física e como reator biológico, alcançando remoções médias de 76% para ST e 95% para Demanda Química de Oxigênio (DQO). A estratégia de saturação favoreceu a retenção de Sólidos Voláteis (93% de remoção de SV), comprovando a aptidão desta configuração para a futura estabilização da matéria orgânica presente no lodo de tanque séptico afluente.

Ademais, a implementação da recirculação no WCL_{TS} M1 constituiu-se como o diferencial tecnológico mais expressivo do estudo, elevando o processo de tratamento e a qualidade do efluente líquido drenado. O efluente recirculado apresentou remoção

global (referente ao lodo bruto de tanque séptico afluente) de 97% de DQO (com concentração final média de 104 mg/L) e ST de 77% (com concentração final média de 727 mg/L). A recirculação do efluente drenado pelo maciço filtrante promoveu a oxidação da matéria orgânica residual solúvel e garantiu maior estabilidade ao pH, validando a recirculação como uma estratégia positiva para obtenção de efluentes clarificados e com menor potencial poluidor.

Já o WCL_{TS} M2, operando sob regime de drenagem livre, apresentou resultados inferiores na eficiência de retenção física em comparação ao WCL_{TS} M1. Embora o M2 tenha alcançado uma remoção de 90% de DQO, demonstrando excelente capacidade oxidativa do biofilme mesmo com baixo tempo de contato, a remoção de Sólidos Totais limitou-se a 56%. Esse comportamento confirma que a alta velocidade de passagem do fluido na drenagem livre favorece o arraste de sólidos particulados finos, resultando em um efluente final com maior quantidade de particulados.

A comparação direta entre as duas estratégias operacionais permite concluir que o regime de drenagem livre (WCL_{TS} M2) oferece robustez para a remoção de carga orgânica dissolvida com menor complexidade de gestão, enquanto que o módulo com maciço saturado e recirculação (WCL_{TS} M1) é superior no desempenho de tratamento produzindo efluente de melhor qualidade. A recirculação mostrou-se especialmente eficaz na redução de nutrientes como o fósforo e no polimento da matéria orgânica, justificando o incremento de complexidade hidráulica e energética em cenários onde se exigem padrões de lançamento mais restritivos.

No aspecto hidráulico, os testes de vazão e infiltração foram cruciais para o ajuste operacional da unidade. A identificação de incompatibilidades no sistema de bombeamento inicial e sua subsequente substituição garantiram a aplicação correta das taxas volumétricas de projeto. O monitoramento hidráulico revelou oscilações na vazão de recirculação, evidenciando a influência de variáveis eletromecânicas e confirmando a aferição periódica da vazão como uma prática indispensável para garantir a estabilidade operacional.

O balanço hídrico do sistema de recirculação indicou uma perda volumétrica média de aproximadamente 28% no WCL_{TS} M1, atribuída à evapotranspiração e à retenção nos interstícios do maciço filtrante. No entanto, a observação de balanços negativos em períodos chuvosos reforça que WCL_{TS} são sistemas abertos e dinâmicos, cuja operação é diretamente influenciada pelas condições climáticas.

Em relação aos nutrientes nitrogenados, ambos os módulos apresentaram desempenho moderado, com remoções de Nitrogênio Amoniaco em torno de 48% a 54%. Esses resultados são consistentes com módulos de estágio único, onde a coexistência de zonas aeróbias e anóxicas é limitada. Vale ressaltar que a remoção de Nitrogênio Amoniaco foi superior no M2, fato atribuído à predominância de condições aeróbias no meio filtrante, favorecidas pelo regime de drenagem livre

A pesquisa também destacou a importância da manutenção rotineira, exemplificada pelo manejo da vegetação (*Salix* spp.) e controle de espécies invasoras. O corte da parte aérea das macrófitas mostrou-se uma intervenção necessária para renovar o vigor das plantas e manter a funcionalidade do sistema, evidenciando que a operação de WCL_{TS} exige um protocolo de manejo agrônomico periódico para assegurar a eficiência da evapotranspiração e a permeabilidade do maciço filtrante a longo prazo.

Por fim, este trabalho conclui que os WCL_{TS} representam uma Solução Baseada na Natureza (SbN) viável, robusta e eficiente para o gerenciamento de lodo de tanques sépticos no contexto de Santa Catarina e, também, aplicável às distintas realidades do Brasil. A operação continuada dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS} permitiu, mesmo diante da variabilidade do lodo de tanque séptico recebido, inferir que a ecotecnologia é capaz de operar com estabilidade e desempenho na remoção de poluentes. Recomenda-se, contudo, a continuidade na operação e no monitoramento periódico e de longo período para se avaliar a taxa de acúmulo da camada de lodo (torta) bem como sua mineralização, consolidando os parâmetros para o dimensionamento de novas unidades em escala plena no território brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2005). **Standard methods for the examination of water and wastewater** (21st ed.).

ANDRADE, Cynthia Franco. **Avaliação do tratamento do lodo de caminhões limpa-fossa e do percolado em sistemas alagados construídos de escoamento vertical**. 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ANDREOLI, Cleverson Vitório (Coord.). **Lodo de fossa séptica**. In: PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO (PROSAB 5, Tema 6). Brasília: Finep, 2009. Disponível em: http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5_tema_6.pdf. Acesso em: 29 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11799:1990 – **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 17076:2024 – **Projeto de sistemas de tratamento de esgoto de menor porte – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde (FUNASA). **Operação e manutenção de tanques sépticos – Lodo: manual de boas práticas e disposição do lodo acumulado em filtros plantados com macrófitas e desinfecção por processo térmico**. Brasília: FUNASA, 2014. Disponível em: https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/publicacoes/operacao_manutencao_tanques_septicos_lodo_manual_praticas.pdf. Acesso em: 29 jan. 2025.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB)**. Brasília: Ministério das Cidades, 2013. Disponível em: <https://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/961>. Acesso em: 14 dez. 2025.

CARVALHO, Eraldo Henriques de; ANDREOLI, Cleverson V. (orgs). **Lodos de fossa e tanque séptico: orientações para definição de alternativas de gestão e destinação**. Curitiba: ABES, 2015.

CASAN - Companhia Catarinense de Águas e Saneamento. **Especialistas estimulam reflexões sobre universalização do saneamento com serviços**

descentralizados. 2021. Disponível em:

<https://www.casan.com.br/noticia/index/url/especialistas-estimulam-reflexoes-sobre-universalizacao-do-saneamento-com-servicos-descentralizados#0>. Acesso em: 21 jan. 2025.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (Brasil). Mapa Interativo. São José dos Campos: CEMADEN, 2025.

Disponível em: <https://mapainterativo.cemaden.gov.br/#/>. Acesso em: 17 dez. 2025.

DOMINGUEZ, Ágata Bogado. **Unidade de gerenciamento de lodo de tanque séptico do tipo wetland aplicável ao contexto catarinense**. 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/263564/PGEA0782-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 fev. 2025.

FARIA, G. L., & TIEPO, A. (2020). **Análise da importância do levantamento topográfico para as obras de terraplenagem na estruturação de loteamentos em glebas urbanizáveis**. Recuperado de

https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/51068/1/GIOVANN_LOUREN%C3%87O_FARIA.pdf. Acesso em: 5 fev. 2025.

FLORENCIO, Lourdinha; BASTOS, Rafael Kopschitz Xavier; AISSE, Miguel Mansur (Coord.). **Tratamento e utilização de esgotos sanitários. 2006**. Disponível em: http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/Esgoto-Prosab_-_final.pdf. Acesso em: 27 mar. 2025.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Política e Plano Municipal de 92 Saneamento Básico: convênio Funasa/Assemae**. 2. ed. Brasília, DF: Funasa (2014). E-book. Disponível em:

<https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/publicacoes/politica_plano_municipal_saneamento_basico_2_ed.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2025.

GESAD. **Cartilha Wetlands Construídos**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2019. Disponível em:

<https://gesad.ufsc.br/files/2019/09/CARTILHA-Wetlands-Constru%C3%ADdos-GESAD-2020.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2025.

GODOY, Lucia Camilo de. **A logística na destinação do lodo de esgoto**. Revista Científica Online – Tecnologia, Gestão e Humanismo, Guaratinguetá, v. 2, n. 1, 2013. Disponível em: <http://www.fatecguaratingueta.edu.br/revista/index.php/RCO-TGH/article/view/43>. Acesso em: 5 fev. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022: população e domicílios: primeiros resultados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em:

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102011.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2025.

INGALLINELLA, A. M. et al. **The challenge of faecal sludge management in urban areas – strategies, regulations and treatment options**. *Water Science and*

Technology, 2002. Disponível em: [https://www.fsmttoolbox.com/assets/pdf/256%20\(2\).pdf](https://www.fsmttoolbox.com/assets/pdf/256%20(2).pdf). Acesso em: 21 jan. 2025. INGNUNZA, Maria Del Pilar Durante; et al. **Caracterização física, química e microbiológica do lodo de fossa/tanque séptico**. In: ANDREOLI, Cleverson Vitorio (org). Lodo de fossa séptica – Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Rio de Janeiro: ABES, 2015. v. 1, p. 42-77.

KADLEC, Robert H.; WALLACE, Scott D. **Treatment Wetlands. 2. ed.** Boca Raton: CRC Press, 2009. (Capítulo 22: Management, Operations, and Maintenance - Seção 22.1 Start-up).

KADLEC, Robert H.; ZMARTHIE, Linda A. **Wetland treatment of leachate from a closed landfill**. Ecological Engineering, v. 36, n. 8, p. 946-957, 2010.

KÄFER, Silvana Cristina. **Tratamento de lodo anaeróbio em wetlands construídos operados em alta taxa e com a recirculação de líquido percolado**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

KINI, P. Giridhar; BANSAL, R. C.; AITHAL, R. S. **Impact of voltage unbalance on the performance of three-phase induction motor**. (2006) Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/43517405_Impact_of_voltage_unbalance_on_the_performance_of_three-phase_induction_motor. Acesso em: 11 dez. 2025.

KOOTTATEP, T.; SURINKUL, N.; POLPRASERT, C.; KAMAL, A. S. M.; KONÉ, D.; MONTANGERO, A.; HEINSS, U.; STRAUSS, M. **Treatment of septage in constructed wetlands in tropical climate – Lessons learnt after seven years of operation**. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2004. Disponível em: <https://www.fsmttoolbox.com/assets/pdf/250.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2025.

LANDAU, Elena Charlotte; MOURA, Larissa (Ed.). **Variação geográfica do saneamento básico no Brasil em 2010: domicílios urbanos e rurais**. Brasília: Embrapa, 2016. 975 p. Disponível em: <https://encurtador.com.br/dAQ56>. Acesso em: 21 jan. 2025.

LIBRALATO, Giovanni; GHIRARDINI, Annamaria Volpi; AVEZZÙ, Francesco. **To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management**. Journal Of Environmental Management, (2012). Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.07.010>.>. Acesso em: 29 jan. 2025.

MAGRI, M. E.; FRANCISCO, J. G. Z.; SEZERINO, P. H.; PHILIPPI, L. S. **Constructed wetlands for sludge dewatering with high solids loading rate and effluent recirculation: Characteristics of effluent produced and accumulated sludge**. Ecological Engineering, v. 95, p. 316-323, out. 2016.

MANJATE, Elias Sete. **Behaviour evaluation of vertical flow constructed wetlands for treatment of domestic sewage and septic tank sludge**. 2016. 158 f.

Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MANT, C. et al. **A feasibility study of a *Salix viminalis* gravel hydroponic system to renovate primary settled wastewater.** Bioresource Technology, v. 90, n. 1, p. 19-25, 2003.

MARTINETTI, Thais Helena; TEIXEIRA, Bernardo Arantes do Nascimento; SHIMBO, Ioshiaqui. **Pesquisa-ação participativa para execução de sistema de tratamento local de efluentes sanitários residenciais sustentável: caso do assentamento rural Sepé- -Tiaraju. Ambiente Construído, Porto Alegre, (2009).** Disponível em: < <https://livrozilla.com/doc/1337529/programa-oficial-do-congresso-miolo-web.ps>>. Acesso em: 29 jan. 2025.

MASSOUD, May A.; TARHINI, Akram; NASR, Joumana A.. **Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries.** Journal Of Environmental Management, (2009). Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.001>>. Acesso em: 29 jan. 2025.

PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO (PROSAB). **Lodo de fossa séptica.** 2009. Disponível em: http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5_tema_6.pdf. Acesso em: 21 jan. 2025.

RIBEIRO, Thaís et al. **Avaliação da fase inicial de partida operacional em uma unidade de gerenciamento de lodo de tanque séptico empregando wetlands verticais.** In: VII CONFERENCIA PANAMERICANA DE SISTEMAS DE HUMEDALES PARA EL TRATAMIENTO Y MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA, 2025, Assunção, Paraguai, 2025.

SAMPAIO, Américo de Oliveira. Editorial. **Revista Dae.** São Paulo, p. 3-3. set. 2011. Disponível em: <https://revistadae.com.br/downloads/edicoes/Revista-DAE-187.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2025.

SANTOS, R. B. et al. **Tratamento de lodo de tanque séptico em wetlands construídos: avaliação da eficiência e do acúmulo superficial.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 29, n. 1, p. 1-12, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/cq7JH7syLMWYrPn48sZQgYm/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 5 fev. 2025.

SANTOS, Ramon Leandro dos. **O uso do ferro e aço na construção civil.** 2021. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/43163/1/RAMON_LEANDRO_DOS_SANTOS.pdf. Acesso em: 19 mar. 2025.

SANTOS, W. A. et al. **Constructed wetland for septic tank sludge management: drained water quality under different operating strategies on a bench-scale experiment.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 29, e20240040, 2024. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/esa/a/cq7JH7syLMWYrPn48sZQgYm/?format=html&lang=en>. Acesso em: 04 dez. 2025.

SERAFIM, Milena P.; DIAS, Rafael de B.. **Tecnologia social e tratamento de esgoto na área rural**. In: COSTA, Adriano Borges (Org.). Tecnologia social e políticas públicas. São Paulo: Instituto Polis (2013). Disponível em: <<https://polis.org.br/wp-content/uploads/2014/08/2061.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2025.

SEZERINO, Pablo Heleno et al. **Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, n. 1, p. 151-158, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/8zwy5WwwLZVxRk5btDHDmK6/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 5 fev. 2025.

SEZERINO, Pablo Heleno et al. WETLANDS CONSTRUÍDOS APLICADOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção. 1ª ed. Tubarão: Copiart, 2018. 56 p.

SILVA JÚNIOR, É. D. da; ALMEIDA, R. de A.; SIQUEIRA, E. R.; SILVA, Á. R. da; RODRIGUES, A. de M. **Tratamento de resíduos sépticos em wetlands construídos de fluxo vertical**. 2015. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/recc/article/download/6639/4285>. Acesso em: 21 jan. 2025.

SILVA, Bárbarah Brenda. **As relações de gênero e o saneamento: um estudo de caso envolvendo três comunidades rurais brasileiras**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (2017). Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-AVRKFW>>. Acesso em: 29 jan. 2025.

SIRINO, Thiago. **Estudo numérico da influência da viscosidade no desempenho de uma bomba centrífuga submersa**. 2013. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/880/1/CT_PPGEM_M_Sirino%2C%20Thiago_2013.pdf. Acesso em: 27 mar. 2025.

SPERLING, Marcos Von. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. Disponível em: https://www.academia.edu/39149408/Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_qualidade_das_%C3%A1guas_e_ao_tratamento_de_esgotos?auto=download. Acesso em: 29 jan. 2025.

STEFANAKIS, Alexandros I.; AKRATOS, Christos S.; TSIHRINTZIS, Vassilios A. **Sludge Treatment Wetlands: Basic Design Considerations**. In: STEFANAKIS, A. I.; AKRATOS, C. S.; TSIHRINTZIS, V. A. Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2014. Cap. 10, p. 191-208.

SUNTTI, C.; MAGRI, M. E.; PHILIPPI, L. S. **Filtros plantados com macrófitas de fluxo vertical aplicados na mineralização e desaguamento de lodo de tanque séptico**. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/Vg47GvwcWCF6HHm5qZDZQqH/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 21 jan. 2025.

SUNTTI, Carla. **Desaguamento de lodo de tanque séptico em filtros plantados com macrófitas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SUPREMA. **Estudo técnico visando diagnosticar a situação dos recursos hídricos destinados à exploração de água no município de Holambra-SP, compatibilizando alternativas entre disponibilidades e demandas hídricas (Projeto águas de Holambra)**, (2013): Disponível em: <<https://silo.tips/download/agencia-das-bacias-pc-j-200>> Acesso em: 21 jan. 2025.

TREVISAN, A. B.; MARTINS, J. J.; SEZERINO, P. H. **Partida Operacional em Wetlands Componentes de uma Unidade de Gerenciamento de Lodo de Tanque Séptico em Escala Real**. In: 7° SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE WETLANDS CONSTRUÍDOS, 2025, Curitiba - PR, 2025.

TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA (TCESC). **Apenas 34,8% do esgoto gerado em Santa Catarina é tratado, aponta Agência Nacional. Tribunal de Contas do Estado de Santa Catarina**, 2025. Disponível em: <https://www.tcesc.tc.br/apenas-348-do-esgoto-gerado-em-santa-catarina-e-tratado-aponta-agencia-nacional>. Acesso em: 27 mar. 2025.

TSIHRÍNTZIS, V. A.; GIKAS, G. D. **Constructed wetlands for wastewater and activated sludge treatment in north Greece: a review**. *Water Science & Technology*, v. 61, n. 10, p. 2653-2672, 2010. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/61/10/2653/15827/Constructed-wetlands-for-wastewater-and-activated>. Acesso em: 5 fev. 2025.

UGGETTI, Enrica; FERRER, Iveta; LLORENS, Esther; GARCÍA, Joan. **Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art**. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 9, p. 2905-2912, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409016095>. Acesso em: 5 fev. 2025.

Vogel, A. L. (1981). **Análise inorgânica qualitativa** (4ª ed.). Editora Guanabara

WHO/UNICEF. **What do safely managed sanitation services mean for UNICEF programmes?. Wash Discussion paper**, 2020. Disponível em: <https://www.unicef.org/media/91321/file/2020-DP3-UNICEF-SMSS-Discussion-Paper.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2025.

YEH, T. Y. **Removal of metals in constructed wetlands: review**. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, v. 12, n. 2, p. 96-101, abr. 2008. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/247479894_Removal_of_Metals_in_Constructed_Wetlands_Review. Acesso em: 02 dez. 2025.

APÊNDICE A

PROJETO DA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE LODO DE TANQUE SÉPTICO

Dominguez (2024) descreveu todas as etapas de elaboração do projeto da UGL_{TS}. No dimensionamento dos módulos WCL_{TS}, a taxa de aplicação de sólidos (TAS), expressa em kg.ST/m².ano, consolidou-se como o critério preponderante de projeto. Para validar o desempenho do sistema, a metodologia de operação foi dividida em três cenários progressivos de taxa de carregamento de sólidos. O processo inicia-se com um cenário de start-up (40 kg.ST/m².ano), evolui para um estágio intermediário de transição (60 kg.ST/m².ano) e culmina na operação plena (100 kg.ST/m².ano), assegurando a análise da capacidade máxima de tratamento, isso para ocorrer em um universo temporal de 15 anos. Com o objetivo de tornar a operação prática e replicável em contexto real, o volume de aplicação de lodo nos leitos de 60 m² foi definido considerando uma frequência semanal (52 aplicações anuais) para os três cenários de taxa de carregamento. Para o Cenário 1 (40 kg.ST/m².ano), o volume calculado de aproximadamente 7,43 m³/semana foi operacionalizado através da descarga de um caminhão com capacidade de 8 m³. No Cenário 2 (60 kg.ST/m².ano), o aumento da demanda volumétrica para cerca de 11 m³/semana resultou na proposta de aplicação proveniente de dois caminhões de 6 m³. Por fim, para o Cenário 3 (100 kg.ST/m².ano), que apresenta um volume teórico calculado de 18,52 m³/semana, estabeleceu-se a utilização de dois caminhões de 8 m³, adequando a carga hidráulica teórica à capacidade comercial usual dos veículos auto-vácuo disponíveis.

O desenvolvimento do projeto que iniciou-se em 2019, enfrentou pausas devido à pandemia e revisões técnicas por alterações na área disponível, totalizando cerca de 5 anos desde a concepção inicial até o início efetivo das obras em abril de 2024.

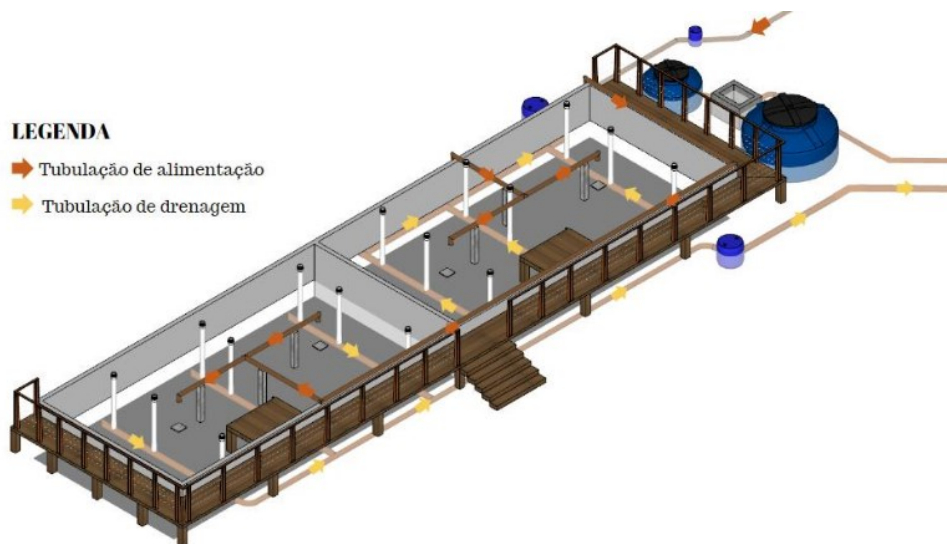
A infraestrutura técnica dos módulos foi projetada para garantir eficiência hidráulica e operacional. O sistema de alimentação utiliza tubulações de PVC e placas de dispersão de concreto para assegurar a distribuição uniforme do lodo e evitar a compactação do meio filtrante. Já o sistema de drenagem de fundo emprega tubos perfurados interligados a colunas de ventilação passiva. Estudos realizados por Stefanakis & Tsihrintzis (2012) *apud* Dominguez (2024), indicam que o uso de tubos

de aeração passiva melhoram significativamente o desempenho do sistema. As unidades com essa ventilação tiveram 5% a mais de remoção de matéria orgânica e menores concentrações de NTK e N-NH_4^+ no efluente em comparação àquelas sem os tubos, otimizando o desempenho biológico do leito.

O projeto conta com um diferencial operacional proposto para um dos módulos, o sistema de recirculação do percolado, desenhado para testar essa modalidade de tratamento. O efluente drenado passa por uma caixa de inspeção e é armazenado em reservatórios (2.000L e 10.000L), sendo posteriormente reintroduzido no leito através de bombeamento. Para suportar essa operação, foi prevista a automação via painel de controle, devidamente dimensionado para as cargas elétricas e protegido contra intempéries, além de estruturas de acesso como passarelas de madeira e guarda-corpos, garantindo a segurança e facilitando a manutenção e amostragem em diferentes profundidades. A especificação da caixa de passagem de 2.000 litros para o recirculado deveu-se à inviabilidade técnica de enterrar o reservatório de maior porte (10.000 litros). Complementarmente, o posicionamento dos registros foi estrategicamente planejado para evitar o retorno de lodo ou drenado, otimizando as rotinas de operação e manutenção. Na Figura é possível observar o desenho esquemático e após construção (*as built*) dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS} finalizada antes do plantio de macrófitas.

No que tange aos custos, o orçamento inicial base de 2022 estimava um investimento de aproximadamente R\$ 172 mil, valor que, atualizado pelo INCC e submetido ao processo licitatório, resultou em um contrato homologado de R\$ 265.777,77 em 2024. A análise financeira demonstrou que a maior parte dos recursos (66,61%) foi destinada a materiais e equipamentos, enquanto a mão de obra civil representou 33,39%. Ao isolar os custos específicos de implantação da tecnologia wetland (descontando administração e tratamento preliminar), obteve-se um custo normalizado de R\$ 1.727,56 por metro quadrado construído.

Figura A1: Imagem esquemática gerada na fase de projeto seguida de imagem fotográfica após construção (*as built*) dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS} finalizada antes do plantio de macrófitas.



Fonte: Adaptado de Dominguez (2024)

APÊNDICE B

Alimentações realizadas e campanhas de coletas amostrais durante a operação dos módulos WCL_{TS} componentes da UGL_{TS}, entre julho e dezembro de 2025.

Alimentações realizadas e campanhas de coletas amostrais					
Semana	Data	Lodo Séptico Bruto M1	Lodo Séptico Bruto M2	Drenado M1	Amostras
1	01/jul	X	X		Bruto M1
2	08/jul		X	X	Bruto M2, Drenado M2, Drenado M1
3	15/jul	X	X		Recirculado M1
4	22/jul		X	X	
5	29/jul	X	X		
6	05/ago		X	X	
7	12/ago	X	X		Bruto M1, Bruto M2, Drenado M2
8	19/ago		X	X	Drenado M1
9	26/ago	-	-		Recirculado M1
10	02/set	X	X		
11	09/set		X	X	
12	16/set	X	X		Bruto M1, Bruto M2, Drenado M2

Alimentações realizadas e campanhas de coletas amostrais					
Semana	Data	Lodo Séptico Bruto M1	Lodo Séptico Bruto M2	Drenado M1	Amostras
13	23/set		X	X	Drenado M1
14	30/set	X	X		Recirculado M1
15	07/out		X	X	
16	14/out	X	X		Bruto M1, Bruto M2, Drenado M2
17	21/out		X	X	Drenado M1
18	27/out	X	X		Recirculado M1
19	03/nov		X	X	
20	11/nov	X	X		Bruto M1, Bruto M2, Drenado M2
21	18/nov		X	X	Drenado M1
22	25/nov	X	X		Recirculado M1
23	02/dez		X	X	
24	09/dez	X	X		
25	16/dez		X	X	

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE C

Valores de medidos junto aos módulos WCL_{TS} M1 e M2 componentes da UGL_{TS} a partir das diferentes estratégias operacionais conduzidas ao longo do período entre julho e dezembro de 2025.

WCL_{TS} M1: Lodo Séptico Bruto – Efluente Drenado					
	Entrada	Desvio Padrão - Entrada	Saída	Desvio Padrão - Saída	% Remoção
pH	6,88	0,7	6,84	0,6	-
ST (mg/L)	3.232	1.452	761	114	76%
SF (mg/L)	1.060	422	614	140	42%
SV (mg/L)	2.171	1.050	147	47	93%
DQO (mg/L)	4.131	1.631	197	90	95%
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	172	43	90	32	48%
P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	108	25	44	20	59%

WCL_{TS} M1: Lodo Séptico Bruto – Efluente Recirculado					
	Entrada	Desvio Padrão - Entrada	Saída	Desvio Padrão - Saída	% Remoção
pH	6,88	0,7	6,95	0,4	-
ST (mg/L)	3.232	1.452	727	152	77%
SF (mg/L)	1.060	422	602	90	43%
SV (mg/L)	2.171	1.050	124	70	94%
DQO (mg/L)	4.131	1.631	104	40	97%
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	172	43	84	16	51%
P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	108	25	26	9	76%

WCL_{TS} M1: Efluente Drenado – Recirculado					
	Entrada	Desvio Padrão - Entrada	Saída	Desvio Padrão - Saída	% Remoção
pH	6,84	0,6	6,95	0,4	-
ST (mg/L)	761	114	727	152	4%
SF (mg/L)	614	140	602	90	2%
SV (mg/L)	146	47	124	70	15%
DQO (mg/L)	197	90	104	40	47%
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	90	32	84	16	7%
P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	44	20	26	9	41%

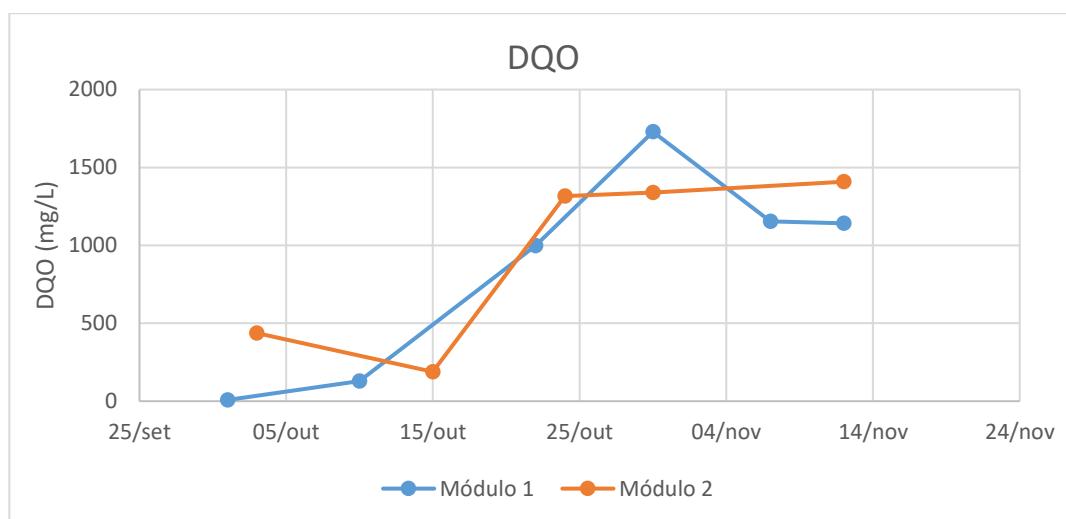
WCL_{TS} M2: Lodo Séptico Bruto – Efluente Drenado					
	Entrada	Desvio Padrão - Entrada	Saída	Desvio Padrão - Saída	% Remoção
pH	6,6	0,67	6,9	0,42	-
ST (mg/L)	2.416	1.467	1.066	216	56%
SF (mg/L)	933	319	653	73	30%
SV (mg/L)	1.483	1.154	413	272	72%
DQO (mg/L)	3.030	1.898	295	223	90%
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	174	23	80	44	54%
P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	111	8	38	20	65%

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE D

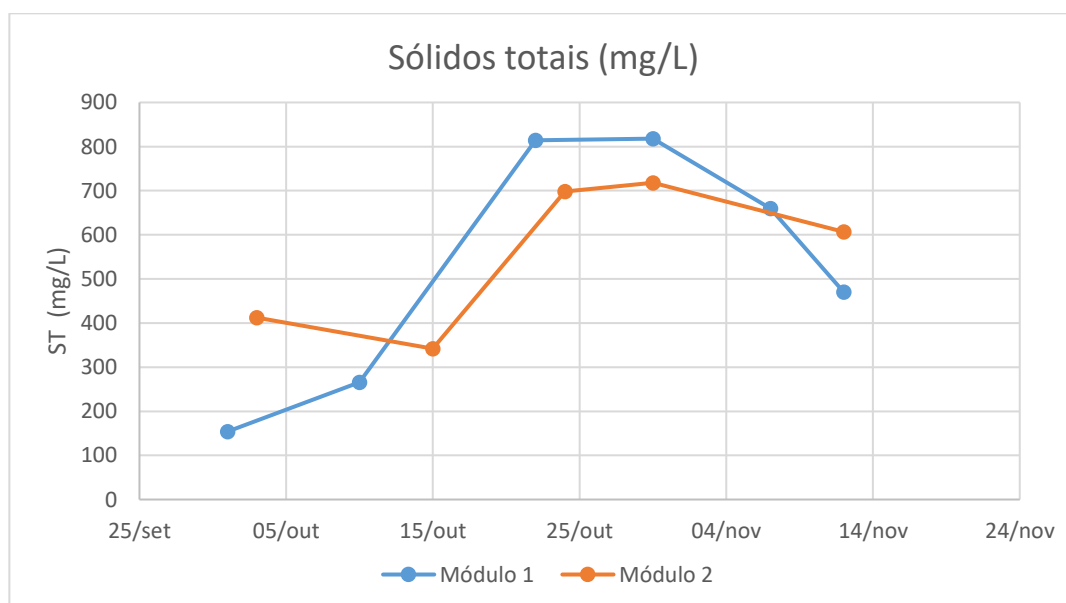
Perfis de concentração de DQO (mg/L) e ST (mg/L) durante o período de *start up*.

Variação da DQO (mg/L) da mistura lodo de tanque séptico + esgoto tratado utilizada para alimentar o sistema durante o período de *start up*.



Fonte: Elaborado pelo autor

Variação da concentração de Sólidos Totais - ST (mg/L) da mistura lodo de tanque séptico + esgoto tratado utilizada para alimentar o sistema durante o período de *start up*.



Fonte: Elaborado pelo autor