

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - PPGESA

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO
DE LEITO DE SECAGEM PARA TRATAMENTO DE
EFLUENTES SANITÁRIOS GERADOS EM UMA
MINERADORA NO ESTADO DO PARÁ**

ENG° CLEYTON EDUARDO COSTA FERREIRA

ORIENTADOR PROF.DR NEYSON MARTINS MENDONÇA

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



BELÉM (2022)



**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE LEITO DE
SECAGEM PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS GERADOS EM
UMA MINERADORA NO ESTADO DO PARÁ**

CLEYTON EDUARDO COSTA FERREIRA

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

Examinada por:

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

Prof. Mario Augusto Tavares Russo, Dr. em Engenharia civil
(Instituto Politécnico de Viena do Castelo - Membro)

Prof. Arnaldo Sarti, Dr. em Hidráulica e saneamento
(Unesp Araraquara – Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

Abril 2023



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

F383e Ferreira, Cleyton Eduardo Costa.
Estudo de viabilidade econômica da implantação de leito
de secagem para tratamento de efluentes sanitários gerados
em uma mineradora no Estado do Pará / Cleyton Eduardo
Costa Ferreira. — 2022.
22 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental, Belém, 2022.

1. Tratamento. 2. Lodo. 3. Projeto. 4. Orçamento. 5.
Viabilidade econômica. I. Título.

CDD 620.8

ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE LEITO DE SECAGEM PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS GERADOS EM UMA MINERADORA NO ESTADO DO PARÁ

ECONOMIC FEASIBILITY STUDY OF THE IMPLEMENTATION OF A DRYING BED FOR THE TREATMENT OF SANITARY EFFLUENTS GENERATED IN A MINING COMPANY IN THE STATE OF PARÁ

Cleyton Eduardo Costa Ferreira ¹
Dr. Neyson Martins Mendonça^{2*}

Abstract

Waste management is one of the main challenges of modern society, especially when it comes to finding more sustainable and economical alternatives for the treatment and disposal of these materials. In this context, biosolids, a byproduct generated from wastewater treatment, have been identified as a possible source of nutrients and organic matter for agriculture and other sectors, thus contributing to a more circular economy. Biosolids contain a large amount of nutrients that can be used to improve soil quality and increase agricultural productivity (OLIVEIRA et al., 2018). In addition, the use of biosolids as fertilizer can reduce the need for chemical inputs, contributing to the reduction of the environmental impact associated with final disposal (RIBEIRO et al., 2015).

This study was conducted in a mining company in the state of Pará, Brazil, which has eight decentralized anaerobic wastewater treatment plants. The study aimed to define the treatment route for biosolids, as well as to evaluate the economic viability of implementing a drying bed for the production of biosolids to be applied in the restoration of degraded areas. It was found that 11,776 kg of total suspended solids (TSS) per year of sludge are generated, resulting in the design of a drying bed with three cells, each with 22 m², an operation cycle of 25 days, and a Surface Application Rate of 13.30 Kg TSS/m²xdia. For sanitization, CaO was chosen. The implementation cost of the drying bed was R\$ 100,358.70, operational costs were R\$ 2,059.62/month, and the solution via incineration was R\$ 18,415.80/month. Based on the simple and discounted payback, the investment returns in approximately 7.14 and 7.19 months, respectively, and is part of the synergistic costs with the current sanitation management. The other indicators point to the investment as viable and capable of financial surplus. Therefore, the company will have financial and environmental gains with the implementation of the project.

Key Words (en negritas): Treatment. Sludge. Project. Budget. Economic viability.

¹ Discente na Universidade Federal do Pará (UFPA), Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA), Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental.

² Professor Dr. na Universidade Federal do Pará (UFPA), Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA), Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Resumo

A gestão de resíduos é um dos principais desafios da sociedade atual, sobretudo quando se trata de encontrar alternativas mais sustentáveis e econômicas para o tratamento e destinação desses materiais. Nesse contexto, o bio sólido, um subproduto gerado a partir do tratamento de esgoto, tem sido apontado como uma possível fonte de nutrientes e matéria orgânica para a agricultura e outros setores, contribuindo assim para uma economia mais circular. O bio sólido contém uma grande quantidade de nutrientes, que pode ser utilizada para melhorar a qualidade do solo e aumentar a produtividade agrícola (OLIVEIRA et al., 2018). Além disso, a utilização de bio sólido como fertilizante pode reduzir a necessidade de insumos químicos, contribuindo para a redução do impacto ambiental associado à destinação final (RIBEIRO et al., 2015). O presente estudo foi desenvolvido em uma mineradora no estado do Pará, que possui oito ETE's descentralizadas do tipo anaeróbia. Além disso, foi realizada a definição da rota de tratamento dos subprodutos, dimensionamento e análise de viabilidade econômica do da implantação de leito de secagem com objetivo de realizar a produção de bio sólido para aplicação na recuperação de áreas degradadas. Constatou-se que anualmente são gerados 11.776 kg SST/ano de lodo, resultando no dimensionamento de leito de secagem com 3 células, sendo cada uma com 22 m², ciclo de operação de 25 dias e Taxa de Aplicação Superficial de 13,30 KgSST/m²xdia. Para a higienização, foi escolhida a caleação com CaO. O custo de implantação do leito de secagem correspondeu a R\$ 100.358,70, operacionalização R\$ 2.059,62/mês e a solução via incineração de R\$ 18.415,80/mês. Utilizando como base o payback simples e descontado, o investimento retorna em aproximadamente 7,14 e 7,19 meses, respectivamente, sendo parte dos custos sinérgicos com a gestão de saneamento atual. Os demais indicadores, apontam o investimento como viável e passível de superávit financeiro. Portanto, a empresa terá ganhos financeiros e ambientais com a implantação do projeto.

Palavras-chave: Tratamento. Lodo. Projeto. Orçamento. Viabilidade econômica.

1. Introdução

A gestão de resíduos é um dos principais desafios da sociedade atual, sobretudo quando se trata de encontrar alternativas mais sustentáveis e econômicas para o tratamento e destinação desses materiais. Nesse contexto, o bio sólido, um subproduto gerado a partir do tratamento de esgoto, tem sido apontado como uma possível fonte de nutrientes e matéria orgânica para a agricultura e outros setores, contribuindo assim para uma economia mais circular.

Existem diversas formas de realizar a destinação final adequada de lodo sanitário, podendo partir de produção de biodiesel, matéria-prima complementar na construção civil, incineração, disposição em aterros sanitários e como condicionadores de solo (bio sólido). Uma das técnicas mais simples e promissoras é a utilização do lodo sanitário como bio sólido para a recuperação de áreas degradadas, em decorrência dos seus altos teores de matéria orgânica e substâncias nutritivas, como nitrogênio, fósforo, carbono e micronutrientes (ABES, 2015).

O bio sólido contém uma grande quantidade de nutrientes, que pode ser utilizada para melhorar a qualidade do solo e aumentar a produtividade agrícola (OLIVEIRA et al., 2018). Além disso, a utilização de bio sólido como fertilizante pode reduzir a necessidade de insumos químicos, contribuindo para a redução do impacto ambiental associado à destinação final (RIBEIRO et al., 2015).

No entanto, para que o uso de bio sólido seja efetivamente incorporado na economia circular, é necessário que haja investimentos em tecnologias de tratamento e manejo adequado desse resíduo, de forma a minimizar os riscos ambientais e sanitários (BORSOI et al., 2017).

Antes da definição das rotas de tratamento, deve-se determinar os volumes gerados, metodologia de desaguamento e desinfecção do lodo. Logo, a metodologia a ser adotada deve ser, de preferência, eficaz, de simples operação e a um baixo custo, desse ponto de vista o sistema de leito de secagem, encontra-se como sendo a alternativa mais viável, desde que se tenha características ambientais adequadas (raios solares) e área superficial disponível (SPERLING, 2014).

Também deve ser considerado a pegada de carbono e as emissões gasosas providas das soluções de tratamento de efluentes e resíduos sólidos. Conforme o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2022), as alterações de temperatura já estão causando impactos mundialmente, variando de secas extremas a inundações recordes, desencadeando grande insegurança hídrica para a população mundial. Alguns outros aspectos gerados pelas mudanças climáticas: perda de biodiversidade, insegurança alimentar, incêndios, aumento do nível do mar, entre outros.

As emissões gasosas residenciais e industriais são o fator chave para o desencadeamento das mudanças climáticas. Portanto, a aderência da população e indústria de práticas mais sustentáveis no seu dia a dia e fluxos de tratamento de efluentes e resíduos sólidos que possam reduzir a pegada de carbono é essencial para tentar alterar o cenário global atual.

Diante do exposto, o presente trabalho trata-se de um estudo de caso sobre o gerenciamento do subproduto sólido (lodo) gerado por oito (08) estações de tratamento de esgoto implantada numa Mineradora situada no município de Paragominas no Estado do Pará. O lodo gerado é do tipo anaeróbio e vem sendo encaminhado para a incineração, sem o prévio desaguamento. O estudo tem como objetivo traçar a rota de tratamento de lodo em leito de secagem, juntamente com o seu projeto básico, determinar o Capex e Opex e calcular as métricas de viabilidade econômica para verificar a viabilidade do sistema proposto com o intuito de inserir as boas práticas de economia circular e redução de emissões de gases do efeito estufa.

2. Metodologia

- Local de estudo

O local de estudo possui área aproximada de 60 km², estando localizado em área remota do município de Paragominas no estado do Pará. Os sistemas de tratamento de efluentes sanitários do local são do tipo descentralizado, em decorrência das distâncias existentes entre as frentes de serviço da empresa. No ano de 2021, o empreendimento contava com o total de 8 ETE's, tendo vazões variando de 0,08 m³/dia a 43,93 m³/dia. A vazão de projeto das ETE's corresponde ao atendimento de 1125 contribuintes, resultando na vazão de projeto de 165 m³/dia, com exceção das ETE07 e ETE08, que são projetadas para atendimento da população presente nas frentes de lavra, correspondendo a vazão de projeto de 4,3 m³/dia.

Os sistemas de tratamento são compostos por tratamento primário (gradeamento, medição de vazão, caixa de gordura e de areia), tratamento secundário (biorreator anaeróbio seguido de biofiltro anaeróbio de fluxo ascendente) e desinfecção final (sistema de cloração por pastilhas). Apenas as ETE07 e ETE08 apresentam o diferencial de serem módulos móveis, locados em containers, que avançam conforme a evolução lavra e realizam, basicamente, o atendimento da demanda do restaurante móvel.

- Diretriz técnica de projeto

As informações utilizadas na composição do estudo são provenientes da base de dados cedidos pela empresa, onde as análises laboratoriais foram executadas quinzenalmente e as campanhas de medição de vazão semanalmente.

Fora considerado que o montante teórico de lodo sanitário gerado seria encaminhado para a empresa terceirizada de destinação final de resíduos sólidos e esse material incinerado em sua totalidade. Os custos adotados foram os praticados no contrato durante o período de estudo.

Considerou-se que a unidade de gerenciamento de lodo seria locada na ETE03, em decorrência de ser a ETE com maior demanda e contar com maior área superficial livre, e o lodo das demais ETE's seriam coletadas via caminhão hidrojetado e encaminhadas para tratamento nesse local.

As estimativas de geração de lodo sanitário foram realizadas com base nas campanhas de vazão de efluentes e nas determinações de DQO executadas em laboratório terceirizado acreditado durante o ano de 2021. Posteriormente, foi aplicada a estatística descritiva com apoio do *software Microsoft Excel 365* e *Minitab Statistical Software*.

A carga orgânica mensal de cada uma das ETE's foi determinada pela Equação 1.

$$CO = DQO_{bruta} \times Q_{mês} \quad \text{Equação 1}$$

Onde

CO: carga orgânica (kg DQO/mês); e

DQO_{bruta}: valor de DQO do efluente bruto (mg/L ou kg/m³); e

Q_{mês}: valor de vazão de entrada da ETE (m³/dia ou m³/mês).

Em seguida foram calculados os valores de produção de lodo e a vazão de lodo, conforme a Equação 2 e Equação 3, respectivamente. Os valores adotados para as variáveis foram os orientados pela NBR ABNT 12.209/2011 (ABNT, 2011).

$$Plodo = Y \times CO \quad \text{Equação 2}$$

$$Ql = \frac{Plodo}{Glodo \times Clodo} \quad \text{Equação 3}$$

Onde

Plodo: Massa de lodo gerada no reator (KgSST/mês);

Y: Coeficiente de produção de sólidos (0,20 KgSST/Kg DQO);

Yobs: Coeficiente de produção de sólidos, em termos de DQO 0,21

Ql: Vazão de lodo gerado no reator (m³/dia);

Glodo: Densidade do lodo no (1020 KgSST/m³);

Clodo: Concentração esperada para o lodo de descarte (adotado 5 %);

CO: Carga orgânica em termos de DQO (KgDQO/dia);

Qmed = m³/dia.

A partir das informações de produção e de vazão de lodos gerados, foi possível realizar o dimensionamento do leito de secagem. Foram utilizados os valores de referência sugerido pelos autores Jordão e Pêsoa (2014). Os cálculos de volume do leito de secagem, área superficial do

leito de secagem e o seu número de células são apresentados na Equação 4, Equação 5 e Equação 6.

$$V_{\text{leito}} = V_{\text{lodo}} (T_p + T_l) \quad \text{Equação 4}$$

$$A_s = \frac{V_{\text{leito}}}{H_{\text{útil}}} \quad \text{Equação 5}$$

$$A_{sc} = \frac{A_s}{n} \quad \text{Equação 6}$$

Onde

TP: tempo de permanência (dias);

TL: tempo de limpeza (dias);

Asc: área superficial (m²); e

N: número de células (3 adotadas).

Após a determinação do volume e área superficial necessário foi possível determinar as dimensões do leito, sendo apresentadas na Equação 7 e Equação 8.

$$B = \frac{\text{Área}}{A} \quad \text{Equação 7}$$

$$A_{\text{útil}} = A \times B \quad \text{Equação 8}$$

Onde

A: comprimento (m); e

B: largura (m)

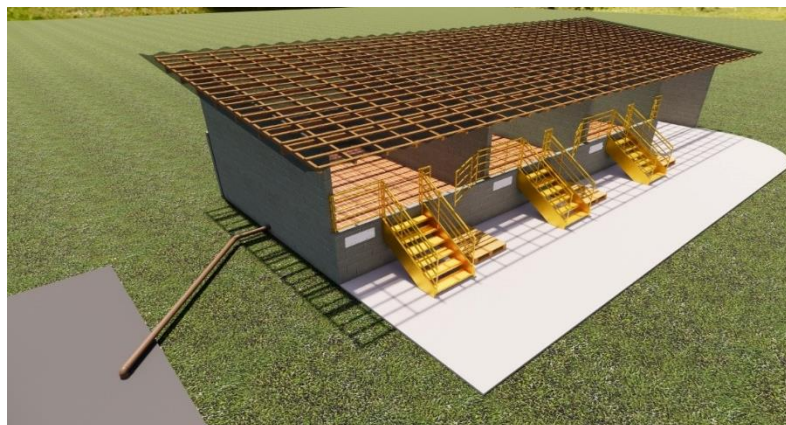
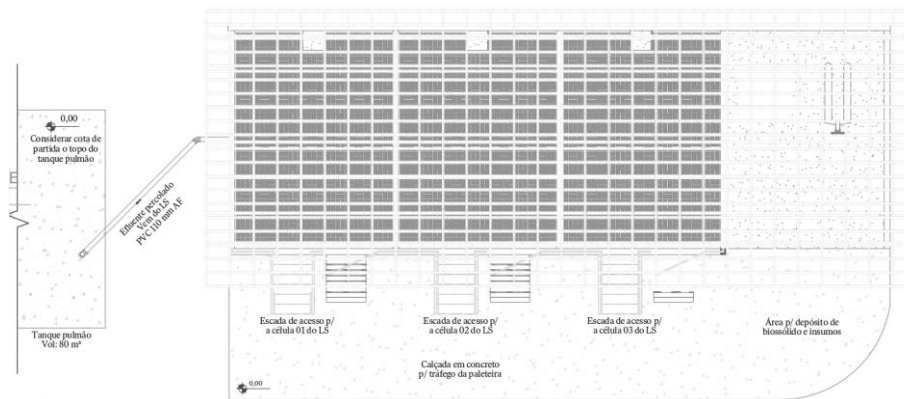
Após o dimensionamento, foi necessário realizar a elaboração das peças gráficas. Para as camadas drenantes foi utilizada a composição dos materiais e volumes recomendados por Jordão e Pessoa (2014):

- 1ª camada: tijolos e areia. Altura 0,15 m;
- 2ª camada: brita 1/16" a 1/4". Altura 0,03 m;
- 3ª camada: brita 1/4" a 7/8". Altura 0,05 m; e
- 4ª camada: brita 3/4" a 2". Altura 0,20 m.

O efluente percolado é direcionado para a canaleta fundo que conta com tubulação ranhurada em PVC rígido 110 mm com declividade de 2%. O efluente coletado é redirecionado para o tanque pulmão de 80 m³ locado próximo ao leito de secagem, aproveitando a estrutura já existente no local, voltando assim para o tratamento da ETE03.

A partir da premissa do direcionamento do efluente percolado para o tanque pulmão, foi necessário utilizar a cota de topo desse tanque como referência de construção. Na Figura 1 é apresentada a disposição do tanque e a configuração das camadas filtrantes.

Figura 1 – Desenho técnico do leito de secagem.



- Elaboração de orçamento detalhado (CAPEX e OPEX).

Para a elaboração do orçamento, insumos e composições de custos, foi utilizado o *software* Orçafascio, que é um programa especializado para a composição de orçamentos executivos para obras de engenharia. Nele já são previstas diversas bases de dados oficiais de materiais, mão-de-obra e valores adotados e considera os custos particulares para cada estado do Brasil. As seguintes bases orçamentárias foram utilizadas para a determinação do Capex do sistema de leito de secagem:

- SINAPI - 11/2021 – Pará;
- SBC - 12/2021 – Pará;
- SICRO3 - 07/2021 – Pará;
- SICRO2 - 11/2016 – Pará;
- ORSE - 09/2021 – Sergipe; e
- SEDOP - 09/2021 – Pará.

Referente a Bonificação de Despesas Indiretas (BDI) foi adotado o valor correspondente a 30%, semelhante ao valor sugerido pelo Tribunal de Contas da União (TCU) pelo Acórdão 2622/2013 para obras de saneamento (TCU, 2013).

Posteriormente, foi determinado o Opex, sendo considerados os custos envolvidos para a operacionalização do sistema de desaguamento e produção de biossólido. Ressalta-se que os custos de mão-de-obra e insumos foram obtidos através dos contratos vigentes na empresa do estudo de caso.

- Análise de viabilidade econômica

A partir dos valores obtidos após a elaboração do orçamento, deu-se início aos estudos de viabilidade financeira, sendo aplicadas as seguintes métricas:

- *Payback* simples: métrica para avaliar o tempo necessário para que um dado investimento retorne o seu valor inicial (BRANCO, 2016). O fluxo descontado foi calculado através do custo mensal da solução atual de gestão de lodo (incineração – R\$ 18.415,80/mês) menos o custo mensal de operacionalização do leito de secagem. O equacionamento é apresentado na Equação 9 e Equação 10, respectivamente.

$$PS = \frac{I}{RA}$$

Equação 9

$$Fc = Cinc - Cls$$

Equação 10

Onde

I: investimento inicial (R\$ reais);

RA: receitas anuais ou entradas líquidas de caixa (R\$);

Fc: fluxo de caixa (R\$);

Cinc: custo de incineração mensal (R\$/mês); e

Cls: custo operacionalização leito de secagem mensal (R\$/mês).

- *Payback* descontado: similar ao *payback* simples, no entanto, aplica uma taxa de desconto, trazendo a valor presente o capital descontado das taxas (BISCHOFF, 2013). Para o presente estudo utilizou-se o geralmente Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA ou inflação), para esse estudo foi adotado o valor acumulado de 12 meses equivalente a 10,75% (IBGE, 2022). O equacionamento é apresentado na Equação 11.

$$VP = \frac{VF}{(1 + K)^t}$$

Equação 11

Onde

VP: valor presente;

VF: valor futuro;

K: taxa de rentabilidade equivalente periódica (IRR);

t: prazo.

- Valor presente líquido (VPL): é um indicador que permite a avaliação da viabilidade econômica de um projeto de longo prazo. De acordo com Bourdeaux-Rêgo (2013), o VPL é calculado pela subtração dos benefícios atuais pelo valor atual dos custos ou desembolsos. O equacionamento é apresentado na Equação 12.

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + r)^t} + \frac{VR}{(1 + r)^n}$$

Equação 12

Onde

I_0 = investimento inicial;

r = é o custo de capital definido pela empresa;

VR = é o valor residual de projeto ao final do período de análise; e

FC = fluxos previstos de entradas de caixa em cada período de vida do projeto (benefícios de caixa).

- Cálculo da taxa interna de retorno (TIR): é a taxa utilizada para igualar os fluxos de caixa ao valor presente (PV), ou seja, é o custo ou rentabilidade efetiva de um projeto ou simplesmente a taxa de desconto igual aos fluxos de caixa ao investimento inicial, seja pelo regime de juros compostos ou simples (HIRSCHFELD, 2016). O equacionamento é apresentado na Equação 13.

$$I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1 + K)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + K)^t}$$

Equação 13

Onde

I_0 = montante do investimento no momento zero (início do projeto);

I_t = montantes previstos de investimentos em cada momento subsequente;

K = taxa de rentabilidade equivalente periódica (IRR); e

FC = fluxos previstos de entradas de caixa em cada período de vida do projeto (benefícios de caixa).

- Índice de lucratividade (IL): é uma métrica que considera o valor de caixa presente e o custo de implantação do projeto. De acordo com Bourdeax-Rêgo (2013), existem faixas de classificação, sendo: $IL > 1$, investimento retornará atendendo uma taxa exigida e ocorrerá aumento de riqueza; $IL = 1$, o investimento será recuperado exatamente na taxa exigida; $IL < 1$, investimento não será recuperado. O equacionamento é apresentado na Equação 14.

$$IL = \frac{VPL + I}{I}$$

Equação 14

Onde

IL: índice de lucratividade;

VPL: valor presente líquido; e

I: investimento inicial.

3. Resultados

- Estatística descritiva

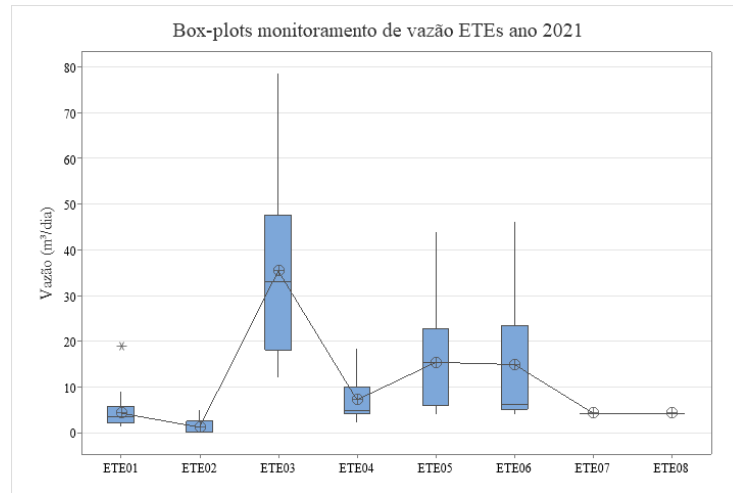
Os dados referentes as campanhas de medição de vazão de efluentes bruto executados durante o ano de 2021 foram tratados e constam sumarizados na Tabela 1. No entanto, ressalta-se que a ETE07 e ETE 08 não possuíam dados de medição anual, sendo utilizados os dados de projeto para o dimensionamento.

Tabela 1 – Estatística descritiva dados de vazão referentes ao ano de 2021 nas ETE's do estudo de caso.

ETE	NÚM DADOS (N)	MÉDIA (M ³ /DIA)	MÍNIMO (M ³ /DIA)	MÁXIMO (M ³ /DIA)	DESVIO PADRÃO (M ³ /DIA)	COEF. VAR (-)
ETE01	560	4,3	1,2	19,0	2,3	0,5
ETE02	150	1,2	0,1	5,2	1,7	1,4
ETE03	240	35,4	12,0	78,6	18,3	0,5
ETE04	320	7,2	2,3	18,3	4,6	0,6
ETE05	160	15,4	4,1	43,9	10,6	0,7
ETE06	160	15,0	4,0	46,3	12,3	0,8
ETE07	1	4,3	4,3	4,3	-	-
ETE08	1	4,3	4,3	4,3	-	-

Na Figura 2 está presente o box-plot com os dados de medição de vazão executados nas ETE's durante o ano de 2021.

Figura 2 – Box-plot dos dados de vazão medidos no ano de 2021 nas ETE's do estudo de caso.



Como pode ser constatado na Figura 2, os dados referentes as medições da ETE01, ETE02, ETE04, ETE 07 e ETE08 foram as que apresentaram menor dispersão, sendo devido a característica mais achatada do box-plot. Referente a ETE05 e ETE06, apresentaram variação moderada, tendo como base seus valores de mínimos e máximos.

E por fim, a ETE03 foi o sistema que apresentou maior variabilidade nos dados, tendo o seu desvio-padrão de 18,31 m³/dia, além do maior pico diário, correspondendo a 78,5 m³/dia. Tal situação já era esperada, tendo em vista que a ETE03 é a que recebe possui as maiores contribuições locais, além dos aportes adicionais advindos de limpeza de banheiros químicos, sendo esse primeiramente acondicionados em um tanque pulmão.

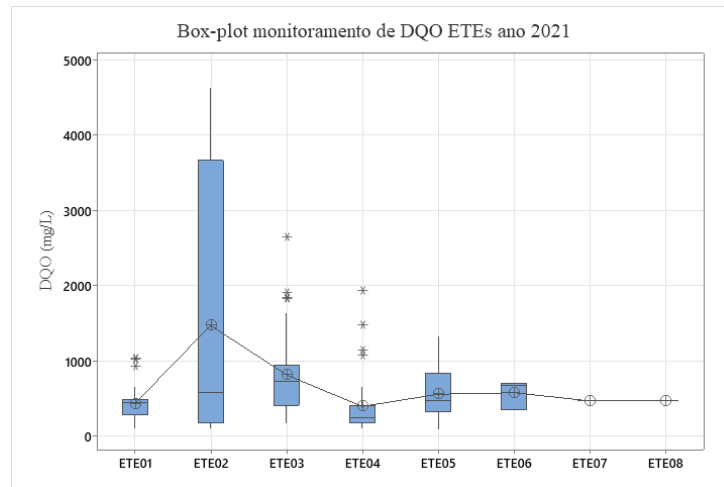
Os dados referentes as campanhas de medição de DQO do efluente bruto executados durante o ano de 2021 foram tratados e constam sumarizados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** N o entanto, ressalta-se que a ETE 07 e ETE 08 não possuíam dados de medição anual, sendo utilizados os dados de projeto para o dimensionamento.

Tabela 2 – Estatística descritiva dados de DQO referentes ao ano de 2021 nas ETE's do estudo de caso.

ETE	Núm dados (N)	Média (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Desvio-padrão (mg/L)	Coef. Var (-)
ETE01	36	430	105	1030	222	0,52
ETE02	4	1471	96	4628	2121	1,44
ETE03	36	814	173	2646	554	0,68
ETE04	36	396	107	1934	400	1,01
ETE05	32	558	96	1323	316	0,57
ETE06	3	578	357	708	192	0,33
ETE07	1	469	469	469	0	0
ETE08	1	469	469	469	0	0

Na Figura 3 é apresentado os box-plots referentes aos dados de DQO determinados no ano de 2021.

Figura 3 – Box-plot dos dados de DQO medidos no ano de 2021 nas ETE's do estudo de caso.



Como pode ser constatado na Figura 3, os dados referentes as medições na ETE01, ETE05 Operação de Mina, Expansão e Rejeitoduto foram as que apresentaram menor dispersão. Referente às ETE03 e ETE04, em sua maioria apresentaram os dados em torno da sua mediana, tendo picos bastante distantes do seu percentil de 75. E por último, a ETE02 foi o local que apresentou os maiores picos, destoando significativamente dos demais locais.

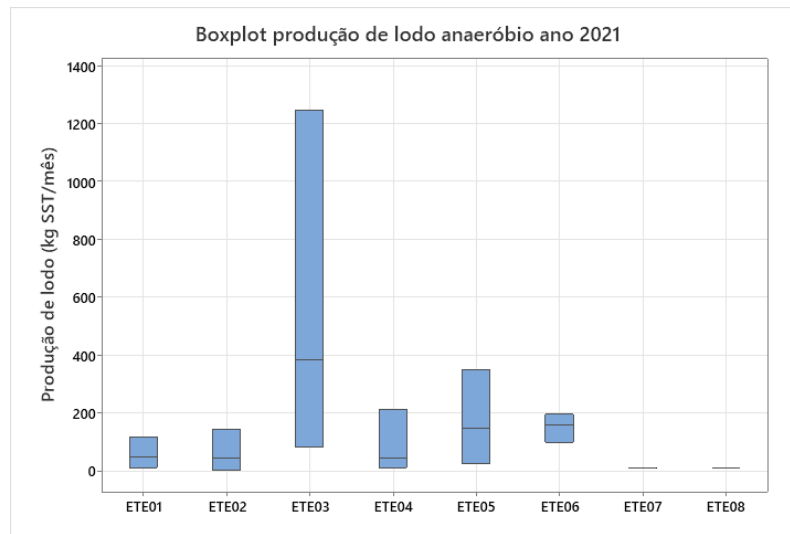
A partir da definição dos dados foi dado início ao cálculo de vazão e lodo anaeróbico produzido na mina em questão, conforme a Equação 2 e Equação 3. Os resultados obtidos estão sumarizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Produção de lodo e vazão de lodo anaeróbico referentes ao ano de 2021 nas ETE's do estudo de caso.

ETE	P Lodo (kg SST/mês)	Q Lodo (m ³ /mês)	Carga (kg DQO/mês)
ETE01	49,04	0,96	245,22
ETE02	45,50	0,89	227,50
ETE03	383,50	7,52	1.917,51
ETE04	43,55	0,85	217,75
ETE05	147,00	2,88	735,00
ETE06	160,44	3,15	802,18
ETE07	12,15	0,24	60,76
ETE08	12,15	0,24	60,76
Total	853,33	16,73	4.266,67
Total + 15%	981,34	19,24	4.906,67

Como pode ser constatado na Tabela 3, a produção de lodo equivaleu a 853,33 kgSST/mês e vazão de 16,73 m³/mês, considerando uma carga orgânica mensal de 4.266,67 kgDQO/mês. Na Figura 4 está presente o gráfico box-plot contendo as faixas de produção de lodo.

Figura 4 – Produção de lodo anaeróbico nas ETE's do estudo de caso.



Conforme pode ser constatado na Figura 4 a ETE03 é a maior produtora de lodo anaeróbico, correspondendo o valor central a 383,50 kg SST/mês e máximo de 1.247,18 kg SST/mês em decorrência dessa ETE ser a principal e por receber todos os efluentes da área administrativa da empresa, além de contribuições da limpeza de tanques sépticos.

- Resultados do projeto

Após definidos os volumes produzidos, deu-se início a etapa de dimensionamento do leito de secagem proposto. Foi utilizada a Equação 4 a Equação 8 para a determinação das dimensões mínimas, sendo os resultados sumarizados na Tabela 4. Os desenhos técnicos referentes ao leito estão presentes no Anexo I.

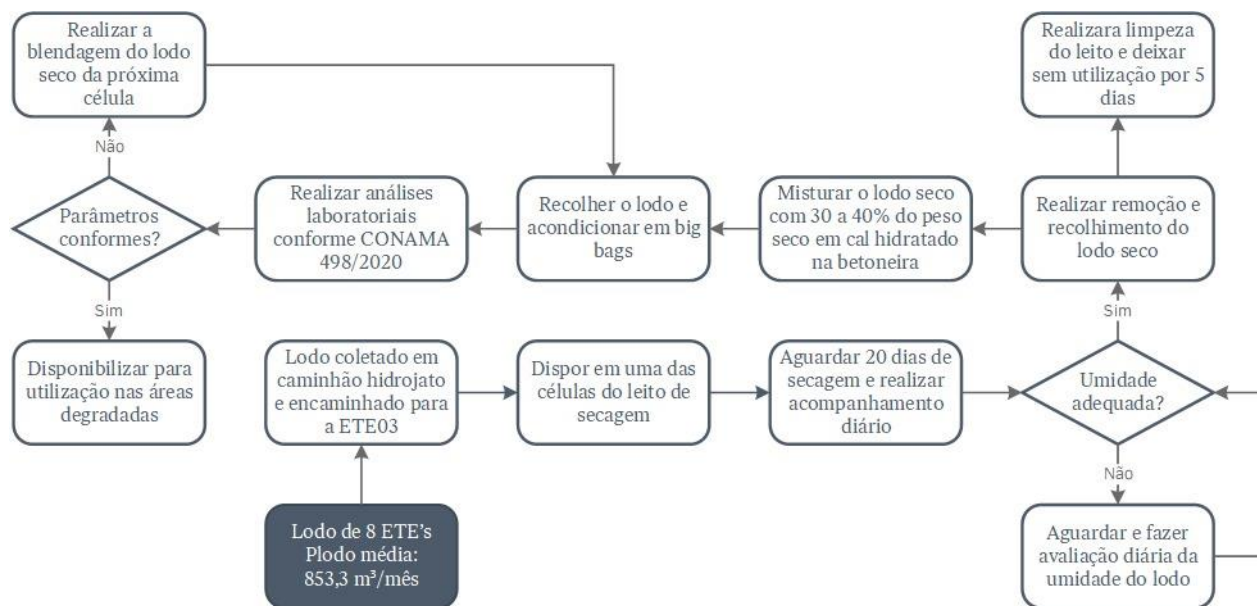
Tabela 4 – Resumo dos dados obtidos durante o dimensionamento do leito de secagem.

VARIÁVEIS	RESULTADOS
Volume do leito (m ³)	18,44
Área superficial (m ²)	61,47
Altura útil da camada de lodo (m)	0,30
Área superficial de cada célula (m ²)	30,73
Número de células	2,00
Tempo de operação (d)	20,00

VARIÁVEIS	RESULTADOS
Tempo de limpeza (d)	5,00
Carga de lodo (kg SST/ano)	11.776,02
TAS (Kg SST/m ² x d)	13,30

O fluxo de gestão do lodo gerado está contido na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma de gestão lodo.



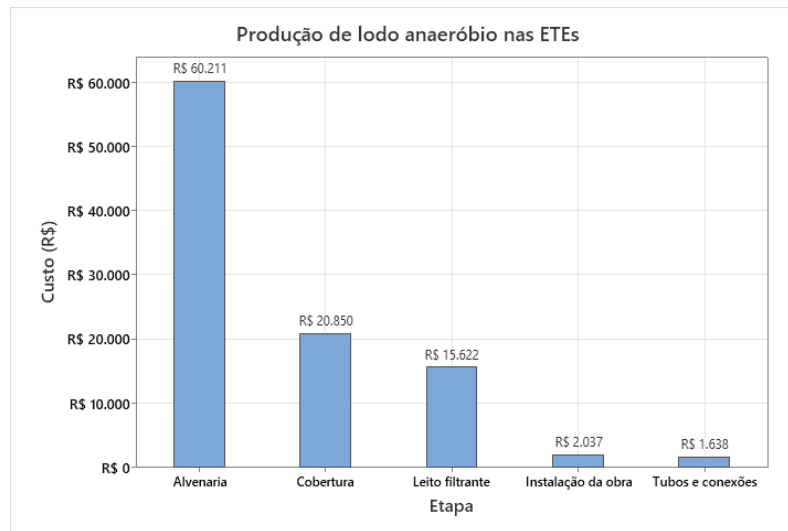
Conforme pode ser constatado, o fluxo de gestão do lodo irá ser centralizado na ETE03. O leito de secagem possui três células, sendo que deverá funcionar no sistema de 2+1, ou seja, duas células em funcionamento e uma reserva. Após o período de 20 dias de secagem, o operador deverá verificar se o nível de umidade está aceitável, em caso negativo deverá ser aguardado até chegar se chegar ao teor de umidade desejável.

Caso a umidade seja a desejável, deverá ser dado início no processo de desinfecção do lodo. De acordo com o autor Andreoli (2014), a via química por de produto alcalinizante (CaO), apresenta resultado satisfatório, em decorrência da capacidade de inativação dos microrganismos e um período menos exigente para a relação tempo-temperatura, quando comparado com via térmica isoladamente. Portanto, será considerada a utilização via caleação para a higienização do lodo.

- Capex e Opex

A partir da determinação dos desenhos técnicos foi possível elaborar os quantitativos e o orçamento analítico (Anexo II). O custo total de implantação (CapEx) previsto para o leito de secagem correspondeu a R\$ 100.358,07. A estratificação dos custos está presente na Figura 6.

Figura 6 - Custos envolvidos na implantação do leito de secagem, estratificado por etapas.



A alvenaria correspondeu a maior parte do custo envolvido na implantação (60%), devido a obra ser relativamente simples. O segundo maior custo deveu-se a cobertura (21%), para esse leito de secagem optou-se pela cobertura com telhas translúcidas, conforme recomendado por PROSAB (2009) em seu estudo do comportamento do teor de umidade de lodo sanitário em leitos cobertos e descobertos no município de Belém/Pa. Concluiu-se que o leito com presença de cobertura, teve maior estabilidade no processo de desaguamento ao longo do tempo. O terceiro grupo que apresentou o maior custo foi a aquisição do leito filtrante, correspondendo a 16% do custo total.

A composição do custo de operacionalização do leito de secagem, considerou os custos envolvidos na análise laboratorial do lodo, coleta do lodo, operador de ETA/ETE e higienização do lodo. A composição de custo para a operacionalização mensal está presente na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição de custos referentes a operacionalização mensal do leito de secagem.

Item	Descrição	Uni	Quant	Custo unitário	Total (R\$)	Total (\$)³
1.0	Análise de fertilidade + frete	un	1,00	R\$ 598,00	R\$ 598,00	\$ 127,23
2.0	Operacionalização do Hidrojato (lodo líquido)	mês	1,00	R\$ 1.052,24	R\$ 1.052,24	\$ 223,88
2.1	Caminhão combinado hidrojato e hidrovácuo	hora	8,00	R\$ 103,24	R\$ 825,89	\$ 175,72
2.2	Motorista caminhão	h/h	8,00	R\$ 10,34	R\$ 82,76	\$ 17,61
2.3	Operador ETA e ETE (caminhão)	h/h	16,00	R\$ 8,97	R\$ 143,59	\$ 30,55
3.0	Operacionalização do leito de secagem (lodo líquido)	mês	1,00	R\$ 107,69	R\$ 107,69	\$ 22,91
3.1	Operador ETA e ETE (leito de secagem)	h/h	12,00	R\$ 8,97	R\$ 107,69	\$ 22,91
4.0	Higienização do lodo seco	mês	1,00	R\$ 301,69	R\$ 301,69	\$ 64,19

³ Dolarização dos custos, considerando o valor de abril de 2022, correspondendo a R\$ 4,70 por unidade de dólar.

Item	Descrição	Uni	Quant	Custo unitário	Total (R\$)	Total (\$)³
4.1	Operador ETA e ETE (Produção de biossólido)	h/h	8,00	R\$ 8,97	R\$ 71,79	\$ 15,27
4.2	Cal virgem ou gesso	ton	0,18	R\$ 871,25	R\$ 153,90	\$ 32,74
4.3	Big bag (2500 kg)	un	1,00	R\$ 76,00	R\$ 76,00	\$ 16,17
Total operacionalização geral/mês		mês			R\$ 2.059,62	\$ 438,22
Total operacionalização geral/ano		ano			R\$ 24.715,49	\$ 5.258,61
Custo de operação do lodo bruto por m³		R\$/m³ lodo hig/			R\$ 2.224,73	\$ 473,35

O custo mensal de operacionalização do leito de secagem correspondeu a R\$ 2.059,62, sendo que cerca de 88,8% dos custos operacionais já estão contemplados no contrato de gestão do saneamento da empresa do estudo de caso, ficando cerca de 12,2% (R\$ 229,90), parcela referente aos insumos big bags (acondicionamento temporário) e cal, como custos adicionais.

É possível ter uma economia relevante com a operacionalização do leito de secagem, devido a sinergia existente entre a estrutura operacional do atual contrato de gestão dos sistemas de saneamento presentes na empresa. O custo de operacionalização anual, por empresa terceirizada que executa o gerenciamento dos efluentes do empreendimento, com o leito de secagem correspondeu a R\$ 24.715,49. Estimando a geração de aproximadamente 11,11 m³/ano de lodo seco e higienizado, resulta no valor de R\$ 2.224,73/m³_{lodo higienizado}.

- Análise de viabilidade econômica

A partir da determinação dos valores de Capex e Opex, torna-se possível realizar o cálculo do tempo de *payback* simples e descontado. Foi considerado o custo de implantação do leito como o investimento inicial (R\$ 100.358,70), o fluxo de caixa como sendo a diferença (R\$ 16.356,18/mês) entre a destinação final do lodo para a incineração (R\$ 18.415,80/mês) para a operacionalização do leito de secagem e produção de biossólido (R\$ 2.059,62/mês). Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 6 - Cálculo de payback simples e descontado da implantação do leito de secagem.

Meses	Fluxo de caixa do projeto	Saldo (payback simples)	Fluxo de caixa descontado (VP)	Saldo descontado
0	-R\$ 100.358,70	-R\$ 100.358,70	-R\$ 100.358,70	-R\$ 100.358,70
1	R\$ 16.356,18	-R\$ 84.002,52	R\$ 16.210,96	-R\$ 84.147,74
2	R\$ 16.356,18	-R\$ 67.646,34	R\$ 16.067,02	-R\$ 68.080,72
3	R\$ 16.356,18	-R\$ 51.290,16	R\$ 15.924,37	-R\$ 52.156,35
4	R\$ 16.356,18	-R\$ 34.933,98	R\$ 15.782,98	-R\$ 36.373,37
5	R\$ 16.356,18	-R\$ 18.577,80	R\$ 15.642,84	-R\$ 20.730,53
6	R\$ 16.356,18	-R\$ 2.221,62	R\$ 15.503,95	-R\$ 5.226,58

Meses	Fluxo de caixa do projeto	Saldo (payback simples)	Fluxo de caixa descontado (VP)	Saldo descontado
7	R\$ 16.356,18	R\$ 14.134,56⁴	R\$ 15.366,30⁵	R\$ 10.139,72
8	R\$ 16.356,18	R\$ 30.490,74	R\$ 15.229,86	R\$ 25.369,59
9	R\$ 16.356,18	R\$ 46.846,92	R\$ 15.094,64	R\$ 40.464,23
10	R\$ 16.356,18	R\$ 63.203,10	R\$ 14.960,62	R\$ 55.424,85
11	R\$ 16.356,18	R\$ 79.559,28	R\$ 14.827,79	R\$ 70.252,63
12	R\$ 16.356,18	R\$ 95.915,46	R\$ 14.696,13	R\$ 84.948,77
13	R\$ 16.356,18	R\$ 112.271,64	R\$ 14.565,65	R\$ 99.514,42
14	R\$ 16.356,18	R\$ 128.627,82	R\$ 14.436,32	R\$ 113.950,74
15	R\$ 16.356,18	R\$ 144.984,00	R\$ 14.308,15	R\$ 128.258,89
16	R\$ 16.356,18	R\$ 161.340,18	R\$ 14.181,11	R\$ 142.440,00
17	R\$ 16.356,18	R\$ 177.696,36	R\$ 14.055,20	R\$ 156.495,20
18	R\$ 16.356,18	R\$ 194.052,54	R\$ 13.930,40	R\$ 170.425,60
19	R\$ 16.356,18	R\$ 210.408,72	R\$ 13.806,72	R\$ 184.232,32
20	R\$ 16.356,18	R\$ 226.764,90	R\$ 13.684,13	R\$ 197.916,45
21	R\$ 16.356,18	R\$ 243.121,08	R\$ 13.562,63	R\$ 211.479,08
22	R\$ 16.356,18	R\$ 259.477,26	R\$ 13.442,21	R\$ 224.921,30
23	R\$ 16.356,18	R\$ 275.833,44	R\$ 13.322,86	R\$ 238.244,16
24	R\$ 16.356,18	R\$ 292.189,62	R\$ 13.204,57	R\$ 251.448,73
25	R\$ 16.356,18	R\$ 308.545,80	R\$ 13.087,33	R\$ 264.536,06
26	R\$ 16.356,18	R\$ 324.901,98	R\$ 12.971,13	R\$ 277.507,19
27	R\$ 16.356,18	R\$ 341.258,16	R\$ 12.855,96	R\$ 290.363,16
28	R\$ 16.356,18	R\$ 357.614,34	R\$ 12.741,82	R\$ 303.104,97
29	R\$ 16.356,18	R\$ 373.970,52	R\$ 12.628,69	R\$ 315.733,66
30	R\$ 16.356,18	R\$ 390.326,70	R\$ 12.516,56	R\$ 328.250,22
31	R\$ 16.356,18	R\$ 406.682,88	R\$ 12.405,43	R\$ 340.655,65
32	R\$ 16.356,18	R\$ 423.039,06	R\$ 12.295,28	R\$ 352.950,93
33	R\$ 16.356,18	R\$ 439.395,24	R\$ 12.186,11	R\$ 365.137,04
34	R\$ 16.356,18	R\$ 455.751,42	R\$ 12.077,92	R\$ 377.214,96
35	R\$ 16.356,18	R\$ 472.107,60	R\$ 11.970,68	R\$ 389.185,64
36	R\$ 16.356,18	R\$ 488.463,78	R\$ 11.864,39	R\$ 401.050,03

Conforme pode ser constatado na Tabela 6, considerando a metodologia de payback simples é possível obter o total retorno do investimento em 7,14 meses de operacionalização do leito de secagem e, por cálculo de payback descontado, o retorno total é obtido com o período similar,

⁴ Tempo de 7,14 meses para o retorno total do investimento pelo do cálculo de *payback* simples.

⁵ Tempo de 7,19 meses para o retorno total do investimento pelo do cálculo de *payback* descontado.

sendo equivalente a 7,19 meses, considerando uma taxa de desconto (IPCA acumulado de 12 meses em dezembro de 2021) de 10,75%.

Os resultados de VPL, TIR e IL são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados referentes ao VPL, TIR e IL.

VARIÁVEIS	UNIDADE	RESULTADO	INTERPRETAÇÃO
Taxa anual	a.a.	10,75%	-
Taxa mensal	a.m.	0,90%	-
VPL	R\$	R\$ 401.050,03	Investimento viável
TIR	%	16,23%	Investimento viável
n	meses	36	-
VP dos retornos	R\$	R\$ 501.408,73	
Índice de lucratividade (IL)	-	5,00	Os investimentos serão recuperados, remunerado ao menos à taxa exigida e haverá ainda um aumento de riqueza

Considerando o VPL de R\$ 401.050,03, ao final dos 36 meses considerados, é possível considerar que ao final do prazo de 36 meses, o saldo economizado corresponderia a, aproximadamente, 4 vezes o valor inicialmente investido (R\$ 100.358,70). Referente ao TIR, o valor correspondeu a 16,23%, ou seja, o investimento não irá apresentar prejuízos. Considerando apenas o VPL e o TIR, o investimento já é considerado como sendo viável economicamente.

O índice de lucratividade correspondeu a 5, sendo superior a 1, ou seja, o investimento inicial será recuperado, no prazo estimado, e ainda haverá superávit ao final do tempo escolhido. Portanto, de uma forma geral, avaliando as questões econômicas-financeiras, o investimento irá trazer ganhos significativos.

4. Conclusão

Considerando as informações levantadas verificou-se que a carga de lodo anual correspondeu a 11.776 kg SST/ano. A partir desses dados foi realizado o dimensionado leito de secagem situado, sendo escolhido o local de instalação a ETE03 para o recebimento do lodo séptico das demais ETE's. O leito foi dimensionado para três células de 22 m² cada (5,50 x 4,0 m) cada, ciclo operacional de 25 dias, sendo 20 dias de operação e 5 dias de não operando. Juntamente com o dimensionamento foram elaborados os desenhos técnicos, estimativas de custos operacionais e de instalações, além das orientações de operação do sistema.

Referente a análise de viabilidade econômica, verificou-se que o custo de implantação ficou na faixa de R\$ 100.358,07, sendo que 81% do custo foi referente a construção do piso, parede, pintura (impermeabilização), porta, guarda-corpo e cobertura. Em termos de operacionalização, concluiu-se que o custo corresponderia a R\$ 2.059,62/mês, sendo que 88,8% desse valor já está embutido no contrato de gestão dos sistemas de saneamento. Quando comparado ao custo teórico de envio mensal para incineração é obtido economia de 88,7%/mês ou valor de R\$ 16.237,28/mês é economizado.

Realizando a avaliação de *payback* simples e descontado, o investimento de implantação do leito de secagem, constatou-se que em, aproximadamente, 7 meses a totalidade do investimento é retornado, tanto para a avaliação simples quanto a descontada do IPCA acumulado de 12 meses. Extrapolando-se o prazo para 36 meses (3 anos), verificou-se economia de R\$ 488.463,78 e R\$ 401.050,03, para o *payback* simples e descontado, respectivamente.

Referente a avaliação de valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e índice de lucratividade, constatou-se que o investimento é viável e que será recuperado e pode gerar superávit de caixa dentro do período estabelecido de 36 meses.

Portanto, o investimento inicial para a implantação do leito de secagem e a sua operacionalização, justifica-se do ponto de vista econômico-financeiro, tendo o retorno do investimento em período inferior a 8 meses. Além disso, as demais métricas apontam para um retorno financeiro positivo quando comparado com a solução via incineração. Outro fato relevante, refere-se ao impacto ambiental reduzido da operacionalização do leito de secagem quando comparado a solução de incineração.

O resíduo gerado possui potencial de reutilização para a recuperação em áreas degradadas, em decorrência da presença de macro e micronutrientes essenciais para o crescimento de indivíduos arbóreos e recuperação de áreas degradadas, podendo ser uma via alternativa para a inserção do resíduo gerado para a economia circular.

5. Referências bibliográficas

- ABES. Lodos de fossa e tanques sépticos: orientações para definição de alternativas de gestão e destinação / Eraldo Henriques de Carvalho, Cleverson V. Andreoli. Curitiba: Brasil, 2015.
- ABNT. NBR 12.209 - Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, RJ. Brasil, 2011.
- ABNT. NBR 12209 - Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgoto sanitários. Rio de Janeiro, RJ. Brasil, 2010.
- ABNT. NBR 13969 - Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final do efluente. Rio de Janeiro, RJ. Brasil, 1996.
- ABNT. NBR 7229 - Construção e Instalação de Fossa Séptica e disposição de Efluentes Finais. Rio de Janeiro. Brasil, 1993.
- ABNT. NBR 9648 - Estudo de Concepção de sistemas de Esgoto Sanitário, que estabelece terminologia e condições gerais para este tipo de estudo. Brasil, 1986.
- ABNT. NBR 9800 - Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, RJ. Brasil, 2011.
- ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDE, F. princípios do tratamento biológico de águas residuárias. lodo de esgotos: tratamento e disposição final, v. 6. 1. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais - SANEPAR, 484p. Brasil, 2001.
- BISCHOFF, LISSANDRA. Análise de projetos de investimentos. 1ª ed. Rio de Janeiro: Ferreira, 2013.
- BORDEAUX-RÊGO, R. Viabilidade econômica-financeira de projetos. 4º. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2013.
- BORSOI, G. M. et al. Uso agrícola do lodo de esgoto: aspectos econômicos, sociais e ambientais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 21, n. 7, p. 464-471, 2017.
- BRANCO, A. C. C. Matemática Financeira Aplicada: método algébrico, HP 12C: Microsoft Excel. 4º. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

- BRASIL. Resolução CONAMA n° 498, de 21 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente. Brasil, 2020.
- BRASIL. Resolução CONAMA n° 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre os procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental e no exercício da competência, bem como as atividades e empreendimento sujeitos ao licenciamento ambiental. Ministério do Meio Ambiente. Brasil, 1997.
- CHAMHUM-SILVA, L. A.; SILVA, J. B. G.; OLIVEIRA, L. S. R.; BORGES, M. N.; LIMA, T. G.; MATOS, A. T. Coletânea de Notas Técnicas 2: Valoração e gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento do esgoto Parte A: Higienização e uso de lodo de esgoto no solo engenharia cadernos técnicos sanitária e ambiental. Vol. 2. Nota Técnica 7 – Uso de biossólido para recuperação de áreas degradadas. Vol. 2. N° 1. ABES. Brasil, 2021.
- IPCC, 2022: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2022.
- JORDÃO, E.; PESSOA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos: 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil, 2014.
- MACARTHUR, Ellen. Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2012.
- MCCONNELL, K. et al. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Geneva: World Health Organization, 2018.
- OLIVEIRA, F. C. et al. Reaproveitamento de biossólido para a produção de mudas de eucalipto. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 13, n. 3, p. 1-8, 2018.
- PROSAB. Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final / Cleverson Vitório Andreoli (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 2009.
- RENTED. Caracterização, Tratamento e Gerenciamento de Subprodutos de Correntes de Esgotos Segregadas e Não Segregadas em Empreendimentos Habitacionais / André Bezerra dos Santos; organizador. – Fortaleza: Impreco, 2019. 812 p. ISBN: 978-85-8126-190-4. Brasil, 2019.
- RIBEIRO, P. R. A. et al. Biossólido como fonte de nutrientes para o milho em Neossolo Quartzarênico. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 8, p. 787-792, 2015.
- TCU. Acórdão 2.622/2013 – TCU – Plenário. Processo n°: TC 036.076/2011-2. Distrito Federal, Brasil, 2013.
- VAN HAANDEL, A. E MARAIS, G. O comportamento do sistema de lodos ativados – Teoria e aplicações para projetos e operações, Epgraf Campina grande Pb. Brasil, 1999.
- VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4ª ed. Belo Horizonte. UFMG. Brasil, 2014.