



PBPC
ISSN 2674-9432



Qualis A3
CAPES 2021-2024



DOI - Crossref

Latindex



Indexado no
Acadêmico

SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS EM ZONAS URBANAS- ETE NORTE: Proposta de uma Modelagem Multicritério

Educélio Gaspar Lisboa, Érico Gaspar Lisboa, Leonardo Augusto Lobato Bello, Heriberto Wagner Amanajás Pena, Fabrini Quadros Borges, Maria Graciete Rodrigues do Amaral



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n1p2058-2081>

Artigo recebido em 25 de Dezembro e publicado em 25 de Fevereiro de 2026

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

O presente artigo mostrou que a aplicação do método PROMETHEE-AHP, é capaz de auxiliar o agente público na tomada de decisão quanto ao esgotamento sanitário na zona urbana da cidade de Belém analisando a ETE Norte. Os estudos mostraram que as questões abordadas sobre os critérios econômicos, sociais, ambientais e técnicos, sempre entram em alternância na medida em que há mudança quanto a tecnologia de tratamento de esgoto, quando comparado ao PMSB (2020). Constatou-se que aplicando o método PROMETHEE-AHP, as duas tecnologias selecionadas foram Lodos Ativados (a mais preferida) e UASB+Lodos Ativados (segunda preferida). Faz-se necessário dialogar com as comunidades afetadas no sentido de trazer para o centro das discussões a opinião das mesmas, na questão do esgotamento sanitário.

Palavras-Chaves: PROMETHEE-AHP; Esgotamento sanitário; Tecnologias de tratamento e Estação de Tratamento de Esgotos.



SELECTION OF SEWAGE TREATMENT TECHNOLOGIES IN URBAN AREAS- ETE NORTE: PROPOSAL FOR A MULTICRITERIA MODELING

ABSTRACT

This article showed that the application of the PROMETHEE-AHP method is capable of assisting public agents in making decisions regarding sewage disposal in the urban area of the city of Belém, analyzing the ETE Norte. The studies showed that the issues addressed regarding economic, social, environmental and technical criteria always alternate as there is a change in sewage treatment technology, when compared to the PMSB (2020). It was found that applying the PROMETHEE-AHP method, the two technologies selected were Activated Sludge (the most preferred) and UASB+Activated Sludge (second preferred). It is necessary to dialogue with the affected communities in order to bring their opinion to the center of discussions on the issue of sewage.

Keywords: PROMETHEE-AHP; Sanitary sewage; Treatment technologies and Sewage Treatment Plant.

Autor 1- Educélio Gaspar Lisbôa, Doutor em Desenvolvimento Urbano; <https://orcid.org/0000-0001-6656-0594>; Instituição: Universidade do Estado do Pará- UEPA; Endereço: Trav⁹ Dr. Enéas Pinheiro; E-mail: lisboa.uepa@gmail.com

Autor 2- Érico Gaspar Lisbôa, Doutor em Engenharia Civil; <https://orcid.org/0000-0002-2837-1490> Universidade da Amazônia- UNAMA; Endereço: Trav⁹ Alcindo Cacela E-mail: ericoglisboa@gmail.com

Autor 3- Leonardo Augusto Lobato Bello, Doutor em Engenharia Civil <https://orcid.org/0000-0002-2017-5292>. Universidade da Amazônia- UNAMA; ; Endereço: Trav⁹ Alcindo Cacela; E-mail: leonardo.bello@unama.br;

Autor 4- Heriberto wagner Amanajás Pena, Doutor em Ciências Agrárias: <https://orcid.org/0000-0001-7207-6643>; Instituição: Universidade do Estado do Pará- UEPA; Endereço: Trav⁹ Dr. Enéas Pinheiro; E-mail: heriberto@uepa.br;

Autor 5- Fabrini Quadros Borges, Doutor em Administração: <https://orcid.org/0000-0002-4689-8472>; Instituição: Universidade do Estado do Pará UEPA) Endereço: Trav⁹ Dr. Enéas Pinheiro; E-mail: fabrini.borges@gmail.com;

Autor 6- Maria Graciete Rodrigues do Amaral, Doutora em Administração: Instituição: Universidade do Estado do Pará(UEPA)Endereço: Trav⁹ Dr. Enéas Pinheiro;;E-mail:mariagraciete.amaral@uepa.br

1. INTRODUÇÃO

A falta do saneamento básico e o ineficiente tratamento dos esgotos ainda são alguns dos maiores problemas para o desenvolvimento sustentável da maioria das cidades brasileiras. Neste cenário, o diagnóstico dos esgotos gerados pelos principais centros urbanos do Brasil revelou que, pouco mais de 46% tiveram tratamento. A região norte foi quem apresentou o pior resultado deste indicador, em que próximo dos 22% dos esgotos produzidos são tratados (SNIS, 2021). Neste contexto, o Plano Nacional do Saneamento Básico (PLANASB) prevê a necessidade de R\$ 508,4 bilhões em 20 anos de investimentos, para universalizar o saneamento, que incluem o tratamento dos esgotos (MDR, 2020). O principal investimento no saneamento básico nas zonas urbanas pode ser materializado pela implantação e operação de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

Para alcançar esta ecoeficiência, inicialmente, o processo de seleção da tecnologia a ser utilizada numa ETE, deve-se basear em avaliações que possam minimizar custos e maximizar benefícios. A minimização de custos não se refere apenas por implantar, operar e manter uma ETE, mas também está associado ao consumo de energia, dos resíduos gerados, de tal modo que os impactos socioambientais em zonas urbanas possam ser mitigáveis ou compensados; e, deste modo, a remoção de poluentes e da matéria orgânica deve ser maximizado. Por este contexto, considerar que os planos diretores de saneamento sejam desenvolvidos por uma racionalidade comunicativa, em face da racionalidade normativa (e.g., MAGALHÃES, 2018), é uma questão preponderante, i.e., que incorpore a participação da sociedade ao processo decisório, aditado das questões ambientais, técnicas e econômicas, e que seja considerado uma concepção de intersectorialidade.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1- O método AHP

O método AHP (*Analytical Hierarchical Process*) foi desenvolvido na década de 1970 pelo matemático Thomas Saaty. O fundamento do método AHP se refere a decomposição e síntese das relações entre os critérios, até que se chegue a uma priorização dos seus indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição

única de desempenho (SAATY, 1991). Para tanto, inicialmente, o método AHP é processado pela organização de uma estrutura matricial hierárquica entre os m -critérios, definindo os julgamentos paritários de importância por:

$$K = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,2}' & \dots & x_{1,j}' \\ \frac{1}{x_{1,2}'} & 1 & \dots & x_{2,j}' \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{1}{x_{i,1}'} & \frac{1}{x_{i,2}'} & \dots & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

Pela matriz “K”, os elementos em diagonal são auto comparados e de igual importância. Os termos x_{ij} foram relacionados a uma escala definida por Saaty (1980), sendo denominada de escala fundamental de Saaty. É por esta escala que se proporciona um julgamento de importância de cada critério (C_j), sendo expressa pelo

x_{ij}'	Grau de Importância entre critérios
1	Um critério é de igual importância a outro
3	Um critério ligeiramente mais importante que outro
5	Um critério é mais importante que outro
7	Um critério é muito mais importante que outro
9	Um critério é extremamente mais importante que outro

Quadro 1 - Escala fundamental de Saaty

x_{ij}'	Grau de Importância entre critérios
1	Um critério é de igual importância a outro
3	Um critério ligeiramente mais importante que outro
5	Um critério é mais importante que outro
7	Um critério é muito mais importante que outro
9	Um critério é extremamente mais importante que outro

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Saaty (1980).

Sobre a escala fundamental, Roche e Vejo (2004) referiram que podem ser inseridos valores intermediários (2, 4, 6, 8) como valores de consenso entre opiniões, bem como a inserção de valores decimais, como 0,1 aos valores de x_{ij} , usados para graduações mais refinadas de opiniões. Portanto, após preencher a matriz de

comparações paritárias, obtém-se o vetor de pesos associado a esta matriz, definindo a importância relativa entre a família de critérios considerados. A importância relativa da i -ésima variável é comparado com o j -ésimo atributo sobre os valores nos lados esquerdo e direito da diagonal da matriz. Uma vez que a matriz, K , é construída, o processo de normalização é implementado, por meio do cálculo de uma média geométrica (MG) da i -ésima linha e normalizando as médias geométricas das linhas na matriz de comparação, por:

$$MG_i = \left[\prod_{j=1}^n x_{i,j} \right]^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots(2)$$

$$w_j = \frac{MG_i}{(\sum_{i=1}^m MG_i)_i} \dots\dots\dots(3)$$

Forman e Peniwati (1998) referiram que, neste procedimento, normalmente utiliza-se a média aritmética (MA). A “MA” trabalha com medidas e números em escalas com significado intervalar. No entanto, quando se trabalha com medidas em escalas de magnitudes, como no método AHP, tanto a “MA” quanto a “MG” tem significado. Para garantir que a avaliação da matriz de comparação de pares seja razoável e aceitável, é realizada uma verificação de consistência. Portanto, seja o termo “C” denotando um vetor de coluna m -dimensional que descreve a soma dos valores ponderados para os graus de importância dos atributos (ou critérios), tem-se:

$$C = [C_j]_{m \times 1} = KW, j = 1, 2, \dots, m \dots\dots\dots(4)$$

Onde o termo “KW” é representado pela matriz expressa por:

$$KW = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,2} & \dots & x_{1,j} \\ \frac{1}{x_{1,2}} & 1 & \dots & x_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{1}{x_{i,1}} & \frac{1}{x_{i,2}} & \dots & 1 \end{bmatrix} [w_1, w_2, \dots, w_m] = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_m \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

O valor de consistência para os atributos pode ser representado pelo vetor $CV = [cv_j]_{1 \times m}$, como sendo um elemento típico definido como $cv_j = \frac{c_j}{w_j}$ ($j = 1, 2, \dots, m$). No entanto, para evitar inconsistência na matriz de comparação de pares, Saaty

(2008) sugeriu o cálculo de um autovalor da matriz hierárquica, $\lambda_{\max}$, para calcular a eficácia do julgamento:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{j=1}^m cv_j}{m} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad \dots\dots\dots(6)$$

A partir do valor, $\lambda_{\max}$, um índice de consistência é aferido por meio da expressão:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad \dots\dots\dots(7)$$

Se o valor de IC for igual a 0, a avaliação da matriz de comparação de pares é considerada perfeitamente consistente. E, quando o valor de $\lambda_{\max}$ for mais próximo de m , mais consistente é a avaliação. Deste modo, uma razão de consistência (RC) pode ser usada como um guia para verificar a consistência da importância de julgamento entre os critérios (pesos). A razão RC é estimada pela relação entre o índice IC e o índice randômico (IR). Convém considerar que, Saaty (1977; 1980; 1991) atribuíram uma quantificação do índice randômico de matrizes de ordem 1 a 15 calculados em laboratório, em função do número de critérios considerados, expressos pelo Quadro .

Quadro 2 - Índice randômico proposto por Saaty (1980).

<i>m</i> - critér ios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0,0 0	0,0 0	0,5 8	0, 90	1, 12	1, 24	1, 32	1, 41	1, 45	1, 49	1, 51	1, 48	1, 56	1, 57	1, 59

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Saaty (1980).

O índice IC é obtido em função do número de *m*-critérios. Assim, analisa-se a consistência destes procedimentos de modo que, se RC for menor ou igual a 0,20 (RC ≤ 20%) dos julgamentos de importância entre critérios são consistentes, i.e., torna-se desnecessário o especialista reavaliar os julgamentos (SATTY, 2008).

2.2- O método *PROMETHEE*

O método multicritério *PROMETHEE* (*Preference Ranking METHod for Enrichment Evaluation*) foi proposto por Brans-Vincke (1985), e se enquadra na

concepção da escola francesa de tomada de decisão, sendo concebido para resolver problemas de seleção e ordenação que satisfaz a condição:

$$\text{Max } \{f_1(a), f_2(a), \dots, f_k(a) \mid a \in A\} \dots \dots \dots (8)$$

Em que A é um conjunto finito de n -alternativas. O termo $f_j(.)$ refere-se as avaliações dos m -critérios sobre uma alternativa A , em que j varia de 1 até k critérios. Estes critérios podem ser minimizados e/ou maximizados. Assim, constroem-se a matriz de avaliação (decisão), que é uma relação entre n -alternativas ($a_1, a_2, \dots, a_n$) e j -critérios [$f_1(.)$, $f_2(.)$, ..., $f_k(.)$]. Nestes termos, uma função de preferência de uma alternativa a_1 sobre uma a_2 – $P_j(a_1, a_2)$ é expresso por:

$$P_j(a_1, a_2) = P_j[d_j(a_1, a_2)] = P_j[f_j(a_1) - f_j(a_2)] \dots \dots \dots (9)$$

Brans-Vincke (1985) referiram que a função de preferência de um critério (j) descreve a forma como a preferência do decisor é alterada com a diferença entre níveis de desempenho de duas alternativas $d_j(a_1)$ e $d_j(a_2)$ num critério j , em que $d_j(a_1)$ representa o desempenho de a_1 no critério j . Para a função usual (TIPO I), $P_j(a_1, a_2)$ assume os valores 0 ou 1. Para as demais funções, $P_j(a_1, a_2)$ pode assumir qualquer valor no intervalo $[0,1]$, implicando numa relação de preferência difusa (“fuzzy”), que permite incorporar aspectos de incerteza no julgamento dos decisores. Em seguida, calcula-se um índice de preferência para cada par de alternativas, que é dado pela agregação das intensidades de preferências, determinadas para todos os critérios, referente ao respectivo par de alternativas de tal modo que:

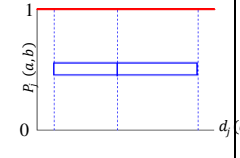
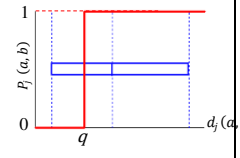
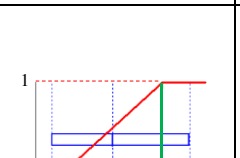
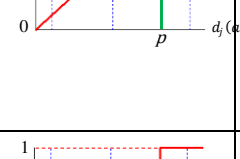
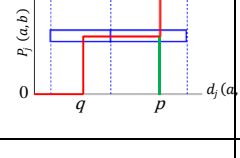
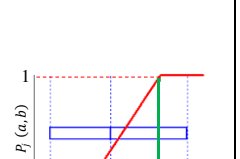
$$\pi(a_1, a_2) = \frac{\sum_j^k w_j \cdot P_j(a_1, a_2)}{\sum_j^k w_j} \dots \dots \dots (10)$$

)

Em que w_j é o peso de cada critério j . Definido os pesos, calcula-se a estimativa do índice de preferência para cada par de alternativas expresso pela equação (12). Por esta equação, três fluxos de sobreclassificação são definidos pelo Quadro .

Quadro 3 - Tipos, definições e representações das funções de preferência.

TIPO	DEFINIÇÃO	REPRESENTAÇÃO	PARÂMETR
		O	O

TIPO I Usual	$P_j(a_1, a_2) = 1$ [se $d_j(a, b) \leq 0$] $P_j(a, b) = 0$ [se $d_j(a, b) > 0$]		—
TIPO II Quase-critério (formato “U”)	$P_j(a, b) = 1$ [se $d_j(a, b) \leq q$] $P_j(a, b) = 0$ [se $d_j(a, b) > q$]		q (indiferença)
TIPO III Critério de preferência linear (formato “V”)	$P_j(a, b) = 1$ [se $d_j(a, b) > p$] $P_j(a, b) = d_j(a, b) > p$ [se $0 < d_j(a, b) \leq p$] $P_j(a, b) = 0$ [se $d_j(a, b) \leq 0$]		p (preferência)
TIPO IV Critério de nível	$P_j(a, b) = 1$ [se $d_j(a, b) > p$] $P_j(a, b) = 0,5$ [se $q < d_j(a, b) \leq p$] $P_j(a, b) = 0$ [se $d_j(a, b) \leq q$]		q, p
TIPO V Critério de preferência linear com zona de indiferença	$P_j(a, b) = 1$ [se $d_j(a, b) > p$] $P_j(a, b) = [d_j(a, b) - 1] / (p - q)$ [se $q < d_j(a, b) \leq p$] $P_j(a, b) = 0$ [se $d_j(a, b) \leq q$]		q, p
TIPO V Critério Gaussiano	$P_j(a, b) = 1 - \exp\{-[d_j(a, b)]^2 / 2\sigma^2\}$		σ

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Saaty (1980).

- Fluxo de saída- $\Phi^+(a)$: Representa a intensidade de preferência sobre a alternativa a sobre todas as outras alternativas do conjunto A. O fluxo mensura a força de sobreclassificação de a sobre as outras $n-1$ alternativas

$$\Phi^+(a_1) = \frac{\sum_{a_2=1, a_2 \neq a_1}^n \pi(a_1, a_2)}{n-1} \dots\dots\dots(11)$$

- Fluxo de entrada- $\Phi^-(a)$: Representa a intensidade de preferência sobre a alternativa de todas as outras alternativas do conjunto A sobre a . O fluxo mensura a força de sobreclassificação das outras $n-1$ alternativas sobre a

$$\Phi^-(a_1) = \frac{\sum_{a_2 \neq a_1}^n \pi(a_1, a_2)}{n-1} \dots\dots\dots(12)$$

- Fluxo líquido- Φ : é o resultado da diferença entre o fluxo de saída (Φ^+) e entrada (Φ^-) da alternativa a_1 .

$$\Phi(a_1) = \Phi^+(a_1) - \Phi^-(a_1) \dots\dots\dots(13)$$

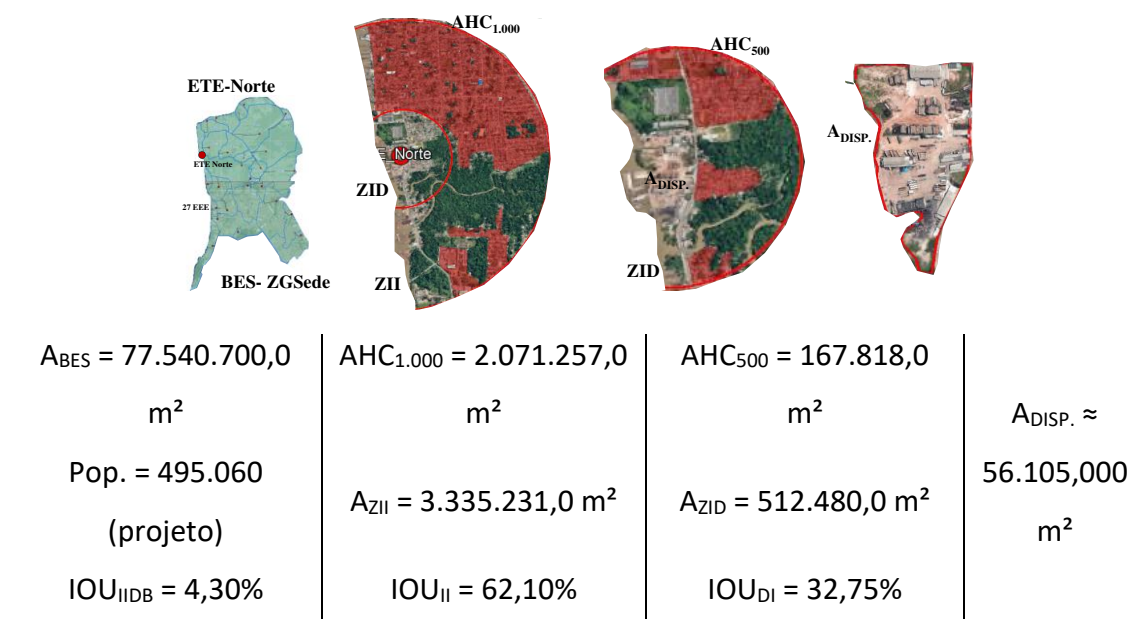
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A partir da nova concepção, com viés de concentração das unidades depuradoras de esgotos, proposta pelo PMSB (2020) para o sistema de esgotamento sanitário de Belém, as tecnologias a serem implantadas e operacionalizadas na ETE Norte é do tipo UASB+lodos ativados. Portanto, diante deste complexo cenário para a tomada de decisão sobre qual tecnologia de tratamento de esgoto deveria ser implantada e operacionalizada em zonas urbanas, a partir do viés racionalidade comunicativa e de um pressuposto de sustentabilidade, foi que se desenvolveu uma modelagem matemática. Esta modelagem com enfoque multicritério, a par de uma correspondente proposta protocolar de remediação e contingência de impactos socioambientais gerados pela operação de uma ETE, alinhada a concepção da intersectorialidade, é que deve ser gerido o setor de saneamento nas cidades.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste cenário foram enfatizados os parâmetros que determinam os padrões de lançamento de efluentes tratados por uma ETE e as condições de múltiplos usos de corpos hídricos receptores; bem como sobre os custos

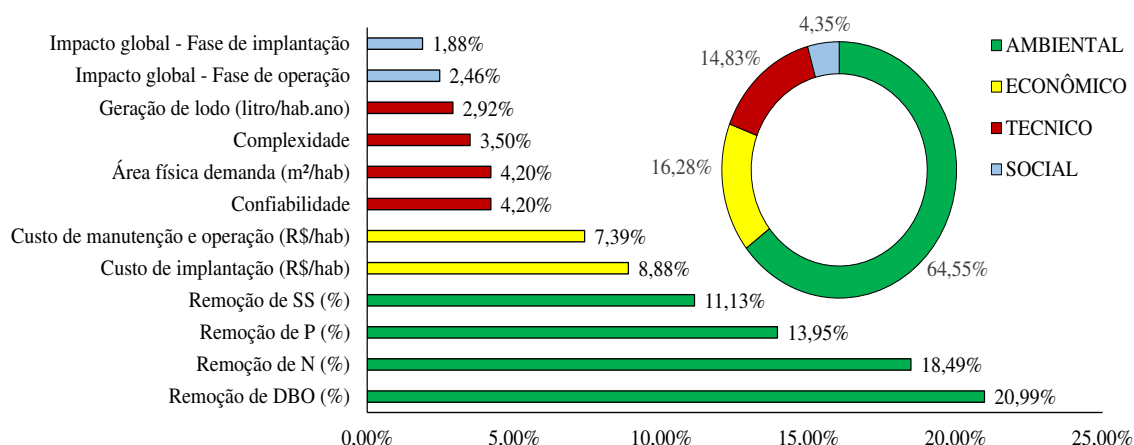
Figura 1 – Metodologia para selecionar tecnologias de tratamento de esgoto em zonas urbanas.



Fonte: Do autor (2023).

econômico-financeiros demandados para implantação, operação e manutenção de uma tecnologia de tratamento de esgotos em zona urbana. O julgamento de importância foi realizado pela escala de Saaty, de tal modo que apenas foi satisfeito a condição de consistência proposta por Saaty (2008). Assim, este julgamento alcançou uma razão de consistência (RC) de 4,888% (consistente), pelo que os pesos dos critérios e subcritérios estão ilustrados (Figura 2).

Figura 2 – Pesos dos critérios e subcritério para análise do cenário (a).



Fonte: Do autor (2023).

Como observou-se, o maior peso foi dado ao critério ambiental (64,55%), pelo que o subcritério associado a eficiência de remoção de DBO foi o mais importante (20,99%). Por outro lado, o critério econômico representou uma importância de

Assim, pela aplicação das equações (11) e (12) tem-se os resultados dos fluxos de saída (Φ^+) e de entrada (Φ^-) de cada uma das oito tecnologias consideradas. A tecnologia Lodo ativado (A1) apresentou um fluxo Φ^+ superior a todas as demais tecnologias, enquanto *UASB*+Lodo ativado (A4) apresentou maior valor de Φ^- . Por outro lado, *UASB* (A8) apresentou os menos valores de Φ^+ e Φ^- . E, no geral, pela aplicação da equação (13), (A1) e (A4) foram as tecnologias de tratamento de esgotos mais preferidas, respectivamente. E, (A8) foi a tecnologia menos preferida para ser implantada e operacionalizada em zona urbana (Figura 1).

Figure 1 consists of two ternary phase diagrams, labeled (a) and (b), showing the distribution of water, oil, and gas in a reservoir. The vertical axis represents the water saturation level (UASB) from 0.0 to 1.0. The horizontal axis represents the oil saturation level (UASB) from 0.0 to 1.0. The diagrams show the distribution of water, oil, and gas for different water saturation levels (UASB) and for different water saturation levels (UASB) with and without the effect of the water saturation level (UASB). The diagrams show that the distribution of water, oil, and gas changes significantly as the water saturation level increases, particularly for the UASB+LAGOA and UASB+LAGOA AREADO cases.



**SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS EM ZONAS URBANAS- ETE
NORTE: Proposta de uma Modelagem Multicritério**
Lisbôa et. al.

(A)

(B)

Fonte: Do autor (2023)

Figura 4-. Matriz de decisão, otimização, funções de preferência e pesos para o cenário (a)

Cenário (a)	C.IMPLEMEN...	CUSTO DE OM	DBO	N	P	SS	ÁREA	LODO	IMPACTO FO	IMPACTO FI	COMPLEXID...	CONFIABILI...
Unit	R\$/hab	R\$/hab	%	%	%	%	m²/habitante	litro/hab.ano	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group												
Preferences												
Min/Max	min	min	max	max	max	max	min	min	min	min	min	max
Weight	1.07	0.89	2.52	2.22	1.67	1.33	0.51	0.35	0.30	0.23	0.42	0.51
Preference Fn.	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	\$ 18.51	\$ 2.89	8.24	13.32	19.06	7.25	1.64	717.02	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	\$ 45.38	\$ 7.47	18.09	25.47	38.38	15.81	2.64	1763.36	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics												
Minimum	\$ 39.98	\$ 1.92	70.00	30.00	35.00	72.50	0.10	107.50	1.0	3.00	0.00	1.00
Maximum	\$ 97.81	\$ 12.24	98.00	75.00	88.00	97.00	4.00	2150.00	4.0	3.00	5.00	4.00
Average	\$ 72.53	\$ 7.87	89.25	58.75	46.63	88.94	0.65	1069.69	3.4	3.00	2.38	3.00
Standard Dev.	\$ 21.58	\$ 3.58	8.50	11.92	17.95	7.42	1.27	839.00	1.0	0.00	1.80	1.22
Evaluations												
LODO ATIVADO		\$ 97.81	\$ 12.24	93.00	75.00	88.00	93.00	0.19	2050.00	baixo	moderado	moderado
UASB+BIODISCO		\$ 82.09	\$ 11.74	95.00	60.00	35.00	93.00	0.15	915.00	alto	moderado	baixo
UASB+FLOTAÇÃO		\$ 82.54	\$ 7.63	95.00	60.00	35.00	93.00	0.15	915.00	alto	moderado	alto
UASB+LODO ATI...		\$ 57.98	\$ 5.56	93.00	60.00	35.00	93.00	0.14	2050.00	moderado	moderado	alto
UASB+LAGOA A...		\$ 39.98	\$ 4.27	85.00	30.00	35.00	87.00	0.20	225.00	alto	moderado	alto
LAGOA ATIVADA		\$ 93.81	\$ 11.74	98.00	60.00	60.00	97.00	0.23	2150.00	alto	moderado	alto
LAGOA AERADA ...		\$ 40.76	\$ 1.92	85.00	65.00	50.00	83.00	4.00	107.50	alto	moderado	moderado
UASB		\$ 85.23	\$ 7.89	70.00	60.00	35.00	72.50	0.10	145.00	moderado	moderado	baixo

Fonte: Do autor (2023).

A modelagem proposta para aplicação do método *PROMETHEE-AHP*, para este cenário (a), apontou que a tecnologia mais preferida, com maior ênfase no ponto de vista ambiental, seguido dos pontos de vistas econômicos e técnicos, e de menor peso social, foi a tecnologia Lodos ativados (A1). Entretanto, a tecnologia de tratamento UASB+Lodos ativados (A4) também poderia ser considerada. Importante ressaltar que a seleção da tecnologia (A1) não necessariamente é aquela que se apresenta mais eficiente na remoção de DBO (%), que seria a tecnologia de Lagoa ativada (A6).

Tabela 1 – Ordem dos subcritérios mais sensíveis para selecionar tecnologias – cenário (a).

C_i	Subcritérios	w_j (%) (AHP)	w_j – mín (%)	w_j - máx (%)	Δ (%)
C9	Complexidade	3,50	2,29	3,93	1,64
C6	Custo de operação/ manutenção	7,39	5,40	7,75	2,35
C5	Custo de implantação	8,88	6,83	9,29	2,46
C10	Geração de lodo	2,92	0,68	4,57	3,89
C8	Confiabilidade	4,20	0,00	4,56	4,56
C7	Área física demandada	4,20	0,00	6,10	6,10
C3	Eficiência de remoção do P	13,95	13,70	20,21	6,51
C1	Eficiência de remoção de DBO	20,99	13,15	26,57	13,42
C4	Eficiência de remoção do SS	11,13	0,00	14,74	14,74
C2	Eficiência de remoção do N	18,49	17,04	33,14	16,10
C12	Impacto – Fase de operação	2,46	1,74	21,73	19,99
C11	Impacto – Fase de implantação	1,88	0,00	100,00	100,0

Fonte: Do autor (2023).

O subcritério associado ao índice de impacto global na fase de operação de uma ETE foi o menos sensível, pois é preciso que se atribua um peso acima de 21,73% para haver alterações na ordem de selecionamento de uma tecnologia com menos impacto socioambiental. Da mesma forma que, é preciso atribuir um peso igual a 100% ao subcritério C11 para que haja alterações na preferência de tecnologias. A avaliação operacional de uma tecnologia para tratar esgotos em zona urbana (TECURB) foi analisada pelo cenário (a), dado ênfase o ponto de vista ambiental, uma vez que a sua importância é maior que 50% quando comparado aos demais critérios. Neste cenário, a tecnologia selecionada foi Lodos ativado (A1), e as demais tecnologias consideradas, cumprem o requisito legal de eficiência mínima de remoção de DBO, estabelecido em 60% por Brasil (2011).

Inicialmente, analisa-se a operacionalidade da tecnologia de tratamento de esgoto do tipo Lodo ativado (A1) na ETE Norte. Esta ETE Norte está inserida na zona de gestão sede (ZG Sede), com estimativa populacional de 495.060 habitantes, cujo corpo hídrico receptor é a Baía do Guajará (PMSB, 2020). A dinâmica populacional da BES, onde está inserida a ETE Norte, é capaz de gerar uma concentração de DBO afluente em torno de 138,62 mg/L. Este valor foi produto das estimativas das equações (2) e (3), e das considerações definidas pela NBR 12.209 (ABNT, 2011). A tecnologia selecionada pelo método *PROMETHEE-AHP*, Lodos ativados (A1), tem eficiência em torno de 93% em que, pelo cálculo da equação (1), se consegue reduzir a concentração de DBO para 9,70 mg/L.

Este valor se enquadra na Classe 3 (BRASIL, 2005), cujo corpo hídrico receptor pode ser utilizado para abastecimento do consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; à pesca amadora; à recreação de contato secundário; e, à dessedentação de animais. Da mesma forma que, o afluente gerado pela BES, onde a ETE Norte será operacionalizada, irá demandar uma concentração de nitrogênio (N) em torno de 22,18 mg/L. Assim, pela tecnologia do tipo Lodos ativado (A1), que tem eficiência em torno de 75%, se consegue reduzir a concentração de (N) em cerca de 5,54 mg/L. Igualmente à remoção de DBO, quanto ao enquadramento às classes definidas por

Brasil (2005), no que se refere ao parâmetro (N), o corpo hídrico é classificado na Classe 3.

Por outro lado, a BES, caracterizada pela operação da ETE Norte, produz uma carga afluente de fósforo total (P) em torno de 2,77 mg/L. Portanto, (A1) tem eficiência na remoção em cerca de 88% de (P), devolvendo a Baía do Guajará, que se caracteriza por ser um ambiente lótico, uma concentração de 0,33 mg de P/L. Entretanto, quanto a concentração de fósforo, Santos et. al., (2014) classificaram a Baía do Guajará e Rio Guamá em estados eutróficos e mesotróficos (LAMPARELLI, 2004). Embora a Baía do Guajará, em períodos de baixamar, possa indicar concentrações de fósforo que podem acarretar implicações sobre a qualidade da água, mas que ainda, se enquadram em níveis aceitáveis (estado mesotrófico); no período de preamar, este corpo hídrico apresentou alterações indesejáveis na qualidade da água interferindo nos seus múltiplos usos (estado eutrófico) (SANTOS et al., 2014).

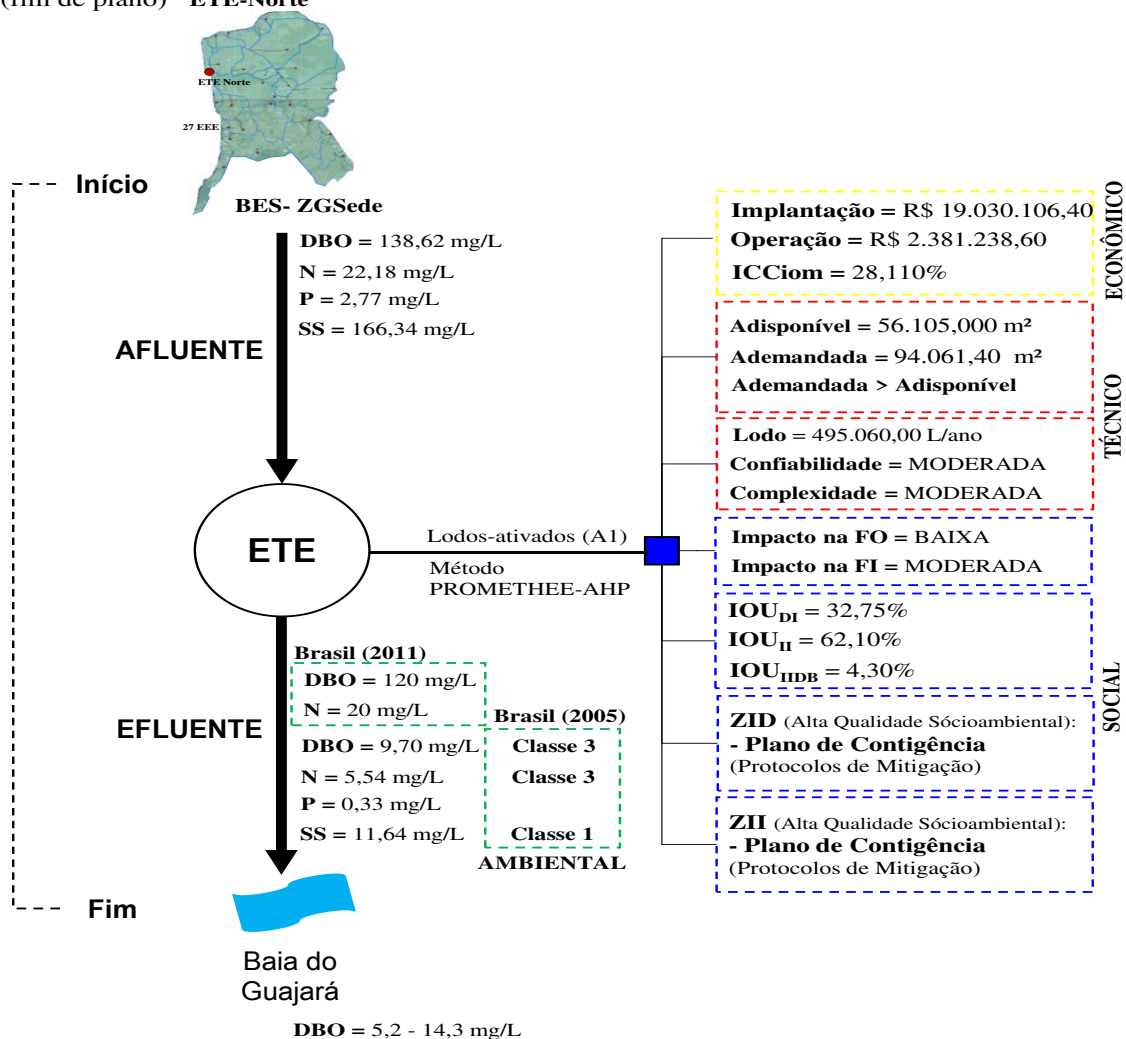
Rahmanian et al., (2015) referiram que a Baía do Guajará apresenta turbidez superior aos permitidos pela legislação, não sendo apropriadas para o consumo, pois seus sólidos suspensos atuam como abrigo e alimento para microrganismos. Embora do ponto de vista ambiental, (A4) apresente uma equivalente eficiência na remoção de (DBO) e (SS), quando comparado a tecnologia (A1), as eficiências de remoção de (N) e (P) não comprometem o lançamento de efluentes a Baía do Guajará, posto que este corpo hídrico se apresenta em estado eutrófico. No que se refere ao afluente gerado pela BES em torno de 22,18 mg de N/L, pela tecnologia (A6), se consegue reduzir a concentração de (N) em 8,87 mg/L, enquadrando-o na Classe 3 (BRASIL, 2005). Deste modo, qualquer uma das tecnologias, quer aquela selecionada pela modelagem PROMETHEE-AHP, quer aquela definida pelo PMSB (2020), do ponto de vista ambiental, podem ser adotadas.

Embora o critério econômico tenha uma importância relativa um pouco superior a 16%, importa considerar que, entre os anos de 2010 a 2020 a cidade de Belém apresentou uma média anual de receitas próprias correntes (RPC) e despesas correntes (DC) de R\$ 1.557.543.504,55 e R\$ 1.141.576.796,36, respectivamente. Neste período de 10 anos, por uma transferência média da união (T) de R\$ 1.107.452.599,50 para o município de Belém, e adotando-se a proposta de Bovo (1995), pela equação

(4), obteve-se um índice de compatibilidade do custo de implantação, operação e manutenção de uma ETE em zona urbana (ICC_{IOM}) que deve ser igual ou inferior a 5%. Assim, do ponto de vista econômico, a tecnologia (A4), definida por PMSB (2020), e (A1), preferida pelo método *PROMETHEE-AHP*, demandariam do erário municipal, respectivamente, 23,905% e 28,110%. Por outro lado, embora a confiabilidade e a complexidade operacional da tecnologia proposta pelo PMSB (2020) para ETE Norte sejam desejavelmente “altas” e “baixas”, respectivamente; do ponto de vista social, o impacto na fase de implantação e operação são moderados. Deste modo, conforme a REGRA 5 (Tabela 10) para qualificar zonas urbanas a partir da operação de uma ETE, se tecnologia (A4) for implantada, diante da população diretamente exposta, a zona de impacto direto (ZID) é classificada como uma zona urbana de moderada qualidade socioambiental (ZUMQSA).

Figura 5 – Cenário (a): Operação da tecnologia para tratar esgotos selecionada pelo método *PROMETHEE-AHP* aplicado para ZG Sede – ETE Norte.

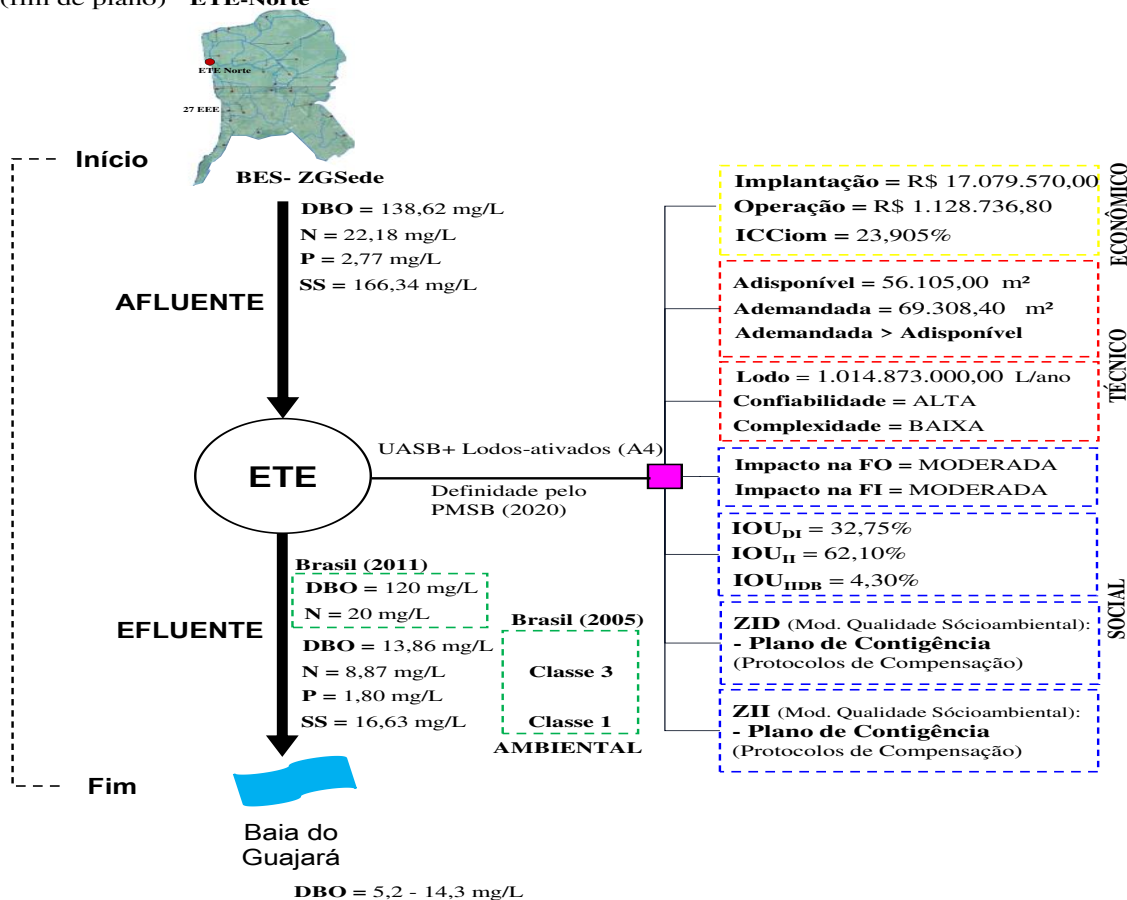
Pop. = 495.060,000 hab.
(fim de plano) ETE-Norte



Fonte: Do autor (2023).

Figura 6— Cenário (a): Operação da tecnologia para tratar esgotos definida pelo PMSB (2020) para ZG Sede – ETE Norte.

Pop. = 495.060,000 hab.
(fim de plano) ETE-Norte



Fonte: Do autor (2023)

Da mesma forma que, pelo referido regramento qualificatório de zona urbana, considerando a tecnologia (A4) a ser implantada na ETE Norte, diante da população indiretamente exposta e diretamente beneficiadas, a zona de impacto indireto (ZII) é classificada pela REGRA 9 como ZUMQSA. Entretanto, pelo método multicritério *PROMETHEE-AHP*, ao selecionar a tecnologia A1, embora a complexidade e a confiabilidade operacional sejam consideradas moderados, o impacto durante a fase de operação é “baixo”. Neste caso, se tecnologia A1 for implantada, diante da população diretamente exposta, pelas regras de classificação de zona urbana proposta neste trabalho, a ZID é classificada como ZUAQSA pela REGRA 3.

Complementarmente, pela implantação na ETE Norte da tecnologia A1, diante da população indiretamente exposta e diretamente beneficiadas, a ZII é classificada como ZUAQSA pela REGRA 5. Assim, para ambas as zonas, pela operação da tecnologia A1, é sugestivo recorrer a um plano de contingência com ações protocolares de

mitigação, recorrendo a uma série de ações preventivas a serem adotadas pela operação da ETE, acima referidas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo demonstrou que é possível o uso de técnicas para a tomada de decisão, e análise de sensibilidade dos subcritérios ambientais, sociais, econômicos e técnicos, para auxiliar a escolha de sistemas de tratamento de esgoto sanitário e consequentemente a gestão pública municipal. O modelo multicritério *PROMETHEE-AHP*, desenvolvido na pesquisa mostrou-se eficaz em identificar as alternativas das tecnologias de tratamento de esgoto como aquelas mais eficazes para os critérios abordados (econômicos, ambientais, sociais e técnicos).

De outra maneira o modelo indicou a necessidade de se efetuar estudos conjuntos de estimativa de custo de implantação com operação e manutenção de uma ETE com sua respectiva tecnologia de tratamento, uma vez que os melhores custos de implantação ou de operação e manutenção não indicam, necessariamente, a melhor alternativa. Do ponto de vista do PMSB (2020), a tecnologia selecionada (*UASB*+Lodos ativados), salientou que o motivo de tal escolha foi a contenção de custos, não evidenciando nem qualitativamente e nem quantitativamente a seleção da tecnologia preferida.

Nestas circunstâncias o presente artigo propôs-se a investigar através do método *PROMETHEE-AHP*, a tecnologia que melhor traduz a realidade para a zona urbana da cidade de Belém, analisando respaldado pelo PMSB (2020), a ETE Norte, e dividindo-a em um cenário que levaram em consideração aspectos técnicos, social, econômico e especialmente o ambiental. E desta maneira constatou-se que os resultados para o cenário (a), indicaram que a tecnologia Lodos ativados é a melhor preferida, levando em consideração todos os critérios abordados no presente artigo, que de forma quantitativa selecionou tal tecnologia (contrariando a preferida do PMSB, 2020), como a melhor que se adequa as condições para a ETE Norte, especialmente os aspectos ambientais, na medida em que neste cenário o grau de importância foi dado para DBO.

6. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A G DE. ALMEIDA, A. T. DE. (2009). Apoio à decisão na seleção de investimentos em petróleo e gás: uma aplicação utilizando o método PROMETHEE. Gest. Prod., São Carlos. Doi: 10.1590/S0104-530X2009000400004;

BOVO, J. M. (1995). O conceito de capacidade de poupança própria na análise das finanças municipais. Revista de Administração Pública, Rio de Janeiro, 29(1), 110-114.

BRANS, J. P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method. European Journal of Operational Research, v. 24, n. 2, p. 228-238, 1985.

BRASIL. RESOLUÇÃO nº 430, DE 13 DE MAIO DE 2011. Disponível em: Acesso em: 10 out. 2011

_____. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de esgotos, e dá outras providências. Data da legislação: 17/03/2005 - Publicação DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63.

FORMAN, E., PENIWATI, K. (1998). Aggregating individual judgements and priorities with the Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research, Vol. 108, pp. 165-169. Doi: 10.1016/j.ejor.2017.04.027.

LAMPARELLI, M.C. Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento. 2004. 235f. Tese (Doutorado em Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo (IB-USP), São Paulo, 2004.

MOSTAFA, S.; LEE, S.; DUMRAK, J.; CHILESHE, N.; SOLTAN, H. Lean thinking for a maintenance process. Production & Manufacturing Research Journal, Vol.3(1), pp.236-272, Reino Unido, 2014.

PLANASB, (2020). Plano Nacional de Saneamento Básico- V 1. - Relatório de Avaliação Anual.

MAGALHÃES, Gustavo Alexandre. O Licenciamento Ambiental à Luz do Princípio Constitucional da Proporcionalidade. Veredas do Direito, Belo Horizonte, v. 7, n. 13/14, p. 241-268, jan./dez. 2018.

RAHMANIAN, N., ALI, S. H. B., Homayoonfard, M., ALI, N., Rehan, M., Sadeh, Y. & Nizami, A. (2015). Analysis of physiochemical parameters to evaluate the drinking water quality in the State of perak, Malaysia. Journal of Chemistry, 1–11.

RAHMANIAN, N.; ALI, S. H. B.; HOMAYOONFARD, M.; ALI, M. J.; REHAN, M.; SADEH, Y.; NIZAMI, A. S. Analysis of physiochemical parameters to evaluate the drinking water quality in the state of perak, Malaysia. Journal of Chemistry, v.2015, 2015.

REISMAN, A. (2017). Entering the historical problem space: Wholeclass, text-based discussion in history class. Teachers College Record, 117(2), 1-44.

ROCHE, H.; VEJO, C. (2004). Analisis multicriterio em la toma de decisiones. Métodos Cuantitativos aplicados a la administración. Analisis multicritério – AHP. Material apoyo AHP, 11 f.

SANTOS, M. de L. S. et al. Influência das condições de maré na qualidade de água do rio Guamá e Baía do Guajará. Boletim Técnico Científico do Cepnor. Belém, v. 14, n. 1, p. 17- 25, 2014.

SANTOS, M. L. S.; HOLANDA, P.; PEREIRA, I.; RODRIGUES, S.; PEREIRA, J. A. R.; MESQUITA, K.. Influência das Condições da Maré na Qualidade de Água do Rio Guamá e Baía do Guajará. Boletim Técnico Científico Cepnor, v.14, n.1, p.17-25, 2020.

SAATY, Thomas L. (1990). How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research, v. 48, p. 9-26. Doi:10.1016/0377-2217(90)90057-I.

SAATY T. L. (1980), The Analytic Hierarchy Process: Planning Setting Priorities, McGraw Hill Text, New York, USA. 287 P.

SAATY, T.L. Decision making for leaders. Pitts burg, USA: WS. Publications, 2008.
Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/home/item.html?id=04487e2a605842f4b15476fe2acf6d1>, Acesso em 14 de outubro de 2021.

TAN, R. R; AVISO K.B., HUELGAS A.P., PROMENTILLA M.A.B (2014). Fuzzy AHP approach to selection problems in process engineering involving quantitative and qualitative aspects. Process Safety and Environmental Protection, v. 92, n. 5, p. 467–475. Doi: 10.3390/math8112014.

VAN HAANDEL A., MARAIS G.R.V. (1999). O comportamento do sistema de lodo ativado. Campina Grande – 1ª ed. C; 472p.

VINCKE, P. Multicriteria decision aid. New York: John Wiley e Sons, 1992.



**SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS EM ZONAS URBANAS- ETE
NORTE: Proposta de uma Modelagem Multicritério**
Lisbôa et. al.