

Educação, Inovação e Sustentabilidade na Pesquisa Aplicada

Análise bibliométrica sobre a transformação digital no tratamento de esgoto

Esp. Allan dos Anjos Pestana

<https://orcid.org/0009-0000-3478-0867>

Dra. Marcia Ito

<https://orcid.org/0000-0003-4799-2433>

Resumo – O uso da digitalização em sistemas produtivos tem sua expansão em diversos segmentos na indústria visando a eficiência dos processos. Para o saneamento e mais especificamente o tratamento de esgoto, além de contribuir nos diversos controles existentes nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), como as malhas de vazão, nível, pH, condutividade, oxigênio dissolvido (OD) entre outros, a transformação digital pode ser a via de acesso para outros tipos de controles como, por exemplo, prever o comportamento do esgoto nas estações. Melhorar os controles e a eficiência têm como consequência um maior volume de esgoto tratado e melhor qualidade do efluente. Esses pontos são fundamentais, pois o novo marco legal do saneamento, lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, preconiza que o setor de saneamento deve atender 99% da população com água potável e 90% com coleta e tratamento de esgoto até 31 de dezembro de 2033. Assim, o objetivo deste artigo é uma análise bibliométrica sobre o estado atual da transformação digital no tratamento de esgoto. Por meio de palavras-chaves realizou-se uma busca nas bases Scopus, Web of Science e Capes. Com base em critérios de inclusão e exclusão, foram analisados os títulos e resumos dos artigos para uma seleção prévia. Com os artigos selecionados uma análise da qualidade permitiu a seleção dos artigos mais aderentes ao objetivo da pesquisa. Foi possível identificar aumento nas pesquisas acerca do tema, além de correlacionar os pesquisadores e as palavras presentes nos artigos. Com os resultados foi possível observar que para a amostra, a tecnologia mais adotada atualmente é a de redes neurais artificiais. Por fim, foi possível ter um retrato do nível de conhecimento consolidado da transformação digital no tratamento de esgoto e os potenciais usos futuros das ferramentas digitais para a melhoria do processo do tratamento de esgoto.

Palavras-chave: Transformação digital. Tratamento de esgoto. Indústria 4.0. Digitalização. Controle e automação.

Abstract – *The use of digitization in productive systems has been expanding across various sectors in the industry, aiming at process efficiency. For sanitation and specifically wastewater treatment, in addition to contributing to the various controls present in wastewater treatment plants (WWTPs), such as flow rates, levels, pH, conductivity, dissolved oxygen (DO), among others, digital transformation can serve as a pathway to other types of controls, such as predicting the behavior of wastewater in the plants. Improving controls and efficiency results in a greater volume of treated wastewater and better effluent quality. These points are crucial, as the new legal framework for sanitation, law no. 14,026, dated July 15, 2020, stipulates that the sanitation sector must provide 99% of the population with drinking water and 90% with wastewater collection and treatment by December 31, 2033. Thus, the objective of this article conducts a bibliometric analysis on the current state of digital transformation in wastewater treatment. Using keywords, a search was performed in the Scopus, Web of Science, and Capes databases. Based on inclusion and exclusion criteria, the titles and abstracts of the articles were analyzed for preliminary selection. With the selected articles, an analysis of quality allowed the selection of articles most relevant to the research objective. It was possible to identify an increase in research on the topic, as well as to correlate researchers and the words present in the articles. From the results, it was observed that, for the sample, the most adopted technology currently is artificial neural networks. Finally, it was possible to have an overview of the consolidated level of knowledge regarding digital transformation in wastewater treatment and the potential future uses of digital tools for improving the wastewater treatment process.*

Keywords: Digital transformation. Sewage treatment. Industry 4.0. Digitalization. Control and automation.

1 Introdução

A Lei nº 11.445/07 descreve saneamento básico como sendo um conjunto de instalações, infraestrutura e serviços fundamentais para a população visando distribuição de água potável, coleta e tratamento de esgoto, drenagem urbana e manejo de resíduos sólidos (PHILIPP; MAIOLA; LEMANSKI, 2022). Apesar da lei parte da população ainda não tem acesso ao direito básico no Brasil. No mundo, aproximadamente 1 bilhão de pessoas não tem acesso à água potável e diariamente 6 mil crianças morrem devido às doenças relacionadas à qualidade da água (DIAZ; NUNES, 2020).

Considerando a importância da água e dos serviços de saneamento para a vida humana e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável nº3 – Saúde e bem-estar, nº6 – Água potável e saneamento e nº14 – Vida na água, é fundamental o acesso ao tratamento de esgoto, e a digitalização de processos pode se mostrar como uma alternativa visando aumento dos serviços prestados (SAUL; GEBAUER, 2018).

No saneamento e mais especificamente no tratamento de esgoto, diversas são as fontes de dados dos processos de tratamento. Dados analíticos, como pH, condutividade, Sólidos Suspensos Totais (SST), turbidez, manto de lodo, amônia, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Oxigênio Dissolvido (OD), *Oxidation-Reduction Potential* (ORP) ou Potencial de Oxido-Redução e cloro se somam a outras variáveis provenientes dos processos, como vazão e nível, bem como de equipamentos, como vibração e temperatura, para subsidiar ações em controles (ARISMENDY (2021). Porém dados por si só não é informação, muito menos conhecimento, então trazer valor agregado para companhias nas formas de eficiência operacional e energética correlacionando essas informações é o grande desafio das empresas do setor.

Em Estações de Tratamento de Esgoto, a transformação digital em conjunto com as análises de qualidade dos processos de tratamento, tem a capacidade de antecipação das alterações necessárias do processo, contribuindo com a eficiência do tratamento.

Um fato relevante é que o processo de tratamento de esgoto não possui um comportamento linear, podendo ser influenciado por diversos fatores LI (2022). Portanto trazer previsibilidade, principalmente sobre as características do esgoto a ser tratado tem grande valor para equipe de operação, haja vista parâmetros legais para lançar o efluente tratado de volta à natureza.

Além disso, as Estações de Tratamento de Esgoto possuem equipamentos com consumo energético comparado à pequenos municípios (PESTANA, 2018), e maneiras de se reduzir esses custos são fundamentais, portanto, identificar o nível atual do conhecimento sobre a transformação digital no segmento de tratamento de esgoto e como essas tecnologias podem auxiliar na eficiência dos processos, é a questão de pesquisa desse trabalho.

2 Objetivo

O objetivo do trabalho é analisar o conhecimento existente de transformação digital no tratamento de esgoto respondendo à seguinte questão de pesquisa: “Quais e como os conhecimentos de automação já consolidados no tratamento de esgoto são utilizados? ” Para tanto, os objetivos específicos foram realizar a bibliometria da transformação digital e analisar o potencial de uso de novas tecnologias visando eficiência energética e operacional no tratamento de esgoto.

3 Referencial Teórico

3.1 Transformação digital

A transformação digital é um processo de mudança impulsionado por novas tecnologias nas empresas, sendo caracterizada, principalmente, pela computação embarcada e a conectividade (EBERT; DUARTE, 2018). Os benefícios listados são aumento nas vendas ou produtividade, inovação nas criações de valor, novas formas de interação com os clientes, entre outros (MATT; THOMAS; BENLIAN, 2015).

Vial (2019) através de uma revisão sobre assunto e outras definições, identifica como um processo que visa melhorar algo por meio de mudanças em suas propriedades e de combinações de tecnologias de informação, computação, comunicação e conectividade.

No sentido da aplicação da transformação digital em serviços avançados, diversos requisitos podem ser necessários, entre eles podem ser citados inteligência, conexão e recursos analíticos. Inteligência como sendo o aprimoramento e incorporação de produtos inteligentes para detecção e captura de dados operacionais, enquanto os recursos de conexão envolvem transmissão sem fio e de rede de ativos interconectados e os recursos analíticos é obtenção de insights preditivos por meio de processamento de dados lógicos (SAUL; GEBAUER, 2018).

No tratamento de esgoto, a transformação digital atrelada às análises de qualidade que são realizadas nos processos de tratamento e a conectividade dessas informações, tem a capacidade antecipação de manobras necessárias.

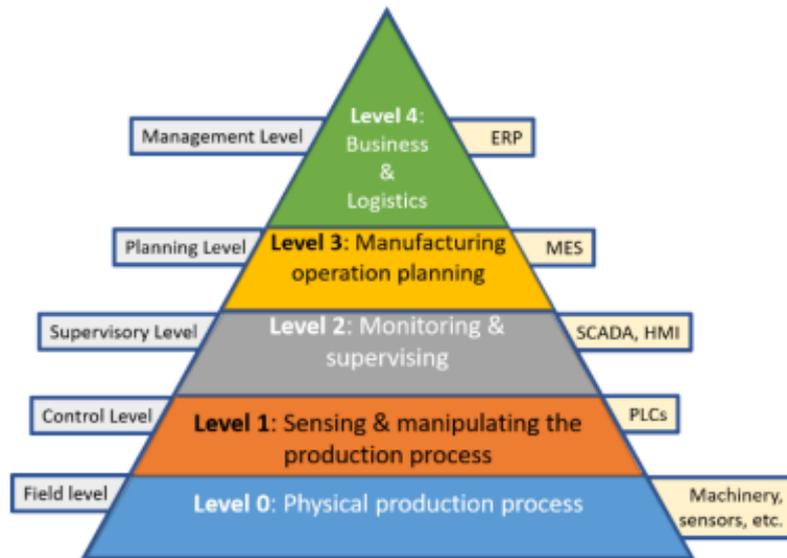
3.2 Automação

A automação por meio do controle de processo permite diversos benefícios em um processo industrial, como aumento da produtividade, além de minimizar a entrada manual de registro e medições, simplificar a realização de estudos econômicos, aumentar o acesso à dados para análise do processo e problemas operacionais entre outros (MEHTA, 2014).

A literatura de automação usualmente divide os componentes acerca do tema em 5 principais camadas. Na primeira estão os dispositivos de campo, na segunda os controladores, na terceira os sistemas de supervisão, enquanto na quarta estão os gerenciadores das plantas e na quinta os *Enterprise Resource Planning* - Sistema integrado de gestão empresarial (ERPs) conforme Figura 1

(MARTINEZ et al, 2021). Importantes ressaltar que níveis cada vez maiores de automação permitem controles mais aprimorados e por consequência melhor eficiência operacional, e para isso todo o volume de dados provenientes dos processos é fundamental.

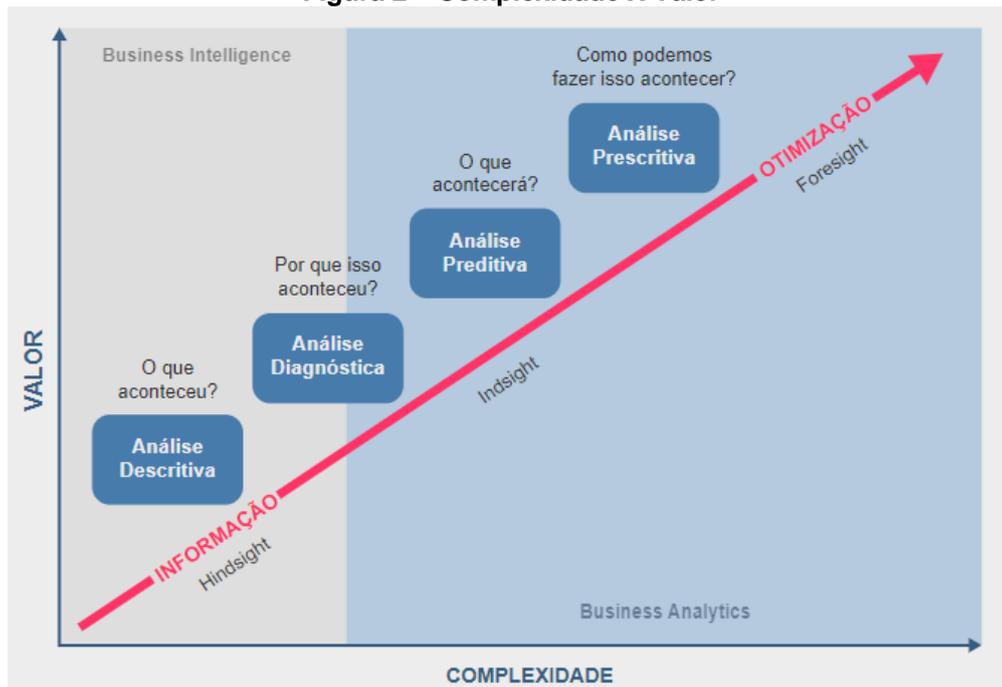
Figura 1 – Pirâmide de automação



Fonte: MARTINEZ et al, (2021, p.3)

É possível correlacionar a complexidade com o valor dos dados, onde há o caminho de informação para otimização, do *Business Intelligence* para *Business Analytics*, saindo da análise descritiva e diagnóstica, ou seja, o que aconteceu e por que aconteceu, para a análise preditiva e prescritiva, o que acontecerá e como fazer para que algo aconteça, trazendo previsibilidade para os processos produtivos (PAULUCCI; RUBIM, 2022), conforme Figura 2:

Figura 2 – Complexidade X Valor



Fonte: PAULUCCI, A.; RUBIM, L. (2022)

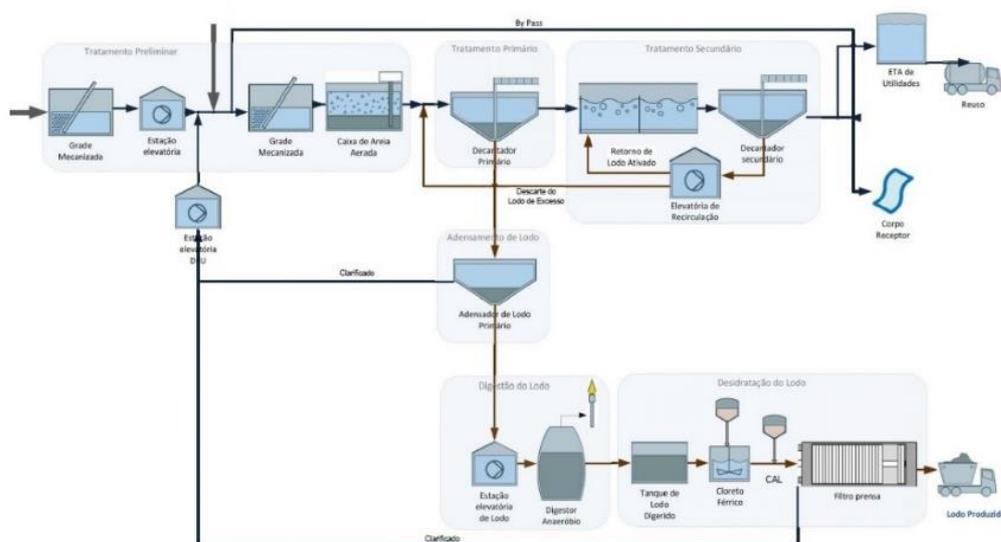
A automação em tratamento de esgoto, normalmente é composta por instrumentos que monitoram o processo, enviam essas informações aos controladores, que além atuar nos elementos finais de controle presentes em cada etapa, fazem a comunicação com o sistema de supervisão da planta, esse último conectado ao banco de dados e historiador quando existente.

3.3 Tratamento de esgoto

A tecnologia mais comum para o tratamento de esgoto é o processo de lodo ativado, onde basicamente é enviado oxigênio ao esgoto para que as bactérias existentes possam decompor a matéria orgânica ali presente. Cada vez mais os processos de tratamento exigem tecnologias mais eficientes com menor impacto ambiental e custo possível (PERES et al, 2021).

O processo de tratamento por lodo ativado consiste basicamente em acelerar o processo que ocorre na natureza de decomposição da matéria orgânica, oxigenando as bactérias presentes no esgoto. Esse material orgânico é composto por proteínas (40-60%), carboidratos (25-50%) e gorduras (10%) e é fonte de energia para esses microrganismos (FERREIRA; CORAIOLA, 2008). Na Figura 3 temos um fluxograma que representa o processo de uma Estação com essas características. Uma ênfase para a separação das fases de tratamento (líquida e sólida) e para onde ocorre essa depuração da matéria orgânica, nos tanques de aeração.

Figura 3 – Fluxograma do tratamento – ETE



Fonte: Dos autores, 2023.

A Figura 3 apresenta cada etapa do processo de tratamento como a fase preliminar onde as grades fazem a primeira retirada de material particulado. Nos tanques de aeração onde ocorre a depuração da matéria orgânica e a desidratação mecânica de lodo, última fase do tratamento fase sólida onde o lodo é prensado e separado o que é líquido do que é sólido.

O tratamento de esgoto usualmente utiliza de várias análises para nortear os seus processos em cada uma de suas etapas. Uma das mais importantes é a Demanda Química de Oxigênio (DQO) ou *Chemical Oxygen Demand* (COD). A DQO é a concentração em massa de oxigênio que é equivalente à quantidade de um certo reagente químico consumido em seu ensaio, e pode ser associado à carga orgânica presente no esgoto (GEERDINK, 2017). Ou seja, uma relação da DQO de entrada e saída podem trazer informações sobre a eficiência da Estação de tratamento e por isso esse ensaio é tão usual.

3.4 CONAMA nº 430 complementa e altera a resolução nº357

A resolução do CONAMA 430, trata sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2011).

Essa resolução rege os limites para os parâmetros físico-químicos presentes no efluente de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), de acordo com o corpo receptor e a classe do rio. Alguns dos parâmetros são: pH, temperatura, turbidez e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).

3.5 Instrumentação

Instrumentação pode ser definido como um sistema que detecta uma variável de processo, quantifica-a e converte essa informação, geralmente para um

sinal elétrico, para que posteriormente esse dado possa ser trabalhado, armazenado e acessado (PADMANABHAN, 2012).

A variável medida ou variável de processo é a medida da variável física de interesse no sistema, por exemplo temperatura ou pressão. O elemento primário converte o valor medido em uma forma adequada para posterior conversão, enquanto o elemento secundário apresenta esse valor já em unidade de engenharia ao usuário (WARNE; LAUGHTON, 2003). No caso das ETEs, diversas são as grandezas medidas e enviadas aos sistemas de controle através de sinais elétricos, como vazão, nível e pressão.

3.6 Modelagem matemática

Diversas abordagens podem utilizadas visando obter insights através de dados. Entre elas é possível citar as Redes Neurais Artificiais, Algoritmos genéticos, *Deep Learning*, Séries Temporais entre muitos outros. Através da análise dos dados estudados ou treinamento do algoritmo é possível encontrar determinados padrões, e para isso é fundamental a utilização de algumas métricas que visam identificar a acurácia do modelo utilizado, e através do conceito de benchmarking em modelagem, comparar diferentes modelos. A equação 1 nos mostra o cálculo para raiz do erro quadrático médio ou *Root Mean Square Error* (RMSE), usualmente utilizado para determinar a diferença entre o valor predito e esperado em um modelo (PADHMA, 2023).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(d-y)^2}{n}}$$

Equação (1)

Outra métrica normalmente utilizada é o erro percentual médio absoluto ou *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), equação 2:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{d-y}{d} \right| * 100$$

Equação (2)

Por fim, o coeficiente de determinação ou R^2 , demonstra a quão ajustada está a equação obtida ao *dataset*, equação 3:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (y[n] - \hat{y}[n])^2}{\sum_{n=1}^N (y[n] - \bar{y})^2},$$

Equação (3)

Enquanto nos dois primeiros RMSE e MAPE, espera-se valores baixos afim de se atestar a qualidade do modelo, o R² varia entre 0 e 1, com valores se aproximando de 1, aumentando o poder de predição do modelo.

4 Método

A estratégia escolhida para definição das palavras-chave foi a PICO, que é um acrônimo para População, Intervenção, Comparação e *Outcome* (desfecho). A estratégia que tem origem na medicina auxilia o pesquisador, através de perguntas sobre cada uma dessas dimensões, a encontrar as palavras mais adequadas que irão compor a *string* de pesquisa. Dois grupos de palavras foram resultantes, um deles descrevendo o campo, ou seja, tratamento de esgoto, lodo ativado e águas residuais e outro caracterizando a evolução tecnológica esperada, chegando em: Indústria 4.0, transformação digital, digitalização e controle e automação. O resultado para essa *string* é:

("Sewage Treatment" OR "Activated Sludge" OR "Wastewater") AND ("Industry 4.0" OR "Digital Transformation" OR "Digitization" OR "Control Automation")

A *string* foi pesquisada em todas as bases de dados Scopus, *Web of Science* e Capes em 18/04/2023. As bases foram escolhidas devido à aderência das mesmas a essa área do conhecimento.

Na busca dos artigos que mais respondem à questão de pesquisa, os artigos encontrados foram selecionados, segundo critérios de inclusão e exclusão (quadro 1).

Quadro 1 – Critérios de inclusão e exclusão

Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
Aplicado no tratamento de esgoto	Não está em inglês
Artigos em inglês ou português	Não responde a questão de pesquisa
	Tecnologia não caracteriza transformação digital ou Indústria 4.0
	É uma revisão sistemática

Fonte: Dos autores, 2023.

Para avaliação da qualidade dos artigos selecionados, foram elaboradas algumas perguntas visando identificar: (1) se o artigo é relacionado ao tratamento de esgoto; (2) se o uso da tecnologia caracteriza uma transformação digital; (3) se é um dos pilares da indústria 4.0; e (4) se o resultado do artigo tem relação com a eficiência do processo de tratamento de esgoto. O quadro 2 traz uma síntese das questões aplicadas para esta finalidade.

Quadro 2 – Questões para avaliação de qualidade

Questões
É relacionado ao tratamento de esgoto?
Caracteriza transformação digital?
É um pilar da indústria 4.0?
O resultado da pesquisa tem relação com a eficiência do processo de tratamento de esgoto?

Fonte: Dos autores, 2023.

Para cada um dos artigos selecionados e acerca de cada uma das questões, foi verificado se artigo respondia à questão de pesquisa: “Quais e como os conhecimentos de automação já consolidados no tratamento de esgoto são utilizados? ”. Uma pontuação para cada nível de resposta foi atribuída e por fim uma nota de corte foi adotado visando ter como resultado, os artigos mais aderentes à questão de pesquisa. O quadro 3 apresenta a pontuação utilizada na análise.

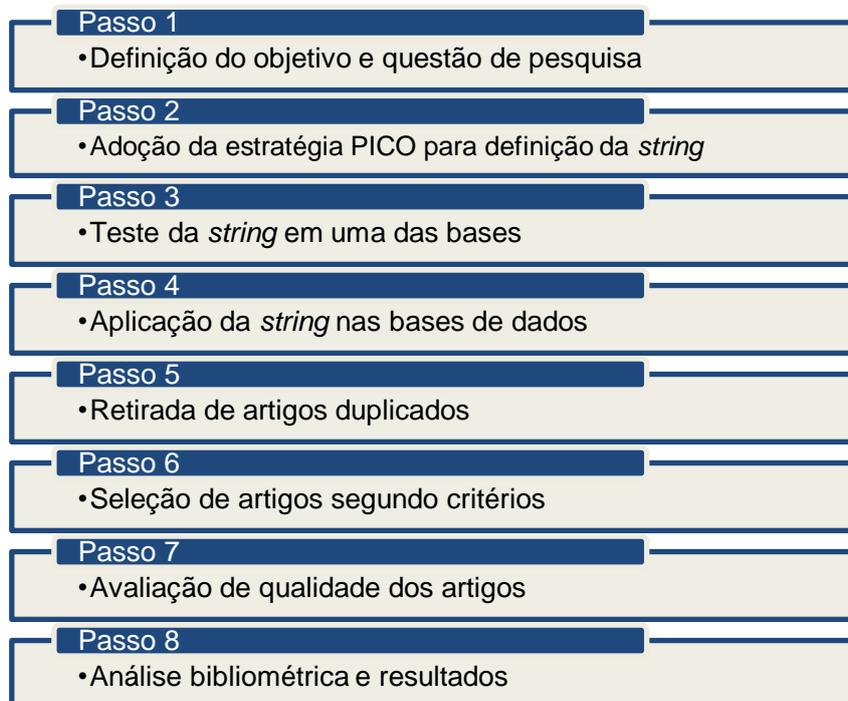
Quadro 3 – Pontuação para avaliação das questões de qualidade

O artigo responde ao critério avaliado ou o critério não se aplica	1.0
O artigo não deixa claro se atende ou não o critério	0.5
Não existe nada no artigo que atende ao critério	0.0

Fonte: Dos autores, 2023.

Assim, a Figura 5 traz uma síntese do processo metodológico que foi baseado em Kitchenham (2007), utilizando-se a ferramenta Parsifal.

Figura 5 – Procedimento metodológico adotado



Fonte: Dos autores, 2023.

No passo 1 são definidos o objetivo e a questão de pesquisa, seguido pelo passo 2 que por meio de um método, nesse caso a estratégia PICO, e atrelado ao objetivo definido permite encontrar uma *string* mais adequada para pesquisa nas bases de dados. Antes da aplicação de fato da *string* na base de dados no passo 4, testes com as *strings* em pelo menos uma das bases se faz necessário visando verificar a abrangência dos resultados obtidos. Muitas das bases de dados acabam incluindo os mesmos artigos em suas bases, por isso a utilização de alguma ferramenta para retirada dos itens duplicados ocorre no passo 5. A seleção dos artigos mais aderentes ao objetivo de pesquisa é feita nos passos 6 e 7, em um primeiro momento por critérios de inclusão e exclusão e posteriormente por uma avaliação de qualidade, respondendo algumas questões de modo a entender o quanto cada artigo responde à questão. Por fim a análise bibliométrica e discussão dos resultados pode ser realizada com o produto obtido.

5 Resultados e Discussão

Para definição das palavras-chave, inicialmente foi realizada uma contextualização com as questões de pesquisa e a problematização que em conjunto com a estratégia PICO deu origem às palavras que foram utilizadas neste trabalho. O quadro 4 apresenta a contextualização do problema e que foi usado para encontrar as palavras chaves.

No quadro 4 foi possível observar a reincidência de alguns termos chaves em mais de um momento, como por exemplo, transformação digital, tratamento de esgoto e indústria 4.0.

Quadro 4 – Contextualização do problema

	IDENTIFICAÇÃO DA IDEIA	PALAVRAS-CHAVE(DESCRITORES)
CONTEXTO	Indústria 4.0 e Transformação digital no Tratamento de esgoto	Indústria 4.0; Transformação digital; Tratamento de esgoto
PROBLEMATIZAÇÃO	Como automação, controle e transformação digital podem tornar os processos de tratamento de esgoto mais eficientes e por consequência aproximar a companhia do desafio da universalização dos serviços	Automação, Controle, Eficiência, Universalização; Indústria 4.0; Transformação digital; Tratamento de esgoto
QUESTÕES DE PESQUISA	Quais os conhecimentos de automação já consolidados no tratamento de esgoto (controles e tecnologias) ? Dentro do conceito de indústria 4.0, quais tecnologias têm potencial de contribuir para a eficiência de seus processos ? Qual o nível de preparação (equipamentos e pessoas) atual das Estações de Tratamento de Esgoto da região metropolitana para receber essas novas tecnologias? Como essas tecnologias podem contribuir nos custos de tratamento (Energia, químicos, HH) e eficiência ?	Tecnologias, conhecimentos consolidados Tecnologias habilitadoras Maturidade; Região metropolitana Benefícios
PROBLEMA	A universalização como meta dos serviços de tratamento, e a impossibilidade de atendimento sem a evolução tecnológica.	Universalização; Tratamento de esgoto; Evolução tecnológica
OBJETIVOS	GERAL: identificar o conhecimento de transformação digital consolidado e o potencial dentro do tratamento de esgoto. ESPECIFICOS: Realizar bibliometria, e de tecnologias potenciais.	Conhecimentos; Transformação digital Bibliometria; Tecnologias potenciais

Fonte: Dos autores, 2023.

A estratégia PICO, conforme o quadro 5, foi utilizada visando delinear a pesquisa e obter as palavras-chave mais adequadas. Com o uso dessa estratégia e a partir de quatro dimensões (População, Intervenção, Comparação e *Outcome* ou o desfecho esperado) é possível encontrar as palavras mais adequadas para a busca.

Quadro 5 – Estratégia PICO

PICO			
População	Intervenção	Comparação	Outcome (desfecho)
Tornar os processos de Tratamento de Esgoto mais eficientes na Unidade de Tratamento de Esgoto da Região Metropolitana de São Paulo	Por meio da automação, controle, transformação digital e uso das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 no Saneamento	Estações que operam hoje de forma totalmente manual	Espera-se com isso redução de custos com químicos, energia elétrica, tornar os processos mais estáveis e em etapa futura, poder prever situações no Tratamento.

Fonte: Dos autores, 2023.

Com as palavras-chave sugeridas pela técnica adotada, fez-se necessário avaliar em pelo menos uma das bases o conjunto de algumas *strings*, com o objetivo de visualizar o resultado que a busca geraria, e em caso de poucas respostas poder analisar quais palavras usar. Os resultados obtidos em cada base estão apresentados na tabela 1.

A partir dos testes foi possível observar que pesquisas no título restringiriam muito os resultados, provavelmente excluindo artigos com conteúdo aderente à pesquisa, assim como pesquisas somente no assunto, portanto ficou definido que as pesquisas seriam realizadas de forma geral. Outro ponto observado, foi que a inclusão de uma tecnologia específica na *string*, além de enviesar a pesquisa, poderia dar a falsa impressão de uma pesquisa com muitos resultados acerca daquela tecnologia, enquanto não englobaria pesquisas que até a utilizassem, porém se tratasse de um tipo específico. Por exemplo, a inclusão de *machine learning*, enquanto algum pesquisador pudesse descrever em seu material diretamente qual técnica de *machine learning* utilizou, como árvore de decisão, *k-means* ou *Support Vector Machine (SVM)*.

Com os resultados que se encontram na tabela 1, foi possível definir a *string* que seria usada para responder à questão de pesquisa:

("Sewage Treatment" OR "Activated Sludge" OR "Wastewater") AND ("Industry 4.0" OR "Digital Transformation" OR "Digitization" OR "Control Automation")

Tabela 1 – Teste de strings em uma das bases

FINAL - GERAL					
String	Res ultad os	Res ultad os (Arti gos)	Resulta dos (Artigos) & (Inglês)	Resultado s (Artigos & (Inglês & (>2013)	Resultados (Artigos) & (Inglês) & (>2013) & (Revisado por par)
("Sewage Treatment" OR "Activated Sludge" OR "Wastewater") AND ("Industry 4.0" OR "Digital Transformation" OR "Digitization")	175	143	142		124
" OR "Automation")	3066	2100	2063		1735
" OR "Control Automation")	205	156	153		130
PESQUISA GERAL					
("Sewage Treatment" OR "Activated Sludge" OR "Wastewater") AND ("Industry 4.0" OR "Digital Transformation" OR "Digitization")	160	128	126	120	106
" OR "Machine Learning")	1466	1319	1316	1283	1232
" OR "Artificial intelligence")	1579	1316	1310	1079	1019
" OR "Data Science")	248	215	213	205	188
" OR "Big Data")	409	369	367	360	334
" OR "Internet of things")	360	315	312	305	267
" OR "Machine Learning" OR "Artificial intelligence" OR "Data Science" OR "Big Data" OR "Internet of things")	2976	2604	2596	2350	2238
PESQUISA NO ASSUNTO					
("Sewage Treatment" OR "Activated Sludge" OR "Wastewater") AND ("Industry 4.0" OR "Digital Transformation" OR "Digitization")	71	71	71	68	61
" OR "Machine Learning" OR "Artificial intelligence" OR "Data Science" OR "Big Data" OR "Internet of things")	1773	1607	1605	1480	1429
PESQUISA NO TÍTULO					
("Sewage Treatment" OR "Activated Sludge" OR "Wastewater") AND ("Industry 4.0" OR "Digital Transformation" OR "Digitization")	9	5	5	5	5
" OR "Machine Learning" OR "Artificial intelligence" OR "Data Science" OR "Big Data" OR "Internet of things")	262	176	175	160	149

Fonte: Dos autores, 2023.

Após seleção dos artigos e aplicados os critérios de inclusão (artigo na língua inglesa e revisados por pares) chegou-se ao resultado final (tabela 2).

Tabela 2 – Quantitativo dos resultados nas bases

Base de dados	Dados	Resultados	Resultados (Artigos)	Resultados (Artigos) & (Inglês)	Resultados (Artigos) & (Inglês) & (Revisado por par)
CAPES	18/04/2023	210	161	157	133
SCOPUS	18/04/2023	99	44	37	37
WEB OF SCIENCE	18/04/2023	62	40	40	40
Total		371	245	234	210

Fonte: Dos Autores, 2023.

Do produto de cada uma das bases e utilizando o software Parsifal, foi identificado que 56 artigos estavam presentes em mais de uma das bases, sendo assim duplicados e retirados nessa etapa. A tabela 3 apresenta o resultado após esse procedimento.

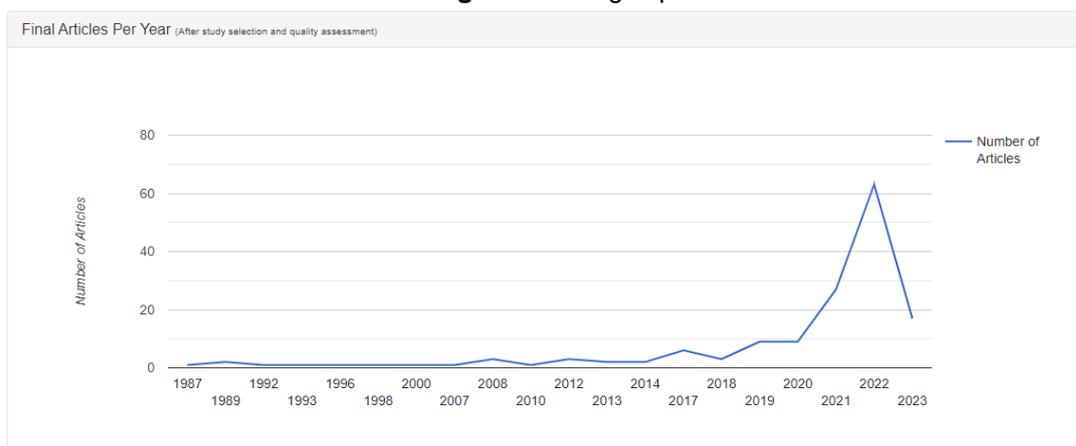
Tabela 3 – Quantitativo dos resultados nas bases após excluir duplicados

Base de dados	Após retirar duplicados
CAPES	107
SCOPUS	30
WEB OF SCIENCE	17
Total	154

Fonte: Dos Autores, 2023.

Nesse passo foi possível observar o crescente número de pesquisas relacionado ao tema, com pico em 2022 (Figura 6).

Figura 6 – Artigos por ano



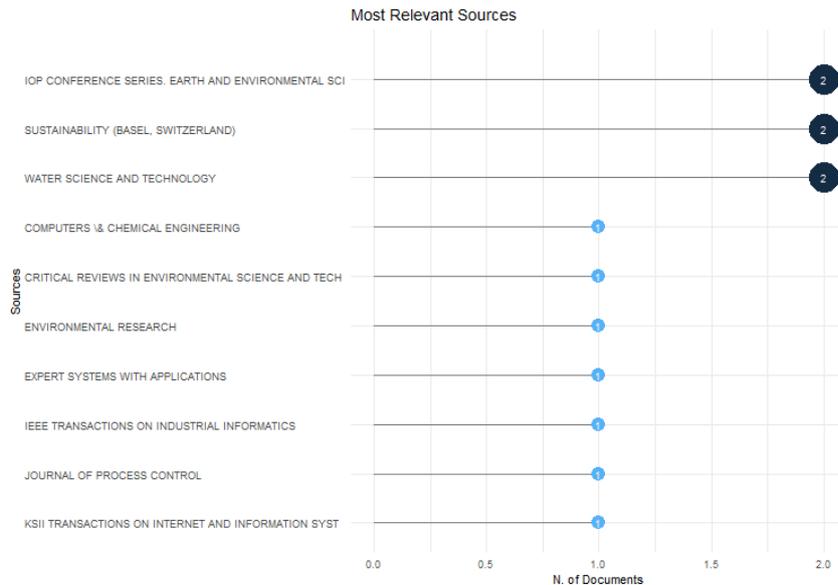
Fonte: Dos autores, 2023.

Outras análises foram realizadas por meio do software VosViewer, e pelo uso da biblioteca Bibliometrix para o RStudio. Na Figura 7 é possível observar que

Nesse passo é possível observar a relação das tecnologias encontradas com algumas análises importantes, como a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e o Nitrogênio associadas à qualidade da água e algoritmos.

Dos periódicos encontrados, três deles aparecem com duas publicações cada, o IOP Conference series Earth and environmental SCI, O Sustainability (Basel Switzerland) e Water Science and Technology (Figura 13).

Figura 13 – Bases mais relevantes dos artigos qualificados



Fonte: Dos Autores, 2023.

Enquanto a nuvem de palavras dos artigos qualificados demonstra maior citação nas pesquisas de tecnologias mais atuais e utilizadas na otimização das Estações, com destaque maior para redes neurais e inteligência artificial, seguido pelos algoritmos genéticos, *machine learning* e *Internet of Things (IoT)* (Figura 14):

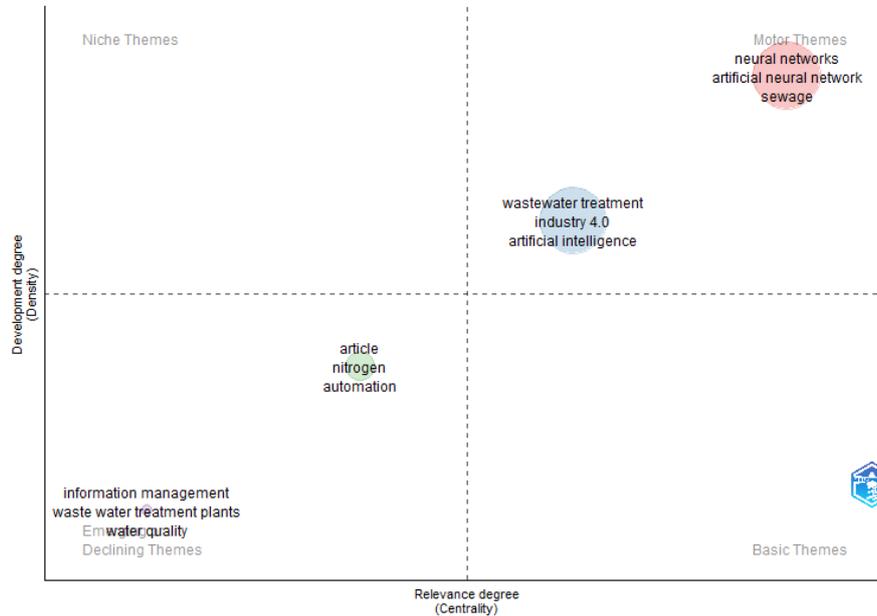
Figura 14 – Nuvem de palavras dos artigos qualificados



Fonte: Dos Autores, 2023.

Alguns grupos de pesquisas convergentes foram observados, sendo um deles relacionado ao esgoto, e à aplicação de redes neurais, enquanto outros deles trazia o termo “tratamento de esgoto” e ao uso de inteligência artificial (Figura 15).

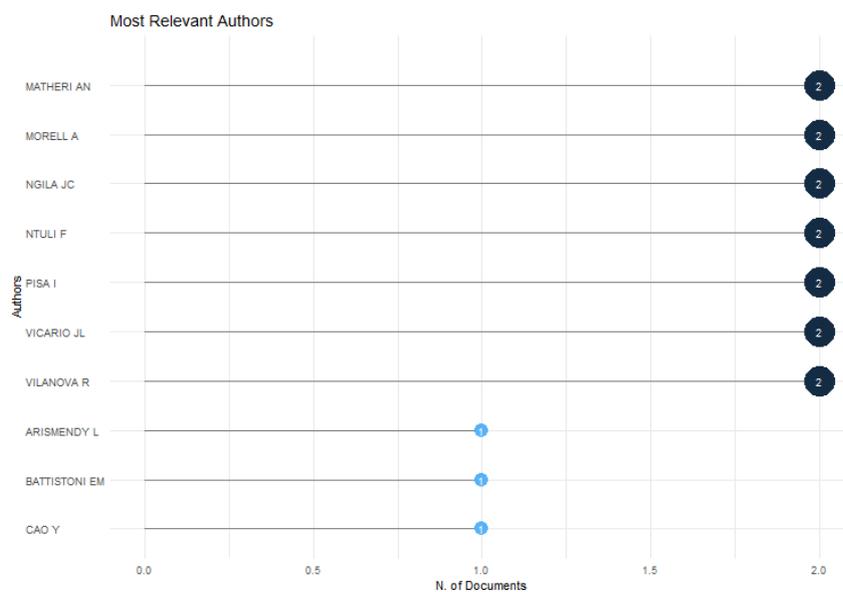
Figura 15 – Cluster de palavras dos artigos qualificados



Fonte: Dos Autores, 2023

Como para os artigos qualificados o número de material é bem menor do que o encontrado nas primeiras etapas, pouco se pode concluir sobre a quantidade de produção por autor, contudo alguns deles, chegam a essa etapa com mais de uma publicação (Figura 16).

Figura 16 – Principais autores dos artigos qualificados



Fonte: Dos Autores, 2023.

Para os artigos qualificados iniciou-se, assim, uma análise sobre seu conteúdo, pontos em comum e diferenças sobre o conteúdo da pesquisa, dos modelos e tecnologias utilizadas, no quadro 6 tem-se os 16 artigos selecionados.

Quadro 6 – Artigo após qualificação

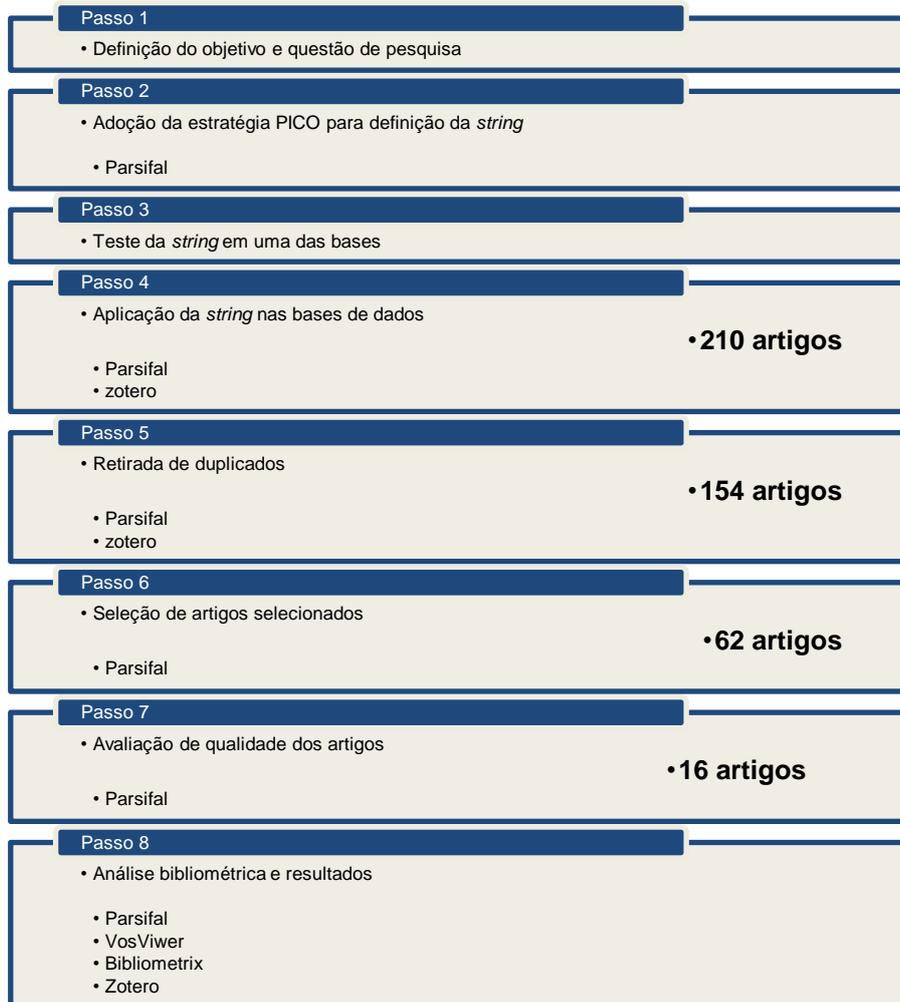
AU	TI	PY
SINGH G;JOSHI P;RAGHUVANSHI AS	A NOVEL DUTY CYCLE BASED CROSS LAYER MODEL FOR ENERGY EFFICIENT ROUTING IN IWSN BASED IOT APPLICATION	2022
ARISMENDY L;CÁRDENAS C;GÓMEZ D;MATURANA A;MEJÍA R;QUINTERO M. CG	A PRESCRIPTIVE INTELLIGENT SYSTEM FOR AN INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT PROCESS: ANALYZING PH AS A FIRST APPROACH	2021
SHEN Y;LI H;ZHANG B;CAO Y;GUO Z;GAO X;CHEN Y	AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK-BASED DATA FILLING APPROACH FOR SMART OPERATION OF DIGITAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS	2023
HERNANDEZ-DEL-OLMO F;LLANES FH;GAUDIOSO	AN EMERGENT APPROACH FOR THE CONTROL OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS BY MEANS OF REINFORCEMENT LEARNING TECHNIQUES	2012
LI F;VANROLLEGHEM PA	AN INFLUENT GENERATOR FOR WRRF DESIGN AND OPERATION BASED ON A RECURRENT NEURAL NETWORK WITH MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION USING A GENETIC ALGORITHM	2022
HEO S;NAM K;LOY-BENITEZ J;YOO C	DATA-DRIVEN HYBRID MODEL FOR FORECASTING WASTEWATER INFLUENT LOADS BASED ON MULTIMODAL AND ENSEMBLE DEEP LEARNING	2021
PISA I;MORELL A;VICARIO JL;VILANOVA R	DENOISING AUTOENCODERS AND LSTM-BASED ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS DATA PROCESSING FOR ITS APPLICATION TO INTERNAL MODEL CONTROL IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS—THE WASTEWATER TREATMENT PLANT CONTROL CASE	2020
VIET ND;JANG D;YOON Y;JANG A	ENHANCEMENT OF MEMBRANE SYSTEM PERFORMANCE USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE WATER AND WASTEWATER TREATMENT: A CRITICAL REVIEW	2022
MATHERI AN;NTULI F;NGILA JC;SEODIGENG T;ZVINOWANDA C	PERFORMANCE PREDICTION OF TRACE METALS AND COD IN WASTEWATER TREATMENT USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK	2021
PADHMA PRIYA P;JENIT A;PEARLIN D DJ;SHARMA NK	PREDICTIVE BIODEGRADATION OF MULTIPLE TOXIC POLLUTANTS IN BIOREACTORS TREATING REAL WASTEWATER USING ANN AND GP	2023
HAO X;LI B	RESEARCH ON INTELLIGENT SYSTEM ARCHITECTURE OF URBAN DOMESTIC SEWAGE TREATMENT	2020
SHARMA N;CHANDRASEKAR S;SUNDAR K	SUITABILITY OF ANN AND GP FOR PREDICTING SOAK PIT TANK EFFICIENCY UNDER LIMITED DATA CONDITIONS	2018
MATHERI AN;MOHAMED B;NTULI F;NABADDA E;NGILA JC	SUSTAINABLE CIRCULARITY AND INTELLIGENT DATA-DRIVEN OPERATIONS AND CONTROL OF THE WASTEWATER TREATMENT PLANT	2022
PISA I;MORELL A;VICARIO JL;VILANOVA R	TRANSFER LEARNING IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS CONTROL: MEASURING THE TRANSFER SUITABILITY	2023
NARDELLI P;GATTI G;CECCHI F;BATTISTONI EM	UPGRADING SMALL WWTPS IN THE AUTONOMOUS PROVINCE OF TRENTO (ITALY) BY ALTERNATING OXIC/ANOXIC PROCESS: A DEMONSTRATION STUDY	2008
PANDEY S;T WALA B;SINGH R;GEHLOT A;SINGH A;MONTERO EC;PRIYADARSHI N	WASTEWATER TREATMENT WITH TECHNICAL INTERVENTION INCLINATION TOWARDS SMART CITIES	2022

Fonte: Dos autores, 2023.

Um ponto observado que há apenas um artigo de 2012 e outros artigos somente após 2018, sugerindo que o tema apresentou maior relevância a partir desta data.

Na Figura 17, é possível observar o mesmo passo a passo metodológico apresentado na seção de materiais e métodos, porém agora mostrando os resultados obtidos em cada uma das etapas e as ferramentas utilizadas: O primeiro produto obtido da *string* trouxe um total 210 artigos que após a retirada dos artigos duplicados resulta em 154 artigos. Após a seleção de artigos em critérios pré-estabelecido chega-se ao total de 62 publicações, agora já bem mais aderentes ao objetivo do estudo. Por fim a análise de qualidade refina esse material a um total de 16 publicações, agora trazendo modelagens utilizadas em Estações de Tratamento de Esgoto, com métricas e objetivos semelhantes.

Figura 17 – Procedimento metodológico adotado com resultados



Fonte: Dos autores, 2023.

A partir destes 16 artigos foi feita uma leitura com a finalidade de identificar as tecnologias utilizadas e uma matriz foi criada (quadro 7).

Quadro 7 – Relação dos modelos utilizados

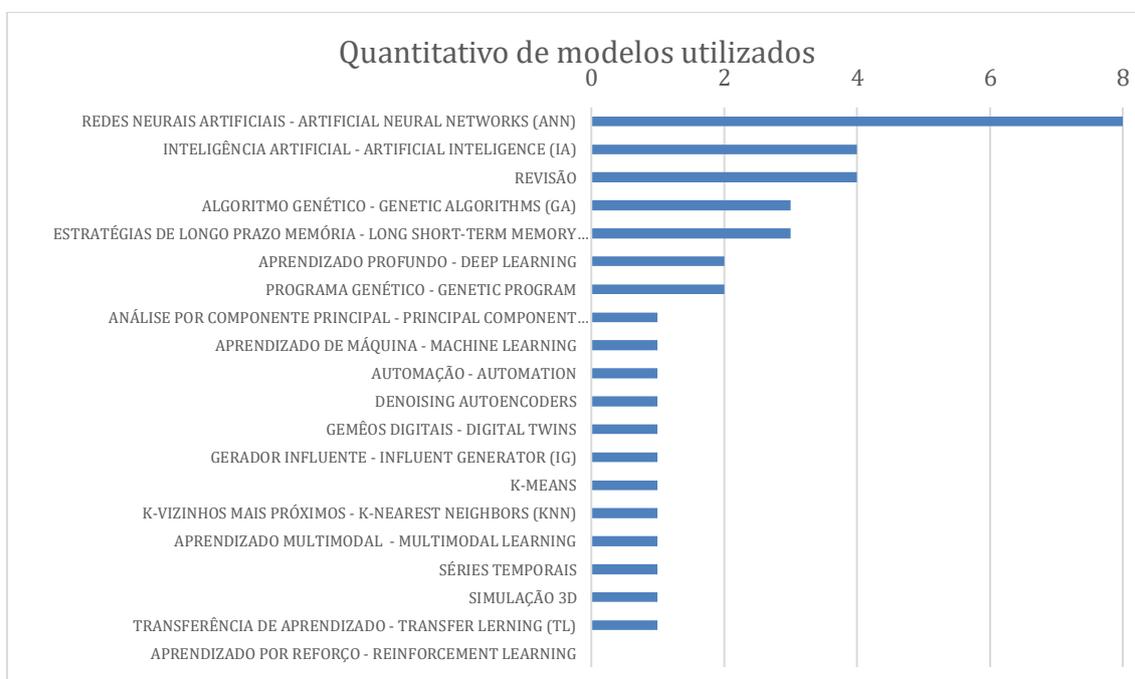
	Modelo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Autor		ALGORITMO GENÉTICO - GENÉTICA LÓGICA (GA)	ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS - PRINCIPAIS COMPONENTES ANALISIS (PCA)	APRENDIZADO DE MÁQUINA - MACHINE LEARNING	APRENDIZADO POR REFORÇO - REINFORCEMENT LEARNING	APRENDIZADO PROFUNDO - DEEP LEARNING	AUTOMAÇÃO - AUTOMATION	DENOISNG AUTOCODERS	ESTRATÉGIAS DE LONGO PRAZO MEMÓRIA - LONG SHORT-TERM MEMORY (LSTM)	GÊMEOS DIGITAIS - DIGITAL TWINS	GERADOR INFLUENTE - INFLUENT GENERATOR (IG)	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL - ARTIFICIAL INTELLIGENCE (IA)	K-MEANS	K-VIZINHOS MAIS PRÓXIMOS - K-NEAREST NEIGHBORS (KNN)	APRENDIZADO MULTIMODAL - MULTIMODAL LEARNING	PROGRAMA GENÉTICO - GENÉTICO PROGRAM	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS - ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS (ANN)	SÉRIE TEMPORAIS	SIMULAÇÃO 3D	TRANSFERÊNCIA DE APRENDIZADO - TRANSFER LEARNING (TL)	REVISÃO
A	SINGH G; JOSHI P; RAGHUVANSHI AS												X								
B	ARISMENDY L; CÁRDENAS C; GÓMEZ D; MATORANA A; MEJÍA R; QUINTERO M. CG	X		X					X								X				
C	SHEN Y; LI H; ZHANG B; CAO Y; GUO Z; GAO X; CHEN Y													X			X				
D	HERNANDEZ-DEL-OLMO F; LLANES FH; GAUDIOSO					X						X									
E	LI F; VANROLLEGHEM PA	X							X		X						X	X			
F	HEO S; NAM K; LOY-BENITEZ J; YOO C					X									X						
G	PISA I; MORELL A; VICARIO JL; VILANOVA R		X					X	X								X				
H	VIET ND; JANG D; YOON Y; JANG A											X									X
I	MATHERI AN; NTULI F; NGILA JC; SEODIGENG T; ZVINOWANDA C																				X
J	PADHMA PRIYA P; JENIT A; PEARLIN D DJ; SHARMA NK	X										X				X	X				
K	HAO X; LI B									X									X		X
L	SHARMA N; CHANDRASEKAR S; SUNDAR K															X	X				

M	MATHERI AN;MOHAMED B;NTULI F;NABADDA E;INGILA JC																			X	
N	PISA I;MORELL A;VICARIO JL;VILANOVA R														X					X	
O	NARDELLI P;GATTI G;CECCHI F;BATTISTONI EM					X															
P	PANDEY S;TWALA B;SINGH R;GEHLOT A;SINGH A;MONTERO EC;PRIYADARSHI N																			X	
	Total	3	1	1	0	2	1	1	3	1	1	3	1	1	1	2	7	1	1	1	4

Fonte: Dos autores, 2023.

A Figura 18 traz uma síntese das tecnologias abordadas nos artigos, com as redes neurais artificiais como a mais utilizada, em sequência o uso de inteligência artificial e algoritmos genéticos.

Figura 18 – Quantitativo dos modelos utilizados



Fonte: Dos autores, 2023.

Como observado, as redes neurais artificiais é a abordagem mais encontrada nos artigos selecionados. Uma leitura rápida dos artigos que usam a tecnologia de redes neurais foi identificada que a técnica em comum entre os autores, o LSTM. Enquanto as aplicações, incluem principalmente a predição de variáveis importantes para determinação da eficiência da estação, como a DQO. Já as métricas utilizadas também apresentam concordância entre as publicações, com o MAPE, MAE e RMSE sendo utilizados para verificar a qualidade da modelagem utilizada e determinação do erro entre o valor predito e esperado.

6 Considerações finais

O setor de saneamento no Brasil tem grande desafio pela frente com o novo marco legal do saneamento. E a transformação digital e a digitalização sugerem aumento de eficiência e volume do serviço prestado à população. Portanto conhecer as possíveis tecnologias utilizadas no tratamento de esgoto é necessário. Este artigo apresenta as pesquisas que usaram tecnologias digitais aplicadas ao tratamento de esgoto, como as redes neurais artificiais e inteligência artificial e a possibilidade de aplicação no tratamento de esgoto brasileiro.

Para a estratégia mais utilizada, redes neurais, uma quantidade significativa dos autores utiliza vertentes em comum da mesma, como o *Long Short-Term Memory* (LSTM). A métrica mais encontrada foi a raiz do erro quadrado médio (RMSE), porém outras também foram vistas em mais de uma publicação, como o erro médio absoluto (MAE), o erro percentual médio absoluto (MAPE), a precisão (AR), além do coeficiente de determinação (R^2). Muitos deles também utilizam o conceito de benchmarking em modelagem, que é a aplicação de mais de um tipo de modelo afim de verificar a acurácia desses justamente comparando as métricas utilizadas em diferentes modelos. As aplicações incluem principalmente a modelagem da análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO), utilizada para determinar a eficiência do processo de tratamento, a fim de poder predizê-la.

Para trabalhos futuros, uma revisão sistemática da literatura, leitura e síntese dos artigos obtidos na etapa final deste trabalho podem dar um norte das principais respostas ou “dores do usuário” a serem respondidas pelas modelagens utilizadas.

Referências

ARISMENDY, L.; CÁRDENAS, C.; GOMES, D.; MATURANA, A.; MEJÍA, R.; QUINTERO, C. G. **A Prescriptive Intelligent System for an Industrial Wastewater Treatment Process: Analyzing pH as a First Approach.** *Sustainability (Basel, Switzerland)*, v. 13, n. 8, p. 4311, 2021.

FERREIRA, D.; CORAIOLA, M. **EFICIÊNCIA DO LODO ATIVADO EM FLUXO CONTÍNUO PARA TRATAMENTO DE ESGOTO.** *Revista acadêmica: ciências agrárias e ambientais*, v. 6, n. 2, p. 259, 2008.

DÍAZ, R. R. L.; NUNES, L. R. **A evolução do saneamento básico na história e o debate de sua privatização no Brasil.** *Revista de Direito da FACULDADE GUANAMBI*, v. 7, n. 02, 2020, p. 1-23.

EBERT, C.; DUARTE, C. H. C. **Digital Transformation.** *IEEE software*, v. 35, n. 4, p. 16–21, 2018.

GEERDINK, R. B.; SEBASTIAAN VAN DEN HURK, R.; EPEMA, O. J. **Chemical oxygen demand: Historical perspectives and future challenges.** *Analytica chimica acta*, v. 961, p. 1–11, 2017.

HAN, H.; QIAO, J. **Nonlinear Model-Predictive Control for Industrial Processes: An Application to Wastewater Treatment Process.** *IEEE transactions on industrial electronics (1982)*, v. 61, n. 4, p. 1970–1982, 2014.

LI, F.; VANROLLEGHEM, P. A. **An influent generator for WRRF design and operation based on recurrent neural network with multi-objective optimization using a genetic algorithm.** *WaterScience and Technology*IWA Publishing, 2022.

MARTINEZ, E. M. et al. **Automation Pyramid as Constructor for a Complete Digital Twin, Case Study:A Didactic Manufacturing System.** *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 21, n. 14, p. 4656, 2021.

MATT, C.; HESS, T.; BENLIAN, A. **Digital Transformation Strategies.** *Business & information systems engineering*, v. 57, n. 5, p. 339–343, 2015.

MEHTA, B. R.; REDDY, Y. J. **Industrial Process Automation Systems - Design and Implementation.** *Oxford: Elsevier*, 2014.

PADHMA PRIYA P; JENIT A; PEARLIN D DJ; SHARMA NK. **Predictive Biodegradation of Multiple Toxic Pollutants in Bioreactors Treating Real Wastewater using ANN and GP.** *IOP conference series. Earth and environmental science*, v.1130, n. 1, p. 12040, 2023.

PADMANABHAN, T. R. **Industrial Instrumentation: Principles and Design.** *London: Springer London Limited*, 2012.

PAULUCCI, A.; RUBIM, L. FIAP - **Nano courses. Big Data & Analytics.** Disponível em: <https://on.fiap.com.br/local/nanocourses/index.php> Acesso em: 27 jun. 2022

PERES, J. et al. **Modelagem matemática para sistema de tratamento de esgoto doméstico com remoção simultânea de matéria orgânica e nitrogênio.** *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 26, n. 4, p. 765–773, 2021.

PESTANA, A. A.; HIRATA, A. Y.; OGAWA, F. I.; COSTA, R. A.; PALADINO, R.; **Automação dos painéis elétricos dos sopradores de ar dos tanques de aeração de estação de tratamento de esgotos, tendo como objetivo melhoria no controle de oxigênio dissolvido desses tanques e eficiência energética do equipamento.** 29º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. 2018

PISA, I. et al. **Transfer Learning in wastewater treatment plants control: Measuring the transfer suitability.** *Journal of process control*, v. 124, p. 36–53, 2023.

PHILIPP, M. C.; MAIOLA, M. R. A.; LEMANSKI, S. R. **HISTÓRICO DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL E PERSPECTIVAS FUTURAS.** *Rev. Terra & Cult, Londrina*, v. 38, n. especial, 2022

RESOLUÇÃO Nº 430, DE 13 DE MAIO DE 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005**, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627. Acesso em: 12 ago. 2023.

SAUL, C.; GEBAUER, H. **Digital Transformation as an Enabler for Advanced Services in the Sanitation Sector.** *Sustainability (Basel, Switzerland)*, v. 10, n. 3, p. 752, 2018.

SHARMA, N.; CHANDRASEKAR, S.; SUNDAR, K. **Suitability of ANN and GP for Predicting Soak Pit Tank Efficiency under Limited Data Conditions.** *MATEC Web of Conferences*, v. 203, p. 3001, 2018.

SHEN, Y. et al. **An artificial neural network-based data filling approach for smart operation of digital wastewater treatment plants.** *Environmental research*, v. 224, p. 115549–115549, 2023.

VAN HOUDT, G.; MOSQUERA, C.; NÁPOLES, G. **A review on the long short-term memory model.** *The Artificial intelligence review*, v. 53, n. 8, p. 5929–5955, 2020.

VIAL, G. **Understanding digital transformation: A review and a research agenda.** *The journal of strategic information systems*, v. 28, n. 2, p. 118–144, 2019.