

Captura da realidade e modelação estatística para gestão digital dos ativos de água: estudo de caso de infraestrutura hidráulica no Brasil

Reality capture and statistical modelling for digital water asset management: case study of hydraulic infrastructure in Brazil

[10.29073/rae.v2i2.937](https://doi.org/10.29073/rae.v2i2.937)

Recebido: 31 de julho de 2024.

Aprovado: 10 de setembro de 2024.

Publicado: 20 de setembro de 2024.

Autor/a 1: Wagner de Carvalho , Aegea Saneamento e Participações, S.A. Gerência de Engenharia; Instituto Superior Técnico, Portugal, wagner.carvalho@tecnico.ulisboa.pt.

Autor/a 2: Marta Gomes , Instituto Superior Técnico, Portugal, marta.gomes@tecnico.ulisboa.pt.

Autor/a 3: Rui Marques , Universidade Lusófona, Portugal, rui.marques@ulusofona.pt.

Resumo

A prestação de serviços de abastecimento de água continua a ser um desafio global significativo, com cerca de 2 bilhões de pessoas sem acesso à água potável (UNICEF/WHO, 2023). Além disso, o setor de distribuição de água enfrenta perdas financeiras substanciais, estimadas em 14 bilhões de dólares anuais devido aos altos índices de desperdício de água durante a distribuição (World Bank Group, 2022). Nos países em desenvolvimento, a média de perda de água é de 35%, chegando a 70% em algumas regiões, enquanto nos países desenvolvidos o índice médio atinge 15%.

A transformação digital promovida pela Indústria 4.0 tem potencial para aumentar a eficiência das entidades prestadoras de serviços de água. O programa Digital Water, lançado pela International Water Association (IWA, 2022), exemplifica como a digitalização pode melhorar a eficiência operacional e a gestão dos recursos hídricos. Neste contexto os ativos do setor de abastecimento de água têm grande potencial de aumento de desempenho, porém um dos maiores desafios é aumentar a qualidade da base informacional que frequentemente é caracterizada por dados incompletos, desatualizados e com baixa confiabilidade.

O estudo apresentado neste artigo analisa quali e quantitativamente a metodologia da captura de realidade dos ativos (Niles et al., 2022) e a base dos dados de uma concessionária de água do Brasil. Empregou-se modelações estatísticas uni e bivariadas com o uso do software IBM SPSS (Cronk, 2018) para analisar 2.584 ativos pertencentes a 106 reservatórios (entidades) de 19 municípios, caracterizados em 2 variáveis de contexto e 26 variáveis métricas.

Na aplicação da modelação estatística dos dados confirmaram a insuficiência informacional dos ativos físicos do setor de água, além de apresentar as medidas descritivas da quantidade e condição dos ativos na planta por meio de representações gráficas, incluindo histogramas e gráficos de barras.

O resultado das análises bivariadas gerou insights relevantes para a gestão de ativos de água ao demonstrar correlações significativas entre algumas variáveis derivadas das categorias, atributos, condição e de contexto dos ativos físicos. Como exemplo destaca-se a identificação da concentração de alguns reservatórios deficientes em regiões do Rio de Janeiro (alta densidade populacional e IDHM elevado) e esta indicação irá orientar a tomada de decisão da empresa para priorizar os investimentos nestes ativos.

Palavras-Chave: Captura da Realidade; Digitalização; Modelação Estatística Uni e Bivariadas; Prestação de Serviços de Água; Sistema de Gestão de Ativos.

Abstract

The provision of water supply services continues to be a significant global challenge, with approximately 2 billion people lacking access to safe drinking water (UNICEF/WHO, 2023). Additionally, the water distribution sector faces substantial financial losses, estimated at \$14 billion annually due to high levels of water loss in the distribution system (World Bank Group, 2022). In developing countries, the average water loss is 35%, reaching up to 70% in some regions, while in developed countries, this average is 15%.

The digital transformation promoted by Industry 4.0 has the potential to increase the efficiency of water service providers. The Digital Water program, launched by the International Water Association (IWA, 2022), exemplifies how digitalization can improve operational efficiency and water resource management. Asset management in the water supply sector needs to advance, particularly in the quality of the informational base, often characterized by low-reliability data.

The study presented in this paper analyzes the methodology of asset reality capture (Niles et al., 2022) and the data base of a water utility in Brazil. Uni and bivariate statistical models were used at the IBM SPSS software (Cronk, 2018) to analyze 2,584 assets belonging to 106 reservoirs (entities) municipalities, characterized in 2 context variables and 26 metric variables.

In the application of statistical modeling of data confirmed the informational insufficiency of physical assets of the water sector, and to present the descriptive measures of the quantity and condition of the assets in the plant by means of graphical representations, including histograms and bar graphs.

The results of bivariate analyses generated relevant insights for water asset management by demonstrating significant correlations between some variables derived from the categories, attributes, condition and context of the physical assets. As an example, the identification of the concentration of some deficient reservoirs in regions of Rio de Janeiro (high population density and high MHD) is highlighted and this indication will guide the decision of the company to prioritize investments in these assets.

Keywords: Asset Management System; Digitalization; Reality Capture; Uni and Bivariate Statistical Models; Water Supply Services.

Lista de Siglas

- AAS — Asset Administration Shell (Concha de Administração de Ativos)
- ACP — Análise de Componentes Principais (Principal Components Analysis)
- AIO — Asset-Intensive Organizations (Organizações Gestoras Intensivas de Ativos)
- AIR — Asset Information Requirement (Requisitos de Informação dos Ativos)
- AIV — Asset Identification and Verification (Identificação e Verificação dos Ativos)
- BIM — Building Information Modeling (Modelagem da Informação na Construção)
- ETR — Estação Elevatória de Água Tratada e Reservação
- GAI — Gestão de Ativos de Infraestrutura
- OIR — Organization Information Requirement (Requisitos de Informação da Organização)
- IAM — Institute of Asset Management (Instituto de Gestão de Ativos)
- IDHM — Índice de Desenvolvimento Humano Médio
- IQ — Information Quality (Qualidade da Informação)
- IWA — International Water Association
- SGA — Sistema de Gestão de Ativos

1. Introdução

É cada vez mais requisitado das organizações abordagens multidisciplinares e proativas na gestão dos seus ativos construídos, principalmente das infraestruturas críticas que servem as comunidades e ao funcionamento da sociedade. É o caso das entidades prestadoras de serviços de água que gerenciam sistemas com dezenas de

milhares de ativos de infraestruturas e que envolvem grandes quantidades de recursos na sua criação, operação, renovação e adaptação rápida a situações imprevistas (Almeida, 2023).

A gestão de ativos (área de conhecimento reconhecida internacionalmente) orienta a coordenação das atividades financeira, de operação, de manutenção, de gestão do risco e outras que estejam relacionadas aos ativos, para que a organização produza mais valor a partir deles. As normas da família ISO 55000, lançada mundialmente no ano de 2014, conta hoje com mais de 50 países membros e cresce estabelecendo boas práticas de Gestão de Ativos. Diversos setores de utilização intensiva dos mesmos, denominados como *Asset-Intensive Organizations* (AIO), seguem aderindo a estas práticas e melhorando seus resultados operacionais, sejam estas entidades públicas ou privadas (ISO Technical Committee 251, 2024).

Os serviços urbanos de água gerem infraestruturas críticas que são de elevado interesse público, no qual seu valor social supera significativamente seu valor económico. Por isso há uma preocupação dos organismos internacionais em promover maior eficácia na gestão e de apoiar a regulação nesse setor (Marques, 2005) (World Bank Group, 2022). O cenário contemporâneo ainda é mais desafiador ao somar os fatores conflitantes de crescimento urbano, limitação dos recursos naturais e mudanças climáticas, tornando ainda mais complexo assegurar a resiliência do sistema, promover a sustentabilidade dos serviços e adotar princípios da economia circular.

A prestação dos serviços de abastecimento de água e coleta de águas residuais requer a gestão de uma complexa malha de infraestrutura com centenas de ativos físicos espacializados no ambiente urbano, hierarquizados em redes (ativos lineares: redes de distribuição de água, rede coletora de esgotos, etc.) e decompostos por elementos localizados (ativos verticais: estações de tratamento de água, estações elevatórias de esgotos, etc.) com suas relações sistêmicas (Alegre et al., 2014) (Silva, 2023).

A forma como uma organização gerencia seus ativos determina seu sucesso no endereçamento dos desafios da prestação dos serviços de água (Asian Development Bank, 2013). Neste contexto algumas ações são essenciais na gestão destas infraestruturas:

- Rastreabilidade dos ativos;
- Otimização do uso dos ativos em todo seu ciclo de vida;
- Aumento da disponibilidade dos ativos;
- Redução dos custos em reparos e aumento de produtividade;
- Melhoria do planejamento das ações sob os ativos;
- Qualidade dos serviços prestados aos clientes;
- Segurança e conformidade com as regulamentações.

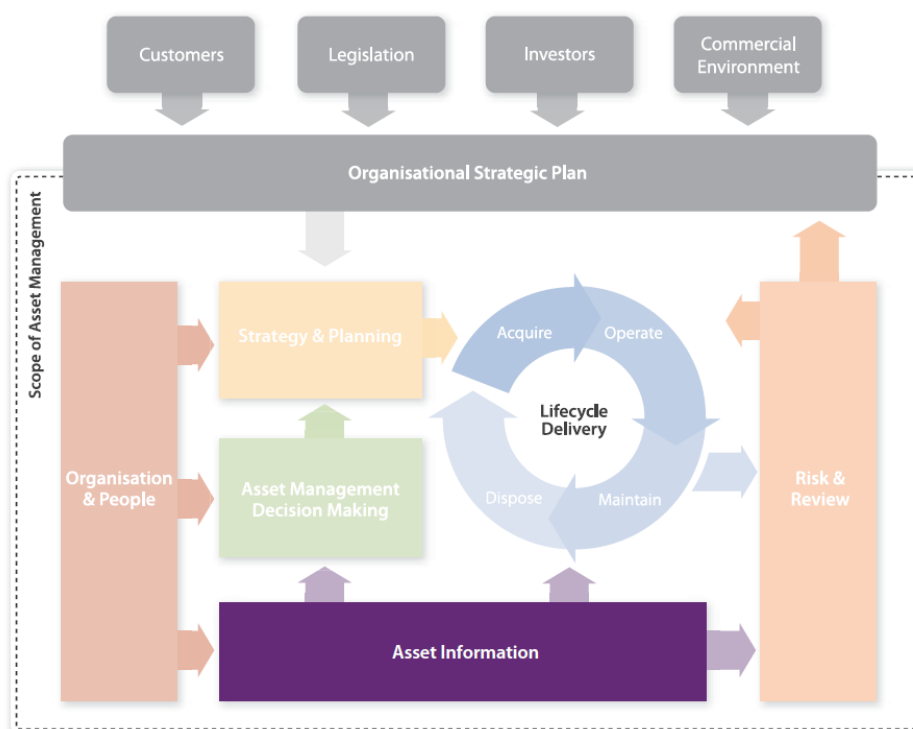
Este trabalho motiva-se no potencial da digitalização dos ativos para aumentar a eficiência operacional da “indústria” de prestação de serviços de água no Brasil. Apesar da relevância mundial do país em disponibilidade de recursos hídricos, a realidade é que cerca de 32 milhões de brasileiros ainda não têm acesso à água potável (aproximadamente 14 % da população), conflitando com a baixa eficiência do setor que registra perdas de mais de 1 litro de água para cada 3 litros produzidos para o sistema de abastecimento, ou seja, índice de 37,78 % de perdas que coloca o país na posição 78 do ranking de 139 nações analisadas (SNIS/Trata-Brasil, 2024).

A baixa eficiência operacional dos sistemas de abastecimento de água no país fica evidenciada pelo elevado índice de perdas na distribuição, somada à dificuldade de garantir a regularidade 24/7 para a população urbana ao longo do ano. As entidades de água não enfrentam concorrência de mercado pois estes serviços de utilidade pública são enquadrados como monopólio natural, porém a regulação do setor tem se fortalecido e exigido padrões mais elevados de qualidade e disponibilidade, ao passo que a escassez hídrica tem sido agravada, nos últimos anos, devido principalmente ao desmatamento, às mudanças nos ciclos pluviométricos e ao aumento da temperatura em muitas regiões do Brasil.

Os processos estruturados de digitalização podem aumentar a confiabilidade e a qualidade do pilar informacional da gestão dos ativos, e com o objetivo de confirmar este potencial, foi selecionada uma amostra de dados dos ativos físicos de uma entidade de água do Brasil para aplicação de métodos avançados de modelação estatística. Os dados foram coletados através da aplicação de tecnologias digitais inovadoras de captura da realidade no campo, ou seja, a organização investiu na base física da operação para gerar uma representação mais fiel das condições reais e ampliar o conhecimento sobre as instalações (Niles et al., 2022).

O modelo conceitual do *Institute of Asset Management* (IAM, 2015), apresentado na **Figura 1**, é a base do Sistema de Gestão de Ativos (SGA) pois agrupam as 39 atividades em 6 grupos de assuntos e ilustra graficamente as suas relações (estratégia e planejamento, tomada de decisão, ciclo de vida, informação do ativo, organização e pessoas, e risco). As organizações engajadas em gestão de ativos dependem de dados e informações estruturadas para gerenciar suas atividades, assim o grupo de informação do ativo (Asset Information) está na base do diagrama para “alimentar” outros grupos, seguindo os requisitos de dados e as atividades prioritárias que agregam mais benefícios. No entanto, é comum que as entidades não tenham informações suficientes em termos de qualidade e quantidade, e a baixa confiabilidade informacional aumentam as incertezas nos grupos do SGA, destacando o impacto no processo de tomada de decisão.

Figura 1: Modelo Conceitual de Gestão de Ativos do IAM.



Fonte: @Copyright 2014 Institute of Asset Management (www.theIAM.org/copyright) (IAM, 2015).

A maior compreensão e maturidade das organizações na disciplina da gestão de ativos estão elevando a importância e a relevância do conhecimento de cada ativo físico que compõe os sistemas que operam. Porém o cenário ainda é muito desafiador para aumentar a fiabilidade da base informacional dos ativos físicos, e de acordo com o relatório da organização *Reliability Leadership Foundation* - líder mundial em confiabilidade na gestão dos ativos - a média atual de conhecimento dos mesmos por parte dos operadores é de apenas 50% e raramente ultrapassa 70% (Terrence O’Hanlon & Ramesh Gulati, 2020).

2. Revisão da Literatura

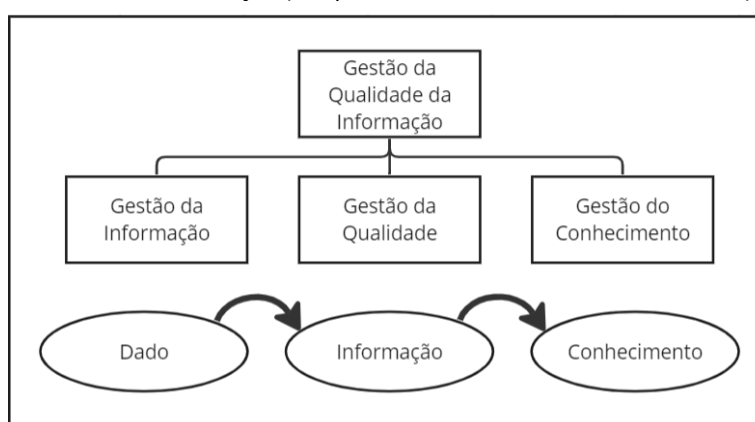
O estudo de Grosch & Bilot (2002) realizado no início do século para os sistemas de água, já apontava o potencial de transformação da era digital nas organizações diante do desafio de adaptação ao atendimento das demandas esperadas, face a grande velocidade na mudança das condições do meio e dos ativos operacionais. A

abordagem denominada “*digital nervous system*” buscava atingir alta eficiência nos processos de gestão das estações de água e águas residuais, para isso tecnologias integravam os sistemas de coleta, gestão, estruturação e disseminação da informação através da organização.

Segundo Helfert & Ge (2007) inúmeras perdas e falhas na gestão dos negócios são causadas por problemas na baixa Qualidade da Informação, ou *Information Quality* (IQ). Nesta pesquisa de estado da arte a IQ é definida como a capacidade da informação de atender às necessidades dos usuários e às especificações dos sistemas. A pesquisa sobre IQ é dividida em três aspectos principais: avaliação de IQ, gestão de IQ e IQ contextual.

O tema do pilar informacional dos ativos físicos foi ganhado relevância na engenharia dos ativos de água e Joe E. Amadi-Echendu et al. (2012) trouxe uma pesquisa do estado da prática em gestão da qualidade da informação (IQ) com algumas organizações. O estudo de benchmarking foi realizado com organizações intensivas em ativos de água do Reino Unido, e revelou desafios nas três áreas de abrangência na gestão da qualidade da informação: gestão da informação, gestão da qualidade e gestão do conhecimento (**Figura 2**).

Figura 2: Gestão da Qualidade da Informação (Adaptado de Joe E. Amadi-Echendu et al. (2012)).



Fonte: Escopo da Pesquisa Científica — Approaches to Information Quality Management: State of the Practice of UK Asset-Intensive Organisations.

O Modelo de Maturidade na Capacidade de Gestão da Qualidade da Informação MMC-QGI (*Information Quality Management Capability Maturity Model*) foi desenvolvido e validado com dez organizações gestoras de ativos de água, assim as organizações foram classificadas segundo a aderência aos fatores críticos de sucesso FCS (*Critical Success Factors*) em níveis de maturidade em gestão da informação: otimização, gestão, medição, reativa e caótica. O resultado da pesquisa é apresentado na

Tabela 1 que referência a primeira coluna com os níveis de maturidade, na segunda linha as organizações analisadas pelas letras de A até J e na terceira linha o atendimento total (F) ou parcial (PF) aos FCS. Na última linha é apresentado o resultado em que nenhuma das entidades gestoras analisadas, na época, atingiu o máximo de maturidade denominado de nível 5 (otimização), sendo 8 organizações enquadradas como nível 2 (reativa) e apenas uma organização alcançou o nível 4 (gestão).



Tabela 1: Nível de maturidade final de cada organização com os valores percentuais de atendimento total (F) e parcial (PF) para cada nível de maturidade (Adaptado de Joe E. Amadi-Echendu et al. (2012)).

Nível de Maturidade	Organizações																	
	A		B		C		D		E		F		G		H		I	
	F	PF	F	PF	F	PF	F	PF	F	PF	F	PF	F	PF	F	PF	F	PF
5 - Otimização	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0
4 - Gestão	0	23	8	62	54	92	0	46	0	46	0	15	15	54	15	46	8	46
3 - Medição	7	33	13	67	73	100	20	47	7	53	0	20	53	87	33	73	7	47
2 - Reativa	100	100	100	100	100	100	93	100	100	100	93	93	93	100	93	100	93	100
1 - Caótica	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Maturidade Final	2		2		4		2		2		2		3		2		2	

O avanço da digitalização nas organizações tem elevado a consciência sobre a necessidade de uma gestão da informação mais qualificada e estruturada. No entanto, além dos investimentos em tecnologias, é imperativo capacitar e qualificar os recursos humanos, bem como desenvolver processos integrados com a gestão de seus ativos informacionais.

Entretanto, qual o esforço e o investimento requerido para coletar informação estruturada dos ativos? Qual o benefício “tangível” da qualidade de informação dos ativos na organização?

Os investimentos em gestão e coleta de dados podem ser muito custosos, e a avaliação dos benefícios gerados não é sempre direta e fácil de se provar. Essencialmente o setor das águas requer a Gestão de Ativos de Infraestrutura (GAI) para a prestação dos serviços à população, e o bom resultado depende da governança e da efetiva utilização de dados para apoiar seus processos.

Rokstad et al. (2016) desenvolveu uma metodologia fundamentada nas ferramentas GAI para quantificar os custos da coleta de dados e os benefícios informacionais proporcionados no setor das águas. Os custos foram contabilizados em horas de trabalho investidas, incluindo custos base (aquisição, configuração e manutenção de ferramentas) e custos de registro de dados (coleta e processamento). Os benefícios são definidos como os resultados informacionais que suportam processos de tomada de decisão na GAI. A análise é consolidada numa planilha estruturada para organizar os dados, calcular os custos e benefícios das combinações de ferramentas e avaliar a relação custo-benefício para diferentes classes de dados.

A aplicação prática dessa metodologia é demonstrada em uma entidade de água na Europa, denominada anonimamente como *Utility X*. A análise de custo-benefício dos dados reais de coleta e utilização informacional revelou oportunidades para maximização os benefícios através das ferramentas de GAI implantados nesta organização. Os resultados foram sintetizados em uma tabela estruturada que destacou as possibilidades de melhoria nos processos de tomada de decisão, alocação de recursos e aumento da eficiência global.

A transformação digital agrega novas dimensões a gestão informacional dos ativos, e particularmente nas inspeções de campo estão sendo aplicados novos processos e tecnologias na coleta de dados, denominadas de captura da realidade (Niles et al., 2022). Neste contexto, a digitalização na indústria 4.0 foi um dos tópicos principais do Congresso Mundial da Engenharia de Gestão de Ativos 16th WCEAM Proceedings (16th World Congress on Engineering Asset Management 2022).

Alonso et al. (2022) estudou várias abordagens de digitalização de ativos (BIM, AIM, AAS e diferentes Digital Twin) revelando a complexidade do desafio atual da Indústria 4.0 e os potenciais benefícios das novas abordagens, desde que sejam adequadamente selecionadas num processo estruturado de gestão de ativos na organização.

A investigação revelou baixa aderência na aplicação das novas tendências, como Digital Twin, na gestão da manutenção dos ativos. Estes profissionais tomam complexas decisões (planejamento e execução da

manutenção) todos os dias e continuam utilizando métodos tradicionais, pois ainda possuem baixa confiança nos resultados das tecnologias (Alonso et al., 2022).

A digitalização está remodelando a natureza dos ativos, porém há necessidade de desenvolver métodos e estratégias para padronização da modelação de ativos em cada indústria e/ou setor. O modelo de gestão deve considerar dados estruturados dos ativos numa arquitetura que facilite o desenvolvimento e a utilização de soluções de digitalização mais sofisticadas (Alonso et al., 2022).

A recente ISO/FDIS 55013 (2024) fornece orientações sobre a gestão de dados no contexto da gestão de ativos, aplicando os princípios e requisitos descritos nas normas ISO 55000 e ISO 55001. Seu principal objetivo é ajudar as organizações a gerenciarem seus dados de maneira eficaz para apoiar a tomada de decisões informadas e atingir os objetivos de gestão de ativos e, consequentemente, os objetivos organizacionais. O contributo mais relevante desta nova norma é abordar a gestão de dados como um ativo da organização, oferecendo diretrizes para a coleta, análise, armazenamento, proteção e utilização de dados, garantindo sua confiabilidade, rastreabilidade e alinhamento com os seus objetivos estratégicos (Figura 3).

Figura 3: Mandala de Gestão de Ativos (Adaptada para ISO/FDIS 55013 (2024)).



3. Metodologia

A metodologia aplicada neste trabalho envolveu modelação estatística avançada numa amostra da base de dados de ativos físicos de uma entidade prestadora de serviços de água no Brasil. A origem dos dados é da coleta digital aplicando processo estruturado de identificação e verificação de ativos, denominada pela organização como AIV (*Asset Identification and Verification*) (Carvalho, 2021), e tecnologias avançadas de captura de realidade (Niles et al., 2022).

A modelação estatística procurou caracterizar aspectos quantitativos e qualitativos das informações coletadas na amostra em relação às informações requeridas no modelo de dados da organização OIR (Organization Information Requirements) (ISO/FDIS 55013, 2024).

O modelo de informações dos ativos da organização prestadora de serviços de água estudada é apresentado na Figura 4, e fundamenta-se nas seguintes dimensões:

- **Ativos Físicos:** classifica a tipologia específica (mais de 300 tipos distintos) e quantifica na categoria da disciplina do ativo físico em mecânico, motor, elétrico, civil ou instrumentação (NAX = Quantidade de Ativos);

- **Atributos:** os requisitos de informação dos ativos variam conforme o seu nível hierárquico (Ordem dos níveis estratégicos, táticos e operacionais da organização são Município, Sistema, Planta, Área, Ativo e Componente). Sendo requerido mais detalhes técnicos para os níveis operacional e tático (DATx = Dados Preenchidos / Total Requerido) e menos detalhes técnicos para o nível estratégico (DAFx = Dados Preenchidos / Fundamental Requerido);
- **Condição:** é a avaliação do estado de conservação para determinar a sua estimativa da vida útil operacional remanescente ou residual do ativo. O resultado é a combinação da inspeção visual realizada individualmente no ativo pelo especialista somados os registros e documentos de gestão disponíveis do mesmo (nota fiscal, histórico de manutenção, entre outros). Conforme a vida útil remanescente o enquadramento da classificação pode ser bom, médio ou deficiente em termos de conservação, e dependendo da criticidade do ativo pode significar uma alta exposição ao risco para a organização, pois a baixa condição de conservação pode indicar uma falha operacional iminente (ACx = % de Vida Útil Operacional Residual).

O estudo também analisou possíveis correlações entre estas variáveis de quantidade, informação (atributos) e condição dos ativos com variáveis de contexto em municípios que possuem diferentes densidades populacionais e características socioeconômicas distintas no Brasil (Figura 5).

Figura 4: Dimensões do Modelo de Informação dos Ativos da Organização (OIR).

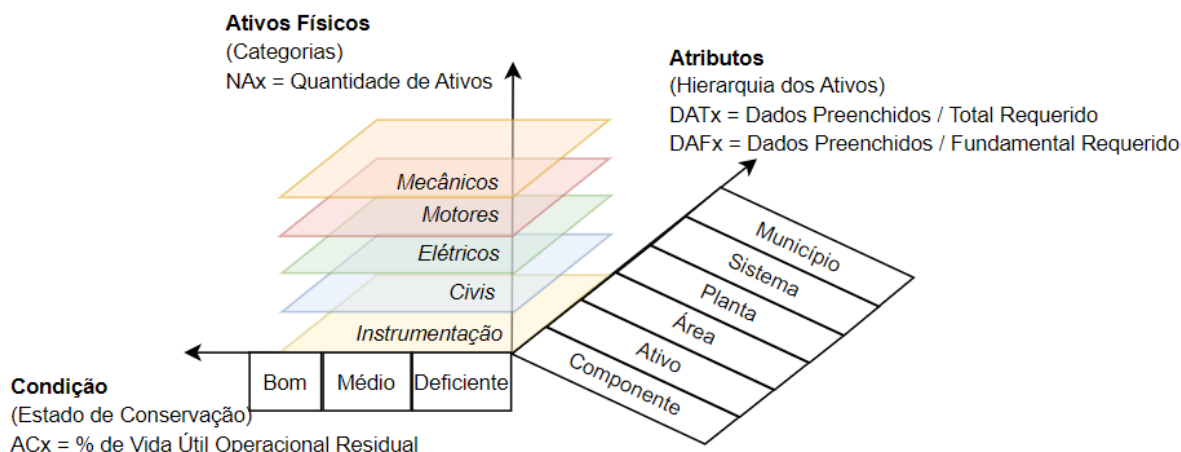


Figura 5: Mapa do Brasil destacando alguns estados onde há ativos operados pela Aegea, 2022.



Foram aplicadas as metodologias estatísticas utilizado o programa SPSS (Statistical Package for Social Sciences), (Cronk, 2018).

4. Análise da Base de Dados

4.1. Análise Qualitativa

A aquisição dos dados é resultado do processo de digitalização para captura da realidade dos ativos de água em campo. Segundo (Carvalho, 2021) o método de coleta de dados foi desenvolvido pelo programa Infra Inteligente e foi denominado como AIV (Asset Identification & Verification), tendo como referências aplicação de tecnologias orientadas pelo BIM (Building Information Modeling) e a gestão de ativos (ISO 55.001, 2014).

Os ativos físicos são identificados e tagueados seguindo o procedimento de classificação na estrutura da árvore hierárquica da organização, do qual o nível mais alto é a própria entidade. Este último representa a esfera mais estratégica do negócio, seguido pelos níveis táticos até os operacionais (equipamentos).

Os profissionais multidisciplinares em campo são equipados de aplicativo customizado com formulário para a classificação das tipologias, categorias e famílias específicos, complementam o processo digitalizando os ativos físicos com tecnologias de captura da realidade: drones, câmeras 360 e GPS de alta precisão (Niles et al., 2022). As imagens de alta resolução e os dados de campo após processamento em laboratório geram modelos digitais 3D dos ativos, e os atributos técnicos são preenchidos com alta confiabilidade da informação, conforme demonstrado na **Figura 6** e **Tabela 2**.

Figura 6: Modelo Digital 3D (Mesh 3D da Planta).



Tabela 2: Atributos de Métricas preenchidos a partir do Modelo Digital 3D.

METRICAS	
Itens Aferidos	Resultado
Area do Terreno	4379.272
Testada	54.761
Profundidade	81.612
Tipo de Cercamento	Muro em alvenaria
Perimetro do Cercamento	272.553
Area do Portao	5.085
Area Construida	731.800
Area Gramada	2888.211
Area Pavimentada	1841.068

O processo AIV visa responder com alto grau de confiabilidade questões essenciais para a eficácia operacional: Quais são os ativos físicos do sistema de água? Onde estão localizados (precisão de georreferenciamento)? Em que condição se encontram (vida útil remanescente)?

O nível de conhecimento mais aprofundado sobre um ativo depende do grau de preenchimento dos atributos de informação requeridos sobre ativo específico AIR (Asset Information Requirements). Organizações maduras em gestão de ativos fornecem um guia de orientação explícito sobre a forma, estrutura e significado dos dados de ativos necessários pela organização. Esse conjunto de definições de dados pode ser referido como "dicionário de dados", "requisitos de informação organizacional" (OIR) ou "requisitos de informação de ativos" (AIR) (ISO/FDIS 55013, 2024).

4.1.1. Classificação e Quantificação dos Ativos Físicos

Exemplo do resultado tabular da classificação dos ativos dentro de uma planta de reservação, identificado conforme a família, categoria e tipologia específica pelo método AIV (**Error! Reference source not found.**).

Figura 7: Quadro de ativos físicos classificados dentro de uma planta (entidade).

Classificacao dos Ativos Fisicos	Qtde de Ativos
FACILITIES(Civil)-Abrigo	1
FACILITIES(Civil)-Galpão Industrial	1
FACILITIES(Poste/Pórtico)-Poste de luz em material cimentício	2
FACILITIES(Poste/Pórtico)-Poste de luz em material metálico	7
OPERACIONAIS(Civil)-Reservatório Apoiado - Aço	1
OPERACIONAIS(Civil)-Reservatório de Contenção	3
OPERACIONAIS(Elétrico)-Disjuntor a Vácuo	1
OPERACIONAIS(Elétrico)-Inversor de frequência	4
OPERACIONAIS(Elétrico)-Painel Elétrico de Comando ou de distribuição	12
OPERACIONAIS(Elétrico)-Painel de automação	3

4.1.2. Condição dos Ativos Físicos

Neste processo é realizada a avaliação da condição, ou seja, a vida útil remanescente de um ativo. O especialista em campo segue o protocolo de análise do equipamento (Figura 8).

Figura 8: Processo de Avaliação da Condição do Ativo.

O resultado da avaliação é calculado a partir dos formulários no aplicativo sobre aspectos visuais de presença de anomalias no ativo (representação das ilustrações: sim - vermelho, não - verde e não avaliado - amarelo) (Figura 9).

Figura 9: Formulário estruturado da avaliação da condição do ativo.

Vistoria de Campo	
A expectativa de vida é menor que 1 ano ? (Falha está iminente)	
Existem vazamentos acima dos normais pelo sistema de selagem ?	
Existem ruídos em níveis acima dos normais, representando um problema do componente ?	
Existe superaquecimento de peças devido a falta de lubrificação ?	
Existem sinais de vazamento de lubrificante ?	
Existem muitos pontos de corrosão, justificando a necessidade de reparo ?	
Há desgaste excessivo em peças móveis e peças sem a devida fixação ?	
Existe vibração em excesso, comprometendo as fixações ou peças móveis ?	
Existem adaptações (gambiarras), comprometendo o funcionamento ?	
Faltam peças e/ou proteções ?	

4.1.3. Requisitos de Informação do Ativo

No método AIV o procedimento de preenchimento dos atributos informacionais requeridos inicia-se após o taqueamento e classificação do ativo na família, categoria e tipologia.

No processo de captura digital parte dos atributos informacionais são preenchidos, a partir dos dados técnicos contidos no selo do equipamento em campo. Porém há muitos desafios na coleta e aquisição de informações requeridas no ambiente operacional, tais como: ativo instalado em local inacessível (equipamento submerso em água ou instalado em poste, por exemplo); equipamento sem selo do fabricante, ou mesmo ilegível devido ao longo tempo de instalação; e ativos situados em locais de ambiente agressivo (instalações de químicos, por exemplo).

Assim o registro digital dos atributos e a pesquisa das variáveis informacionais dos ativos, seguem um fluxo de processo de melhoria contínua, na qual a primeira etapa de digitalização da instalação/planta costuma não ser suficiente para coletar todas as informações requeridas do ativo (AIR) (ISO/FDIS 55013, 2024).

As instalações de reservação de água desta amostra contêm grande diversidade de tipologias de ativos, em diferentes estados de conservação e com idades muito distintas que variam de anos até mesmo séculos de implantação, como é o caso do PL-RJB-ETR0165 (Reservatório do Pedregulho no Rio de Janeiro, inaugurado no ano de 1880 pelo imperador Dom Pedro II).

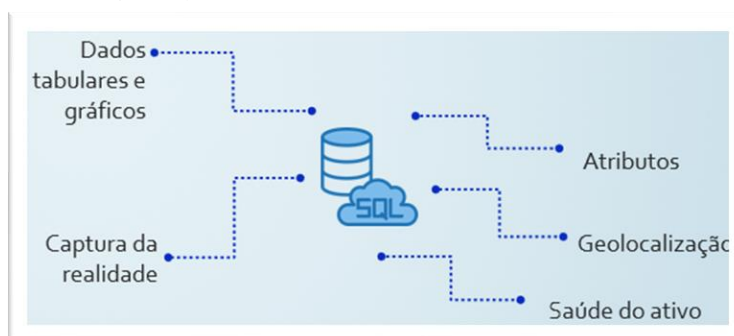
No exemplo ilustrado na Figura 10, foi realizada a análise de um ativo pertencente à família operacional, especificamente à categoria mecânica e à tipologia motor, cujas classificações determinam os requisitos informacionais necessários. A principal fonte de dados foi a digitalização do selo do fabricante do equipamento. O resultado foi a criação de uma ficha técnica simplificada para um equipamento do tipo bomba hidráulica, contendo a identificação do código único do ativo (TAG) e os atributos técnicos essenciais, coletados durante a inspeção e verificação digital AIV. Os atributos marcados como << PREENCHER >> representam informações ausentes ao final do processo (Missing Value). Portanto, um dos objetivos desta investigação é quantificar o percentual de atributos preenchidos, permitindo que as organizações direcionem esforços e investimentos em pesquisa e digitalização, promovendo um maior entendimento de seus ativos operacionais.

Após os processos de coleta e tratamentos, os dados processados dos ativos são armazenados na base de dados em formato SQL e compartilhados com as Key Performance Areas (KPA) em diversos formatos de visualização nas plataformas de SGA da organização (Figura 11)

Figura 10: Atributos fundamentais requeridos de um equipamento do tipo bomba hidráulica.

TAG do Ativo	Atributos
PRO- 02372	Modelo: 8AE17B21 Rendimento: << PREENCHER >> Rotação: 1750 Vazão nominal: << PREENCHER >> Data de fabricação: << PREENCHER >> Fabricante : MARK Diâmetro do rotor: 432mm

Figura 11: Base de Dados da Organização.



Os dados de captura da realidade dos ativos são base para a estruturação e geração de Digital Model, Digital Shadow e Digital Twin (Niles et al., 2022), e o respectivo enquadramento vai estar relacionado ao nível de automação na transferência de dados entre os ativos físicos e virtuais (Vieira et al., 2022) (Kritzinger et al., 2018).

Destaca-se na **Figura 12** a integração dos dados gráficos e não gráficos que resultaram no Digital Twin de uma Estação Elevatória de Água Tratada e Reservação da organização. Essa é uma réplica digital fiel da planta com os atributos reais coletados dos ativos e que são explorados virtualmente num ambiente imersivo com multiplataformas: óculos de realidade virtual (Vive Pro ou Oculus Guest), notebook ou tablet.

Figura 12: Digital Twin da ETR (plataforma XRProj Education and Training: <https://www.xrproj.com/>).



4.2. Análise Quantitativa

A amostra selecionada representa 19 municípios do Brasil contabilizando 2.584 ativos distribuídos por 106 entidades (plantas de reservação de água denominadas de ETR - Estação Elevatória de Água Tratada e Reservação). Para a modelação estatística foram definidas 2 variáveis não métricas (município e situação operacional), 2 variáveis de contexto (densidade populacional e índice de desenvolvimento humano) e mais 24 variáveis métricas. Estas últimas foram elaboradas a partir das dimensões do modelo de informações do ativo da organização, apresentado no capítulo 3 que refere a metodologia, e assim temos as variáveis de quantidade, condição visual e atributo técnico para as cinco categorias de ativos físicos: mecânicos, motores, civil, elétrico e instrumentação.

A **Tabela 3** resume as variáveis selecionadas contendo o nome (abreviatura), a descrição da variável, a unidade de medida e a fonte específica.

Tabela 3: Descrição das Variáveis.

Variáveis	Descrição	Unidade	Fonte
Mun	Município do Brasil	Nominal	
SituaOper	Situação operacional da planta	Nominal	(1)
DensPop	Densidade Populacional	Pessoas/km ²	(2)
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (L=Longevidade, E=Educação e R=Renda)	$\frac{IDHM(L) + IDHM(E) + IDHM(R)}{3}$	(2)
NAm,n,e,c,i	Número de Ativos por Categoria (*) na Planta (Entidade)	$\frac{NAm, n, e, c, i}{Planta}$	(1)
NTme	Número Total de Ativos por Planta (Entidade)	$\frac{NT}{Planta}$	(1)
ACm,n,e,c,i	Índice da Condição Média dos Ativos, ou vida útil remanescente, por Categoria (*) na Planta (Entidade)	$\frac{ACm, n, e, c, i}{Planta}$	(1)



ACme	Índice da Condição Média dos Ativos, ou vida útil remanescente média na Planta (Entidade)	$\frac{AC}{Planta}$	(1)
DATm,n,e,c,i	Índice de Dados dos Atributos preenchidos por Categoria (*) na Planta (Entidade) em relação ao total requerido (AIR)	$\frac{(Dados\ Preenchidos)_{m,n,e,c,i}}{Total\ Requerido}$	(1)
DATme	Índice de Dados dos Atributos preenchidos por Planta (Entidade) em relação ao total requerido (AIR)	$\frac{Dados\ Preenchidos}{Total\ Requerido}$	(1)
DAFm,n,e,c,i	Índice de Dados dos Atributos preenchidos por Categoria (*) na Planta (Entidade) em relação ao fundamental requerido (AIR)	$\frac{(Dados\ Preenchidos)_{m,n,e,c,i}}{Fundamental\ Requerido}$	(1)
DAFme	Índice de Dados dos Atributos preenchidos por Planta (Entidade) em relação ao fundamental requerido (AIR)	$\frac{Dados\ Preenchidos}{Fundamental\ Requerido}$	(1)

Fontes: (1) Inventário de ativos físicos (Carvalho, 2021).

(2) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística — IBGE (Censo 2010).

(*) Observação: Categorias Mecânicos(m), Motores(n), Elétricos(e), Civis(c) e Instrumentação(i).

A Figura 13 apresenta um extrato parcial da base de dados.

Figura 13: Extrato Parcial da Base de Dados.

Entidade	Mun	DensPop	IDHM	NAm	NAn	NAe	NAC	NAi	NTme
Descrição	Nome do município (Brasil)	Medida da densidade populacional no município	Índice estatístico composto de expectativa de vida, educação e renda per capita	Número de Ativos Mecânicos por Planta	Número de Ativos Motores por Planta	Número de Ativos Elétricos por Planta	Número de Ativos Civis por Planta	Número de Ativos de Instrumentação por Planta	Número Total de Ativos por Planta
Entidade	Nominal	Pessoas/km ²	0 - 1	NAm/Planta	NAn/Planta	NAe/Planta	NAC/Planta	NAi/Planta	NTme/Planta
Planta	Município	DensPop	IDHM	NAm	NAn	NAe	NAC	NAi	NTme
PL-PRO-ETR2250	Arraial do Cabo	172.91	0.733	8	1	2	1	6	18
PL-PRO-ETR2262	Arraial do Cabo	172.91	0.733	7	4	3	1	5	20
PL-PRO-ETR3094	Búzios	392.16	0.728	35	3	24	4	17	83
PL-PRO-ETR3096	Búzios	392.16	0.728	15	2	19	4	8	48
PL-PRO-ETR3154	Búzios	392.16	0.728	4	1	2	1	3	11
PL-PRO-ETR4095	Cabo Frio	453.75	0.735	49	2	24	11	15	101
PL-PRO-ETR4129	Cabo Frio	453.75	0.735	13	2	4	1	5	25
PL-PRO-ETR4138	Cabo Frio	453.75	0.735	21	3	3	2	10	39
PL-PRO-ETR4207	São Pedro da Aldeia	264.05	0.712	2	1	1	2	3	9
PL-PRO-ETR4208	São Pedro da Aldeia	264.05	0.712	0	0	0	1	0	1
PL-PRO-ETR4219	Cabo Frio	453.75	0.735	20	2	3	5	2	32
PL-PRO-ETR4241	Cabo Frio	453.75	0.735	3	0	2	1	3	9
PL-TMN-ETR0051	Timon	89.18	0.649	6	1	5	1	5	18
PL-RJA-ETR0001	Cachoeiras de Macacu	56.9	0.7	4	0	0	0	0	4
PL-RJA-ETR0002	Cachoeiras de Macacu	56.9	0.7	6	0	1	1	0	8
PL-RJA-ETR0003	Cachoeiras de Macacu	56.9	0.7	8	0	1	4	0	13
PL-RJA-ETR0024	Cachoeiras de Macacu	56.9	0.7	4	0	0	0	0	4
PL-RJA-ETR0029	São Sebastião do Alto	22.35	0.646	1	1	1	1	0	4
PL-RJA-ETR0111	São Francisco de Itabapoana	36.84	0.639	25	7	18	2	1	53

5. Resultados e Discussão

5.1. Análise Univariada

A análise univariada foi realizada para examinar individualmente algumas variáveis de maior interesse da base de dados, visando compreender suas características e comportamentos específicos. A modelação incluiu a distribuição de frequências e a avaliação das medidas descritivas, tais como as de centralidade, dispersão, assimetria e curtose dos dados, complementada pela representação gráfica por meio de histogramas e gráficos de barras correspondentes.



Foram selecionadas as variáveis quantidade total de ativos (NTme), condição média dos ativos (ACme) e dados totais preenchidos dos ativos (DATme). Os resultados das análises são comentados a seguir, e estão apresentados na :

- **NTme:** a análise indicou que a quantidade mais frequente (moda) de ativos em plantas é 18, observada em 8 plantas. Apenas 2,8% das ETRs possuem mais de 100 ativos, e cerca de 80% das plantas têm menos de 29 ativos. O número de ativos varia de 1 a 137, com uma média de 22,8 e uma mediana de 16. A média superior à moda indica uma distribuição assimétrica positiva, com uma diferença de 6,80 entre a média e a mediana, e um coeficiente de assimetria de 2,669, sugerindo uma assimetria acentuada (**Error! Reference source not found.**);
- **ACme:** o resultado da condição média e mediana dos ativos verificados está em cerca de 75%, o que indica que os ativos da planta já ultrapassaram 25% da vida útil (boas condições). Sendo que 10% das plantas estão com condição abaixo de 50% (condição entre média e deficiente), e 6,6% das plantas estão com 100% (condição de novos). A diferença entre a média e a mediana resultou em 2,01, sendo a assimetria pouco acentuada, como pode ser observado pelo valor de -0,501 (Tabela X). Verificou-se que a moda é maior que a mediana, e que esta é maior que a média: logo, a distribuição é assimétrica negativa (**Figura 14**).
- **DATme:** verificou-se na distribuição de frequências que cerca de 99% das plantas só atingiram no máximo 31% de preenchimento do atributo total, e que apenas 1 planta atingiu índice de atributo de 57% (potencial outlier). A diferença entre a média e a mediana resultou em 0,0004, sendo a assimetria pouco acentuada, como pode ser observado pelo valor de 1,3. Nas medidas de estatística descritiva a média está ligeiramente menor que a mediana: logo, a distribuição é assimétrica negativa (**Error! Reference source not found.**).

Tabela 4: Medidas de Estatística Descritiva para as variáveis: NTme, ACme) e DATme.

		Variável		
		NTme	ACme	DATme
N	Válido	106	106	106
	Omisso	0	0	0
Média		22,80	75,7451	,1196
Mediana		16,00	77,7500	,1200
Moda		18	100,00	,00a
Erro Desvio		26,482	17,31965	,08899
Variância		701,303	299,970	,008
Assimetria		2,669	-,501	1,303
Erro de assimetria padrão		,235	,235	,235
Intervalo		136	68,37	,57
Mínimo		1	31,63	,00
Máximo		137	100,00	,57
Percentis	25	7,75	62,9100	,0500
	50	16,00	77,7500	,1200
	75	24,25	90,7925	,1800

Figura 14: Histograma da variável quantidade (NTme).

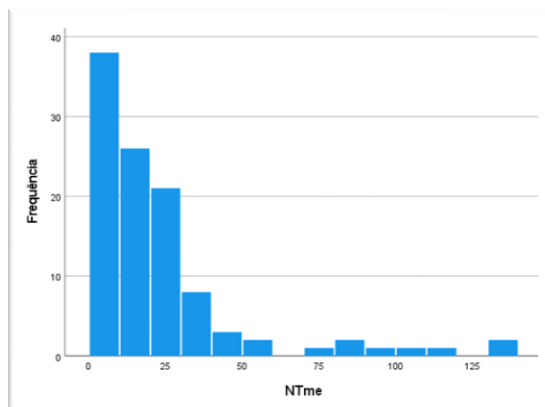


Figura 14: Histograma da variável condição (ACme).

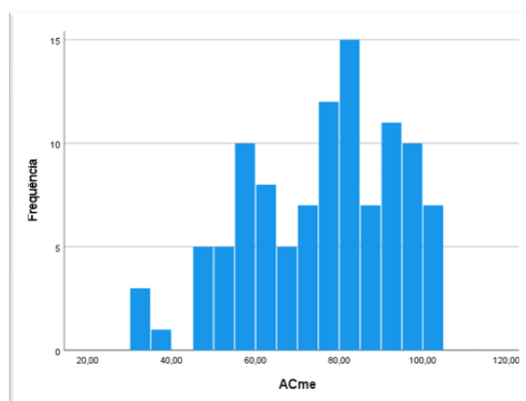
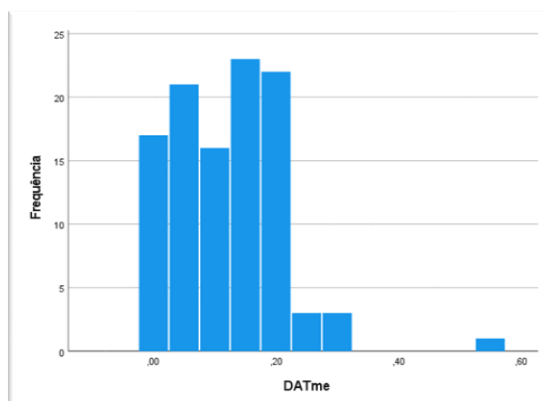


Figura 15: Histograma da variável atributo total (DATme).



Em resumo as medidas de estatística descritiva apresentaram uma ampla variação de quantidade de ativos por planta (desvio padrão / média > . 1) e pouca variação na condição dos ativos (desvio padrão / média < . 1). Quanto a condição média dos ativos na planta é de 75% (boas condições), porém 10% da amostra de ativos está em condição abaixo de 50%, e assim recomenda-se uma análise mais detalhada sobre este subgrupo de ativos com condição de conservação baixa devido a um potencial exposição ao risco e a impactos operacionais em caso de falha.

O nível de informação dos ativos ficou com média de apenas 13% (DATme) e 15% (DAFme), confirmando os artigos técnicos sobre a baixa maturidade na gestão informacional do cadastro técnico no setor das águas.

5.2. Análise Bivariada

Nesta etapa da modelação foram avaliadas as correlações entre as principais variáveis dos ativos e de contexto (análise bivariada).



Os resultados do SPSS, apresentados na **Tabela 5**, mostraram uma correlação positiva entre a densidade populacional e o índice de desenvolvimento humano (IDHM) nestes municípios ($p = 0,936$), e uma correlação negativa entre estas duas variáveis com a condição visual do ativo (ACme) observada em campo ($p = -0,376$; $p = -0,333$).

A correlação positiva ocorre também entre DAFme com DATme ($p = 0,862$), o que se explica porque os atributos fundamentais são um subgrupo dos atributos totais dos ativos físicos.

O estado de condição do ativo (ACme) tem uma relação positiva com os atributos informacionais (DATme e DAFme) resultado da análise do coeficiente de correlação ($p = 0,337$; $p = 0,335$).

Tabela 5: Matriz de correlação entre as variáveis densidade populacional, IDHM, quantidade, condição e atributo total e fundamental dos ativos.

Correlações

	DensPop	IDHM	NTme	ACme	DATme	DAFme
DensPop	1	,936**	,044	-,376**	,021	-,080
IDHM	,936**	1	,063	-,333**	,071	-,014
NTme	,044	,063	1	,098	,044	,138
ACme	-,376**	-,333**	,098	1	,337**	,335**
DATme	,021	,071	,044	,337**	1	,862**
DAFme	-,080	-,014	,138	,335**	,862**	1

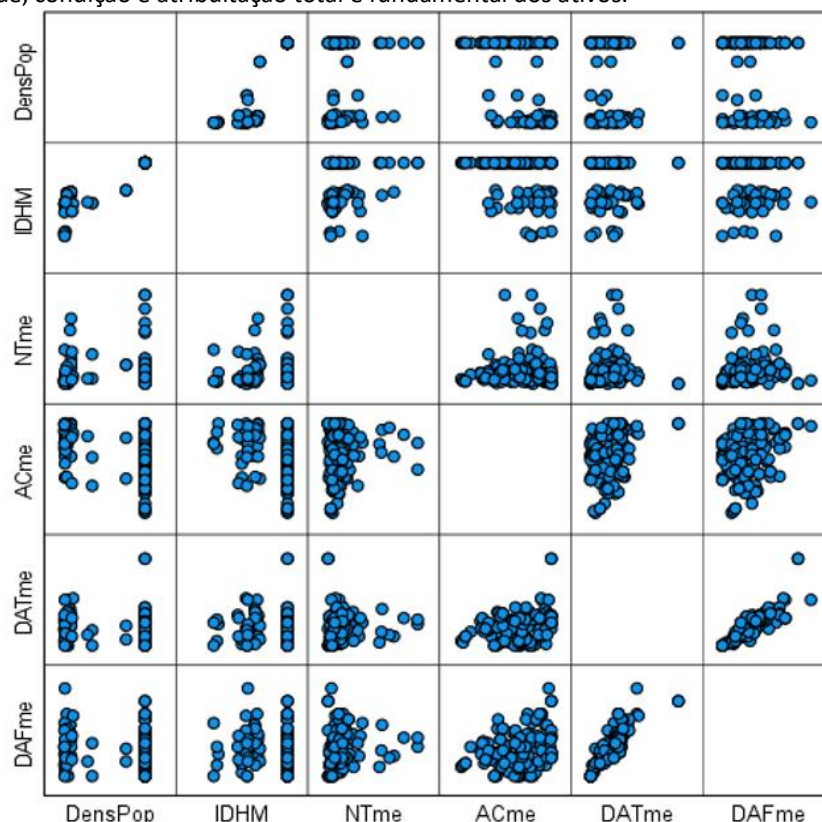
** . A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades).

A matriz de correlação global (todas as variáveis) em escala reduzida pode ser visualizada no Apêndice 1. Verifica-se poucas variáveis com os valores de coeficientes de correlação linear mais elevados, destaca-se pela cor amarela as correlações entre 0,4 e 0,6, e pela cor vermelha as correlações entre 0,6 e 1,0.

Na matriz de diagramas de dispersão (scatter plot matrix) para as variáveis de densidade populacional, IDHM, quantidade, condição e atribuição total e fundamental dos ativos observa-se que há uma correlação mais significativa positiva entre os dados totais e fundamentais dos ativos (DATme e DAFme). Nos quadrantes que estas variáveis se correlacionam tem uma forma elíptica, que se desenvolve se aproximando de uma reta na inclinação diagonal (Figura 16).

Nesta figura também é possível visualizar linhas retas de dados horizontais e verticais nas correlações entre as variáveis densidade populacional e IDHM com as variáveis (NTme, ACme, DATme e DAF), que se explicam pois 68% das plantas estão no mesmo município do Rio de Janeiro.

Figura 16: Matriz de diagramas de dispersão (scatter plot matrix) para as variáveis de densidade populacional, IDHM, quantidade, condição e atribuição total e fundamental dos ativos.



O resultado mais surpreendente foi a correlação negativa entre as variáveis de condição (ACme) e de contexto (densidade populacional e IDHM), pois esperava-se uma condição melhor das plantas nas regiões mais adensadas e de melhor índice socioeconômico. Segundo a concessionária, estas informações e insights irão ajudar na tomada de decisão para priorizar os investimentos nestes ativos.

6. Conclusão

Este estudo motivou-se nos desafios da digitalização dos ativos da “indústria” da água para aumentar a eficiência na prestação destes serviços. Fundamentou-se em investigações anteriores que questionam a qualidade das informações (IQ) dos ativos na gestão de infraestruturas de água e apresenta uma contribuição original ao aplicar métodos avançados de modelação estatística para avaliar a confiabilidade de uma amostra da base de dados de uma entidade de água no Brasil, cujos dados foram coletados por meio de captura digital da realidade (Niles et al., 2022).

Qualitativamente, demonstrou-se que os processos de digitalização proporcionam uma maior rastreabilidade informacional ao SGA da organização (ISO/FDIS 55013, 2024). No entanto, as análises univariadas e bivariadas confirmaram o déficit significativo de dados técnicos relacionados ao OIR, e revelaram uma correlação inesperada e indireta entre as variáveis de condição e de contexto (população e IDHM) das regiões atendidas pelos reservatórios. Assim esses métodos proporcionaram insights valiosos para a organização, gerando oportunidade de priorização na alocação de recursos e na tomada de decisões estratégicas mais estruturadas para a governança dessas plantas.

Esta abordagem não apenas valida a eficácia do processo de digitalização por meio de modelação estatística, como também destaca os benefícios de aumentar o investimento em tecnologias avançadas de coleta de dados em campo. Exemplos incluem a maior precisão, atualização e confiabilidade das informações sobre os ativos, demonstrados por meio de um estudo de caso avançado na gestão do conhecimento em uma tipologia específica do sistema de água. Recomenda-se a realização de pesquisas futuras e testes ampliados em outros ativos do setor.

Agradecimentos

O autor agradece ao apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da unidade de pesquisa CERIS.

Referências

Alegre, H., Vitorino, D., & Coelho, S. (2014). Infrastructure value index: A powerful modelling tool for combined long-term planning of linear and vertical assets. *Procedia Engineering*, 89, 1428–1436. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.469>

Almeida, N. (2023). *Gestão de Ativos — 5ª edição: PorValor*. IST — FUNDEC.

Alonso, P. J., Guillén, A. J., Gómez, J. F., & Cándón, E. (2022). Review of asset digitalization models in the context of intelligent asset management and maintenance. In A. Crespo Márquez, J. F. Gómez Fernández, V. González-Prida Díaz, & J. Amadi-Echendu (Eds.), *16th WCEAM Proceedings* (pp. 87–97). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-25448-2>

Amadi-Echendu, J. E., Brown, K., Willett, R., & Mathew, J. (2012). *Asset condition, information systems and decision models: Approaches to information quality management* (Vol. 2). Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2924-0>

Asian Development Bank. (2013). *Water utility asset management: A guide for development practitioners*.

Carvalho, W. O. (2021). BIM and AM to manage critical and relevant water and wastewater utilities assets. In *Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering - ICCCBE 2020* (Vol. 98, pp. 697–720). https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_49

Cronk, B. C. (2018). *How to use SPSS®: A step-by-step guide to analysis and interpretation* (10th ed.). Taylor & Francis Group.

Grosch, R., & Bilot, P. (2002). A simple strategy for integrated plant management and control. In *ISA Instrumentation, Systems, and Automation Conference Proceedings* (pp. 13–23).

Helfert, M., & Ge, M. (2007). A review of information quality research: Develop a research agenda. <https://www.researchgate.net/publication/220918901>

Institute of Asset Management (IAM). (2015). *An anatomy of asset management*. <https://www.theIAM.org>

ISO Technical Committee 251. (2024). *ISO/TC 251 asset management*. <https://committee.iso.org/sites/tc251/social-links/resources.html>

ISO. (2014). *ISO 55001:2014 Asset management—Management systems—Requirements*. <https://www.iso.org/standard/55089.html>

ISO/FDIS 55013. (2024). *Asset management—Guidance on the management of data assets*. <https://www.iso.org>

IWA - Digital Water Programme. (2022). *A strategic digital transformation for the water industry*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781789063400>

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>

Marques, R. C. (Ed.). (2005). *Regulação de serviços públicos*. Sílabo. <https://silabo.pt>

Niles, J., McClure, S., & Pouliquen, D. (2022). *Reality capture: A digital twin foundation*.

O'Hanlon, T., & Gulati, R. (2020). *10 rights of asset management*.



Rokstad, M. M., Ugarelli, R. M., & Sægrov, S. (2016). Improving data collection strategies and infrastructure asset management tool utilisation through cost benefit considerations. *Urban Water Journal*, 13(7), 710–726. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1024692>

Silva, J. B. (2023). *Structuring urban networks: Accessibility networks, road hierarchy and transport modes*. <http://pcp.vub.ac.be/MACRBOOK.html>

SNIS/Trata-Brasil. (2024). *Estudo de perdas de água de 2024 (SNIS, 2022): Desafios na eficiência do saneamento básico no Brasil*. www.goassociados.com.br

UNICEF/WHO. (2023). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender*. United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization (WHO). <https://washdata.org>

Vieira, J., Martins, J. P., de Almeida, N. M., Patrício, H., & Morgado, J. G. (2022). Towards resilient and sustainable rail and road networks: A systematic literature review on digital twins. *Sustainability*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/su14127060>

World Bank Group. (2022). *Water supply and sanitation policies, institutions, and regulation*. www.worldbank.org

Apêndices

Apêndice 1 — Matriz de Correlações Globais (Todas as Variáveis)

	Matriz de correlações																										
	DensPop	DHM	Nden	Nden	Nde	NAC	NAC	NTime	ACm	ACe	ACe	ACe	ACe	ACme	DATm	DATe	DATe	DATe	DATe	DATe							
Correlação	DensPop	1.000																									
	DHM	0.909	1.000																								
	Nden	0.113	0.107	1.000																							
	Nden	0.134	0.114	0.501	1.000																						
	Nde	0.042	0.038	0.713	0.551	1.000																					
	NAC	-0.007	-0.009	0.363	0.071	0.129	1.000																				
	NAC	-0.310	-0.209	0.488	0.379	0.678	0.301	1.000																			
	NTime	0.044	0.063	0.950	0.813	0.880	0.423	0.673	1.000																		
	ACm	0.273	-0.247	0.554	0.142	0.062	0.034	0.118	0.077	1.000																	
	ACe	-0.340	-0.352	0.014	0.019	0.037	0.003	0.125	0.018	0.668	1.000																
	ACe	-0.200	-0.185	0.564	0.129	0.109	0.069	0.110	0.098	0.462	0.335	1.000															
	ACe	-0.250	-0.191	-0.097	0.018	0.030	0.025	0.126	-0.033	0.368	0.368	0.441	1.000														
	ACi	-0.340	-0.312	0.178	0.213	0.280	0.112	0.347	0.258	0.609	0.638	0.603	0.549	1.000													
	ACme	-0.370	-0.358	0.048	0.122	0.122	0.088	0.401	0.098	0.762	0.769	0.767	0.731	0.865	1.000												
	DATm	0.060	0.115	0.185	0.127	0.027	-0.071	0.104	0.138	0.530	0.107	0.154	0.109	0.227	0.223	1.000											
	DATm	0.051	0.084	0.049	0.309	-0.054	-0.107	0.068	0.033	0.339	0.174	0.138	0.068	0.119	0.203	0.361	1.000										
	DATe	-0.133	-0.043	0.504	0.106	0.066	-0.089	0.278	0.053	0.319	0.238	0.290	0.372	0.377	0.400	0.597	0.260	1.000									
	DATe	0.014	0.018	0.098	-0.036	-0.018	-0.038	0.011	0.068	0.214	0.003	0.138	0.307	0.219	0.254	0.038	0.128	0.614	1.000								
	DATe	0.065	0.082	0.055	0.113	-0.013	-0.143	0.059	0.025	0.238	-0.018	0.101	0.188	0.180	0.103	0.555	0.433	0.485	0.551	1.000							
	DATme	0.021	0.071	0.051	0.222	-0.013	-0.181	0.135	0.044	0.403	0.190	0.245	0.255	0.278	0.337	0.758	0.748	0.713	0.683	0.765	1.000						
	DATm	-0.039	0.041	0.271	0.205	0.105	-0.048	0.174	0.229	0.370	0.063	0.093	0.095	0.251	0.194	0.809	0.372	0.424	0.307	0.431	0.905	1.000					
	DATm	0.009	0.044	0.047	0.254	-0.056	-0.147	0.044	0.010	0.340	0.088	0.175	0.074	0.127	0.221	0.352	0.368	0.265	0.189	0.441	0.146	0.398	1.000				
	DATe	-0.105	-0.103	0.082	0.175	0.152	-0.030	0.287	0.145	0.272	0.114	0.273	0.307	0.317	0.313	0.478	0.123	0.880	0.463	0.434	0.000	0.488	0.284	1.000			
	DATe	-0.019	-0.009	-0.078	-0.068	-0.004	-0.305	0.020	-0.071	0.221	0.171	0.103	0.333	0.228	0.288	0.408	0.077	0.531	0.018	-0.408	0.024	0.320	0.164	0.431	1.000		
	DATe	0.124	-0.098	0.119	0.163	0.139	-0.074	0.182	0.138	0.159	-0.031	0.174	0.216	0.294	0.190	0.377	0.227	0.422	0.348	0.762	0.542	0.458	0.275	0.488	0.371	1.000	
	DATme	-0.080	-0.014	0.135	0.227	0.094	-0.158	0.354	0.138	0.378	0.129	0.256	0.276	0.342	0.235	0.680	0.575	0.688	0.505	0.728	0.882	0.748	0.637	0.750	0.536	0.773	1.000

Declaração Ética

Conflito de Interesse: Nada a declarar. **Financiamento:** Nada a declarar. **Revisão por Pares:** Dupla revisão anônima por pares.



Todo o conteúdo da **RAE — Revista de Ativos de Engenharia** é licenciado sob [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), a menos que especificado de outra forma e em conteúdo recuperado de outras fontes bibliográficas.