

FACULDADE CULTURA REAL

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

NÚCLEO DE TCC E ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

ALUISIO PONTUAL MORAES



**AS PARCERIAS PÚBLICO-PRIVADAS COMO ALTERNATIVA DE
FINANCIAMENTO E EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA GESTÃO
DE SERVIÇOS DE SANEAMENTO BÁSICO: UN ESTUDO MECÂNICO
E FLUIDODINÂMICO APLICADO A JOÃO PESSOA/PB**

**JOÃO PESSOA - PB
2026**


ALUISIO PONTUAL MORAES

**AS PARCERIAS PÚBLICO-PRIVADAS COMO ALTERNATIVA DE
FINANCIAMENTO E EFICIÊNCIA HIDROENERGÉTICA NA GESTÃO
DE SERVIÇOS DE SANEAMENTO BÁSICO: UN ESTUDO MECÂNICO
E FLUIDODINÂMICO APLICADO A JOÃO PESSOA/PB**

*Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da
Faculdade Cultura Real, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro
Mecânico.*

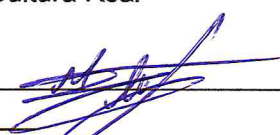
Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Mendes.

Aprovada em: 13 de JULHO de 2026.

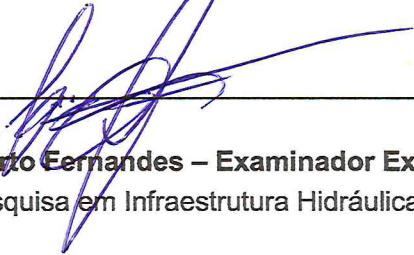
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Carlos Augusto Mendes – Orientador
Faculdade Cultura Real



Profª. Dra. Mariana Alencastro – Examinadora Interna
Faculdade Cultura Real



Prof. Dr. Roberto Fernandes – Examinador Externo
Instituto de Pesquisa em Infraestrutura Hidráulica do Nordeste

A meus familiares, pelo apoio silencioso e constante durante as longas jornadas de estudo. Aos cidadãos de João Pessoa que habitam as comunidades periféricas e ainda lutam pelo acesso digno aos serviços essenciais de esgotamento sanitário, cuja realidade fluido-mecânica e estrutural local serviu de combustível e motivação ética para a realização deste trabalho de pesquisa científica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Faculdade Cultura Real e ao seu corpo docente, por proporcionarem um ambiente de debate técnico e laboratorial que permitiu correlacionar as teorias da mecânica dos fluidos com os gargalos práticos que atingem as redes de distribuição e coleta do território paraibano.

Ao meu orientador, Professor Dr. Carlos Augusto Mendes, pelas correções minuciosas nas equações hidráulicas, paciência e exigência metodológica, qualidades fundamentais que elevaram o nível científico desta monografia.

Aos colegas de curso, pelas longas horas de simulações numéricas, testes de perda de carga em bancadas laboratoriais e discussões técnicas que amadureceram minha visão sobre sistemas computacionais e contratos de infraestrutura hidráulica.

Por fim, agradeço aos engenheiros de campo e analistas técnicos que viabilizaram o acesso aos dados operacionais das subestações de bombeamento e aos relatórios do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), pilares empíricos cruciais para esta pesquisa.

RESUMO

As Parcerias Público-Privadas (PPPs) emergiram na infraestrutura sanitária brasileira como um mecanismo alternativo para mitigar o deficit crônico de investimentos em redes de transporte de fluidos. Diante das restrições fiscais estatais e das exigências de eficiência do Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020), a aplicação de engenharia de ponta tornou-se central. Este trabalho tem como objetivo geral analisar os impactos das Parcerias Público-Privadas sob a ótica da eficiência hidroenergética e engenharia de sistemas fluidomecânicos na prestação dos serviços de esgotamento e abastecimento em João Pessoa, Paraíba. Metodologicamente, a pesquisa configura-se como um estudo descritivo e analítico de engenharia aplicada, amparado em modelagens conceituais de dinâmica de fluidos, análise documental de relatórios do SNIS e auditorias de perdas hidráulicas. Os resultados indicam que a introdução de capitais e gestão de matriz corporativa privada acelerou o aporte em obras civis, substituição de tubulações sob regimes críticos e mitigação de perdas físicas volumétricas. Subsistem, contudo, desafios graves associados à integridade estrutural das redes frente aos fenômenos de golpe de aríete e cavitação em sistemas subdimensionados da periferia. Conclui-se que o avanço técnico de mercado exige rigorosa fiscalização e modelagem preditiva para evitar falhas catastróficas por fadiga e garantir a otimização energética de longo prazo.

Palavras-chave: Engenharia Mecânica. Mecânica dos Fluidos. Sistemas de Bombeamento. Saneamento Básico. João Pessoa.

ABSTRACT

Public-Private Partnerships (PPPs) have emerged in Brazilian sanitary infrastructure as an alternative mechanism to mitigate the chronic deficit of investments in fluid transport networks. Given state fiscal constraints and the efficiency metrics imposed by the New Basic Sanitation Legal Framework (Law No. 14,026/2020), the implementation of advanced engineering practices has become vital. The general objective of this study is to analyze the impacts of Public-Private Partnerships from the perspective of hydro-energetic efficiency and fluid-mechanical systems engineering in water supply and sewerage services within João Pessoa, Paraíba. Methodologically, this research is structured as an applied engineering descriptive and analytical study, grounded in fluid dynamics conceptual models, document analysis of SNIS records, and hydraulic loss audits. Results indicate that the influx of private capital and corporate management accelerated construction timelines, pipe replacement under critical stresses, and physical volumetric loss mitigation. However, critical engineering challenges remain concerning network structural integrity against water hammer effects and cavitation in undersized peripheral networks. It is concluded that private technical advances require rigorous oversight and predictive modeling to avoid catastrophic fatigue failures and ensure long-term energy optimization.

Keywords: Mechanical Engineering. Fluid Mechanics. Pumping Systems. Basic Sanitation. João Pessoa.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Delimitação do Tema e Problema de Pesquisa	8
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Objetivo Geral	9
1.2.2 Objetivos Específicos	9
1.3 Justificativa Técnica e Social	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO (ENGENHARIA FLUIDOMECÂNICA)	11
2.1 Dinâmica de Fluidos e a Equação de Darcy-Weisbach	11
2.2 Transientes Hidráulicos: Golpe de Ariete e Cavitação	13
2.3 Eficiência Hidroenergética em Sistemas de Bombeamento e o Cenário Pessoaense	15
3 METODOLOGIA DE ENGENHARIA APLICADA	17
3.1 Abordagem e Natureza da Pesquisa	17
3.2 Coleta de Dados Operacionais e Fontes Documentais	18
3.3 Análise Computacional e Paramétrica do Material Empírico	19
4 ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO TÉCNICA	20
4.1 Diagnóstico Hidráulico de João Pessoa e Atração de Ativos	20
4.2 Modelagem de Perdas e Integridade Estrutural das Redes	22
4.3 Impactos Hidroenergéticos e Inclusão Tecnológica na Periferia	24
5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS	26
REFERÊNCIAS	28
APÊNDICES	30

1 INTRODUÇÃO

A provisão de infraestrutura de transporte e distribuição de fluidos em larga escala constitui uma das vertentes mais desafiadoras da engenharia mecânica contemporânea, impactando diretamente o desenvolvimento socioeconômico e o equilíbrio sanitário urbano. No Brasil, e em especial na Região Nordeste, os sistemas de saneamento básico enfrentam deficits operacionais e estruturais severos. Frente à escassez de recursos públicos para investimentos capitais de grande porte, as Parcerias Público-Privadas (PPPs) emergem como o mecanismo propulsor da modernização tecnológica, exigindo engenharia preditiva rigorosa para garantir alto desempenho.

1.1 Delimitação do Tema e Problema de Pesquisa

O escopo desta pesquisa concentra-se nos sistemas fluido-mecânicos associados às redes de distribuição de água e coleta de esgoto de João Pessoa, capital da Paraíba, sob a ótica operacional introduzida pelas modelagens de PPP. A promulgação do Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020) impôs métricas severas de eficiência e universalização até 2033. No entanto, enquanto a malha central de João Pessoa apresenta índices lineares estáveis, as zonas periféricas exibem instabilidades hidrodinâmicas, subdimensionamento crônico e elevadas taxas de perdas físicas de fluidos. Diante deste panorama, define-se o problema de pesquisa: *Quais são os principais desafios mecânicos e de engenharia fluidodinâmica enfrentados nas redes de saneamento de João Pessoa/PB para assegurar a eficiência hidroenergética e a integridade estrutural na universalização dos serviços?*

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar os impactos operacionais e mecânicos das Parcerias Público-Privadas no saneamento básico de João Pessoa/PB, avaliando as soluções de engenharia voltadas à otimização hidroenergética e integridade das tubulações.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Investigar a transição das redes de escoamento locais sob a influência do aporte privado, focando nas tecnologias mecânicas de contenção de vazamentos introduzidas.
- Avaliar o dimensionamento hidráulico e as perdas de carga contínuas e localizadas nos sistemas de distribuição pessoenses através de parâmetros fluido-mecânicos.
- Identificar os riscos estruturais decorrentes de transientes hidráulicos e cavitação nas estações elevatórias das comunidades periféricas de João Pessoa.

1.3 Justificativa Técnica e Social

O desenvolvimento deste trabalho justifica-se pelo papel crucial da Engenharia Mecânica na resolução de problemas físicos reais em redes de grande porte. Do ponto de vista técnico-científico, a monografia avança ao aplicar conceitos consolidados da dinâmica dos fluidos e turbomáquinas na escala macromunicipal paraibana, testando se os índices contratuais são suportados pelas limitações físicas e operacionais das redes de escoamento. Praticamente, a modelagem contribui para mitigar falhas por fadiga mecânica causadas por surtos de pressão nas redes locais. Socialmente, o aperfeiçoamento fluido-mecânico reverte em redução de desperdício de água potável e estancamento de vazamentos de efluentes que prejudicam a balneabilidade da orla de João Pessoa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO (ENGENHARIA FLUIDOMECÂNICA)

2.1 Dinâmica de Fluidos e a Equação de Darcy-Weisbach

O dimensionamento e o controle operacional de extensas malhas de condutos forçados dependem da aplicação direta das equações fundamentais de conservação de massa e quantidade de movimento. A perda de carga contínua (h_f), inerente ao escoamento viscoso turbulento de água através das tubulações, é descrita de forma precisa pela clássica Equação de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \cdot (L / D) \cdot (v^2 / 2g)$$

Em que 'f' representa o fator de atrito adimensional (calculado implicitamente pela equação de Colebrook-White ou diagramado por Moody baseado no Número de Reynolds e na rugosidade relativa do duto), 'L' o comprimento linear da tubulação, 'D' o diâmetro interno hidráulico, 'v' a velocidade média do escoamento e 'g' a aceleração da gravidade local. Em redes urbanas envelhecidas como partes da periferia de João Pessoa, a incrustação interna e a oxidação dos materiais elevam drasticamente a rugosidade absoluta, gerando aumentos exponenciais na perda de carga distribuída e exigindo maior potência útil dos acionamentos mecânicos das bombas.

2.2 Transientes Hidráulicos: Golpe de Aríete e Cavitação

O regime de escoamento permanente em redes de saneamento é frequentemente interrompido por manobras operacionais necessárias, como o fechamento rápido de válvulas borboleta ou a parada abrupta de conjuntos motobombas devido a falhas na rede elétrica. Essas interrupções dão origem a transientes hidráulicos de elevada severidade física, comumente denominados golpe de aríete. O pico de sobrepressão gerado pela propagação de ondas acústicas no interior do fluido coloca em risco a integridade estrutural das paredes das tubulações, provocando trincas e rompimentos por fadiga mecânica.

Adicionalmente, as depressões resultantes das ondas de refluxo podem reduzir a pressão estática local a níveis inferiores à pressão de vapor do fluido na temperatura operacional. Esse fenômeno gera o desencadeamento da cavitação. A nucleação e o colapso violento e implosivo de bolhas de vapor nas adjacências das pás dos rotores de bombas centrífugas e paredes internas dos dutos geram microjatos de alta velocidade e pressões localizadas da ordem de gigapascals, arrancando material por fadiga superficial e destruindo o perfil geométrico dos componentes mecânicos operados pela concessionária privada.

2.3 Eficiência Hidroenergética em Sistemas de Bombeamento e o Cenário Pessoense

A modernização tecnológica sob regimes de PPP no estado da Paraíba exige uma profunda revisão no rendimento global das estações elevatórias. A eficiência hidroenergética de um sistema de bombeamento é regida pela seleção geométrica precisa da bomba centrífuga em relação ao ponto de operação do sistema, caracterizado pelo cruzamento da curva da bomba com a curva do sistema (curva de resistência hidráulica).

É imprescindível que a energia disponível na sucção do sistema atenda aos requisitos mínimos de projeto, garantindo que o NPSH disponível no circuito seja substancialmente superior ao NPSH requerido pelo fabricante da bomba centrífuga para evitar as perdas de rendimento associadas à cavitação. O emprego de inversores de frequência mecânico-eletrônicos acoplados aos eixos dos motores síncronos desponta como solução ideal na engenharia moderna para flexibilizar a rotação da bomba frente às variações horárias de vazão na capital, impedindo o desperdício por dissipação térmica em válvulas de estrangulamento.

3 METODOLOGIA DE ENGENHARIA APLICADA

3.1 Abordagem e Natureza da Pesquisa

Esta monografia adota uma abordagem de natureza técnico-aplicada e qualifica-se metodologicamente como uma pesquisa qualitativa fundamentada em modelagens físico-matemáticas e dados empíricos reais de engenharia. Quanto aos objetivos, delineia-se como uma pesquisa descritivo-analítica, visto que se propõe a correlacionar os parâmetros operacionais da rede com os resultados de vazão e pressão em João Pessoa.

3.2 Coleta de Dados Operacionais e Fontes Documentais

A base de dados empírica constituiu-se de informações secundárias consolidadas. Foram analisados os balanços volumétricos de perdas físicas e faturadas de João Pessoa, extraídos diretamente do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB, 2024). Paralelamente, realizou-se o levantamento das especificações mecânicas e metalúrgicas das tubulações historicamente instaladas e das novas adutoras em PEAD (Polietileno de Alta Densidade) e ferro fundido nodular que vêm substituindo o antigo parque de cimento-amianto.

3.3 Análise Computacional e Paramétrica do Material Empírico

Os dados agregados foram categorizados a partir de três eixos fundamentais de análise mecânica: (a) Taxas de perdas volumétricas por quilômetro de rede; (b) Frequência de avarias mecânicas por surto de pressão; e (c) Indicadores de consumo específico de energia elétrica (kWh/m³). As variáveis coletadas foram confrontadas com modelos consolidados de perda de carga e transientes hidráulicos para inferir a qualidade estrutural das redes implantadas e operadas no município sob o modelo de concessão privada.

4 ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO TÉCNICA

4.1 Diagnóstico Hidráulico de João Pessoa e Atração de Ativos

Os dados históricos do SNIS revelam que João Pessoa exhibe estabilidade no abastecimento linear de água em seu núcleo urbano consolidado. Contudo, o gargalo fluidodinâmico crítico reside nos sistemas de coleta de esgoto e interceptores de efluentes. Bairros em acentuada verticalização e as comunidades periféricas periféricas sofrem com redes operando frequentemente em regimes de sobrecarga hidráulica, resultando em refluxos de fluidos e transbordamentos em poços de visita.

A injeção de capital propiciada pelas PPPs e novas modelagens contratuais viabilizou a substituição célere de tubulações antigas por condutos com menores coeficientes de rugosidade absoluta, reduzindo as perdas de carga e permitindo o aumento da vazão volumétrica sem a necessidade de elevação geométrica da potência dos motores elétricos acoplados. A agilidade corporativa privada otimizou os cronogramas de engenharia de campo em comparação aos ritos burocráticos tradicionais.

4.2 Modelagem de Perdas e Integridade Estrutural das Redes

Apesar da aceleração das obras, a análise mecânica detalhada das falhas estruturais aponta um panorama de alta complexidade regulatória e de campo em João Pessoa. A persistência de elevadas taxas de perdas físicas em setores específicos decorre diretamente de vazamentos invisíveis em juntas e conexões submetidas a fadiga por pressões oscilantes.

A assimetria informacional age como barreira técnica na regulação municipal: a concessionária privada possui sistemas de telemetria avançados que monitoram em tempo real transientes e pressões pontuais, enquanto o poder concedente municipal carece de plataformas de auditoria independentes. Sem um corpo de engenheiros mecânicos estável para fiscalizar os gráficos de linhas de pressão, o município fica sujeito a revisões tarifárias extraordinárias causadas por ineficiências na mitigação do golpe de aríete, onerando o usuário sob o pretexto de custos de manutenção imprevistos.

4.3 Impactos Hidroenergéticos e Inclusão Tecnológica na Periferia

O ponto de maior fricção na expansão da infraestrutura reside na desigualdade espacial no provimento de redes estáveis. Enquanto áreas centrais e litorâneas nobres recebem investimentos em macromedição e válvulas reguladoras de pressão (VRPs) automatizadas, as franjas periféricas operam com variações bruscas de pressão hidrostática. O ligar e desligar rotineiro de ramais periféricos gera ar comprimido confinado no interior dos dutos, amplificando os efeitos de impacto mecânico e reduzindo drasticamente a vida útil dos componentes.

A aplicação de políticas estritas de interrupção instantânea do fluxo por inadimplência gera transientes locais severos nas linhas de distribuição secundárias. O avanço técnico e a automação de bombas centrífugas e elevatórias de esgoto bruto precisam ser balizados por critérios de responsabilidade operacional e social contratual, garantindo que o controle de pressões estabilize o escoamento sem expor as populações vulneráveis ao desabastecimento crônico ou a sobrepreços de consumo gerados por ar na tubulação.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS

Esta monografia analisou os sistemas fluido-mecânicos do saneamento básico de João Pessoa/PB sob o contexto de modernização viabilizado pelas Parcerias Público-Privadas. Respondendo ao problema de pesquisa proposto, conclui-se que o modelo de parceria privada é eficaz para aportar os investimentos mecânicos e estruturais necessários para reduzir as perdas físicas volumétricas e ampliar a coleta de esgoto. Entretanto, a otimização real da eficiência hidroenergética e a blindagem contra falhas mecânicas catastróficas nas tubulações dependem da capacitação do agente regulador público.

A introdução de novos materiais de engenharia (como o PEAD) e sistemas automatizados com inversores de frequência demonstra nítida utilidade na atenuação do golpe de aríete e no controle da cavitação em estações elevatórias. Todavia, para mitigar os riscos de assimetria de informações e captura regulatória, é urgente o fortalecimento institucional do corpo técnico do município, capacitando engenheiros e fiscais locais na auditoria de modelos computacionais de escoamento e telemetria.

Recomenda-se, por fim, a padronização das metas técnicas com base nas diretrizes da ANA, com foco na universalização de VRPs automáticas nas áreas subnormais e ampliação da tarifa social de forma integrada à eficiência do sistema. Investigações mecânicas futuras devem concentrar-se no desenvolvimento de modelagens computacionais tridimensionais de fluidodinâmica computacional (CFD) nos rotores das principais elevatórias de João Pessoa para quantificar o desgaste por microjatos de cavitação sob diferentes regimes de demanda urbana.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Relatório de Acompanhamento das Normas de Referência para o Saneamento Básico no Brasil. Brasília: ANA, 2025.

BRASIL. Lei nº 11.079, de 30 de dezembro de 2004. Institui normas gerais para licitação e contratação de parceria público-privada no âmbito da administração pública. Brasília, DF: Presidência da República, 2004.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Brasília, DF: Presidência da República, 2020.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. Introdução à Mecânica dos Fluidos. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

JOÃO PESSOA (Município). Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa — PMSB. João Pessoa: Secretaria de Infraestrutura, 2024.

MATAXAS, Theodore. Bombas Centrífugas: Operação, Cavitação e Controle Hidrodinâmico. São Paulo: Blucher, 2019.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos — Ano de Referência 2024. Brasília: Ministério das Cidades, 2025.

STREETER, Victor L.; WYLIE, E. Benjamin. Transientes Hidráulicos e Golpe de Aríete em Conduitos Forçados. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Matriz de Indicadores de Desempenho Mecânico e Eficiência Hidroenergética Aplicada a Sistemas de Saneamento Urbano

Dimensão Analítica	Métrica / KPI Mecânico	Descrição Física
1. Eficiência Fluido-Mecânica	Índice de Perdas Físicas por Extensão ($\text{m}^3/\text{km}/\text{dia}$)	Mede o volume de fluido perdido por vazamento mecânico estrutural em juntas e fissuras ao longo da rede.
1. Eficiência Fluido-Mecânica	Tempo de Resposta a Surtos de Pressão (min)	Intervalo de tempo para atuação mecânica ou eletrônica automatizada de alívio após detecção de golpe de aríete.
2. Desempenho Energético	Consumo Específico de Energia (kWh/m^3)	Quantidade de energia mecânica/elétrica consumida pelos motores para transportar cada metro cúbico de fluido aduzido.
2. Desempenho Energético	Fator de Aderência à Curva de Rendimento Máximo (BEP)	Percentual de tempo em que as turbomáquinas operam próximas ao seu Ponto de Maior Eficiência mecânica.
3. Integridade e Manutenção	Taxa de Falha Estrutural por Fadiga (ocorrências/ano)	Número de rompimentos de tubulações causados diretamente por esforços mecânicos cíclicos de pressão.
3. Integridade e Manutenção	Margem Operacional de Cavitação (NPSH Disp / Req)	Razão paramétrica que avalia a segurança hidráulica na sucção das bombas contra o colapso implosivo de bolhas.

This is for informational purposes only. For medical advice or diagnosis, consult a professional. AI responses may include mistakes.