



Helenton Carlos Da Silva  
(Organizador)

# Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental 4

**Atena**  
Editora

Ano 2020



Helenton Carlos Da Silva  
(Organizador)

# Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental 4

**Atena**  
Editora

Ano 2020

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação:** Geraldo Alves

**Edição de Arte:** Lorena Prestes

**Revisão:** Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano

Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília  
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília  
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás  
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Msc. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
Prof. Dr. Adailson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Profª Msc. Bianca Camargo Martins – UniCesumar  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Profª Msc. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil  
 Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
 Prof. Msc. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária  
 Prof. Msc. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
 Prof<sup>a</sup> Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
 Prof. Msc. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco  
 Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Prof<sup>a</sup> Msc. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
 Prof<sup>a</sup> Msc. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás  
 Prof. Msc. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
 Prof. Msc. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá  
 Prof. Msc. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados  
 Prof<sup>a</sup> Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
 Prof<sup>a</sup> Msc. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

D371 Demandas essenciais para o avanço da engenharia sanitária e ambiental 4 [recurso eletrônico] / Organizador Helenton Carlos da Silva. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2020.

Formato: PDF  
 Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
 Modo de acesso: World Wide Web  
 Inclui bibliografia  
 ISBN 978-85-7247-952-3  
 DOI 10.22533/at.ed.523202101

1. Engenharia ambiental. 2. Engenharia sanitária. I. Silva, Helenton Carlos da.

CDD 628.362

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

Atena Editora  
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A obra “*Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental*” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora, em seu III volume, apresenta, em seus 29 capítulos, discussões de diversas abordagens acerca da importância da engenharia sanitária e ambiental, tendo como base suas demandas essenciais interfaces ao avanço do conhecimento.

Os serviços inerentes ao saneamento são essenciais para a promoção da saúde pública, desta forma, a disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas constitui fator de prevenção de doenças, onde a água em quantidade insuficiente ou qualidade imprópria para consumo humano poderá ser causadora de doenças; observa-se ainda o mesmo quanto à inexistência e pouca efetividade dos serviços de esgotamento sanitário, limpeza pública e manejo de resíduos sólidos e de drenagem urbana.

Destaca-se ainda que entre os muitos usuários da água, há um setor que apresenta a maior interação e interface com o de recursos hídricos, sendo ele o setor de saneamento.

O plano de saneamento básico é o instrumento indispensável da política pública de saneamento e obrigatório para a contratação ou concessão desses serviços. A política e o plano devem ser elaborados pelos municípios individualmente ou organizados em consórcio, e essa responsabilidade não pode ser delegada. O Plano deve expressar o compromisso coletivo da sociedade em relação à forma de construir o saneamento. Deve partir da análise da realidade e traçar os objetivos e estratégias para transformá-la positivamente e, assim, definir como cada segmento irá se comportar para atingir as metas traçadas.

Dentro deste contexto podemos destacar que o saneamento básico é envolto de muita complexidade, na área da engenharia sanitária e ambiental, pois muitas vezes é visto a partir dos seus fins, e não exclusivamente dos meios necessários para atingir os objetivos almejados.

Neste contexto, abrem-se diversas opções que necessitam de abordagens disciplinares, abrangendo um importante conjunto de áreas de conhecimento, desde as ciências humanas até as ciências da saúde, obviamente transitando pelas tecnologias e pelas ciências sociais aplicadas. Se o objeto saneamento básico encontra-se na interseção entre o ambiente, o ser humano e as técnicas podem ser facilmente traçados distintos percursos multidisciplinares, potencialmente enriquecedores para a sua compreensão.

Neste sentido, este livro é dedicado aos trabalhos relacionados a estas diversas demandas essenciais do conhecimento da engenharia sanitária e ambiental. A importância dos estudos dessa vertente é notada no cerne da produção do

conhecimento, tendo em vista o volume de artigos publicados. Nota-se também uma preocupação dos profissionais de áreas afins em contribuir para o desenvolvimento e disseminação do conhecimento.

Os organizadores da Atena Editora agradecem especialmente os autores dos diversos capítulos apresentados, parabenizam a dedicação e esforço de cada um, os quais viabilizaram a construção dessa obra no viés da temática apresentada.

Por fim, desejamos que esta obra, fruto do esforço de muitos, seja seminal para todos que vierem a utilizá-la.

Helenton Carlos da Silva

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
ALGORITMO DE BUSCA EXAUSTIVA PARALELA EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	
Artemisa Fontinele Frota Luís Henrique Magalhães Costa Rafael Pereira Maciel Marco Aurélio Holanda De Castro	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5232021011</b>	
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>25</b>
POÇO ARTESIANO; AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA QUE ABASTECE A ZONA RURAL NO MUNICÍPIO DE CALÇADO-PE	
Angela Maria Coêlho de Andrade Caio Cesário de Andrade	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5232021012</b>	
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>38</b>
AVALIAÇÃO DE DIGESTOR ANAERÓBIO PARA OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL E VIABILIZAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS NA GERAÇÃO DE ENERGIA	
Felipe R. A. dos Santos Clément Van Vlierberghe Guilherme F. Campos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5232021013</b>	
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>52</b>
AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE BOVINOCULTURA, SUINOCULTURA E LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE MILHO ( <i>Zea mays</i> L.)	
Rhégia Brandão da Silva Leonardo Duarte Batista da Silva Alexandre Lioi Nascentes Antonio Carlos Faria de Melo Dinara Grasiela Alves Everaldo Zonta João Paulo Francisco Marcos Filgueiras Jorge	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5232021014</b>	
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>76</b>
DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÃO WEB APLICADA À HIDRÁULICA DE CANAIS	
Lenise Farias Martins Rafael Pereira Maciel Luis Henrique Magalhães Costa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5232021015</b>	



**CAPÍTULO 6 ..... 86**

ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM REATOR ANAERÓBIO HORIZONTAL DE LEITO FIXO (RAHLF) PARA TRATAMENTO BIOLÓGICO DE EFLUENTE SINTÉTICO CONTENDO D-LIMONENO

Arnaldo Sarti  
Bruna Sampaio de Mello  
Brenda Clara Gomes Rodrigues  
Maria Angélica Martins Costa  
Samuel Conceição de Oliveira

**DOI 10.22533/at.ed.5232021016**

**CAPÍTULO 7 ..... 98**

ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DE PERDAS ATRAVÉS DO CONTROLE DE PRESSÃO – MODELO HIDRÁULICO DO SISTEMA MORROS DA ZONA NORTE DO RECIFE-PE

Marcos Henrique Vieira de Mendonça  
Hudson Tiago dos S. Pedroso

**DOI 10.22533/at.ed.5232021017**

**CAPÍTULO 8 ..... 111**

ESTUDO DA VULNERABILIDADE DA ÁGUA SUBTERÂNEA NO DISTRITO INDUSTRIAL DE ICOARACI (BELÉM-PA)

Ana Carla Leite Carvalho  
Leonardo Augusto Lobato Bello  
Ronaldo Lopes Rodrigues Mendes  
Marco Valério Albuquerque Vinagre

**DOI 10.22533/at.ed.5232021018**

**CAPÍTULO 9 ..... 122**

ESTUDO DE ÁREA DE RISCO DEVIDO À EROSÃO HÍDRICA EM TRECHO DO CÓRREGO AFONSO XIII EM TUPÃ / SP – CAUSAS E SOLUÇÃO

José Roberto Rasi  
Roberto Bernardo  
Cristiane Hengler Corrêa Bernardo

**DOI 10.22533/at.ed.5232021019**

**CAPÍTULO 10 ..... 136**

FATORES DETERMINANTES PARA GESTÃO DA MANUTENÇÃO ELETROMECÂNICA EFICAZ EM UMA EMPRESA DE SANEAMENTO

Karlos Eduardo Arcanjo da Cruz  
Tiago Pontual Waked  
Bruno Roberto Gouveia Carneiro da Cunha

**DOI 10.22533/at.ed.52320210110**

**CAPÍTULO 11 ..... 145**

FISCALIZAÇÃO TÉCNICO-OPERACIONAL REMOTA DA PRESTAÇÃO DE SERVIÇO DE ÁGUA E ESGOTO – DO PLANEJAMENTO A EXECUÇÃO

Flávia Oliveira Della Santina  
Rodolfo Gustavo Ferreras

**DOI 10.22533/at.ed.52320210111**

<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>161</b>
GESTÃO E CONSERVAÇÃO DE ÁGUA: ALTERNATIVAS PARA MELHORAR O ATENDIMENTO DAS DEMANDAS HÍDRICAS DO CENTRO DE CONVENÇÕES DE PERNAMBUCO	
Amanda Almeida de Oliveira Figueiredo Simone Rosa da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210112</b>	
<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>180</b>
APLICAÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS EM HIDROMETRIA COM BASE EM ESTUDOS DE VIABILIDADE ECONÔMICO FINANCEIRO	
Luiz Claudio Drumond	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210113</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>190</b>
METODOLOGIA DE LEVANTAMENTO DE DADOS DE PROJETO DE SANEAMENTO APLICADA AO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA REGIÃO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE BRASÍLIA PRESIDENTE JUSCELINO KUBITSCHKE UTILIZANDO O SOFTWARE EPANET	
Stefan Igreja Mühlhofer Carolina Silva de Oliveira Sá Teles	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210114</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>204</b>
VISITAS DOMICILIARES JUNTO À POPULAÇÃO BENEFICIÁRIA DE OBRAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA – UMA ABORDAGEM SOCIOAMBIENTAL EM CAICÓ – RN	
Julyenne Kerolainy Leite Lima Marília Adelino da Silva Lima Teonia Casado da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210115</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>212</b>
OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE RESERVATÓRIO NA BUSCA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (RESERVATÓRIO DE JORDÃO DE 90.000 M <sup>3</sup> , SISTEMA PIRAPAMA-PE)	
Hudson Tiago dos S. Pedrosa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210116</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>228</b>
PERSPECTIVA DOS 20 ANOS DA LEI N°9.433/97: PERCEPÇÕES DOS COMITÊS DE BACIA HIDROGRÁFICA E DOS ÓRGÃOS GESTORES DE RECURSOS HÍDRICOS ACERCA DO ENQUADRAMENTO DE CORPOS D'ÁGUA	
Paulo Eduardo Aragon Marçal Ribeiro Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210117</b>	

<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>238</b>
PRÉ-DIAGNÓSTICO DAS EFICIÊNCIAS ELETROMECÂNICAS E HIDROENERGÉTICAS DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA A PARTIR DO CONSUMO ENERGÉTICO NORMALIZADO	
Luis Henrique Pereira da Silva Karlos Eduardo Arcanjo da Cruz Leonardo Nascimento de Oliveira Milton Tavares de Melo Neto Hudson Tiago dos Santos Pedrosa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210118</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>247</b>
PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE REUSO DE ÁGUA EM SISTEMAS RESFRIAMENTO	
Ewerton Emmanuel da Silva Calixto Fernando Luiz Pellegrini Pessoa Lidia Yokoyama Sérgio Pagnin Andréa Azevedo Veiga	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210119</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>260</b>
PROGRAMA DE MONITORAMENTO DA LAGOA DA GAROPABA DO SUL/SC COM VISTAS A EFETIVA EXECUÇÃO DOS INVESTIMENTOS DO CONTRATO DE CONCESSÃO EM SANEAMENTO	
Ricardo Martins Anderson Sandrini Botega Eduardo Silvano Batista Gislaine Lonardi Katia Viviane Motta Martins	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210120</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>274</b>
PROJETO DE AÇÃO SOCIAL ALIADO A EDUCAÇÃO AMBIENTAL NA ESCOLA E SEUS EFEITOS NA COMUNIDADE	
Manuella Andrade Swierczynski	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210121</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>293</b>
PROJETO DE EFICIÊNCIA HÍDRICA: REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA DESCARTADA POR DESTILADORES	
Roberto Santos de Oliveira Julio Cesar Oliveira Antunes Lucas Olive Pinho Silva Gomes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.52320210122</b>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>305</b>
PROJETO DE INFRAESTRUTURA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO DESENVOLVIDO ATRAVÉS DA FILOSOFIA BIM	
Marcos André Capitulino de Barros Filho Pedro Henrique Matias Dantas	

Lucas Vieira Fernandes  
Aldrin Magno Dantas Siqueira Júnior  
**DOI 10.22533/at.ed.52320210123**

**CAPÍTULO 24 ..... 318**

QUALIDADE DA ÁGUA DOS POÇOS DO BAIRRO JARDIM CABANO DA VILA DOS CABANOS, MUNICÍPIO DE BARCARENA-PA

Claudio Farias de Almeida Junior  
Ronaldo Pimentel Ribeiro  
Mirian Favacho da Silva Ramos  
Amanda Ingrid da Silva Therezo  
Márcia de Almeida  
Marcos Antônio Barros dos Santos

**DOI 10.22533/at.ed.52320210124**

**CAPÍTULO 25 ..... 327**

RECUPERAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM POÇOS TUBULARES PROFUNDOS: O CASO DE VALE DO CATIMBAU

Karlos Eduardo Arcanjo da Cruz  
Paulo César Nunes Pinho  
José Antônio Charão Cunha  
Luis Henrique Pereira da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.52320210125**

**CAPÍTULO 26 ..... 338**

RESPONSABILIDADE SOCIAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. AÇÕES QUE FIZERAM A DIFERENÇA NA COMPANHIA DOCAS DO PARÁ/PORTO DE SANTARÉM – PARÁ – AMAZÔNIA

Cristiane da Costa Gonçalves de Andrade  
Andrelle Soares Dantas Faria  
Paula Danielly Belmont Coelho

**DOI 10.22533/at.ed.52320210126**

**CAPÍTULO 27 ..... 349**

SANEAMENTO DE QUALIDADE É CONSTRUÍDO COM FOCO EM GESTÃO: A EXPERIÊNCIA DA EMBASA – UNIDADE REGIONAL DE ITABERABA COM A IMPLANTAÇÃO DO MEG

Sebastiana Flávia Lima dos Santos  
Gustavo Lima Magalhães Ferreira

**DOI 10.22533/at.ed.52320210127**

**CAPÍTULO 28 ..... 360**

TOXICOLOGIA AGUDA DE *Rhamdia quelen* EXPOSTOS A XENOBIÓTICOS UTILIZADOS EM LAVOURAS ARROZEIRAS

Jaqueline Ineu Golombieski  
Débora Seben  
Joseânia Salbego  
Elisia Gomes da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.52320210128**

<b>CAPÍTULO 29</b> .....	<b>370</b>
--------------------------	------------

**TRATAMENTO NATURAL DE ÁGUA RESIDUÁRIA DE PISCICULTURA COM USO DE SEMENTE DE MORINGA OLEIFERA**

Edilaine Regina Pereira  
Maik Mauro Alves  
Bruna Ricci Bicudo  
Dandley Vizibelli  
Fellipe Jhordã Ladeia Janz

**DOI 10.22533/at.ed.52320210129**

<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>383</b>
----------------------------------	------------

<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>384</b>
-------------------------------	------------

## ALGORITMO DE BUSCA EXAUSTIVA PARALELA EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

*Data de aceite: 06/01/2020*

*Data de submissão: 21/10/2019*

### **Artemisa Fontinele Frota**

Universidade Estadual Vale do Acaraú - UVA

Sobral – Ceará

<http://lattes.cnpq.br/1850137749322859>

### **Luís Henrique Magalhães Costa**

Universidade Estadual Vale do Acaraú - UVA

Sobral – Ceará

<http://lattes.cnpq.br/5710487391407826>

### **Rafael Pereira Maciel**

Universidade Federal do Rio Grande - FURG

<http://lattes.cnpq.br/9489198566647497>

### **Marco Aurélio Holanda De Castro**

Universidade Federal do Ceará - UFC

<http://lattes.cnpq.br/9250831617884112>

**RESUMO:** O sistema de distribuição de água é o componente de maior custo do sistema de abastecimento de água e por isso é necessário que haja a otimização dos custos tanto na implantação como sua condição de funcionamento. Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo de busca exaustiva aplicado aos problemas de otimização de diâmetros e de operação de bombas. Visto que o número de soluções cresce exponencialmente em função do número de trechos, no caso da otimização de diâmetros, e da quantidade de bombas, no

caso da otimização de estratégias operacionais, foi utilizada uma rede com 8 trechos para o custo mínimo de implantação e uma segunda rede com uma bomba para o custo mínimo energético. A análise do tempo computacional foi feita utilizando programação sequencial e programação paralela, sendo esta última responsável por uma grande redução do tempo de execução visto que a mesma atua por meio de multi threads, fazendo com que todos os processadores do computador sejam utilizados simultaneamente no processo de busca.

**PALAVRAS-CHAVE:** Redes de Distribuição de Água, Busca Exaustiva, Otimização.

### PARALLEL EXHAUSTIVE SEARCH ALGORITHM IN PROBLEMS OF OPTIMIZATION OF WATER SUPPLY SYSTEMS

**ABSTRACT:** Water distribution networks are the most expensive components of a water supply system; therefore, it is important to optimize costs both in deployment and operation. For this paper, an algorithm was developed using exhaustive search applied to problems of diameter optimization and operational strategies for pumps. Since the number of algorithm iterations increases exponentially due to the number of pipes, in the case of diameters optimization, or to the number of pumps, in the

case of optimization of operational strategies, a network with eight pipes was used as model to find the minimum implementation cost, and a second network containing one pump was used to find the minimum energy cost. The computational time analysis was achieved using sequential parallel programming, the latter being responsible for a large reduction in execution time since it operates through multiple threads, causing all computer processors to be used simultaneously in the search process.

**KEYWORDS:** Water Distribution Networks; Exhaustive Search; Optimization.

## 1 | INTRODUÇÃO

É de fundamental importância que o homem tenha acesso à água de qualidade e em quantidades suficientes para satisfazer todas as necessidades. De acordo com o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos, do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, pode-se estimar que o setor saneamento brasileiro, no ano de 2017, gerou, aproximadamente, 580,9 mil empregos diretos, indiretos e de efeito. Logo, além de ser essencial à saúde, também é comprovado que a implantação de redes de distribuição de água possibilita o desenvolvimento econômico da população beneficiada. Além disso, as redes de distribuição melhoram a qualidade de vida dos habitantes com pouco tempo de implantação, já que proporcionam prevenção contra doenças relacionadas a esse líquido, melhora nos hábitos higiênicos da população, limpeza pública, entre outras.

Por outro lado, é necessário um grande investimento para a implantação e operação de redes de abastecimento de água, sendo esta a responsável pela maior parte dos custos de um sistema de abastecimento de água. Tendo isso em vista, a rede deve ser projetada de modo que os gastos sejam reduzidos ao máximo, já que o valor investido para a implantação de uma rede é altíssimo. Além disso, é preciso que haja a manutenção da rede, garantindo o adequado estado de operação.

Segundo o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos, do SNIS, referente ao ano de 2017, para abastecimento de água há dados de 5.126 municípios com população urbana de 172,1 milhões de habitantes, assegurando uma representatividade de 92,0% em relação ao total de municípios e de 98,0% em relação à população urbana do Brasil. Desse modo, a maioria dos municípios brasileiros possui serviço de abastecimento de água, porém, é notável que a qualidade desse abastecimento é insuficiente, não somente nos aspectos químicos, físicos e bacteriológicos como também no que diz respeito ao atendimento da demanda.

O crescimento da população e a expansão das cidades fez surgir a necessidade de ampliar as redes existentes e de adequar os sistemas de bombeamento ao aumento da demanda, pois é comum que determinadas áreas não sejam abastecidas ou que em algumas horas do dia o abastecimento de água não seja satisfatório. Esse

problema diz respeito não somente a implantação de um sistema bem dimensionado, como também a gestão adequada e eficaz dos recursos hídricos.

Assim, surge a necessidade de estudo das opções de dimensionamento das tubulações, levando em consideração que quanto maiores os diâmetros, mais caros estes serão. Em contrapartida, reduzir os diâmetros aumenta a perda de carga, ou seja, mais energia será perdida pela água quando esta escoar e, conseqüentemente, as propriedades hidráulicas da rede, como pressões nos nós e velocidades nos trechos, têm suas qualidades reduzidas. Desse modo, para o dimensionamento ótimo da rede de distribuição de água é preciso que as restrições hidráulicas sejam atendidas, ou seja, que a rede proporcione condições mínimas de funcionamento para que seja garantido o abastecimento de água em todos os pontos.

Por outro lado, a otimização de estratégias operacionais de bombas se faz necessária para minimizar o custo energético com o sistema de bombeamento, visto que, em longo prazo, esse valor pode chegar a superar o custo de implantação da rede. Levando em consideração que o KWh possui custo diferente de acordo com a hora do dia e que o abastecimento de água não pode ser interrompido ou ter a qualidade prejudicada em nenhum momento, é necessário que as bombas contidas na rede de distribuição de água sejam ligadas em momentos que a tarifa de energia seja a menor possível e que nos momentos em que estiverem desligadas, a água armazenada nos reservatórios seja suficiente para suprir a demanda da população.

Diversos métodos já foram desenvolvidos com o intuito de reduzir os custos com sistemas de abastecimento de água para ambos os problemas. Exemplos de métodos encontrados na literatura para dimensionamento ótimo de redes de distribuição são: programação linear de Alperovits e Shamir (1977); algoritmo genético de Prasad e Park (2004); recozimento simulado de Cunha e Sousa (1999), busca harmônica de Geem et al. (2002); entre outros. Para o estudo de otimização de estratégias operacionais de bombas tem-se como exemplo programação linear de Francato e Barbosa (1999); algoritmo genético de Rao e Salomons (2007); otimização de colônia de formigas de López-Ibáñez et al. (2008); entre outros.

Contudo, nenhum dos métodos supracitados garante a otimalidade do dimensionamento, sendo o presente trabalho o único capaz de garantir a abordagem da solução ótima global. Embora o problema de otimização de diâmetros seja antigo, não há estudo que utilizasse a busca exaustiva, isto é, testasse todas as combinações possíveis para resolução dos problemas. Para o problema de otimização em estação elevatória, Costa et al. (2015) encontra a solução ótima global utilizando o método Branch-and-Bound, com a restrição da quantidade máxima de acionamentos de cada bomba igual a 3, o que reduz significativamente o espaço de busca.

Para compensar a desvantagem da busca exaustiva, que é o elevado tempo computacional, propõe-se o uso de programação paralela que, diferentemente



da programação sequencial, em que o programa é executado por apenas um processo, ou seja, há somente um fluxo de controle durante a execução, possui um sistema de divisão do programa em vários subprocessos, os quais são executados simultaneamente e conhecidos como threads, termo utilizado para definir uma sequência básica ordenada de instruções que pode ser passada ou processada por um único núcleo de CPU.

Desse modo, a eficácia desse método depende da quantidade de núcleos que possui o computador, já que quanto maior a quantidade de núcleos maior é a capacidade do computador de lidar com multitarefas e conseqüentemente maior será redução do tempo de execução da busca. A programação paralela tem sido amplamente utilizada na resolução de problemas de otimização aplicados à área de saneamento visando à redução do tempo computacional. Pezzi et al. (2014), Hernández et al. (1999) e López-Ibáñez et al. (2008) são exemplos de autores que alcançaram excelentes resultados fazendo uso de programação paralela para redução do tempo em problema aplicados à redes de distribuição de água.

Para o desenvolvimento desse método foi utilizada uma rotina que interage com o simulador hidráulico EPANET, que retorna o comportamento hidráulico de um determinado traçado, por meio de um conjunto de funções contidas na biblioteca EPANET Programmer's Toolkit. Para comprovação da eficácia desses modelos, foram analisadas duas redes exemplos da literatura para o estudo de dimensionamento ótimo, sendo uma ramificada e outra malhada, com o objetivo de evidenciar a utilidade para diferentes tipos de rede. Para o estudo da otimização de estratégias operacionais de bomba, a análise foi feita utilizando uma rede de pequeno porte, que contém uma bomba e dois reservatórios de níveis variáveis.

## 2 | OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal encontrar a solução ótima global para dimensionamento de tubulações e operação de estações elevatórias de redes de distribuição de água utilizando o método de busca exaustiva, isto é, avaliar todas as possíveis soluções para problemas de otimização de custos de implantação, a qual será feita mediante a redução de diâmetros das tubulações, e de operação, que é obtida utilizando a estratégia operacional de bomba que resulte no menor custo energético. Dado que o algoritmo de busca exaustiva percorre todo o espaço de busca para o problema, sendo a solução encontrada a solução ótima global, também é objetivo desse estudo comprovar a confiabilidade de alguns métodos da literatura, visto que alguns deles não fornecem resultados tão eficazes quanto aos encontrados nesse estudo. Além disso, este trabalho visa propor alternativas que reduzam o tempo computacional de busca, como a utilização de programação paralela.

## 3 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Linguagem de Programação

A linguagem usada para elaborar os algoritmos de otimização de diâmetros de tubulações e de estratégias operacionais de bombas foi C# e a IDE (Integrated Development Environment) utilizada foi Microsoft Visual Studio. A linguagem C# foi escolhida pelo fato de ser uma linguagem clara e de fácil compreensão, possuir recursos de programação orientada a objetos e não apresentar problemas de compatibilidade com o ambiente Windows. Além disso, essa linguagem possui várias funções que facilitam o uso de programação paralela, o que proporciona um melhor rendimento com a utilização de multi threads para computadores que possuem mais de um núcleo.

Outra vantagem dessa linguagem é que essa linguagem é compatível com a toolkit do EPANET (EPANET Programmer's Toolkit) que é uma DLL (Dynamic Link Library) composta por várias funções que permitem que o programador personalize o mecanismo computacional do simulador hidráulico EPANET de modo a satisfazer necessidades específicas. Sendo assim, a toolkit é uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento da rotina responsável pela otimização.

O computador utilizado na elaboração e execução do modelo tem um processador Intel® Core™ i3-4005U, 1,70GHz, cache de 3MB, com dois núcleos, quatro processadores e 4GB de memória RAM.

### 3.2 Otimização de Diâmetros

Para reduzir os custos com a implantação de sistemas de abastecimento de água foi desenvolvida uma rotina que consiste em, basicamente, processar um arquivo de extensão “.INP” contendo a rede que se busca otimizar, desenvolvida no EPANET, testando cada possível combinação de diâmetros e calculando o respectivo custo. As combinações são geradas a partir de conversões de base numérica, convertendo o número da combinação da base decimal para a base ND, em que ND é o número de diâmetros testado em cada trecho e dessa forma o número da combinação varia de 0 a  $\{\mathrm{(ND)}^{\mathrm{n}}-1\}$ , sendo n o número de trechos da rede. Desse modo, para cada algarismo que compõe o número gerado pela conversão é atribuído um valor de diâmetro, sendo a primeira combinação correspondente à rede que tem todos os valores de diâmetros iguais ao valor mínimo de diâmetro possível e a última a rede que tem todos os valores de diâmetros iguais ao valor máximo de diâmetro possível.

Por exemplo, em uma rede que possui 5 trechos, sendo cada trecho possui 4 opções de diâmetros (50 mm, 100 mm, 150 mm ou 200 mm), tem-se  $4^5 = 1024$  combinações e o número da combinação que varia de 0 a 1023 será convertido da

base decimal para a base 4, ou seja, cada algarismo do número formado só pode assumir os valores 0, 1, 2 e 3. Desse modo, cada algarismo do número representará um trecho sendo o número 0 equivalente ao diâmetro de 50 mm, o número 1 ao diâmetro de 100 mm, o número 2 ao diâmetro de 150 mm e o número 3 ao diâmetro de 200 mm. Logo, a primeira combinação de número 0, quando convertida para base 4 também será o número 0, ou seja, todos os trechos terão diâmetro igual a 50 mm, e a última combinação será a de número 1023, que quando convertido para a base 4 equivale ao número 33333, sendo assim, todos os trechos terão diâmetro 200 mm. A Tabela 1 apresenta as conversões para algumas combinações.

Número da Combinação	Conversão para BASE 4	Sequência de diâmetros (mm)
0	00000	50 50 50 50 50
1	00001	50 50 50 50 100
2	00002	50 50 50 50 150
3	00003	50 50 50 50 200
4	00010	50 50 50 100 50
1020	33330	200 200 200 200 50
1021	33331	200 200 200 200 100
1022	33332	200 200 200 200 150
1023	33333	200 200 200 200 200

Tabela 1: Conversões de base e diâmetros equivalentes.

Depois que a combinação é gerada, o custo é calculado e são verificadas as restrições hidráulicas. Essas restrições variam de acordo com o problema e geralmente são: as pressões nos nós (que devem estar entre os valores máximo e mínimo); as velocidades nas tubulações (que devem ser menores que a velocidade máxima permitida para cada diâmetro); a perda de carga unitária (que não deve ultrapassar o valor máximo estabelecido pelo projetista). Caso a combinação atenda todas as restrições, ela é considerada como uma solução viável.

Para diminuir o tempo computacional, após a primeira solução ser encontrada, as restrições hidráulicas das próximas combinações serão verificadas apenas se o custo da combinação gerada (ainda não simulada) for menor que o custo da solução encontrada. Caso isso aconteça e a combinação seja viável, o custo mínimo será atualizado e salvo junto com a combinação em um arquivo de texto. Quando todas as possibilidades forem testadas o programa mostra na tela o tempo computacional em segundos.

Essa estratégia foi utilizada tendo em vista que o tempo computacional para calcular o custo é bem menor do que para simular e checar as restrições hidráulicas, pois nessa etapa todos os diâmetros já foram informados e se trata de um cálculo

simples. Em contrapartida, para a análise das restrições é necessário um maior número de procedimentos, como atualizar os diâmetros na rede, executar a simulação hidráulica e, em seguida, captar informações referentes aos trechos e aos nós. Sendo assim, somente serão simuladas aquelas combinações que têm um custo menor do que o encontrado até então (iteração corrente). Essa estratégia proporcionou uma redução de 7,69% do tempo computacional em testes realizados.

Em testes preliminares, as restrições hidráulicas foram checadas e, somente após essas serem atendidas, o custo era calculado, o que apresenta como vantagem o fato de todas as soluções serem encontradas e listadas, porém, foi comprovado que realmente do modo como é indicado pelo fluxograma da Figura 1, o tempo computacional é diminuído significativamente, principalmente para análise de redes maiores. Além disso, a finalidade da busca exaustiva é saber solução ótima global, tornando desnecessário o conhecimento de outras soluções. Esses argumentos reforçaram a escolha do método utilizado para a resolução do problema.

O fluxograma da Figura 1 detalha o processo de execução:

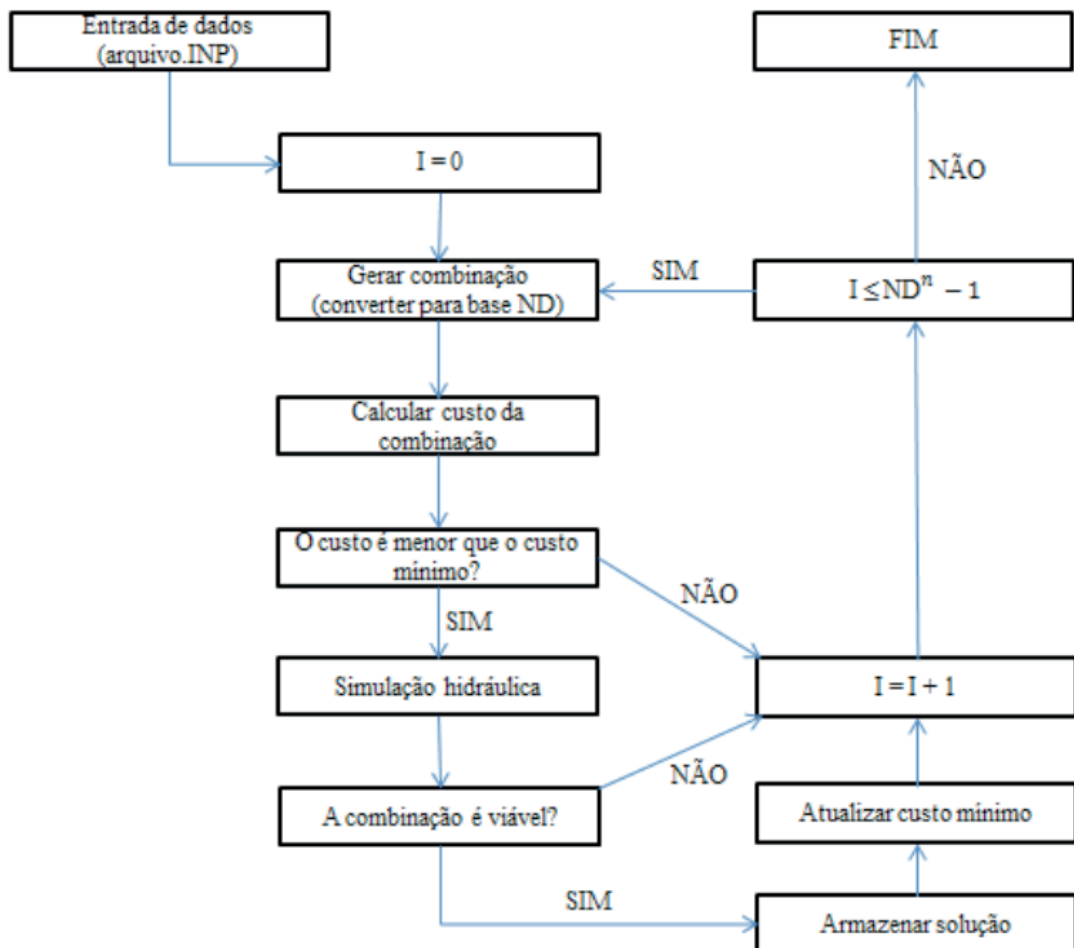


Figura 1: Fluxograma da metodologia proposta.

Quando o arquivo de entrada é processado, são extraídos da rede o número de trechos, assim como os respectivos comprimentos e o número de nós. O valor do custo da combinação () é dado pelo somatório dos custos de cada trecho, sendo

esses o produto do comprimento do trecho (L) pelo custo do metro de tubulação (Cm). Sendo assim, o custo da combinação é obtido pela Equação 1, em que NT é o número de trechos da rede:

$$C_t = \sum_{i=1}^{NT} L_i \times Cm_i \quad (1)$$

Como inicialmente não é conhecido um custo mínimo, todas as combinações de diâmetros são simuladas e as restrições hidráulicas são checadas até que a primeira solução viável seja encontrada. Quando isso ocorrer, o custo mínimo receberá o valor do custo da primeira solução viável encontrada e a partir disso cada combinação só será simulada e sua viabilidade checada se o custo dela for menor do que o custo mínimo. Confirmada a viabilidade da combinação, o custo mínimo será atualizado e a solução armazenada.

Para a adaptação do algoritmo à programação paralela foi necessário dividir o espaço de busca de acordo com a quantidade de threads. Desse modo, cada thread realizará uma parte da busca com  $(ND^n / x)$  iterações, onde x é o número de threads. O esquema mostrado pela Figura 2 mostra como é feita a divisão das iterações.

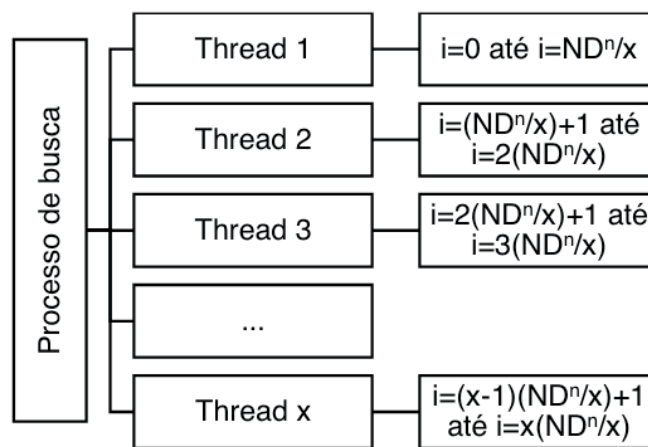


Figura 2 - Divisão do espaço de busca para o algoritmo proposto.

### 3.3 Otimização de Estratégias Operacionais

Da mesma forma que o programa de otimização de diâmetros, esse algoritmo processa um arquivo de extensão “.INP” contendo a rede estudada e cada possível solução é testada por meio de processos iterativos. Visto que uma bomba só pode ter dois estados, ligada ou desligada, para um determinado período, uma estratégia operacional consiste em dizer em quais momentos a bomba está ligada e em quais ela está desligada.

O número de iterações, isto é, o número de estratégias testadas é igual

à quantidade de possíveis estados da bomba elevado ao produto do número de períodos de tempo pela quantidade de bombas pertencentes a rede. Nesse estudo, a duração total da simulação é de 24 horas, em que cada período de tempo possui duração de 1 hora. Logo, a simulação possui 24 períodos de tempo e o número de iterações pode ser obtido pela Equação 2, sendo NB o número de bombas presentes na rede.

$$N = 2^{24 \cdot NB} \quad (2)$$

Logo, a presença de mais de uma bomba na rede de distribuição aumenta exponencialmente o número de iterações e torna complexa a utilização desse modelo computacional devido ao grande tempo computacional para testar e avaliar todas as possíveis soluções para o problema.

As estratégias operacionais nesse algoritmo também são geradas por meio da conversão de bases numéricas. Desse modo, o número da iteração, que varia de 0 até (224-1), é convertido da base decimal para a base binária, sendo o número 0 referente ao estado desligado e o número 1 ao estado ligada. Assim sendo, cada estratégia é composta por um vetor de tamanho igual ao número de horas da simulação, ou seja, 24, onde cada um dos seus parâmetros armazenará o valor do estado da bomba para sua respectiva hora. Desse modo, a primeira estratégia é referente ao vetor preenchido unicamente por 0, isto é, em todos as 24 horas a bomba está desligada, e a última corresponde aquela em que a bomba permanece ligada durante toda a simulação.

Após a estratégia ser gerada, são checadas as restrições hidráulicas impostas para que a estratégia operacional garanta o fornecimento ininterrupto de água à população. Dessa forma, deve-se garantir que durante todo o período de simulação os níveis de todos os reservatórios presentes na rede devem estar entre os níveis máximo e mínimo estabelecidos pelo projeto e que o nível de cada um durante a última hora seja superior ou igual ao nível da primeira hora do dia. Caso a estratégia seja viável o custo é calculado, sendo salva em um arquivo de texto.

O fluxograma apresentado pela Figura 3, mostra o esquema construtivo do algoritmo de otimização de estratégias operacionais de bombas.

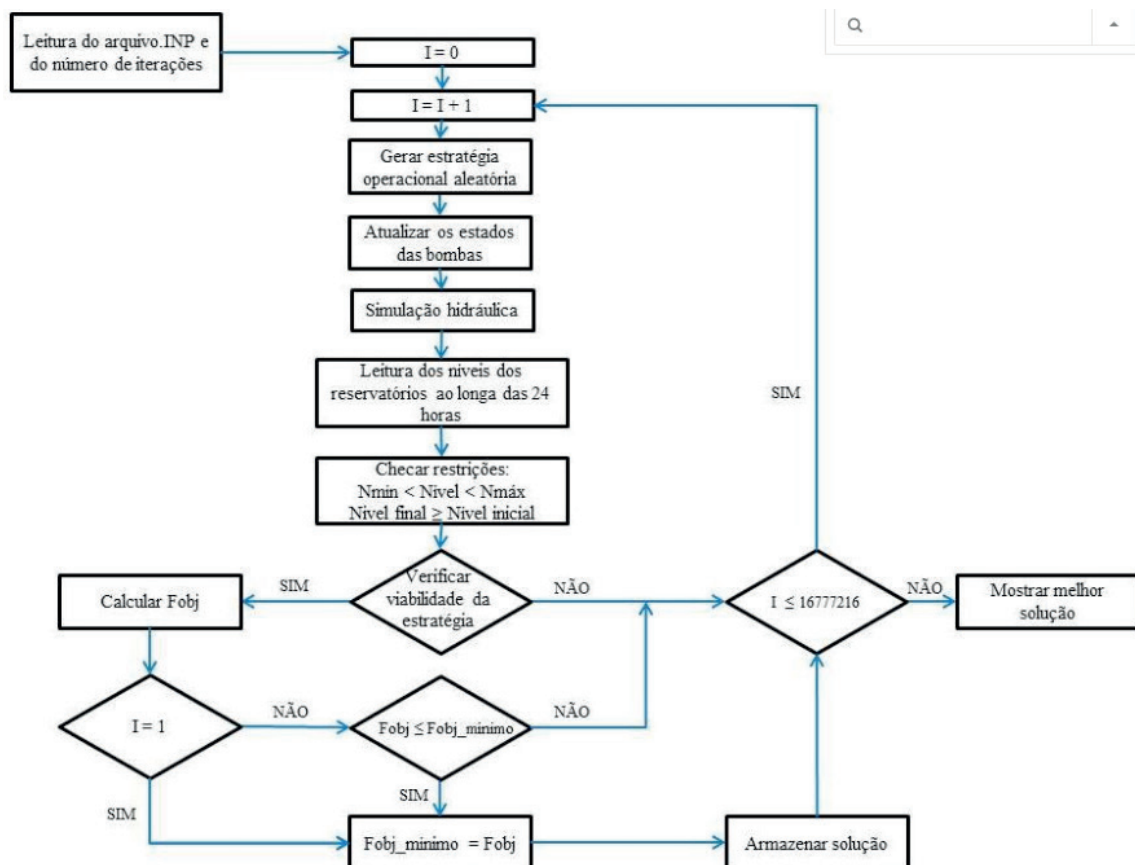


Figura 3: Esquema construtivo do algoritmo de otimização de estratégias operacionais.

Como mostra o fluxograma, inicialmente o algoritmo faz a leitura do arquivo “.INP” e são extraídos dados importantes para a realização das iterações, como a duração total da simulação, o número de períodos de tempo que compõe o padrão da bomba, a tarifa energética para cada hora do dia, os níveis inicial, mínimo e máximo de cada reservatório e o intervalo de cálculo hidráulico. Logo após, é calculado o número de iterações e o processo é iniciado.

Vale ressaltar que trabalhar com padrões de tempo significa que o tipo de simulação é dinâmica, ou seja, para cada iteração serão verificadas as restrições hidráulicas a cada hora. A metodologia adotada para definir se a estratégia é viável ou não consiste em criar um vetor representativo, de mesmo tamanho do vetor da estratégia, que possui todos os parâmetros inicializados como zero e cada um deles representa um período da simulação.

Para cada erro encontrado, isto é, não satisfação de alguma das restrições hidráulicas, em determinada hora, será acrescentada uma unidade no valor que equivale a hora no vetor representativo. Desse modo, ao término da simulação, para cada estratégia será feita a soma de todos os parâmetros presentes no seu vetor representativo, caso a soma seja zero a estratégia é viável.

Caso a solução seja viável é calculado o custo energético (CE), que pode ser obtido pelo somatório do produto da energia em kWh (P) pela tarifa energética (T)

em cada hora, como mostra a Equação 3. A energia gasta pela bomba é obtida mediante a uma função contida na toolkit do EPANET, que retorna a energia em kWh gasta para determinado período da simulação. Desse modo, para cada execução de cálculo hidráulico, que pode ser feito mais de uma vez dentro do período de uma hora, é obtido um valor de energia e são somadas as parcelas para determinar a quantidade de energia em kWh para cada hora da simulação.

$$C_E = \sum_{i=1}^n P_i * T_i \quad (3)$$

O primeiro custo mínimo adotado é o valor da primeira estratégia viável. Todas as estratégias viáveis e seus respectivos custos são salvos em um arquivo de texto e contabilizados. Ao final da busca o programa retorna o tempo computacional requerido, o número de soluções viáveis disponíveis e a melhor estratégia operacional encontrada, bem como o custo.

A adaptação do algoritmo de otimização de estratégias operacionais de bombas à programação paralela é feita de forma semelhante ao do algoritmo de dimensionamento ótimo, sendo a busca dividida em x threads, cada uma com  $(2^{24}/x)$  iterações. A figura 4 mostra como se deu a divisão do espaço de busca para essa aplicação.

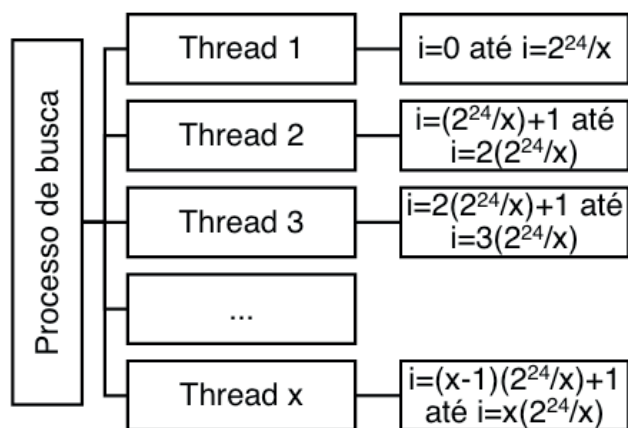


Figura 4: Divisão do espaço de busca para algoritmo de otimização de estratégias operacionais de bombas.

## 4 | RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 Otimização de Diâmetros

A fim de comprovar a aplicabilidade do modelo computacional apresentado, tem-se como objeto de estudo a rede hipotética 1, que foi analisada por vários pesquisadores, composta por dois anéis, 8 trechos e 6 nós, apresentada em Alperovits e Shamir (1977). O traçado é mostrado na Figura 5, assim como os consumos nos



nós, as cotas de terreno e os comprimentos das tubulações. Serão testados 14 diâmetros diferentes que são 25,4 mm, 50,8 mm, 76,2 mm, 101,6 mm, 152,4 mm, 203,2 mm, 254,0 mm, 304,8 mm, 355,6 mm, 406,4 mm, 457,2 mm, 558,8 mm e 609,6 mm, com características representadas na Tabela 2. As perdas de carga serão calculadas pela fórmula de Hazen Williams, com  $C=130$ , e a pressão mínima nos nós é 30 mca.

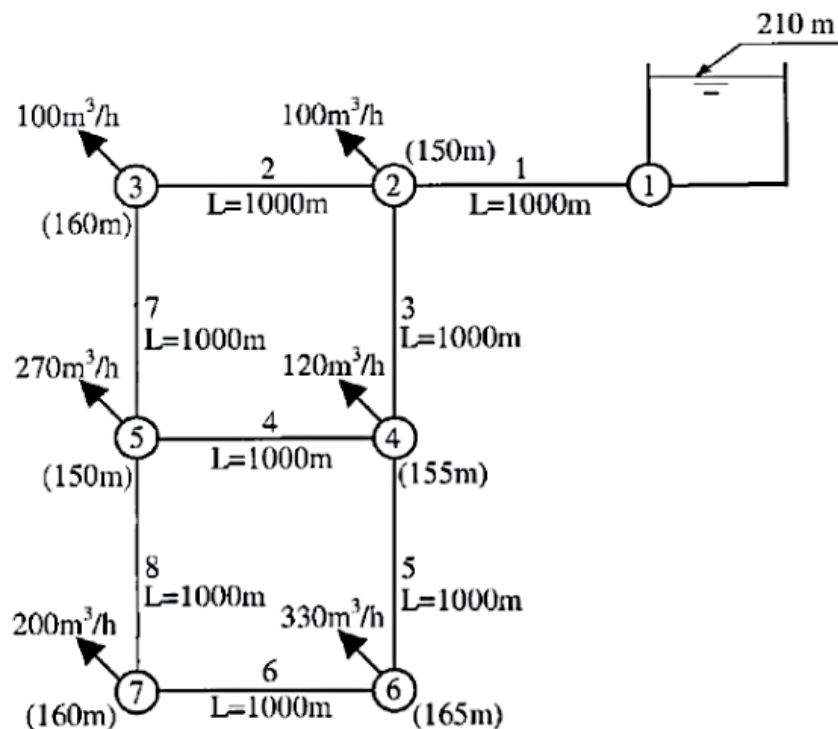


Figura 5: Rede hipotética 1.

Diâmetro (pol.)	Diâmetro (mm)	Custo (un.)
1	25,4	2
2	50,8	5
3	76,2	8
4	101,6	11
6	152,4	16
8	203,2	23
10	254,0	32
12	304,8	50
14	355,6	60
16	406,4	90
18	457,2	130
20	508,0	170
22	558,8	300
24	609,6	550

Tabela 2 - Custos para tubos.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em Alperovits e Shamir, 1977.

Para este caso, a rede é composta por 8 trechos e existem 14 opções de diâmetros. Logo, temos  $14^8 = 1475789056$  combinações, onde o número da combinação varia de 0 a 1475789055, o qual será convertido da base decimal para a base 14. Cada algarismo do número obtido poderá assumir os valores 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, ou 13 que corresponderam, respectivamente, aos diâmetros 25,4 mm, 50,8 mm, 76,2 mm, 101,6 mm, 152,4 mm, 203,2 mm, 254,0 mm, 304,8 mm, 355,6 mm, 406,4 mm, 457,2 mm, 558,8 mm e 609,6 mm. A combinação que proporcionou o menor custo é representada na Tabela 3, assim como as informações referentes às pressões nos nós e velocidades e perdas de carga nos trechos.

Trecho	Diâmetro (mm)	Diâmetro (pol.)	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	Perda de carga (m)	Nó	Pressão (mca)
1	457,2	18	311,11	1,90	6,75	2	53,25
2	254,0	10	93,58	1,85	12,78	3	30,46
3	406,4	16	189,76	1,46	4,80	4	43,45
4	101,6	4	9,05	1,12	14,65	5	33,80
5	406,4	16	147,38	1,14	3,00	6	30,45
6	254,0	10	55,71	1,10	4,89	7	30,55
7	254,0	10	65,80	1,30	6,66		
8	25,4	1	0,16	0,31	6,75		

Tabela 3: Resultados utilizando o método proposto.

A solução ótima global possui a seguinte combinação de diâmetros: 457,2 mm, 254,0 mm, 406,4 mm, 101,6 mm, 406,4 mm, 254,0 mm, 254,0 mm e 25,4 mm. Essa combinação corresponde ao número A6939660 na base 14 e é a combinação de número decimal 1104293876. O custo total da tubulação foi de 419000 unidades monetárias. A menor pressão da rede foi 30,45 mca e a maior velocidade foi 1,90 m/s. Todas as possíveis soluções foram testadas em 12532 segundos, ou seja, aproximadamente 3 horas e meia.

A quantidade total de combinações que atenderam as restrições impostas pelo problema foi de 64128699 soluções viáveis, sendo o valor máximo de dimensionamento igual a 4400000 unidades. Logo, as soluções viáveis têm valor variando entre 419000 e 4400000 unidades. Devido ao elevado número de soluções não foi possível gerar o gráfico dos custos em função do número das soluções para analisar o comportamento dos resultados ao decorrer da busca, porém, é esperado que, a medida que o tempo de busca for passando, os custos tendam a aumentar,

visto que os menores diâmetros são testados primeiro.

Visando à diminuição do tempo computacional, foram feitos testes utilizando programação paralela com diferentes números de threads. Assim, foram realizados testes dividindo o espaço de busca em 2, 4, 6 e 8 partes. A Figura 6 apresenta os resultados de tempo para os algoritmos de otimização de diâmetros, em que é possível perceber que não houve grande redução de tempo a partir de 4 threads.

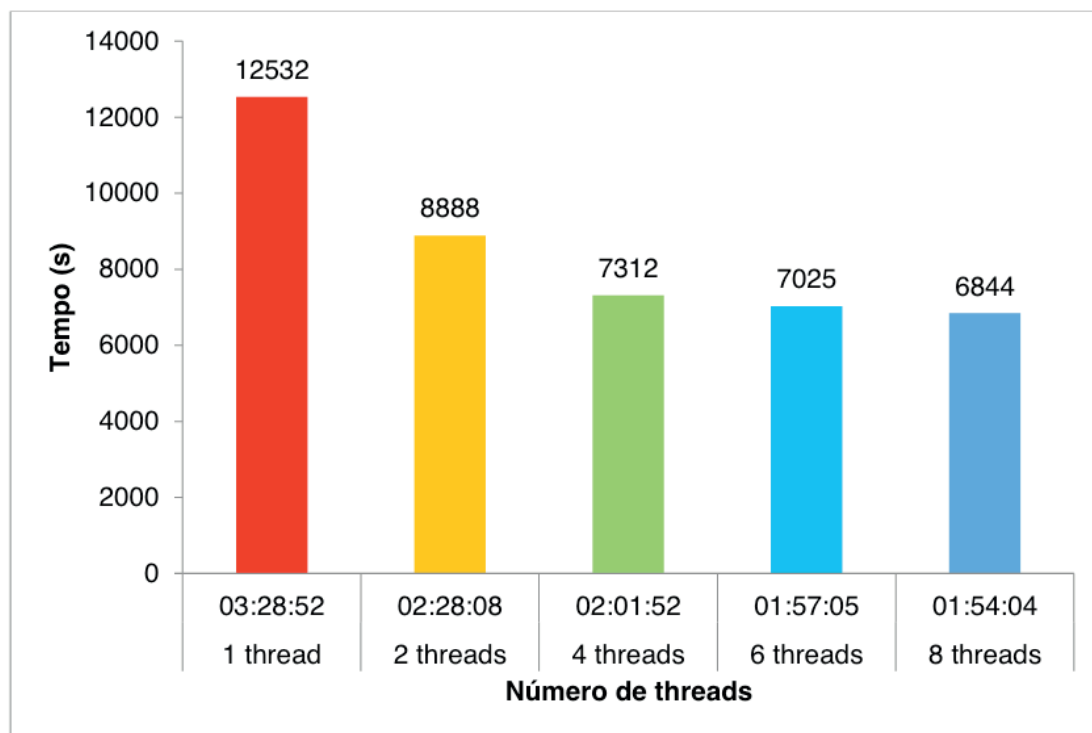


Figura 6: Resultados de tempo para algoritmos de otimização de diâmetros.

A quantidade de threads que proporcionou menor duração foi 8, com tempo computacional total de 1 hora 54 minutos e 4 segundos, representando uma diminuição de 54,61% do tempo computacional em relação a 1 thread. A Figura 7 mostra como se deu a divisão do espaço de busca utilizando a rede de Alperovits e Shamir.

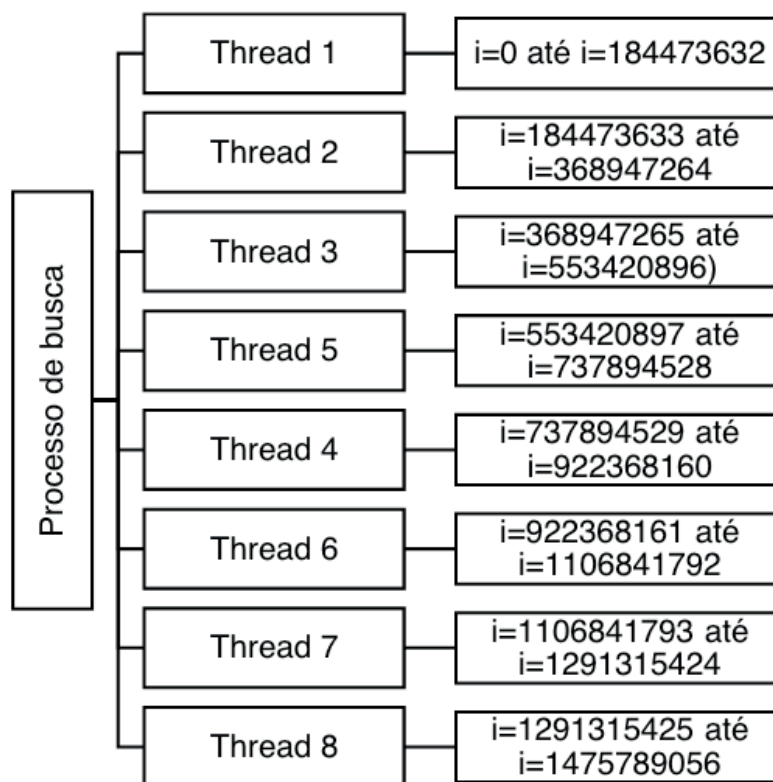


Figura 7: Divisão do espaço de busca utilizando a rede hipotética 1.

## 4.2 Otimização de Estratégias Operacionais de Bombas

Para validar o modelo computacional desenvolvido no estudo de otimização de estratégias operacionais, utilizou-se uma rede hipotética 2, criada por Francato e Barbosa (1999). A Figura 8 apresenta uma ilustração esquemática da rede utilizada para teste e as Tabelas 4 e 5 apresentam as características físicas referentes às tubulações e aos nós da rede. A Tabela 6 apresenta a tarifa energética cobrada pelo kWh de energia para cada hora do dia.

A equação da perda de carga utilizada para resolução do problema foi a de Hazen Williams, com coeficiente de rugosidade da fórmula  $C=130$ . A rede possui dois reservatórios de nível variável, sendo que o reservatório 1 possui os níveis máximo e mínimo, respectivamente, nas cotas 735 e 726 m. O reservatório 2, por sua vez, possui os níveis máximo e mínimo, respectivamente, nas cotas 731 e 722 m. A duração total da simulação será de 24 horas, sendo o intervalo de cálculo hidráulico 1 hora.

Para que a estratégia operacional seja considerada viável é necessário que durante todo o período da simulação os níveis dos reservatórios estejam entre os níveis máximo e mínimo, que os níveis finais sejam maiores ou iguais aos níveis iniciais e que não haja mais do que 3 acionamentos da bomba durante o dia. É importante ressaltar que é considerado como sendo 1 acionamento se a bomba estiver desligada durante a última hora do dia e ligada durante a primeira, visto que

na mudança de um dia para o outro a bomba será acionada.

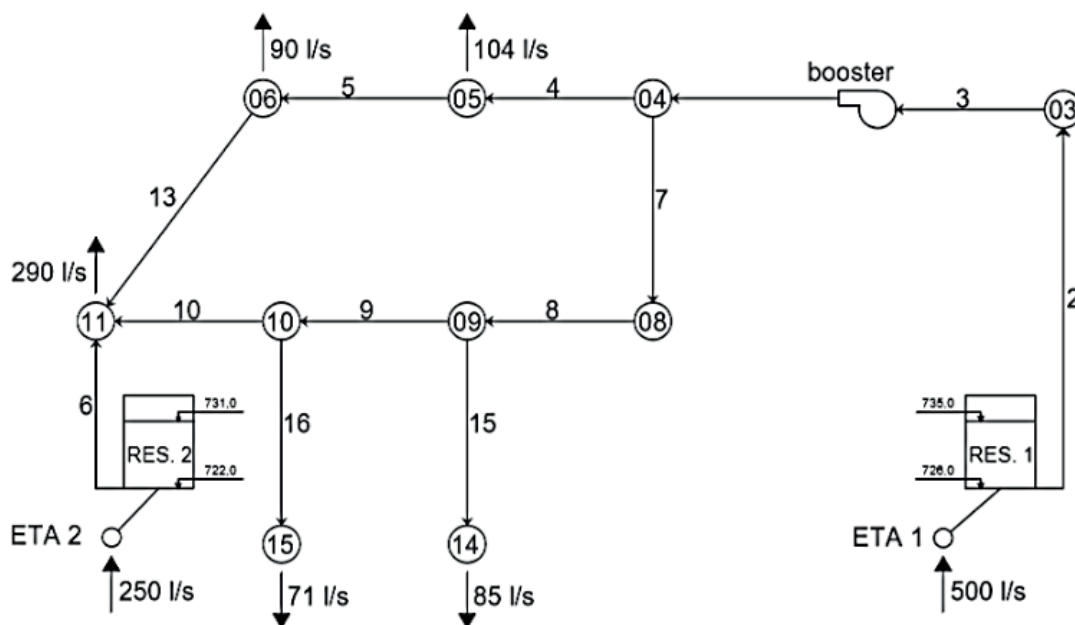


Figura 8: Rede hipotética 2.

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
2	100	450
3	500	400
4	500	450
5	550	450
6	100	400
7	800	450
8	500	450
9	550	400
10	500	400
13	900	400
15	200	350
16	200	350

Tabela 4: Dados das tubulações da rede hipotética 2.

Fonte: Francato e Barbosa, 1999.

Nó	Cota (m)	Vazão Demandada (L/s)
3	715	0
4	720	0
5	714	104
6	713	90
8	717	0
9	715	0

10	710	0
11	716	399
14	713	85
15	707	71

Tabela 5: Dados dos nós da rede hipotética 2.

Fonte: Francato e Barbosa, 1999.

Hora	Tarifa (R\$)	Hora	Tarifa (R\$)
1	0,1814	13	0,3528
2	0,1814	14	0,3528
3	0,1814	15	0,3528
4	0,1814	16	0,3528
5	0,1814	17	0,3528
6	0,1814	18	0,8097
7	0,1814	19	0,8097
8	0,3528	20	0,8097
9	0,3528	21	0,8097
10	0,3528	22	0,1814
11	0,3528	23	0,1814
12	0,3528	24	0,1814

Tabela 6: Tarifas energéticas.

Visto que a rede possui apenas uma bomba, o número de estratégias total a serem testadas é igual a 224, ou seja, 16777216 estratégias. Logo o número das iterações varia de 0 a 16777215 e cada um será convertido da base decimal para binária, representando o estado da bomba para cada uma das 24 horas, onde 0 informa que a bomba está desligada e 1 que a bomba está ligada em determinada hora.

Sendo as cotas do fundo dos reservatórios iguais as cotas dos nível mínimo da água, temos que para o reservatório 1 o nível mínimo da água é 0 e o máximo é de 9 m, sendo estabelecido o nível inicial igual a 4 m. Para o reservatório 2 o nível mínimo da água também é 0 e o nível máximo é de 9 m, sendo inicializado com 4 m. Vale ressaltar que durante o processo de busca os níveis dos reservatórios serão verificados de acordo com a pressão nos pontos representados pelos reservatórios, visto que não há uma função na toolkit que retorne especificamente o nível da água.

A melhor estratégia computacional encontrada, ou seja, aquela que proporcionou o menor custo diário e que atendeu a todas as restrições impostas é mostrada pela Tabela 7.

Hora	Estado da Bomba	Hora	Estado da Bomba
1	0	13	1
2	0	14	1
3	0	15	1
4	1	16	1
5	1	17	1
6	1	18	0
7	1	19	0
8	0	20	0
9	0	21	0
10	0	22	1
11	1	23	0
12	1	24	0

Tabela 7: Melhor estratégia operacional encontrada.

Durante o processo de busca foram encontradas 32704 soluções que atendem as restrições impostas, sendo o menor custo energético diário encontrado igual a R\$ 1010,89 e sendo necessários 19 minutos e 51 segundos para completar toda a busca.

A Figura 9 mostra os níveis dos reservatórios em função do tempo. O menor nível atingido pelo reservatório 1 foi de 3,53 m e o maior foi de 8,89 m. Para o reservatório 2, o menor e o maior nível atingidos foram, respectivamente 3,83 e 8,16 m. Além disso, é possível notar pela Figura 8 que os níveis são maiores ao final da simulação do que no início. Desse modo, a melhor estratégia encontrada pelo algoritmo desenvolvido nesse estudo atende as restrições impostas.

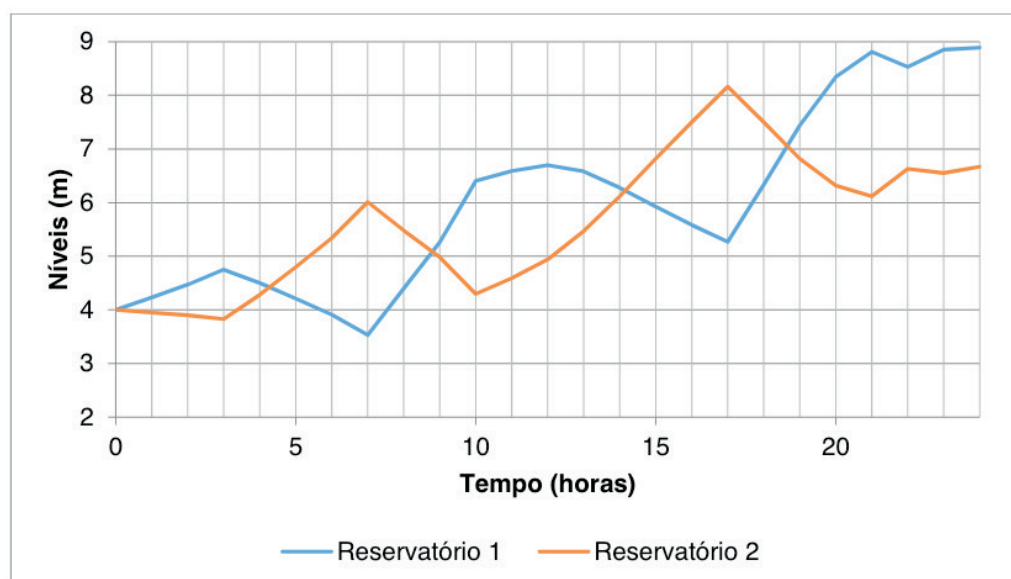


Figura 9: Níveis dos reservatórios durante a simulação.

Para esse estudo de caso também foi feito o uso de programação paralela para otimizar o tempo computacional. Os testes foram realizados com a divisão da busca em 2, 4, 6 e 8 threads. Os resultados de tempo são mostrados na figura 10, onde é possível perceber que não houve significativa redução a partir de 4 threads.

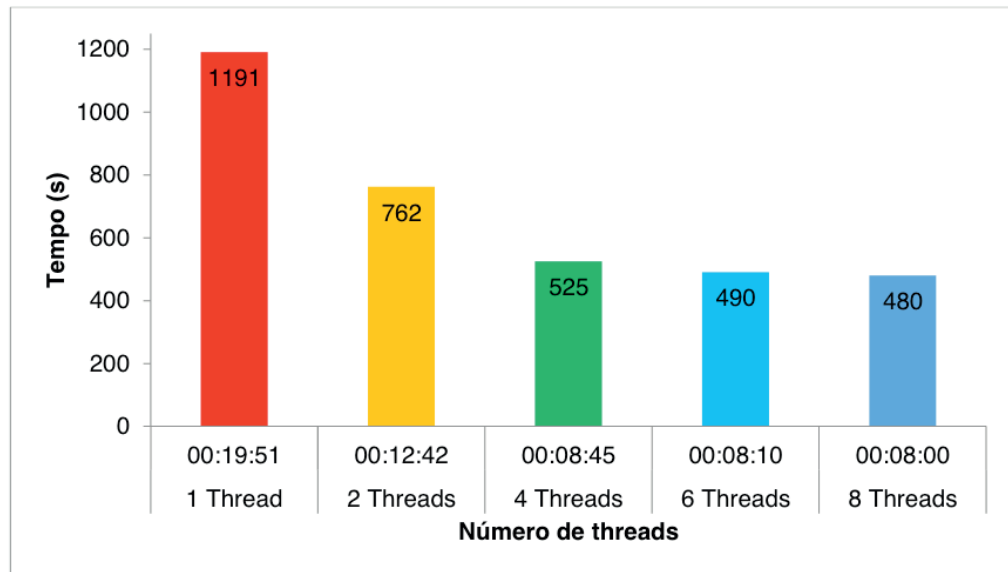


Figura 10: Resultados de tempo para algoritmo de otimização de estratégias operacionais de bombas.

O algoritmo que apresentou melhor resultado foi o de 8 threads, com duração total de exatos 8 minutos, proporcionando uma diminuição de 59,70% do tempo computacional em relação a 1 thread. A Figura 11 apresenta a divisão do espaço de busca para o estudo da rede de Francato e Barbosa utilizando 8 threads, que será sempre a mesma para redes que possuem apenas uma bomba.

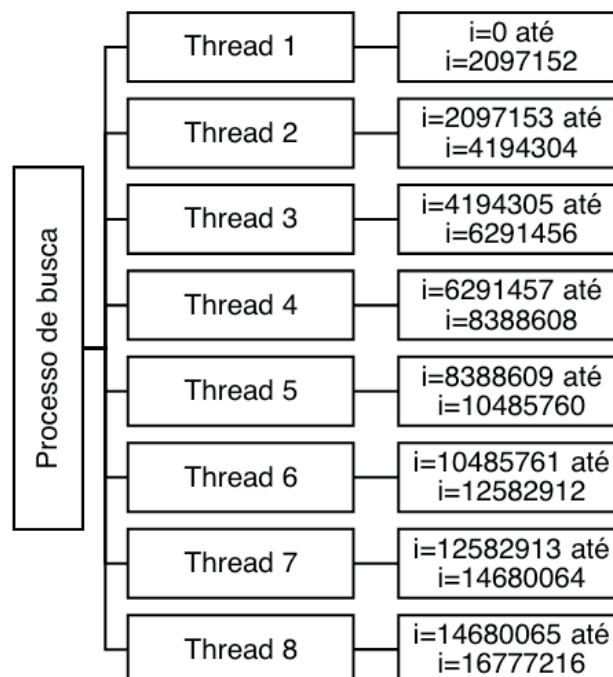


Figura 11: Divisão do espaço de busca para o estudo da rede hipotética 2.



## 5 | DISCUSSÃO

### 5.1 Otimização de Diâmetros

Vários trabalhos utilizaram a rede Alperovits e Shamir como objeto de estudo visando a redução máxima do custo, sendo exemplos mostrados na Tabela 8. Alguns desses métodos consistem em dividir trechos, podendo cada um deles ter mais de um diâmetro, sendo o custo mínimo o de Eiger et. al. (1994), com 402352 unidades monetárias. Dos trabalhos encontrados sem a divisão de trechos, o menor custo encontrado foi de 419000 unidades monetárias.

Literatura	Método	Custo (un.)
Alperovits e Shamir (1977)	Programação linear	497525
Goulter et al. (1986)	Programação linear	435015
Savic e Walters (1997)	Algoritmo genético	419000
Sherali e Smith (1997)	Programação linear	436684
Sherali et al. (1998)	Programação linear	436915
Abebe e Solomatine (1998)	Algoritmo genético	419000
Cunha e Sousa (1999)	Recozimento simulado	419000
Todini (2000)	Índice de resiliência	419000
Geem et al. (2002)	Busca harmônica	419000
Eusuff e Lansey (2003)	Algoritmo de pulo de sapo	419000
Prasad e Park (2004)	Algoritmo genético	419000
Presente modelo	Busca exaustiva paralela	419000

Tabela 8: Soluções para a rede hipotética 1.

Vale acrescentar que, embora outros autores tenham encontrado a mesma solução, o método apresentado neste estudo é o único capaz de assegurar que a solução encontrada é a solução ótima global, já que todas as possibilidades de dimensionamento foram enumeradas e os custos calculados, o que valida a necessidade de utilizar a busca exaustiva para esse tipo de problema, não só por ser eficiente em encontrar a solução ótima global mas também por confirmar que os modelos desenvolvidos por outros autores, que chegaram a mesma solução, para esse estudo de caso, também são eficazes.

Em contrapartida, o fato de o número de combinações crescer exponencialmente em função do número de trechos da rede dificulta a utilização da busca exaustiva para redes com um número elevado de trechos. Como resultado disso, tem-se um grande tempo computacional para listar todas as possíveis soluções e avaliar os custos, sendo necessário a implementação de práticas que otimizem o tempo, como por exemplo a programação paralela, como foi demonstrado nesse trabalho por

meio de testes, apresentou grande eficácia na redução do tempo computacional, diminuindo-o quase pela metade.

Uma segunda estratégia seria reduzir a quantidade de diâmetros testados em cada trecho, já que uma pequena redução dessa variável resulta em uma grande redução do número de combinações. Vale ressaltar que o aumento da quantidade de trechos dificulta a construção e generalização de modelos baseados em pesquisa operacional como, por exemplo, programação linear e no tempo computacional para métodos estocásticos, como algoritmo genético.

## 5.2 Otimização de Estratégias Operacionais de Bombas

Em análise aos resultados obtidos para o estudo de otimização de estratégias operacionais de bombas, a Figura 12 apresenta o gráfico da variação do custo das estratégias viáveis ao decorrer da busca, que foi possível ser gerado nesse estudo já que esse problema possui uma menor quantidade de soluções viáveis do que o de dimensionamento ótimo. É possível notar que o custo tende a aumentar ao decorrer da busca. Isso ocorre devido ao fato de a busca começar com as combinações em que na maior parte do tempo a bomba está desligada e conseqüentemente o custo energético é menor.

Além disso, é possível perceber que existem regiões com custos mínimos quando comparados com os demais pontos próximos, mas que não representam o valor mínimo que o custo pode atingir, chamados de mínimos locais. Esses pontos são responsáveis pela convergência prematura de algoritmos estocásticos e conseqüentemente pela ineficácia desses métodos em encontrar a solução ótima global em alguns casos, tornando-os algoritmos menos confiáveis.

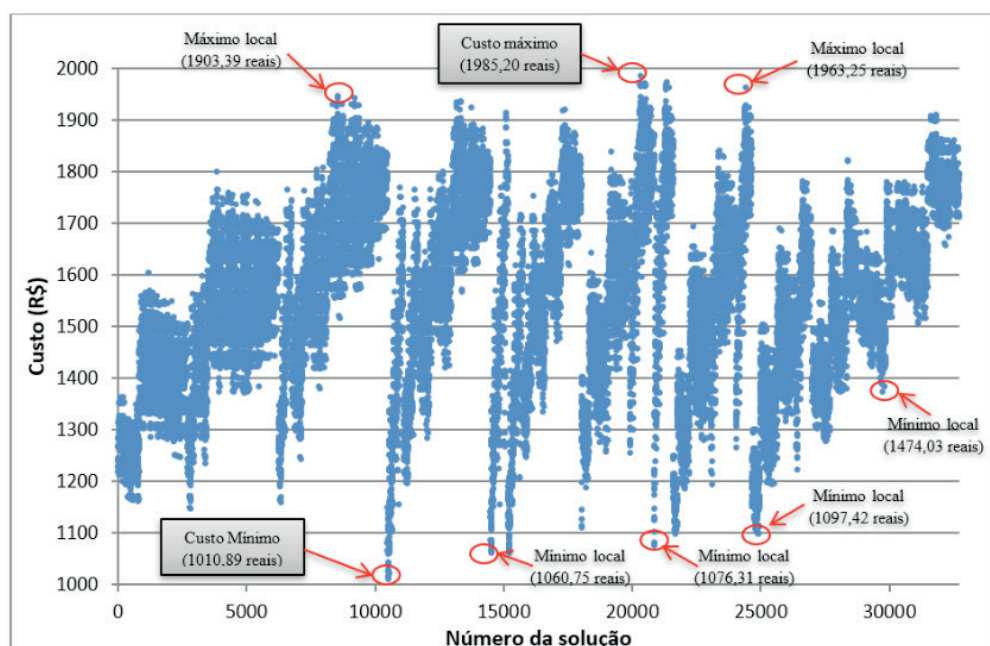


Figura 12: Estratégias viáveis o problema proposto.

## 6 | CONCLUSÕES

Definir o diâmetro ótimo para as tubulações de redes de distribuição e a estratégia que minimize o custo energético de bombas em sistemas de abastecimento de água tem sido um dos grandes desafios para os estudiosos da área. Vários métodos foram utilizados para otimizar os custos com implantação e operação dos sistemas. Este trabalho enumerou todas as possíveis soluções existentes para cada um dos problemas estudados e avaliou o custo de cada uma delas, a fim de encontrar a solução ótima global.

No estudo da otimização de diâmetros foi obtido um excelente resultado. Para a rede de Alperovits e Shamir, o método apresentado encontrou a solução ótima global e provou que os métodos que alcançaram o valor de 419000 unidades foram eficazes, como o de Cunha e Sousa (1999) e Prasad e Park (2004), pois não é possível haver solução com menor custo que a encontrada, visto que, pelo método de busca exaustiva, todas as combinações de diâmetro são testadas, ou seja, nenhuma combinação é excluída do espaço de busca, dado que para todas as possíveis combinações foi calculado o custo.

No caso da otimização de estratégias operacionais de bombas, é importante notar que, devido a alta potência das bombas utilizadas em redes de distribuição, o custo diário com energia elétrica é elevado e uma pequena redução já representa um valor significativo quando visto sob o ponto de vista mensal. Além disso, essa redução será resultado apenas da tomada de decisões, isto é, haverá economia em curto prazo sem que haja necessidade de investimento. Outro fator importante é que além de diminuir os custos, haverá a garantia do abastecimento de água ininterrupto, que nem sempre é satisfatório devido ao funcionamento inadequado dos sistemas de bombeamento.

O grande desafio da busca exaustiva está no grande tempo computacional necessário para testar todas as combinações, sendo viável apenas para redes com pequena quantidade de trechos, no caso da otimização de diâmetros, e para redes com apenas uma bomba, no caso da otimização de estratégias operacionais de bombas. Talvez no futuro, com o avanço da tecnologia, a capacidade de processamento dos computadores seja suficiente para processar redes com as características mencionadas anteriormente via busca exaustiva em tempos consideravelmente curtos.

Por enquanto, a melhor estratégia para a busca exaustiva encontrada é a utilização de programação paralela, a qual se mostrou eficaz na redução do tempo de execução, tanto para o algoritmo de otimização de diâmetros como para o de otimização de estratégias operacionais de bombas. Em ambos os programas a redução do tempo foi superior a 50%, podendo ainda ser aumentada utilizando

computadores com uma maior quantidade de núcleos ou dividindo a busca para vários computadores. Desse modo, o uso de busca exaustiva, que é a melhor opção em termos de confiabilidade, poderá ser feito futuramente com redes de maior porte para resolução de problemas de otimização de sistemas de distribuição de água.

## REFERÊNCIAS

- ABEBE, A. J.; SOLOMATINE, D. P. **Application of global optimization to the design of pipe networks**. Proc. 3rd International Conference on Hydroinformatics, Copenhagen Balkema Rotterdam, p. 986-996, ago. 1998.
- ALPEROVITS, A.; SHAMIR, U. **Design of optimal water distribution systems**. Water Resources Research, v. 13, n. 6, p. 885-900, dez. 1977.
- COSTA, L. H. M.; PRATA, B. A.; CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H. M. **A Branch-and-Bound Algorithm for Optimal Pump Scheduling in Water Distribution Networks**. Water Resources Management, v. 30, n. 3, p. 1037-1052, dez. 2015.
- CUNHA, M. C.; SOUSA, J. **Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 125, ed. 4, p. 215-221, jul/ago 1999.
- EUSUFF, M. M.; LANSEY, K. E. **Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 129, n. 3, p. 210–225, maio 2003.
- FRANCATO, A. L.; BARBOSA, P. S. F. **Operação Ótima de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água**. XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Águas de Lindóia, SP, 1999.
- HERNÁNDEZ, V.; MARTÍNEZ, F.; VIDAL, A.M.; ALONSO, J.M.; ALVARRUIZ, F.; GUERRERO, D.; RUIZ, P.A.; VERCHER, J. **HIPERWATER: A High Performance Computing EPANET-Based Demonstrator for Water Network Simulation and Leakage Minimisation**. Water Industry Systems: modelling and optimization applications, v. 1, p. 141-153, set. 1999.
- GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; LOGANATHAN, G. V. **Harmony search optimization: application to pipe network design**. International Journal of Modelling and Simulation, v. 22, n. 2, p. 125-133, 2002.
- GOULTER, I. C.; LUSSIER, B. M.; MORGAN, D. R. **Implications of head loss path choice in the optimization of water distribution networks**. Water Resources Research, v. 22, n. 5, p. 819-822, maio 1986.
- LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; PRASAD, D.T.; PAECHTER, B. **Parallel Optimisation of Pump Schedules with a Thread-safe Variant of Epanet Toolkit**. Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA, ago. 2008.
- PEZZI, G. P.; VAISSIÉ, E.; VIALA, Y.; CAROMEL, D.; GOURBESVILLE, P. **Parallel profiling of water distribution networks using the Clément formula**. Applied Mathematics and Computation, v. 267, p. 83-95, set. 2015.
- PRASAD, T. D.; PARK, N. S. **Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 130, n. 1, p. 73–82, jan. 2004.
- RAO, Z.; SALOMONS, E. **Development of a real-time, near-optimal control system for water distribution networks**. Journal of Hydroinformatics, v. 9, n. 1, p. 25-37, jan. 2007.

SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. **Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 123, n. 2, p. 67-77, mar. 1997.

SHERALI, H. D.; SMITH, E. P. **A global optimization approach to a water distribution network design problem**. Journal of Global Optimization, v. 11, n. 2, p. 107-132, set. 1997.

SHERALI, H. D.; TOTLANI, R.; LOGANATHAN, G. V. **Enhanced lower bounds for the global optimization of water distribution networks**. Water Resources Research, v. 34, n. 7, p. 1831-1841, jul. 1998.

BRASIL, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2017**. Brasília: SNS/MDR, 2019.

TODINI, E. **Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach**. Urban Water, v. 2, n. 2, p. 115-122, jun. 2000.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Água potável 27, 35, 189, 264, 293, 302, 303, 325, 336, 350

Águas subterrâneas 25, 26, 27, 30, 33, 36, 37, 54, 111, 112, 113, 115, 117, 118, 120, 121, 123, 174, 179, 318, 319, 322, 323, 324, 326, 336, 361

Água subterrânea 25, 35, 36, 112, 117, 118, 119, 120, 161, 175, 318, 319, 324, 325, 377

Análises 25, 27, 28, 35, 37, 38, 41, 43, 45, 49, 50, 56, 91, 126, 140, 141, 158, 164, 267, 271, 301, 302, 320, 321, 322, 324, 360, 370, 373, 376, 379

### B

Biogás 38, 39, 40, 46, 47, 48, 49, 90

Busca exaustiva 1, 3, 4, 7, 20, 22, 23

### C

Conservação 159, 161, 162, 163, 164, 171, 178, 179, 259, 264, 274, 275, 276, 277, 279, 280, 281, 283, 284, 287, 292, 303, 338, 342

### D

Degradação dos solos 122

Desenvolvimento web 76, 78

Desperdício de água 293, 303

Destilador 293, 295, 296, 298, 301, 302

Digestor anaeróbio 38, 40, 43, 49

### E

Educação ambiental 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 284, 290, 291, 292, 304, 338, 340, 342, 344, 345, 347, 348

Eficiência hídrica 293, 294

Erosão hídrica 122, 123, 124, 126, 129, 135

Erosão urbana 122

### F

Fiscalização 140, 145, 146, 147, 148, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 261, 263, 264, 383

Fiscalização direta 145

Fiscalização indireta 145

### G

Gestão da manutenção 136, 137, 138, 139, 143, 144

God 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121

### H

Hidráulica de canais 76, 77, 78, 79, 85

## I

Indicadores 100, 140, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 160, 176, 181, 241, 246, 292, 358  
Inibição da atividade microbiana 38

## L

Lodo físico-químico 38, 41, 42, 43, 47, 48

## M

Manutenção evolutiva 136  
Manutenção preventiva 136, 330, 335  
Medidores estáticos 180, 181, 184, 189  
Meio ambiente 75, 111, 116, 122, 123, 228, 229, 233, 235, 236, 237, 263, 264, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 281, 283, 284, 285, 289, 290, 291, 292, 293, 296, 303, 304, 326, 338, 339, 342, 344, 345, 347, 362, 382, 383

## O

Otimização 1, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 23, 38, 40, 147, 161, 162, 163, 212, 213, 239, 240, 247, 249, 256, 259

## P

Planejamento 111, 125, 137, 139, 140, 143, 145, 146, 147, 155, 162, 228, 229, 230, 231, 236, 237, 246, 289, 305, 306, 308, 310, 315, 317, 326, 349, 351, 355, 356, 383  
Poço artesiano 25, 27, 28, 29, 30, 31, 35

## Q

Qualidade da água 25, 27, 30, 35, 36, 37, 74, 197, 296, 301, 302, 303, 318, 319, 325, 326, 364, 372

## R

Redes de distribuição de água 1, 2, 4  
Reuso de água 178, 247, 293

## S

Submedição 100, 180, 181, 185, 187  
Sulfato de alumínio 38, 41, 46, 47, 49, 50, 380  
Sustentabilidade 111, 123, 162, 163, 179, 205, 206, 211, 235, 236, 274, 275, 277, 280, 285, 292, 296, 303, 304, 338, 351, 383

## T

Tecnologia 22, 35, 37, 51, 52, 74, 76, 96, 98, 109, 168, 179, 180, 182, 188, 189, 212, 227, 238, 247, 259, 274, 299, 305, 308, 313, 316, 326, 360

## V

Viabilidade 8, 161, 180, 181, 186, 187, 188, 189, 235, 261, 296  
Vulnerabilidade 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 125, 181

 **Atena**  
Editora

**2 0 2 0**