

Stefano Mambretti  
Ademar Nogueira do Nascimento  
(Organizadores)

Gestão e Tecnologia do

# SANEAMENTO BÁSICO:

Uma abordagem na Perspectiva  
Brasileira e Internacional



**Atena**  
Editora  
Ano 2022

Stefano Mambretti  
Ademar Nogueira do Nascimento  
(Organizadores)

Gestão e Tecnologia do

# SANEAMENTO BÁSICO:

Uma abordagem na Perspectiva  
Brasileira e Internacional



**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



# Gestão e tecnologia do saneamento básico: uma abordagem na perspectiva brasileira e internacional

**Diagramação:** Natália Sandrini de Azevedo  
**Correção:** Flávia Roberta Barão  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** Stefano Mambretti  
Ademar Nogueira do Nascimento

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G393 Gestão e tecnologia do saneamento básico: uma abordagem na perspectiva brasileira e internacional / Organizadores Stefano Mambretti, Ademar Nogueira do Nascimento. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0639-6

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.396221110>

1. Saneamento. 2. Água. 3. Drenagem. 4. Esgoto. I. Mambretti, Stefano (Organizador). II. Nascimento, Ademar Nogueira do (Organizador). III. Título.

CDD 363.72

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br



**Atena**  
Editora  
Ano 2022

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## PREFÁCIO

Diante de um mundo em rápida mudança, onde promover a sustentabilidade ambiental exige qualificadas habilidades técnicas e invocam a importância da atualização das leis, consideramos importante apresentar uma visão geral sobre o estado da arte da pesquisa, dos projetos e da gestão e tecnologia do serviço integrado de água e destinação de esgotos, juntamente com alguns exemplos de implementação no Brasil e no exterior.

Nesse sentido consideramos muito útil, devido às recentes mudanças legislativas, apresentar o novo marco legal brasileiro, juntamente com as atualizações normativas ocorridas nos Estados Unidos e na Itália. Entendemos que o desenvolvimento e a cooperação multi-países nesse segmento é de fundamental importância para a disseminação de técnicas de racionalização e otimização dos serviços de água e esgoto, de modo a proporcionar melhorias na qualidade de vida das populações com a universalização de tecnologias e gestão de sistemas de referência internacional.

A origem deste presente projeto remete-se à longa e profícua colaboração acadêmica entre a Universidade Federal da Bahia (Brasil) e o Politecnico di Milano (Itália), e posteriormente estendido a profissionais e pesquisadores do Brasil, Itália e Estados Unidos.

Esperamos que o conteúdo deste livro, de caráter transversal, possa ser útil aos profissionais que atuam em diferentes áreas do planejamento dos recursos hídricos e saneamento ambiental, visto que, ao se reconhecer a sua interdisciplinaridade, foram incluídos conteúdos tanto de engenharia, quanto normativo, de gestão e de tecnologias aplicadas, proporcionando uma ampla compreensão técnica para soluções desta relevante problemática ambiental universal.

Stefano Mambretti

Ademar Nogueira do Nascimento




## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA


Gianfranco Becciu  
Stefano Mambretti  
Mariana Marchioni

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211101>

### **CAPÍTULO 2..... 27**

#### PRÁTICAS DE GESTÃO DA REDE DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS


Gianfranco Becciu  
Stefano Mambretti  
Luiz Fernando Orsini Yazaki  
Mariana Marchioni

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211102>

### **CAPÍTULO 3..... 49**

#### DRENAGEM E MANEJO DAS ÁGUAS EM GRANDES CIDADES BRASILEIRAS: O CASO DO MUNICÍPIO DE SALVADOR (BRASIL)


Lafayette Dantas da Luz  
Patrícia Campos Borja

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211103>

### **CAPÍTULO 4..... 81**

#### ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTO NOS ESTADOS UNIDOS: A ESTRUTURA REGULATÓRIA E SERVIÇO PÚBLICO/PRIVADO


David W. Schnare

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211104>

### **CAPÍTULO 5..... 99**

#### O MARCO REGULATÓRIO E SISTEMA DE GESTÃO DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA URBANA E ÁGUAS RESIDUAIS NA ITÁLIA


Alessandro de Carli  
Sara Zanini




 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211105>

### **CAPÍTULO 6..... 124**

#### A PRESTAÇÃO DOS SERVIÇOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO BRASIL, APÓS ALTERAÇÕES NO MARCO LEGAL E REGULATÓRIO DO SANEAMENTO BÁSICO PELA LEI Nº 14.026/2020

Abelardo de Oliveira Filho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211106>

<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>162</b>
O SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL: VISÃO GERAL DA ESTRUTURA JURÍDICA DE PRESTAÇÃO DOS SERVIÇOS	
Lucas Custódio	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211107">https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211107</a>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>181</b>
A QUESTÃO “ÁGUA”: O RECURSO NO MUNDO, A NECESSIDADE DE UM PARADIGMA DIFERENTE, O ENVOLVIMENTO DA POPULAÇÃO	
Gianfranco Becciu	
Camyllyn Lewis	
Stefano Mambretti	
Mariana Marchioni	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211108">https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211108</a>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>206</b>
TÉCNICAS DE TRATAMENTO E APROVEITAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO PARA POPULAÇÃO DE BAIXA RENDA	
Layane Priscila de Azevedo Silva	
Ademar Nogueira do Nascimento	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211109">https://doi.org/10.22533/at.ed.3962211109</a>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>240</b>
<b>SOBRE OS AUTORES</b> .....	<b>241</b>

**Gianfranco Becciu**

**Stefano Mambretti**

**Mariana Marchioni**

segundo as seguintes etapas:

1. Primeira avaliação da rede; balanço hídrico;
2. Coleta de dados da rede; seleção e aplicação de indicadores de desempenho;
3. Construção do modelo matemático da rede; primeiras avaliações quantitativas;
4. Aplicação de modelos de otimização; trabalho com cenários;
5. Identificação dos pontos críticos da rede; decisões sobre onde e como agir para melhorar o ativo.

Essas atividades de complexidade crescente, exigem um conhecimento cada vez maior da rede, bem como de sua modelagem. Essas solicitações são essenciais e exigem melhoria contínua; nunca se poderá dizer que a rede é perfeitamente conhecida ou que a modelagem é perfeita. Além disso, esse trabalho de aumentar o conhecimento – a modelagem deve ser considerada uma forma de melhoria do conhecimento –, através do uso de tecnologias cada vez mais sofisticadas, é essencial no gerenciamento e projeto de uma rede moderna de abastecimento de água.

O que é importante esclarecer é a necessidade de prosseguir paralelamente nas

### 1 . UM CAMINHO VIRTUOSO

A problemática da avaliação de uma rede de abastecimento de água e as decisões quanto à sua melhoria são complexas. Normalmente, o sistema de adução inclui centenas, senão milhares de quilômetros de tubulações principais, consistindo em uma série de tubulações individuais conectadas umas às outras a cada poucos metros. Esses tubos, geralmente muito antigos, devem suportar o tráfego rodoviário e cargas que geram condições de tensão nos tubos e nas juntas; seguem-se corrosão e ruptura dos tubos.

Uma rede desse tipo tem que responder a diferentes necessidades. Por um lado, deve ser possível conectar sistemas mutuamente independentes entre si, garantindo uma estrutura o mais flexível e rápida possível, em resposta às reais necessidades dos usuários. Por outro lado, o sistema geral e o gerenciamento de confluências na calibração global da rede devem ser cuidadosamente estudados.

A princípio, uma avaliação e melhoria de uma rede de aquedutos deve ser realizada

atividades de conhecimento e aprimoramento, ou seja, sem um conhecimento cada vez maior da rede, não é possível avançar no seu aprimoramento.

## 2 . BALANÇO HÍDRICO

Suponha-se que uma rede da qual muito pouco se sabe tenha que ser abordada, acredita-se que a primeira atividade a ser realizada seja a análise do balanço hídrico. Embora essa análise pareça simples, como será visto abaixo, na realidade ela precisa de alguma atenção. Essa análise, se realizada corretamente, permite tanto uma primeira avaliação da integridade da rede quanto identificar quais aspectos são menos conhecidos e, portanto, precisam ser mais aprofundados.

Pela definição do balanço hídrico, os diferentes componentes são:

- volume de água introduzido na rede (I);
- consumo autorizado faturado (F);
- consumo autorizado não faturado (NF);
- perdas (P).

Portanto:

$$I=F+NF+P$$

### 2.1 Problemas na avaliação de parâmetros

A fórmula apresentada possui uma estrutura simples e o significado dos diferentes parâmetros é completamente intuitivo. No entanto, uma análise mais cuidadosa mostra o surgimento de questões importantes.

#### *Problemas na avaliação do volume inserido na rede (I)*

O problema, aparentemente trivial, consiste em medir a quantidade de água que entra no sistema de distribuição. Para cada fonte de abastecimento, deve ser instalado um instrumento de medição que possa fornecer os volumes de água passados por essa seção.

A soma das medições de todas as entradas na rede deve ser corrigida por erros devido a vários fatores concomitantes:

- imprecisão nos instrumentos de medição que, se não forem verificados e recalibrados em intervalos regulares, permitem aproximações de vários pontos percentuais;
- falta total ou parcial de instrumentos para medir a água produzida. Isso geralmente constitui o erro mais consistente, também ligado ao mau hábito enrai-

zado em muitos serviços de água de depender de dados empíricos como os obtidos pela multiplicação do horário de funcionamento de uma bomba por sua vazão teórica ou baseada em medições de vazão de nascentes ou poços, realizadas no momento e em situações de lençol freático que não sejam as atuais. Os erros resultantes podem atingir 20 a 30% do total medido;

- presença de vazamentos nas obras localizadas no montante do medidor; é o caso de fontes espalhadas em um vasto território cuja água a ser medida deve fluir para uma única tubulação, onde existe o instrumento de medição;
- erros decorrentes da presença de ar emulsionado; são volumes significativos devidos a plantas com defeitos, que formam bolsas de ar nas tubulações que alteram o balanço final da água, uma vez que o ar é medido como se fosse água fornecida à rede.

### *Problemas na avaliação do volume de água autorizado e contabilizado (NF)*

A água que é levada e autorizada é a fornecida pelo serviço de água para usos legítimos (civil, industrial, artesanal, comercial, agrícola e público).

A soma do volume faturado deve ser corrigida devido a:

- erros na avaliação dos dados. De fato, esse volume é normalmente obtido através dos registros contábeis elaborados pelo órgão de administração para a cobrança das contas de água e, portanto, para fins e de outras maneiras que não as de interesse. Além disso, não é excluído o caso em que apenas o volume total de água faturado é considerado, sem levar em conta o fato de incluir também volumes não consumidos, mas que são cobrados do usuário pelo consumo mensal menor que a quantidade mínima predeterminada;
- erros no que diz respeito às características mecânicas do medidor de agregado privado. De fato, deve-se considerar a inércia básica, característica do aparelho, que faz com que as pequenas vazões, como o gotejamento de uma torneira ou sua abertura parcial, nem sequer serem medidas, dado que são inferiores à quantidade mínima necessária para superar o atrito inicial do próprio contador;
- erros referentes ao envelhecimento dos medidores dos usuários. Esse inconveniente pode ser evitado com manutenção regular ou com substituição dos instrumentos de medição;
- erros associados à incompatibilidade de períodos de leitura. Obviamente, a leitura do medidor não pode ser realizada simultaneamente para todos os usuários, mas é distribuída por um período maior ou menor. Portanto, esses são dados que não coincidem com os dos medidores de vazão total injetados na rede, causando evidente inhomogeneidade entre os elementos comparados e,

portanto, mais uma razão para erro nos cálculos. A correção pode ser executada trazendo de volta o volume faturado apenas para o período em que o saldo da água está sendo processado.

### *Problemas na avaliação do volume de água autorizado e não contabilizado (NF)*

Esse item do orçamento inclui a água usada para fins especiais ou para fins públicos sem um medidor, dos quais os mais comuns são os seguintes:

- postos de combate a incêndios e soquetes para sistemas de proteção contra incêndio;
- hidrantes para regar jardins públicos, lavar ruas e esgotos;
- pontos de captação para serviços públicos e bebedouros;
- tomadas para edifícios públicos.
- O cômputo desses itens do balanço é uma estimativa que leva em consideração:
- os registos de intervenções realizadas pelo Corpo de Bombeiros durante o período do estudo;
- os registos de saques feitos por empresas municipais para vários serviços públicos (lavagem de ruas, rega de jardins, lavagem de esgoto);
- o número de bebedouros de água e sua pressão de serviço;
- a tipologia de edifícios públicos sem medidor (escolas, prefeitura etc.).

### *Problemas na avaliação de perdas (P)*

Esse volume inclui a água e é relativo a usos não autorizados ou medidos e representa a parte do recurso que provavelmente não produz receita e não está disponível para qualquer uso lucrativo – na literatura anglo-saxônica conhecida como Non Revenue Water (NRW). A maioria das perdas pode ser atribuída às seguintes causas:

- redes de abastecimento ilegais e furtos de água;
- erros nos procedimentos contábeis;
- vazamentos ou transbordamentos dos tanques;
- perdas devido a erros de funcionamento ou erros de manobras nos órgãos da rede;

- vazamentos descobertos;
- vazamentos ocultos.

Como é evidente, a avaliação de apenas vazamentos ocultos é extremamente complexa e duvidosa.

### 3 . INDICADORES DE DESEMPENHO

#### 3.2 Generalidade

Um *Performance Indicator* (PI) – indicador de desempenho – ou um *Key Performance Indicator* (KPI) é um tipo de medida de desempenho. Os PIs avaliam o sucesso de uma organização ou de uma atividade específica – como projetos, programas, produtos e outras iniciativas – nas quais ela se envolve.

Medição de desempenho é o processo de coletar, analisar e/ou relatar informações sobre o desempenho de um indivíduo, grupo, organização, sistema ou componente (BEHN, 2003).

Definições de medição de desempenho tendem a ser baseadas em uma suposição sobre o motivo pelo qual o desempenho está sendo medido:

- Moullin (2002) define o termo com um foco organizacional voltado para o futuro: “o processo de avaliar como as organizações são gerenciadas e o valor que elas agregam aos clientes e outras partes interessadas”.
- Neely, Adams e Kennerley (2002) usam um foco retrospectivo mais operacional “no processo de quantificar a eficiência e a eficácia das ações passadas”.
- O Escritório do Diretor de Informações nos EUA (OFFICE OF THE CHIEF INFORMATION OFFICER, 2002) o definiu usando um foco mais avaliador: “A medição de desempenho estima os parâmetros sob os quais programas, investimentos e aquisições estão alcançando os resultados desejados”.

Além de um simples acordo sobre a vinculação a algum tipo de medida de desempenho, há pouco consenso sobre como definir ou usar medidas de desempenho. À luz disso, o que aconteceu foi o surgimento de estruturas organizadoras que incorporam medidas de desempenho. Os padrões operacionais geralmente incluem listas predefinidas de medidas de desempenho padrão. Por exemplo, a EN 15341 identifica 71 indicadores de desempenho, dos quais 21 são indicadores técnicos.

Frequentemente, o sucesso é simplesmente a conquista periódica e repetida de alguns níveis de meta operacional – por exemplo: zero defeito, 100% de satisfação do

cliente – e, às vezes, o sucesso é definido em termos de progresso em direção a metas estratégicas. Dessa forma, a escolha dos PIs certos depende de um bom entendimento do que é importante para a organização. Como é necessário entender bem o que é importante, várias técnicas para avaliar o estado atual dos negócios e suas principais atividades estão associadas à seleção de indicadores de desempenho. Essas avaliações geralmente levam à identificação de possíveis melhorias, de modo que os indicadores de desempenho são rotineiramente associados a iniciativas de “melhoria de desempenho”.

### 3.3 Medição do desempenho na distribuição da água

O simples fato de os objetivos perseguidos pelas empresas de abastecimento de água terem sido, de alguma forma, colocados em um contexto novo e mais rigoroso pelas estruturas reguladoras modernas significa que as ferramentas de engenharia usadas no suporte de suas atividades devem refletir essas necessidades e ser capaz de reformular as tentativas e procedimentos testados sob essa nova luz. Os níveis de serviço do setor geralmente são avaliados com base em uma série de eventos registrados durante um período de tempo, o que permite a construção de dados estatísticos. Estes são de grande valor quando disponíveis, não apenas para apoiar estudos de intervenção direta, mas também como base para extrapolação. No entanto, muitos procedimentos de engenharia empregados no suporte direto às tarefas de projeto, análise e controle de uma rede de água precisam ser capazes de simular uma grande variedade de situações e cenários hipotéticos. Normalmente, diferentes alternativas devem ser tentadas como soluções para problemas cuja otimização matemática direta é frequentemente complicada por uma infinidade de parâmetros e uma compreensão difícil do comportamento dos sistemas. Isso significa desenvolver procedimentos para analisar e medir o desempenho das redes de água *a priori*, que possam se adequar ao tipo de análise realizada por simulação de rede e serem utilizados para os mesmos fins.

Como Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982) enfatizam:

[...] Seria particularmente interessante ser capaz de analisar amplas faixas de condições operacionais sob alguma abordagem básica e com a possibilidade de descobrir simultaneamente vários aspectos diferentes do comportamento dos sistemas para aumentar a conscientização e a sensibilidade aos aspectos ou características menos óbvias. Provam ser bastante úteis nos processos de tomada de decisão que orientam a seleção de layouts de sistema, capacidades, políticas operacionais e configurações de ideias.

O primeiro passo nessa direção é uma ampla seleção das principais áreas de desempenho dos sistemas de água que podem ser os principais candidatos à dissecação e à aplicação detalhadas de tal abordagem. O primeiro e mais óbvio domínio diz respeito ao comportamento hidráulico da rede. Os processos de concepção, projeto, construção e operação de um sistema de abastecimento de água são impulsionados principalmente pela



necessidade de satisfazer um determinado conjunto de pontos de demanda com vazão suficiente de água a níveis de pressão utilizáveis. Essa sempre foi não apenas a principal motivação dos engenheiros e projetistas, mas também é central para o ambiente regulatório da maioria dos países. Medir o desempenho hidráulico de uma rede é, portanto, crucial em qualquer tentativa de desenvolver um sistema como o mencionado anteriormente.

As empresas de fornecimento e distribuição de água também são naturalmente obrigadas a fornecer água saudável e devem atender aos padrões de serviço relacionados aos aspectos estéticos e de potabilidade, não apenas em prol da saúde de seus clientes, mas também por uma questão de aceitabilidade. A qualidade da água é, portanto, a segunda maior área de preocupação, pois a realização de um sistema é testada. Muitas das metodologias existentes foram desenvolvidas além dos – às vezes quase enxertados – procedimentos de modelagem e projeto anteriormente desenvolvidos para a análise hidráulica.

Outros aspectos do comportamento dos sistemas de água podem ser isolados para análise de desempenho, mas atualmente são menos relevantes em termos do que foi dito anteriormente.

Finalmente, e por razões óbvias, as empresas de água e os órgãos reguladores precisam descobrir – ou ser capazes de exigir – o nível de confiabilidade com que os sistemas executam os níveis de serviço estabelecidos em operacional – hidráulico, qualidade da água e outros – domínios.

### 3.4 Comentários e críticas

Nas últimas décadas, a International Water Association (IWA) (ALEGRE et al., 2000) trabalhou muito para definir indicadores de desempenho adequados, especialmente – mas não apenas – para a avaliação de aquedutos em relação a vazamentos de água. Grande parte desse trabalho também foi incorporada pela Fundação Nacional de Saúde (Funasa) (2014).

Além disso, os parâmetros relatados para a avaliação desses indicadores são calculados com base em regressões e não são valores absolutos que podem ser determinados teoricamente. Isso significa, por exemplo, que os próprios autores, às vezes, os revisam, como, por exemplo, Lambert, Koelbl e Fuchs-Hanusch (2014). Esse artigo é de interesse, pois contém fortes críticas ao procedimento utilizado. Na premissa, de fato, os autores argumentam:

Em uma proporção relativamente pequena de casos, o CARL<sup>1</sup> calculado a partir de um balanço hídrico anual foi menor que o UARL<sup>2</sup> calculado,

---

1 Current Annual volume of Real Losses: é o valor atual da perda anual de água expresso em litros / número de ligações / dia.

2 Unavoidable Average Real Losses: é o valor das perdas reais anuais inevitáveis.

resultando em um ILI<sup>3</sup> menor que 1,0. Isso causou preocupação a alguns usuários, pois implica que o uso da fórmula UARL é inadequado (ou a fórmula precisa ser ajustada) em algumas circunstâncias (LAMBERT; KOELBL; FUCHS-HANUSCH, 2014).

Em outras palavras, as perdas registradas em algumas redes foram inferiores às calculadas como “inevitáveis”: isso levou a um óbvio repensar dos procedimentos e fórmulas, mas deve implicar, na opinião dos autores deste capítulo, também um repensar da validade dos mesmos procedimentos, e se isso pode realmente ser colocado como base contratual, algo duvidoso, pois são correlações entre realidades extremamente diferentes e com dispersões muito altas.

Observa-se que as referências bibliográficas da IWA, embora não relatem os valores de incerteza relacionados à base de dados inicial, nem a dispersão dos dados do banco de dados inicial acima mencionado em torno da fórmula de regressão proposta, consideram que a aplicabilidade da formulação indicada tem que ser fortemente limitada.

Por fim, as seguintes considerações podem ser resumidas:

- os indicadores de desempenho são obtidos pelo agrupamento de dados extremamente limitados das redes, obtendo-se um grau de dispersão não indicado claramente na literatura e não avaliado adequadamente; por esse motivo, eles podem ser usados apenas como indicadores locais de uma possível melhoria (ou deterioração) de uma rede, sem a possibilidade de estendê-lo para comparações entre diferentes redes;
- os valores indicados pelos parâmetros podem ser alcançados apenas como objetivo final de uma campanha de gerenciamento e manutenção de rede (considera-se limitante falar apenas em perdas).

Portanto, acreditamos que é necessário pensar em uma abordagem diferente, considerando uma avaliação com indicadores de desempenho apenas como uma preliminar, para uma avaliação da rede local de aqueduto e sem a pretensão de fazer comparações entre as redes com base em PIs.

## 4 . MODELAGEM

Os programas de computador para modelagem de redes de água não serão discutidos neste texto. Aqui, é necessário enfatizar a importância da modelagem, seus problemas e a necessidade de considerar o trabalho de modelagem e sua atualização como um caminho a ser continuado regularmente nas atividades de gerenciamento de rede.

---

<sup>3</sup> Infrastructure Leakage Index: ILI = CARL / UARL.

A modelagem hidráulica agora é comum em *design* e gerenciamento, e mesmo os modelos hidráulicos “simples”<sup>4</sup> são úteis na moderna gestão de redes de água, pois permitem:

- melhor conhecimento da rede (e corrigir eventuais imprecisões);
- verificar os efeitos do projeto, mesmo fazendo hipóteses do cenário para casos de otimização (a pesquisa das perdas pode cair nesses casos);
- verificar as possíveis avarias, também induzidas.

#### 4.1 A construção do modelo

Para a construção do modelo, é necessário ter todos os dados da rede: topologia, diâmetros, comprimentos, materiais, características das bombas, e se presentes, demandas de água dos usuários. Todos esses dados são normalmente conhecidos com erros mais ou menos graves. O principal problema é manter o modelo constantemente atualizado, através de calibrações sucessivas e cada vez mais precisas.

Claramente, um grande esforço inicial deve ser feito para a construção do modelo em si, mas nunca se deve pensar que o final do trabalho chegou. O modelo deve ser considerado como um arquivo de dados e deve ser verificado e aprimorado com verificações e medições subsequentes, quando disponíveis; também deve ser atualizado se algum trabalho for realizado na rede.

É bastante normal que erros estejam presentes na primeira modelagem executada. O importante é estar ciente disso e preparado para realizar as análises e obter as correções necessárias.

#### 4.2 Comentários adicionais – calibração

Para que o modelo produza simulações confiáveis para fins operacionais, é necessário que seja calibrado. A calibração consiste em determinar diferentes parâmetros do modelo, que, adequadamente modificados, permitem obter uma correspondência razoável entre pressão e vazões simuladas e medidas na realidade.

Os padrões para identificar se um modelo é suficientemente calibrado dependem essencialmente das intenções de uso; de fato, um único modelo dificilmente pode ser considerado calibrado para todos os objetivos. É necessário distinguir, por exemplo, se é usado para planejar estudos, dimensionar novos assentamentos, avaliações de gasto de energia ou qualidade da água. É claro que, no último caso, o modelo precisa ser muito bem calibrado e detalhado para representar corretamente os fluxos, enquanto que, por razões

---

<sup>4</sup> Existem modelos matemáticos gratuitos e amplamente utilizados, como o Epanet; outros modelos comerciais integram bancos de dados e Geographic Information System (GIS) no mesmo pacote de *software*.

de planejamento, um modelo mais simplificado é suficiente.

Ao mesmo tempo, a qualidade da calibração de um modelo depende muito da qualidade e quantidade de dados disponíveis para sua implementação e operação. Por esse motivo, é necessário investir pesadamente na validação de todos esses dados.

Ormsbee (1989) identifica um procedimento de sete etapas para calibrar um modelo hidráulico:

1. identificação das intenções de usar o modelo;
2. determinação inicial dos parâmetros;
3. coleta de dados para calibração;
4. avaliação dos resultados do modelo;
5. calibração em nível macro;
6. análise de sensibilidade;
7. calibração em nível micro.

A análise de sensibilidade permite a identificação dos parâmetros do modelo que mais influenciam o processo de calibração em nível micro.

## 5 . ENTROPIA E SETORIZAÇÃO

Algumas solicitações que devem ser atendidas no planejamento e gerenciamento das redes de abastecimento de água contrastam entre si. Nesta seção, duas pedras angulares do projeto atual são consideradas criticamente na busca do equilíbrio.

### 5.1 Entropia

As boas práticas de projeto exigem que as redes de distribuição de água sejam totalmente integradas, porque esse tipo de rede é mais confiável: como é evidente, de fato, em caso de quebra ou fechamento devido à manutenção de um conduto, no caso de uma rede em *loop* a vazão pode executar um caminho diferente e todos os nós ainda são atendidos, mesmo que algumas vezes com pressões mais baixas – devido à execução de um caminho mais longo e, portanto, às maiores quedas de pressão – e, portanto, com um certo desconforto por parte do usuário, que no entanto é menor do que o que resultaria da total ausência do serviço.

A partir disso, é óbvio que os conceitos de *passividade mínima* dos quais os textos clássicos sugerem a adoção pelo projeto – ou, ainda que menos precisamente, o *custo mínimo* – e *redundância* de rede estão em contraste um com o outro.

Nesse sentido, a medida da redundância é fornecida pelo conceito de *entropia*

introduzido por Shannon (1948) e mais tarde por Jaynes (1957). Essa é uma medida quantitativa da incerteza em uma distribuição de probabilidade: em particular, a entropia é zero quando apenas um resultado é possível – portanto, a incerteza é zero –, enquanto é máxima quando a distribuição é uniforme.

Observa-se, portanto, que, do ponto de vista econômico, é necessário reduzir a redundância da topologia, enquanto o aumento dessa redundância leva a uma melhor confiabilidade da rede. O aumento da redundância de uma rede, necessário para aumentar sua confiabilidade, também contrasta com a necessidade de dividir as próprias redes. Vários estudos foram realizados para definir estruturas distritais que também levam ao aumento da confiabilidade hidráulica do sistema, possivelmente circunscrevendo áreas com maior vulnerabilidade, identificadas pela análise de avarias (Mailhot et al., 2000; Maksimovic & Carmi, 1999).

Os requisitos de um sistema de distribuição são, portanto, múltiplos e, como mencionado, em muitos aspectos, contrastantes.

## 5.2 Setorização

A divisão em setores consiste em dividir a rede de água em várias sub-redes hidráulicamente separáveis entre elas e caracterizadas por uma ou mais alimentações para o qual é conhecido o fluxo.

Coloca-se como uma alternativa à prática tradicional para construção de redes de modo a garantir um elevado grau de interconexão, que tem a vantagem de:

- conter as perdas de carga;
- garantir maior facilidade de expansão do sistema de distribuição;
- melhorar a eficiência global do sistema.

Os sectores, por outro lado, permitem:

- conhecer melhor e ser capaz de gerenciar de forma otimizada uma rede que é agora hidráulicamente mais fácil;
- ter mais controle sobre os parâmetros quantitativos e qualitativos;
- controlar o céu piezométrico tornando-o mais uniforme.

Leva-se vários passos, sinteticamente descritos como:

- delimitação preliminar das áreas do sistema de água caracterizadas por uma maior vulnerabilidade (análise das insuficiências, elaboração de um mapa de vulnerabilidade);
- minimização dos nodos de abastecimento do sector;

- análise, em seguida de relevos preliminares no lugar, de um modelo de simulação hidráulica quali-quantitativa e técnicas de otimização que visam minimizar – ou maximizar – função objetivo com restrição;
- verificação das normas de exercício do distrito (adequada pressão de fornecimento para utente, padrões de segurança em caso de incêndio, padrões de qualidade em termos da direção dos fluxos, de tempos de permanência da água distribuída na rede, de qualidade organolépticas, de cloro residual).

Existem também métodos automáticos ou semiautomáticos, mas o trabalho deve ser sempre conduzido em conjunto com o gestor.

### 5.3 Crítica

A literatura que trata do assunto não será descrita neste texto, mas a crítica comum que pode ser endereçada às metodologias é que são de natureza geral e não dependem dos objetivos e necessidades do gerente local. Isso naturalmente leva à vantagem de ter procedimentos padronizados, o que é útil quando as diretrizes precisam ser descritas, mas há o risco de se esquecer que a setorização não é um objetivo isolado, mas um meio de atingir uma meta. Essa premissa merece ser lembrada, pois, com muita frequência, nas solicitações do gerente – até nas licitações públicas –, aparece o termo “setorização”, mesmo quando o município já é muito pequeno e, de qualquer forma, sem definir seu verdadeiro motivo.

A primeira consideração é a impossibilidade de ter um critério que leve a um estado único de setorização de uma rede. Mesmo no caso da mesma rede e da mesma solicitação, o resultado obtido é consideravelmente diferente se as condições de contorno mudarem. Isso poderia nos levar, em alguns casos, a especular a oportunidade de tornar uma setorização que podemos chamar de “dinâmica”, isto é, que pode mudar com o tempo e com a mudança das condições, por exemplo, entre o dia e a noite, dependendo das diferentes solicitações dos usuários. Mais uma razão pela qual poderíamos esperar resultados diferentes da setorização se os objetivos para a mesma rede fossem diferentes. Portanto, é necessário reiterar o que já foi dito anteriormente: a setorização é um método para alcançar um resultado, e não um resultado em si. Portanto, é inicialmente necessário definir claramente o que deve ser alcançado, antes de indicar o caminho da setorização.

A segunda consideração diz respeito ao tamanho dos setores: os setores delimitados pelos métodos de otimização não são pequenos. É de fato dizer que, quando os setores foram projetados para serem muito pequenos, as experiências de campo acabaram não sendo positivas. Isso deve permitir que se tenha muita liberdade quando se trata de setorização. Se uma rede já é muito pequena, a divisão em vários setores pode não fazer sentido. Por outro lado, se duas redes são contíguas e muito pequenas, a união das mesmas pode até fazer sentido.

Típico da engenharia é saber como se adaptar às solicitações e encontrar soluções apropriadas, sem preconceitos.

## 6 . ÓTIMO E COMO CHEGAR

Em geral, o princípio subjacente à busca do ótimo em redes de abastecimento é dado pela construção de uma função objetivo apropriada a ser maximizada (ou minimizada); nessa função objetivo, todas as quantidades tidas como importantes a serem consideradas para uma boa gestão do sistema de aquedutos, são inseridas e devidamente pesadas. Em geral, a função objetivo possui uma estrutura formal do tipo:

$$Ob = \sum_{i=1}^N \int_0^T \{ p_{i,1}(t) \cdot dO_{i,1}(t) + p_{i,2}(t) \cdot dO_{i,2}(t) + \dots \} = \max(\min)$$

Onde, durante um período  $T$ , para cada nó  $i$  de uma rede composta globalmente por  $N$  nós, é monitorado um número  $j$  de variáveis  $O_{i,j}$ , cada uma associada a um coeficiente de penalidade  $p_{i,j}$ .

Em qualquer caso, por mais que a função objetivo seja construída, o resultado fornece informações sobre o estado da rede em uma determinada configuração: portanto, é possível fazer uma avaliação do *status* atual e, posteriormente, propor a hipótese de diferentes cenários de intervenção; a avaliação do *status* da rede após cada uma das intervenções hipotetizadas nos permite entender sua validade e, eventualmente, selecionar a melhor.

Essa técnica é bastante simples e pode ser facilmente usada no trabalho normal; se os aspectos hidráulicos ou sanitários são levados em consideração, é claro que é necessário ter técnicas disponíveis para avaliar as quantidades de interesse e, nesse caso, por exemplo, programas de simulação de rede podem ser usados.

O procedimento descrito pressupõe que o designer identifique os diferentes cenários possíveis, o que implica que a melhor solução pode nem ser levada em consideração. No entanto, existem métodos mais complexos para procurar o ótimo, sem que o designer precise fazer qualquer tipo de hipótese. O problema, por sua vez, é extremamente complexo, também devido à não linearidade do sistema de resolução. Estudiosos, portanto, propõem a linearização da equação de movimento para chegar a um problema de programação linear mista (ARTINA et al., 2002). Além da complexidade do problema, uma limitação desses algoritmos é dada pela necessidade de a função objetivo ser contínua e derivável. Outras abordagens de solução são baseadas em cálculo evolutivo, elaborados por Holland (1975), que não apresentam hipóteses sobre a função objetivo e levam a resultados muito bons, mas com o problema de ter que realizar simulações diferentes variando os parâmetros de partida, e com outro problema que os algoritmos de cálculo evolutivo podem ficar presos em mínimos locais.

## 6.1 Cálculo evolutivo – generalidade

Os métodos de cálculo evolutivo permitem a busca para o valor máximo (ou mínimo) de uma função objetivo, sem a necessidade da formulação analítica do problema. Em geral, foram desenvolvidos após a observação da natureza.

Neste texto, não nos propomos a explicar todos os métodos desenvolvidos pelos cientistas e disponíveis na literatura científica, nem parece apropriado. A seguir, procuramos apenas mostrar algumas aplicações.

## 6.2 Cálculo evolutivo – exemplos de aplicação

Para mostrar como esses algoritmos podem ser usados, algumas aplicações em vários setores das redes de abastecimento de água são apresentadas brevemente abaixo.

### *Busca das perdas – rede de Castegnato (Itália)*

O estudo de caso é a rede de abastecimento de água de Castegnato, uma pequena cidade no norte da Itália, com cerca de 7.900 habitantes e com uma rede dividida em duas partes desconectadas. As características da cidade e suas redes de abastecimento de água foram apresentadas por Mambretti e Orsi (2012) e Becciu, Mambretti e Martins (2014). Como, ao longo dos anos, os gerentes da rede registraram mais de 50% das perdas de água, vários transdutores foram instalados na rede.

Uma abordagem possível consiste em modelar as perdas como se fossem orifícios, a partir do qual uma vazão sai, que é uma função da pressão. Neste trabalho, a conceituação foi diferente, tanto porque, para redes antigas, não se considera que essa modelagem seja significativa, como porque esse modelo leva em consideração apenas as perdas ocultas, enquanto todas as “anomalias” são de grande interesse: como usuários não cadastrados, erros na modelagem ou até roubo de água; todas essas anomalias não dependem do valor da pressão.

Consequentemente, a *Objective Function* (O.F.) é a seguinte:

$$O.F. = \min \left( \begin{aligned} & \sum_{i=1}^{\text{Número de nodos de controle}} \frac{|H_{med} - H_{comp}|}{|H_{med}|} \cdot W_H \\ & + \sum_{i=1}^{\text{Número dos lados de controle}} \frac{|Q_{med} - Q_{comp}|}{|Q_{med}|} \cdot W_Q \\ & + \sum_{i=1}^{\text{Número dos lados de controle}} \frac{|Q_{tot med} - Q_{tot comp}|}{|Q_{tot med}|} \cdot W_T \end{aligned} \right)$$



Onde:  $N$  é o número de nós de controle,  $L$  é o número de *links* de controle,  $H$  são pressões,  $Q$  são vazões; o subscrito *med* refere-se aos valores medidos, o subscrito *comp* aos valores computados;  $W$  são os pesos, que dependem da precisão esperada dos dispositivos de campo reais.

O modelo de rede é calibrado alterando as solicitações para os nós, para que os valores de saída do modelo sejam os mais semelhantes possíveis aos medidos pelos instrumentos.

A diferença entre os valores esperados e os reais não é necessariamente devido às perdas, mas indica a necessidade de investigar o funcionamento da rede na área identificada.

O método usado pela minimização da função objetivo, é um Algoritmo Genético (AG)<sup>5</sup> simples com operadores de mutação e *crossover*. Como se sabe, esses algoritmos são capazes de encontrar pontos próximos da melhor solução; portanto, no final da aplicação do AG, também é utilizado um procedimento de *hill climbing* para encontrar a melhor solução possível.

A minimização do O.F. permite a reconstrução correta do cenário inicial. Na Figura 1, um cenário é reproduzido, juntamente com sua melhor reconstrução. Como pode ser visto, a redução da O.F. permite a reconstrução do cenário de perda correto (ou seja, original).

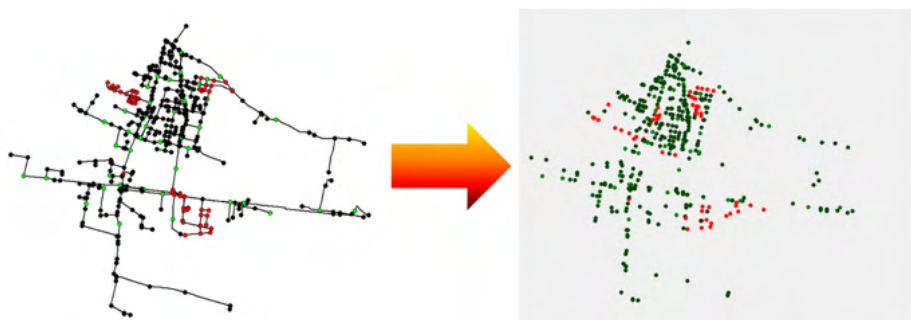


Figura 1: Rede de Castegnato. À esquerda, o cenário hipotético de perda; à direita, a reconstrução (nos dois casos, os pontos de perda estão em vermelho).

Fonte: elaborado pelos autores.

### *Redução do consumo de energia – rede de Milano (Itália)*

Milano têm cerca de 1.3 milhões de habitantes, com uma área de 181,67 km<sup>2</sup>. O sistema de abastecimento de água de Milano adquire água potável de vários poços (cerca de 600); as bombas transportam água para os reservatórios localizados ao nível do solo.

<sup>5</sup> Os AG são inspirados pelo princípio da seleção natural e evolução biológica.

Desses reservatórios, a água é bombeada diretamente na rede, sem a necessidade de reservatórios localizados em maior altitude. Portanto, a carga hidráulica é garantida pelas estações de bombeamento, cuja ação equilibra os efeitos da demanda de água. Os condutos têm uma extensão total de 2.200 km e, na rede, existem 31 estações de bombeamento e em cada uma delas estão instaladas de três a quatro bombas. Cada bomba trabalha com uma vazão na faixa de 200 a 400 l/s e carga máxima de 50 m.

Atualmente, a rede é gerenciada com técnicas tradicionais e empíricas, o que pode não ser o melhor caminho. Então, as perguntas são se as operações atualmente implementadas trazem o sistema para operar com a máxima eficiência e se é possível melhorar a eficiência do sistema.

A função de objetivo que deve ser minimizada é simplesmente a potência  $W$ , obtida pela soma da potência de cada bomba funcionante:

$$W = \sum_{i=1}^{Nbombas} \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{\eta} = \min$$

Onde  $\gamma$  é o peso específico do fluido (água),  $H$  é a carga fornecida pela bomba para a vazão  $Q$  e  $\eta$  representa a eficiência da bomba. As variáveis que devem ser calibradas são as velocidades das bombas.

Se a pressão em algum ponto de controle cair abaixo do valor aceitável ( $MinPres > CompPres$ ), o valor  $W$  é artificialmente aumentado para “penalizar” a configuração em teste:

$$OF = W \text{ quando a pressão é aceitável}$$

$$OF = W \cdot 5 \cdot \left( 1 + \frac{MinPres - CompPres}{MinPres} \right)$$

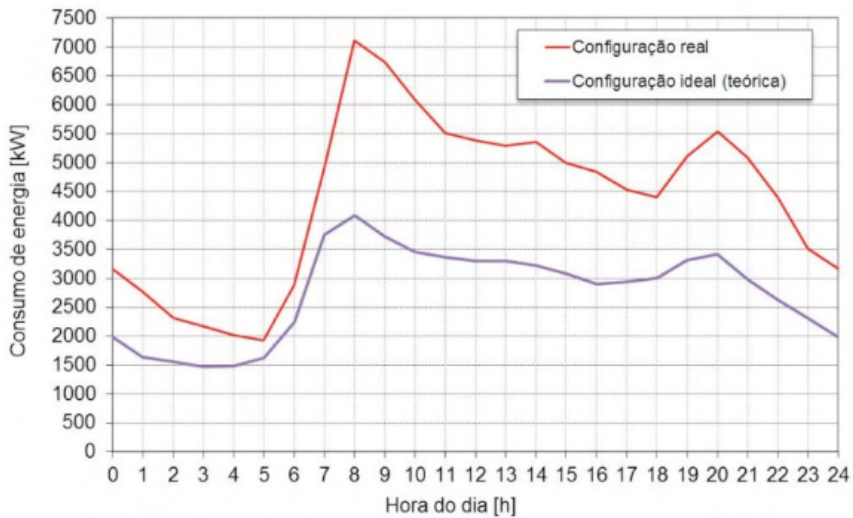


Figura 2: Energia necessária em um dia médio: melhorias obtidas com um método de otimização.

Fonte: elaborado pelos autores.

Milhares de configurações diferentes de bombeamento foram testadas, lideradas por um algoritmo genético, a fim de encontrar a melhor configuração, ou seja, a configuração que pode garantir o mesmo serviço e a melhor economia de energia. Os resultados mostram que uma melhoria dramática é possível, como pode ser observado na Figura 2.

Tomada de nota dos resultados obtidos, em 2017, o operador de rede de Milano decidiu anunciar um concurso público internacional, para um contrato (valor de 2,5 milhões de euros) para a auditoria, otimização e automatização da rede.

### *Quantos instrumentos de medição são necessários?*

A importância de fazer medições precisas já foi discutida. No entanto, permanece o problema de estabelecer o número e a posição dos instrumentos, que são muito caros e exigem manutenção adequada. Obviamente, a instalação real dos instrumentos depende das possibilidades logísticas e econômicas. De qualquer forma, tentamos fazer uma determinação a mais objetiva possível. Com o que vimos até agora, podemos definir um critério operacional.

Pode-se considerar que o número de instrumentos instalados seja suficiente quando a calibração do modelo for inequívoca.

No entanto, é certamente possível que o número de instrumentos posicionados não seja suficiente, e de qualquer maneira, na fase de planejamento do número e posição dos dispositivos, é desejável o conhecimento da presença de outros mínimos. A existência de

outros mínimos é uma medida da incerteza do cenário em análise, contudo, permite uma melhor determinação do número e posição dos instrumentos a serem instalados.

## 7. PARÂMETROS PARA A AVALIAÇÃO DA CRITICIDADE DE UMA TUBULAÇÃO

### 7.1 Generalidades

Por criticidade de um conduto, entendemos a avaliação de sua vida útil ou, o que é conceitualmente muito semelhante, os parâmetros que podem levar à sua ruptura.

Como parte das atividades relacionadas com a gestão do serviço integrado hídrico, é muito frequente o caso em que é necessária a definição de intervenções ótimas de requalificação para redes existentes que permitam a restauração de condições de funcionamento compatíveis com as necessidades dos usuários.

A alocação correta dos recursos disponíveis para os gestores para manutenção da rede é, portanto, de fundamental importância. A descoberta das condições estruturais dos condutos é extremamente difícil. O principal motivo se deve ao fato de os condutos estarem sob pressão e não é fácil inspecioná-los internamente, como no caso de esgotos. Um papel importante é ocupado por dados históricos, por exemplo: a ocorrência de quebras, cuja disponibilidade permite obter uma medição indireta das condições dos condutos. O conhecimento preciso da rede permite uma melhor programação de sua manutenção, o que se traduz em um melhor serviço oferecido ao usuário. Na última década, vários procedimentos foram propostos, a maioria de natureza probabilística, com o objetivo de prever a quebra de condutos de aquedutos, a análise de confiabilidade e com o objetivo final de melhorar a manutenção de todo o sistema de distribuição.

### 7.2 Índice de risco

O índice heurístico HIRC foi desenvolvido pelos autores deste capítulo e é construído a partir de considerações sobre os parâmetros que podem influenciar no mecanismo de ruptura de um conduto. A estrutura do índice é mostrada na equação abaixo e é aplicada a cada seção dos condutos que compõe a rede.

$$HIRC = I_D W_D + I_R W_R + I_P W_P + I_L W_L + I_C W_C + I_A W_A (I_{\Delta P} W_{\Delta P} + I_T I_{LP} W_{DTLP})$$

com:

$I$  é o parâmetro normalizado que se refere a cada variável de interesse [-];

$W$  é o fator de multiplicação de cada elemento [-].

Nisso, os subscritos referem-se às seguintes variáveis:

$D$  = diâmetro interno;

$R$  = reparos realizados;

$\Delta P$  = pressão média de operação;

$L$  = perdas observadas;

$C$  = conexões na seção examinada com tubos de conexão aos usuários;

$A$  = idade de instalação;

$P$  = variação máxima de pressão avaliada em um arco específico de tempo;

$T$  = tráfego de veículos atuando na superfície do solo acima do trecho considerado;

$LP$  = profundidade da superfície de assentamento.

Operacionalmente, uma vez calculado o índice de cada trecho, os resultados são divididos pelo valor máximo encontrado dentro das redes em questão, de modo a trabalhar com dados entre 0 e 1 para todos os trechos de todos os municípios, para definir um único intervalo de criticidade para todas as redes.

O índice heurístico HIRC consiste, portanto, numa série de parâmetros, cada um utilizável de acordo com os dados disponibilizados pelo cliente, medidos pelo organismo que tem que otimizar a rede ou conhecidos a partir de simulações hidráulicas.

Portanto, é necessário avaliar caso a caso quais dados estão disponíveis.

### *Diâmetro*

Entre as muitas disponíveis na literatura, uma formulação simples que estima possíveis quebras é produzida por Ermini, Viparelli e Fiorentino (1998):

$$\Lambda = 116 \cdot D^{-1.05}$$

O parâmetro descreve o número de quebras por ano por quilômetro de conduto conforme ao valor do diâmetro  $D$ , expresso em milímetros.

Para cada trecho, o parâmetro  $I_D$  é, portanto, computado como:

$$I_D = \frac{\Lambda_D - \Lambda_{D,max}}{\Lambda_{D,min} - \Lambda_{D,max}}$$

O parâmetro  $I_D$  vai para zero muito rapidamente quando espectros de diâmetros muito grandes são considerados. Por esse motivo, deve-se sempre considerar que o parâmetro é adequado para redes de distribuição com uma faixa de diâmetros não muito ampla.

### *Reparos*

O parâmetro  $I_R$  é definido como 0 se nenhum reparo  $R$  ainda foi realizado na seção em questão, após o qual ele varia exponencialmente até 1 assumindo o valor de 3 reparos como o limite de criticidade. Isso significa que se 3 atividades de reparo já foram realizadas no trecho da tubulação em questão, então o parâmetro terá um valor máximo e qualquer outro reparo não justificaria novos aumentos no índice.

$$I_R = 0.245 \cdot 2^{R-1}$$

### *Perdas*

Os dados de perdas dependem da exatidão das campanhas de busca de fugas efetuadas pelo organismo escolhido para a otimização da rede e dos relatórios recebidos das perdas encontradas.

Se a nível teórico os dados podem ser implementados imediatamente, na verificação prática, é difícil ter uma cobertura total da rede. A consequência natural das considerações anteriores é que, se implementado no índice, o parâmetro de perda determina uma hierarquia inválida, atribuindo importância excessiva às áreas com perdas medidas, normalmente em áreas da cidade onde é exercido maior controle dos fluxos.

$$\text{PERDAS SIM } I_L = 1$$

$$\text{PERDAS NÃO } I_L = 0$$

### *Pressão média*

Quanto ao parâmetro de  $I_p$  que aparece no Índice de heurística, é considerado um elo de ligação linear, com a pressão de funcionamento médio dentro de uma gama variando de operação entre 20 e 55 metros. A fórmula de interpolação linear, com a pressão expressa em metros, é:

$$I_p = 0.0286 \cdot P - 0.5714$$

Para valores de pressão mais elevados, o valor do parâmetro  $I_p$  é considerado igual à unidade, enquanto para valores de pressão abaixo de 20 metros de coluna d'água, o parâmetro não afeta o índice.

### *Mudanças de pressão*

As mudanças diárias de pressão têm que ser avaliadas como as pressões máximas

e mínimas atuantes em cada trecho da rede. O termo  $I_{\Delta P}$  é considerado uma função linear da variação da pressão, que varia em uma faixa máxima entre 0 e 30 metros.

$$I_{\Delta P} = 0.33 \cdot \Delta P$$

As mudanças de pressão devidas ao golpe de aríete não são consideradas no índice, porque precisa-se de avaliações mais detalhadas.

### *Idade dos condutos*

A idade do conduto é um parâmetro que não descreve exatamente os mecanismos de falha da conduta ou sua criticidade, mas influencia significativamente a probabilidade de ocorrência de perdas e falhas. Na verdade, esse parâmetro pode ser interpretado como um fator de amplificação das demais variáveis que descrevem a dinâmica do fenômeno. Por esse motivo,  $I_A$  é inserido como um multiplicador dos parâmetros relacionados ao tráfego, superfície de assentamento e variações de pressão.

Operacionalmente, os dados sobre a idade de colocação dos dutos quase nunca são conhecidos, com exceção das redes de distribuição mais recentes. Portanto, é escolhido um valor de referência que é considerado o mais significativo para as redes em questão e permanece constante para todos os dutos.

### *Ligações*

Para a implementação no índice heurístico, são consideradas as ligações, entendidas como o número de ligações aos usuários para cada trecho único do conduto, excluindo-se do cálculo as conexões entre os condutos principais. As ligações com os usuários influenciam diretamente a probabilidade de falha de um conduto, pois representam descontinuidades no desenvolvimento longitudinal da infraestrutura.

O parâmetro normalizado  $I_C$  que aparece no índice heurístico está ligado ao número de conexões aos usuários por meio de uma relação de dependência linear mostrada abaixo:

$$I_C = \frac{\Omega - \Omega_{min}}{\Omega_{max} - \Omega_{min}}$$

### *Superfície de assentamento*

Por superfície de assentamento entende-se a altura do telhado para a seção do conduto que vai da superfície do solo até os extrados superiores da infraestrutura.

A ligação entre a profundidade da superfície de assentamento e o índice heurístico é expressa por meio do parâmetro  $I_{LP}$ . O valor atribuído à variável é obtido através de

considerações sobre as cargas dinâmicas, inversamente proporcionais à profundidade de assentamento, e as cargas estáticas atuantes sobre a estrutura e diretamente proporcionais a ela. O resultado obtido da análise anterior pode ser escrito na forma abaixo.

$$I_{LP} = 0.0071 \cdot H^5 - 0.0912 \cdot H^4 + 0.4325 \cdot H^3 - 0.8495 \cdot H^2 + 0.2834 \cdot H + 0.967$$

### *Trânsito de carros*

Os parâmetros a serem levados em consideração são o tipo de carga do veículo – leve ou pesado – e a quantidade de veículos que passam na via acima do gasoduto. O resultado está resumido na Tabela 1.

Tabela 1: Valores do parâmetro  $I_T$ .

Intensidade	Carga zero	Carga leve	Carga pesada
Nada	0.00	0.00	0.00
Moderado	0.00	0.10	0.20
Comum	0.00	0.30	0.60
Intenso	0.00	0.50	1.00

Fonte: elaborado pelos autores.

### *Pesos*

Todos os componentes que contribuem para a determinação do índice heurístico devem ser multiplicados por um fator multiplicativo, que representa o *peso* de um único componente em relação à criticidade. Os valores dos pesos foram obtidos a partir da calibração e verificação da fórmula em cerca de 20 cidades italianas, resultando no que está relatado na Tabela 2.

Tabela 2: Valores dos pesos.

$W_D$	75.00
$W_T$	36.46
$W_P$	185.42
$W_{\Delta P}$	30.21
$W_C$	55.56

Fonte: elaborado pelos autores.



## *Críticas e possíveis melhorias*

Os parâmetros que aparecem no índice heurístico são certamente essenciais para determinar a criticidade de um sistema de aquedutos, mas não são os únicos. A análise pode ser ampliada e a construção do índice está aberta a todos os fatores que contribuem para a determinação das criticidades de uma rede. Por exemplo, “correntes parasitas”, se houver, ou mesmo o número de juntas podem ser considerados.

As possíveis considerações sobre os pesos são completamente semelhantes; eles são calculados com base em dados bastante grandes, mas, sem dúvida, a calibração dos pesos não é exaustiva e, em todo caso, relativa a realidades locais.

Acredita-se, portanto, que a estrutura da metodologia pode ser considerada razoavelmente válida, que pode ser aplicada como uma primeira aproximação e levando em conta possíveis erros também em outras realidades, mas que para uso profissional deve ser verificada com base nas situações locais.

A estimativa do risco obtido deve ser submetida a uma análise mais cuidadosa em relação aos cenários de perda anteriormente assumidos. Essa zonação combinada com a localização (presumida) das perdas pode de fato apoiar o processo de tomada de decisão de manutenção; por exemplo, uma possível coincidência entre áreas com alto risco de quebra e áreas aonde os vazamentos são mais esperados. O vazamento pode empurrar o operador para a substituição do conduto, se necessário, dentro de uma zona definida. Vice-versa, no caso de insistência diferente por parte das duas áreas, o gestor pode optar para o reparo.

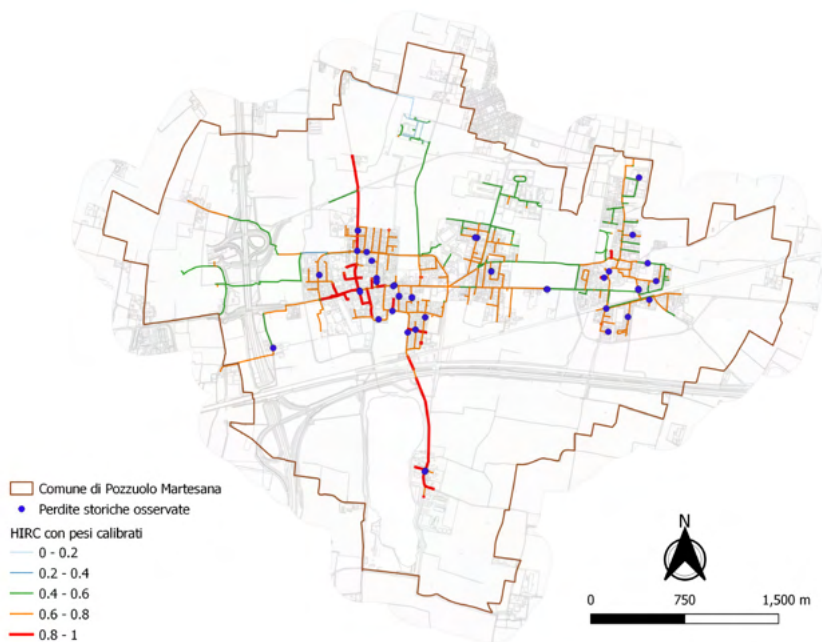


Figura 3: Mapa de risco obtido de acordo com o índice proposto e a legenda relacionada (município de Pozzuolo Martesana, no norte da Itália).

Fonte: elaborado pelos autores.

## 8 . CONCLUSÕES

Como dissemos no início do capítulo, a problemática da avaliação de uma rede de abastecimento de água e as decisões relativas à sua melhoria são complexas – o que aumenta a complexidade do problema – e devem ser tomadas em situações profissionais também muito diferentes entre si. Em algumas situações, nada se sabe e deve-se começar fazendo um balanço hídrico; em outros casos, um modelo hidráulico já calibrado está disponível e avaliações mais específicas podem ser feitas.

Em todos esses, o caminho aqui traçado deve ser considerado indispensável, pois consiste em conhecer cada vez melhor a rede e assim poder fazer escolhas de investimento informadas.

O primeiro passo é, portanto, avaliar em que ponto das cinco etapas indicadas no parágrafo 1 nos encontramos, e depois continuar pelo caminho que, como já dissemos, deve ser considerado “virtuoso”.

## REFERÊNCIAS

- ALEGRE, H. *et al.* **Performance indicators for water supply services**. London: IWA Publishing, 2000.
- ARTINA, S. *et al.* Approccio MILP (mixed integre linear programming) al problema di optimal design di reti di distribuzione idrica. *In: CONVEGNO DI IDRAULICA E COSTRUZIONI IDRAULICHE*, 28., 2002, Potenza. **Anais [...]**. Potenza: IDRA, 2002.
- BECCIU, G.; MAMBRETTI S.; MARTINS P. S. Evolutionary optimization for water losses recognition in water supply networks. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 19, n. 8, p. 976-999, 2014.
- BEHN, R. D. Why measure performance? different purposes require different measures. **PAR: Public Administration Review**, Washington, D.C., v. 63, n. 5, p. 586-606, 2003.
- ERMINI, R.; VIPARELLI, R.; FIORENTINO, M. Una metodologia per la valutazione dell'incidenza della vulnerabilità meccanica sul disservizio nelle reti acquedottistiche. *In: CONVEGNO DI IDRAULICA E COSTRUZIONI IDRAULICHE*, 29., 1998, Catania. **Anais [...]**. Catania: IDRA, 1998. p. 467-478.
- FUNASA. **Redução de perdas em sistemas de abastecimento de água**. 2. ed. Brasília, DF: Funasa, 2014.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water resources research**, New York, v. 18, n. 1, p. 14-20, 1982.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Cambridge: MIT Press, 1975.
- JAYNES, E. T. Information theory and statistical mechanics. **Physical Review Journals Archive**, College Park, n. 106/108, 1957.
- LAMBERT, A. O.; KOELBL, J.; FUCHS-HANUSCH, D. Interpreting ILIs in small systems. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE IWA-WATER IDEAS: INTELLIGENT DISTRIBUTION FOR EFFICIENT AND AFFORDABLE SUPPLIES*, 1., 2014, Bologna. **Anais [...]**. Bologna: IWA-Water Ideas, 2014.
- MAILHOT, A. *et al.* Modelling the evolution of the structural state of water pipe networks with brief recorded pipe break histories: methodology and application. **Water Resources Research**, Washington, D.C., v. 36, n. 10, p. 3053-3062, 2000.
- MAKSIMOVIC, C.; CARMI, N. GIS supported analysis of pressure dependant vulnerability of distribution networks to leakage. *In: SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (ed.). Water Industry Systems: Proceedings of CCW199*. Exeter: University of Exeter, 1999. v. 2. p. 85-96.
- MAMBRETTI, S.; ORSI, E. Genetic Algorithms for Leak Detection in Water Supply Networks. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN WATER*, 1., 2012, New Forest. **Anais [...]**. New Forest: Urban Water, 2012.
- MOULLIN, M. **Delivering excellence in health and social care**. Buckingham: Open University Press, 2002.

NEELY, A. D.; ADAMS, C.; KENNERLEY, M. **The performance prism**: the scorecard for measuring and managing stakeholder relationships. London: Financial Times, 2002.

OFFICE OF THE CHIEF INFORMATION OFFICER. **Enterprise architecture program**. Washington, D.C.: OCIO, 2002.

ORMSBEE, L. E. Implicit network calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 115, n. 2, p. 243-257, 1989.

SAVIC, D. A.; WALTERS, E. D. S. **Proceedings of the CCWI'99 International Conference on Water Industry Systems**: modelling and optimization applications. Baldock: Research Studies Press Ltd., 1999, v. 1.

SCARPA F., LOBBA A., BECCIU G. Expeditionary pump rescheduling in multisource water distribution networks, **Procedia Engineering**, 119,1, 1078-1087, 2015.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal**, Stevenage, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948.

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

Gestão e Tecnologia do

# SANEAMENTO BÁSICO:

Uma abordagem na Perspectiva  
Brasileira e Internacional

  
Ano 2022

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

Gestão e Tecnologia do

# SANEAMENTO BÁSICO:

Uma abordagem na Perspectiva  
Brasileira e Internacional



  
Atena  
Editora  
Ano 2022