



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ALEXANDRE JOSÉ PRIORI JOVINO MARQUES FILHO

**OTIMIZAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA RAMIFICADAS
UTILIZANDO O MÉTODO GRANADOS MODIFICADO**

Recife
2025

ALEXANDRE JOSÉ PRIORI JOVINO MARQUES FILHO

**OTIMIZAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA RAMIFICADAS
UTILIZANDO O MÉTODO GRANADOS MODIFICADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco, Centro de Tecnologia e
Geociências, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Marques Filho, Alexandre José Priori Jovino.

Otimização de Redes de Abastecimento de Água Ramificadas Utilizando o Método Granados Modificado / Alexandre José Priori Jovino Marques Filho. - Recife, 2025.

71 p. : il., tab.

Orientador(a): José Roberto Gonçalves de Azevedo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Modelo Computacional. 2. Excel/VBA. 3. Dimensionamento hidráulico.
I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ALEXANDRE JOSÉ PRIORI JOVINO MARQUES FILHO

**OTIMIZAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA RAMIFICADAS
UTILIZANDO O MÉTODO GRANADOS MODIFICADO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco, Centro de Tecnologia e
Geociências, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Aprovado em: 20/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. José Roberto Gonçalves De Azevedo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. Esp. Lucas Breno dos Santos (Examinador Externo)
Mestrando da Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus, por tudo o que me proporcionou e por cuidar de mim em todos os momentos da vida, e à Nossa Senhora por me guardar e proteger debaixo de seu manto.

À minha família, em especial aos meus pais, Alexandre e Andréa, por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos em que nem eu mesmo acreditava, por me encorajarem e aconselharem nos caminhos da vida. Aos meus avós (in memoriam), por terem formado uma família incrível e contribuído significativamente para minha formação pessoal, com certeza não seria a pessoa que sou hoje sem o que vocês fizeram em minha vida. E aos meus irmãos, Pedro, André e Rafael, por me ensinarem o verdadeiro significado de ser família, por me motivarem a dar meu melhor para ser um bom exemplo para vocês e por estarem comigo no dia a dia de nossas vidas. Vocês têm uma grande parcela no meu crescimento pessoal e profissional.

À Maria Eduarda, você foi responsável por não me deixar parar. Nos momentos em que tive dúvida, foi você quem me ajudou a levantar e a acreditar em mim. Obrigado pelo apoio, pelas críticas construtivas e pelas sugestões ao longo dessa jornada. Agradeço por proporcionar os melhores dias da minha vida ao seu lado.

Aos meus professores da graduação, agradeço a paciência e por todo aprendizado ao longo desse tempo. Em especial ao professor Roberto Azevedo, sou muito grato por tudo que o senhor me ensinou, desde as disciplinas e as pesquisas até esse trabalho.

Aos meus amigos que tiveram grande importância ao longo da minha vida acadêmica e pessoal – em especial a Igor, Kleber, Manoel, Ricardo e Tiago – vocês são grandes companheiros que tornam a vida mais leve, mas que, quando necessário, também incentivam e aconselham de forma a me tornar uma pessoa melhor. Agradeço também a todos que contribuíram a minha formação como engenheiro civil, principalmente aqueles que estiveram ao meu lado nos dias mais difíceis.

RESUMO

A otimização de redes de distribuição de água é essencial para garantir o abastecimento universal e equitativo de água potável, bem como para que estas infraestruturas sejam hidraulicamente eficientes e economicamente viáveis para a ampliação e recuperação dos sistemas, especialmente em contexto de recursos limitados – financeiros, humanos ou hídricos. Este estudo teve como propósito desenvolver e aplicar um Modelo Computacional baseado no Método Granados (MG), com a implementação modificada do MG (MGM) utilizando o *Visual Basic for Application* (VBA) como linguagem de programação no Microsoft Excel, visando otimizar redes ramificadas de abastecimento de água. O estudo foi realizado em três redes hipotéticas com diferentes configurações, compostas por 9, 13 e 18 trechos, respectivamente. As simulações computacionais buscaram identificar e apresentar a uma solução ótima do sistema, respeitando as exigências de pressões mínimas nos nós e para uma cota do nível de água do reservatório previamente conhecida e admitida fixa (cota meta). O Modelo Computacional desenvolvido considera critérios normativos atuais, como a limitação da perda de carga, conforme a NBR 12218 (ABNT, 2017), substituindo o critério de velocidade máxima da versão original do Método Granados (Granados, 1986). A validação do Modelo foi realizada por meio da comparação com resultados obtidos manualmente, os quais se mostraram idênticos. Adicionalmente, para a rede com 9 trechos, a validação realizada pelo software EPANET apresentou diferenças inferiores a 0,5%. Os resultados obtidos demonstraram que o Modelo Computacional baseado no MGM foi capaz de otimizar as redes testadas, respeitando a cota meta e as pressões nos nós. Em todos os casos, os diâmetros foram ajustados de forma eficaz, garantindo os menores custos e respeitando as normas atuais. Os resultados reforçam a aplicabilidade do MGM como ferramenta prática e acessível.

Palavras-chave: Modelo Computacional; Excel/VBA; dimensionamento hidráulico.

ABSTRACT

The optimization of water distribution networks is essential to ensure the universal and equitable supply of drinking water, as well as to guarantee that these infrastructures are hydraulically efficient and economically viable for the expansion and recovery of systems, especially in contexts of limited resources – financial, human, or water. This study aimed to develop and apply a Computational Model based on the Granados Method (MG), with the modified implementation of MG (MGM) using Visual Basic for Applications (VBA) as the programming language in Microsoft Excel, in order to optimize branched water supply networks. The study was conducted on three hypothetical networks with different configurations, composed of 9, 13, and 18 sections, respectively. The computational simulations sought to identify and present an optimal solution for the system, complying with the requirements of minimum pressures at the nodes and for a reservoir water level elevation previously known and assumed fixed (target elevation). The Computational Model developed considers current regulatory criteria, such as the limitation of head loss, according to NBR 12218 (ABNT, 2017), replacing the maximum velocity criterion of the original version of the Granados Method (Granados, 1986). The validation of the Model was carried out by comparison with results obtained manually, which proved to be identical. Additionally, for the network with 9 sections, validation performed using the EPANET software showed differences of less than 0.5%. The results obtained demonstrated that the Computational Model based on MGM was able to optimize the tested networks, respecting the target elevation and node pressures. In all cases, the diameters were effectively adjusted, ensuring the lowest costs and complying with current standards. The results reinforce the applicability of MGM as a practical and accessible tool.

Keywords: Computational Model; Excel/VBA; hydraulic design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo em planta de um SAA	18
Figura 2 – Esquema de uma rede malhada com quatro anéis	18
Figura 3 – Esquema de uma rede ramificada.....	19
Figura 4 – Esquema de uma rede mista	19
Figura 5 – Fluxograma geral das etapas do Método Granados Modificado	24
Figura 6 – Fluxograma referente a “Definição da rede ampliada” do MGM	25
Figura 7 – Interface da planilha das categorias adotadas para a “Definição da rede ampliada”.....	26
Figura 8 – Fluxograma da “Leitura dos Dados de Entrada e Cálculos Hidráulicos Iniciais”	27
Figura 9 – Fluxograma da “Etapa 1” do MGM.....	28
Figura 10 – Interface da planilha da relação da perda de carga, vazão e diâmetro ..	29
Figura 11 – Interface no Modelo Computacional da “Etapa 1.1”	33
Figura 12 – Parte da planilha no Modelo Computacional da “Etapa 1.2”	34
Figura 13 – Parte 1 e 2 do Fluxograma da “Etapa 2”	35
Figura 14 – Parte 3 e 4 do Fluxograma da “Etapa 2”	36
Figura 15 - Parte 5 do Fluxograma da “Etapa 2”	37
Figura 16 - Parte 6 do Fluxograma da “Etapa 2”	37
Figura 17 – 1ª Rede Ramificada: 9 trechos.....	40
Figura 18 – Informações da rede hipotética com 9 Trechos.....	40
Figura 19 – 2ª Rede Ramificada: 13 trechos.....	42
Figura 20 – Informações da rede hipotética com 13 Trechos.....	42
Figura 21 – 3ª Rede Ramificada: 18 trechos.....	44
Figura 22 – Informações da rede hipotética com 18 Trechos.....	44
Figura 23 – Configurações definidas no EPANET.....	45
Figura 24 – Esquema da RDA hipotética de 9 trechos no EPANET	46
Figura 25 – Informações dos nós da RDA no EPANET	47
Figura 26 – Informações dos trechos da RDA no EPANET	47
Figura 27 – Resultados obtidos nos “Dados de Entrada” para a rede com 9 trechos	48
Figura 28 – Resultados obtidos nos “Dados de Entrada” para a rede com 13 trechos	49

Figura 29 – Resultados obtidos nos “Dados de Entrada” para a rede com 18 trechos	50
Figura 30 – Resultados obtidos da “Etapa 1.1” para a rede com 9 trechos	51
Figura 31 – Resultados obtidos na “Etapa 1.1” da rede com 13 trechos.....	51
Figura 32 – Resultados obtidos na “Etapa 1.1” da rede com 18 trechos.....	52
Figura 33 – Resultados obtidos na “Etapa 1.2” dos trechos 1 a 6 da rede com 9 trechos	53
Figura 34 – Resultados obtidos na “Etapa 1.2” dos trechos 1 e 6 da rede com 13 trechos	54
Figura 35 – Resultados obtidos na “Etapa 1.2” dos trechos 1 e 6 da rede com 18 trechos	54
Figura 36 – Solução prévia obtida para a rede com 13 trechos	55
Figura 37 – 1ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos	56
Figura 38 – 4ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos	57
Figura 39 – 5ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos	58
Figura 40 – 6ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos	59
Figura 41 – 7ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos	60
Figura 42 – 13ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos	61
Figura 43 – Última iteração via VBA e manual da “Etapa 2” para a rede com 13 trechos	61
Figura 44 – Solução prévia obtida para a rede com 9 trechos	62
Figura 45 – Última iteração via VBA e manual da “Etapa 2” para a rede com 9 trechos	62
Figura 46 – Solução prévia obtida para a rede com 18 trechos	63
Figura 47 – Última iteração via VBA e manual da “Etapa 2” para a rede com 18 trechos	64
Figura 48 – Resultados dos comprimentos dos diâmetros dos trechos mistos da RDA 9 trechos.....	65
Figura 49 – Resultados dos nós na simulação no EPANET	66
Figura 50 – Resultados dos trechos na simulação no EPANET.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de velocidade máxima em função dos diâmetros das tubulações	22
Tabela 2 – Relação de diâmetros e vazões para C = 115.....	30
Tabela 3 – Relação de diâmetros e vazões para C = 135.....	30
Tabela 4 – Relação de diâmetros e vazões do MG e MGM para C = 115	31
Tabela 5 – Relação de diâmetros e vazões do MG e MGM para C = 135	31
Tabela 6 – Comparativo dos resultados obtidos dos nós no EPANET e via VBA/Excel	66
Tabela 7 – Comparativo dos resultados obtidos dos trechos no EPANET e via VBA/Excel	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Art_EP_0	Artéria com Excesso de Pressão zero
Ca	Câmbio
Compesa	Companhia Pernambucana de Saneamento
CPf	Cota Piezométrica fictícia
Dmin	Diâmetro mínimo
EP	Excessão de Pressão
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPf	Excesso de Pressão fictício
ETA	Estação de Tratamento de Água
GC	Gradiente de Câmbio
H-W	Hazen-Williams
J máxima	Perda de carga unitária máxima
LPS	Litros por segundo
m.c.a	Metros de coluna d'água
MG	Método Granados
MGM	Método Granados Modificado
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NA	Cota atual do nível de água
OMS	Organização Mundial da Saúde
PM	Cota Piezométrica Mínima de Projeto
Qmáx	Vazão máxima
RDA	Rede de Distribuição de Água
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SDA	Sistema de Distribuição de Água
SINISA	Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
VBA	<i>Visual Basic for Application</i>
Vmáx	Velocidade máxima
Z ₀	Cota Piezométrica de Alimentação da solução prévia

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Coeficiente de Rugosidade de Hazen-Williams
C _{pc}	Consumo per capita (L/hab.dia)
C _{unit}	Custo unitário da tubulação (umt/m)
D	Diâmetro do trecho (m)
f	Fator de atrito
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
h _f	Perda de carga do trecho (m)
V	Velocidade de escoamento (m/s)
j	Perda de carga unitária do trecho de comprimento L (m/m)
j _i	Perda de carga unitária do trecho de diâmetro menor (m/m)
j _{ii}	Perda de carga unitária do trecho de diâmetro maior (m/m)
K ₁	Coeficiente do dia de maior consumo
K ₂	Coeficiente da hora de maior consumo
L	Comprimento do trecho (m)
L _i	Comprimento do subtrecho ocupado pelo diâmetro menor (m)
L _{ii}	Comprimento do subtrecho ocupado pelo diâmetro maior (m)
Pop	População de projeto (hab)
Q	Vazão do trecho (m ³ /s)
Q _t	Demanda do trecho (L/s)
Δ Custo	Variação do custo unitário do tubo (umt/m)
Δ h _f	Variação da perda de carga do trecho
ΔΣh _f	Soma acumulada das perdas de carga

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVAS	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (SAA) E HIDRÁULICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA (RDA)	17
2.1.1	Componentes de um sistema de abastecimento de água	17
2.1.2	Tipos de rede de distribuição de água	18
2.1.3	Fundamentos de hidráulica aplicada no dimensionamento das redes ramificadas	19
2.2	OTIMIZAÇÃO APLICADA AO DIMENSIONAMENTO DE REDES HIDRÁULICAS	21
2.3	MÉTODO GRANADOS ORIGINAL	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	AS FERRAMENTAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MODELO COMPUTACIONAL	24
3.1.1	Definição da rede ampliada	24
3.1.2	Leitura dos Dados de Entrada e Cálculos Hidráulicos Iniciais	26
3.1.3	Etapa 1	28
3.1.4	Etapa 2	34
3.2	APRESENTAÇÃO DAS 3 REDES RAMIFICADAS HIPOTÉTICAS	38
3.2.1	1ª Rede Ramificada: com 9 trechos	39
3.2.2	2ª Rede Ramificada: com 13 trechos	41
3.2.3	3ª Rede Ramificada: com 18 trechos	43
3.3	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS NO EPANET	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48

4.1	DADOS DE ENTRADA	48
4.2	ETAPA 1	50
4.2.1	Etapa 1.1	50
4.2.2	Etapa 1.2	52
4.3	ETAPA 2	55
4.4	COMPARATIVO COM OS RESULTADOS OBTIDOS NO EPANET	64
5	CONCLUSÕES	68
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Segundo Heller e Padua (2006), as instalações para abastecimento de água devem ser capazes de fornecer água com qualidade para a população, de forma acessível e com regularidade, além de respeitar os interesses de outros usuários dos mananciais utilizados para o abastecimento. Atualmente, existem inúmeros debates acerca dos problemas oriundos da má distribuição da água e de sua disponibilidade às futuras gerações. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022), 2,2 bilhões de pessoas ainda não tinham acesso seguro a água potável.

Em um Sistema de Abastecimento de Água (SAA) um dos componentes mais onerosos e complexos é a rede de distribuição, responsável pelo transporte de água tratada dos reservatórios até os pontos de consumo. O cumprimento de critérios técnicos hidráulicos, como a pressão, velocidade e vazão, são parâmetros importantes para que as redes de distribuição sejam seguras, funcionais e sustentáveis.

No dimensionamento de um Sistema de Distribuição de Água (SDA) o desafio de grande relevância para a engenharia é o dimensionamento econômico dos diâmetros das tubulações. A utilização de diâmetros maiores implica em custos mais elevados de aquisição e implantação, uma vez que demandam maior quantidade de material e obras civis mais complexas. Por outro lado, diâmetros menores, embora mais baratos, geram maiores perdas de carga devido ao aumento do atrito interno, o que exige pressões mais elevadas ou maior consumo de energia para bombeamento, resultando em maiores custos operacionais (Azevedo Netto et al., 2015). A determinação da combinação de diâmetros que minimiza o custo total constitui um problema clássico de otimização.

Para solucionar essa questão, diversos métodos foram e continuam sendo desenvolvidos e testados, dentre eles, pode-se citar o Método Granados (MG). Este método é um algoritmo iterativo de otimização, que proporciona o custo mínimo de uma rede de distribuição ramificada pressurizada unicamente pela ação da gravidade (Gomes, 2002).

A relevância desse trabalho reside na aplicação de uma metodologia de otimização consolidada a um problema elementar da Engenharia Civil. Diante dos fatos apresentados, a capacidade de projetar SDAs com o menor custo global possível é uma habilidade indispensável para o engenheiro. Este estudo visou, portanto, não

apenas revisar, modificar e aplicar o Método Granados, mas também demonstrar seu potencial acadêmico, pois incentiva os usuários (discentes) na tomada de decisão em projetos de abastecimento de água.

Em um cenário de recursos cada vez mais escassos, a otimização vai além da economia de uma obra, impactando diretamente a sustentabilidade financeira da região, incluindo concessionária e população. A engenharia, neste contexto, assume um papel estratégico garantindo que os investimentos em infraestrutura gerem o máximo retorno social e econômico.

1.1 JUSTIFICATIVAS

A otimização de Redes de Abastecimento de Água (RDA) representa um desafio central para a engenharia civil, principalmente em sistemas de abastecimento de água. A eficiência desses projetos impacta diretamente no custo de implantação, operação e manutenção, bem como a qualidade do serviço prestado à população. Essa questão apresenta bastante relevância no Brasil, cerca de 34 milhões de brasileiros não têm acesso ao abastecimento de água, de acordo com o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA, 2024). Nesse contexto, o MG surge como uma ferramenta de otimização acadêmica, capaz de encontrar soluções econômicas com base em uma metodologia acessível e de fácil implementação em estudos de redes ramificadas.

A relevância deste estudo reside, portanto, na sua capacidade de enfrentar desafios econômicos diretos. A implantação e operação de RDAs exigem investimentos elevados, diante desse cenário, a otimização por métodos como o de Granados pode reduzir significativamente tais custos, tornando os projetos mais viáveis economicamente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho objetiva adaptar e aplicar o Método Granados para otimizar redes ramificadas de abastecimento de água, utilizando a linguagem de programação *Visual*

Basic for Applications (VBA) no Microsoft Excel para análises qualitativas e quantitativas em estudos de casos hipotéticos.

1.2.2 Objetivos específicos

O escopo deste estudo consiste nos seguintes objetivos específicos:

- a) Adequar o Método Granados (MG) às normas técnicas vigentes, principalmente na escolha do diâmetro mínimo dos trechos, e desenvolver um Modelo Computacional no Excel/VBA para realizar o procedimento de cálculo iterativo;
- b) Aplicar o método a 3 estudos de casos com redes ramificadas hipotéticas, dimensionando os diâmetros das tubulações para a condição de menor custo e validar uma delas com o EPANET.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (SAA) E HIDRÁULICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA (RDA)

O acesso a água potável é um pilar fundamental para a saúde pública e o desenvolvimento socioeconômico. A engenharia hidráulica dedica-se a projetar sistemas eficientes para captação, adução, tratamento, reservação e distribuição desse recurso natural. Dentre as etapas deste processo, a rede de distribuição representa a fase final, na qual a água é fornecida para os consumidores, caso o dimensionamento realizado tenha adotado às normas técnicas e as boas práticas da engenharia. Este capítulo apresenta os componentes dos sistemas de abastecimento e aprofunda-se nos princípios da hidráulica que regem o escoamento em redes de distribuição do tipo ramificada, objeto de estudo deste trabalho.

2.1.1 Componentes de um sistema de abastecimento de água

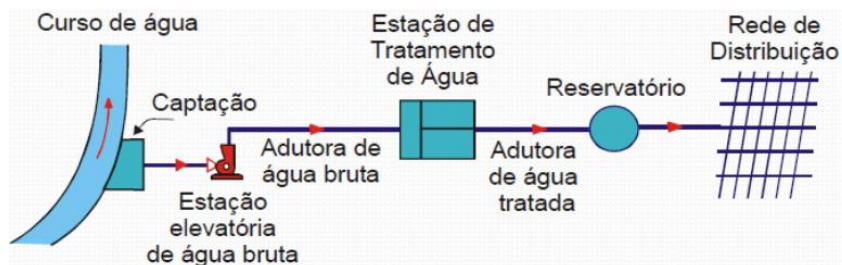
O primeiro componente de um SAA é o manancial, sendo essa a fonte de onde a água é retirada, podendo ser dividida em superficiais (rios, lagos, represas) e subterrâneos (poços, aquíferos, lençóis freáticos) (Tsutiya, 2006). Ao escolher o manancial é importante verificar a disponibilidade de água ao longo do tempo e se a vazão é suficiente para atender as necessidades locais.

Após o manancial, a água, ainda bruta contendo impurezas que a tornam imprópria para consumo, é levada através da adutora para a Estação de Tratamento de Água (ETA), responsável por adequar a qualidade da água aos padrões de potabilidade exigidos pela legislação vigente. Nessa etapa, são realizados processos físicos e químicos para o tratamento, como a coagulação, floculação, decantação e filtração (Di Bernardo; Dantas, 2005).

A água ao ser tratada fica armazenada em reservatórios, que ajudam a regular o fornecimento, garantindo que haja oferta suficiente para atender às demandas da população local. Por fim, a água é levada para os consumidores finais através das redes de distribuição, sendo um conjunto de tubulações, válvulas e outros acessórios que conduzem esse bem. O principal objetivo é garantir as demandas de água, sob condições adequadas de pressão, e ao menor custo possível. Essa é considerada a

última etapa de um SAA e o foco principal desse trabalho. Esse processo pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema ilustrativo em planta de um SAA

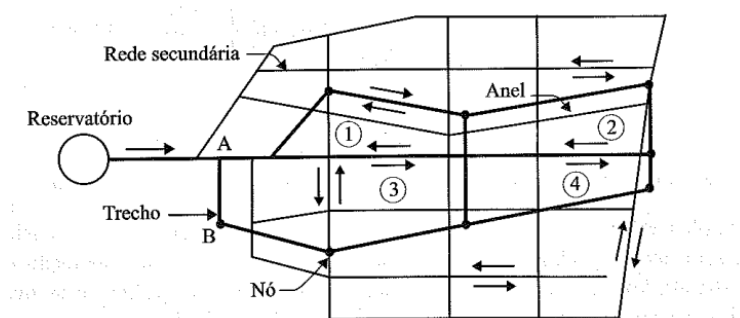


Fonte: Alem Sobrinho e Contrera (2013)

2.1.2 Tipos de rede de distribuição de água

As redes de distribuição de água podem ser divididas em três tipos: malhadas, ramificadas e mistas. As do tipo malhadas são constituídas por tubulações que formam anéis ou blocos, podendo abastecer qualquer ponto do sistema por mais de um caminho, permitindo uma maior flexibilidade em satisfazer a demanda e manutenção da rede, com menor interrupção no fornecimento de água, como pode ser observado na Figura 2 (Tsutiya, 2006). No entanto, esse tipo de rede possui maior custo de implantação e de operação, além de possuir maior complexidade operacional por causa dos múltiplos caminhos para o fluxo de água.

Figura 2 – Esquema de uma rede malhada com quatro anéis

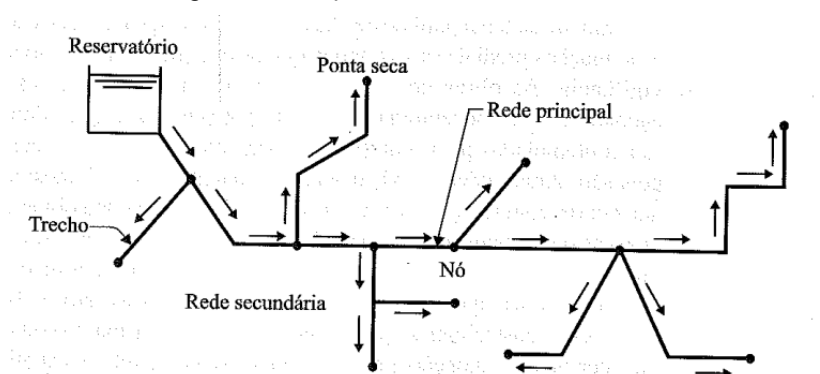


Fonte: Tsutiya (2006).

Já as redes do tipo ramificadas, a água segue um único caminho desde o ponto de alimentação (reservatório) até cada ponto de entrega. A vantagem desse tipo de rede é o menor custo de implantação, no entanto, é considerada menos segura comparada a malhada e o rompimento de um ponto pode deixar a população a jusante

desabastecida, como ilustrado na Figura 3 (Tsutiya, 2006). A utilização desse tipo de rede é recomendada em casos em que a topografia e os pontos a serem abastecidos não viabilizam o traçado com a rede malhada.

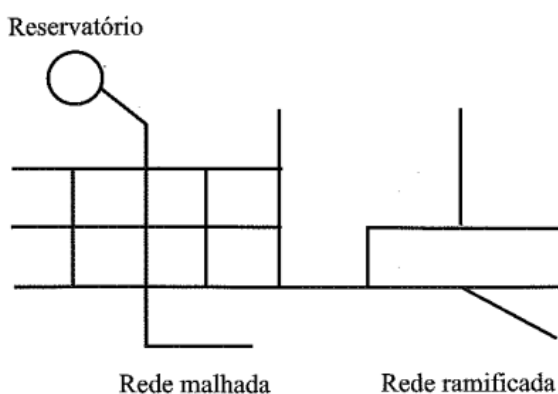
Figura 3 – Esquema de uma rede ramificada



Fonte: Tsutiya (2006).

Uma rede mista seria, portanto, a união dos dois tipos anteriores (ramificada e malhada), conforme ilustrado na Figura 4. Dentre as vantagens dessa rede pode-se citar custos menores de implantação e operação comparada a uma rede totalmente malhada, além da maior confiabilidade do que uma rede ramificada. No entanto, necessita-se de manutenção e diagnósticos mais complexos.

Figura 4 – Esquema de uma rede mista



Fonte: Tsutiya (2006).

2.1.3 Fundamentos de hidráulica aplicada no dimensionamento das redes ramificadas

Para analisar e projetar redes ramificadas, é imprescindível o entendimento dos conceitos de escoamento em condutos forçados sob o regime permanente. Sendo

esse regime no qual as grandezas hidráulicas – como vazão, velocidade e pressão – permanecem constantes em cada ponto do sistema ao longo do tempo (Gribbin, 2014). Já os condutos forçados são tubulações em que o escoamento ocorre com a seção transversal do duto completamente preenchida pelo fluido, nesta condição, a água está sujeita a pressões internas diferentes da pressão atmosférica local (Brunetti, 2008).

A perda de carga constitui um dos principais parâmetros para o dimensionamento das RDAs, pois representa a perda de energia do escoamento devido ao atrito entre o fluido e as paredes da tubulação, bem como pelos efeitos da viscosidade (Azevedo Netto et al., 2015). Se o valor obtido for muito alto, a pressão final no consumidor pode não estar sendo atendida de acordo com a NBR 12218 (ABNT, 2017), a qual recomenda o valor mínimo de 10 metros de coluna d'água (m.c.a), e ser insuficiente para o abastecimento.

A perda de carga se divide em distribuída e localizada, sendo predominante a distribuída em redes extensas. Nesse trabalho foi utilizada a equação de Hazen-Williams (Equação 1) para o cálculo da perda de carga (Azevedo Netto et al., 2015). Foi utilizada tal equação devido à sua simplicidade de aplicação em comparação à Fórmula Universal (Equação de Darcy-Weisbach) e à possibilidade de ajuste do coeficiente de rugosidade (C), o que permite considerar diferentes materiais de tubulação e eventuais ampliações da rede.

$$h_f = \frac{10,674 * Q^{1,852}}{C^{1,852} * D^{4,871}} * L \quad (1)$$

Outro método bastante utilizado para o cálculo da perda de carga é a Fórmula Universal (Equação de Darcy-Weisbach), a qual relaciona a perda de energia diretamente às propriedades físicas do fluido e do escoamento, por meio de um fator de atrito (f) (Azevedo Netto et al., 2015).

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

Não foram apresentadas as opções de cálculo de perdas acidentais (localizadas) nas peças, válvulas e outros dispositivos da rede, pois, pela grande extensão das RDA, é possível desprezá-las.

2.2 OTIMIZAÇÃO APLICADA AO DIMENSIONAMENTO DE REDES HIDRÁULICAS

O problema do dimensionamento econômico reside na busca pelo equilíbrio entre utilizar menores diâmetros comercialmente disponíveis e garantir o desempenho, ou seja, satisfazer a necessidade de que a água seja disponibilizada com pressão e vazões adequadas nos pontos de consumo. Esse desafio torna-se ainda mais complexo em redes com múltiplos trechos, nos quais a diversidade de combinações possíveis entre os diâmetros disponíveis amplia significativamente o número de alternativas a serem avaliadas.

Conforme Alperovits e Shamir (1977), a utilização de modelos de otimização para redes hidráulicas permite obter soluções mais econômicas sem comprometer a confiabilidade do abastecimento. O dimensionamento de uma RDA visa garantir o contínuo fornecimento de água, além da eficiência e economia a todos os pontos de consumo. Nesse contexto, a otimização desempenha um papel fundamental, pois permite identificar as configurações de rede mais adequadas a partir de múltiplas possibilidades, ao considerar critérios técnicos, econômicos e operacionais.

A aplicação de técnicas de otimização no dimensionamento de redes hidráulicas visa, em geral:

- Minimizar os custos de implantação da rede;
- Minimizar as perdas de carga ao longo da rede;
- Garantir pressões adequadas nos pontos de consumo;
- Otimizar o uso de diâmetros comercialmente disponíveis para as tubulações;
- Reduzir o consumo de energia, especialmente em sistemas de bombeamento.

O Método Granados se enquadra na categoria de método de otimização como Heurístico-Determinístico, os quais seguem um conjunto fixo de regras e procedimentos, mas que incorporam simplificações para chegar a uma solução. Embora não explore todo o espaço de soluções como em outros métodos de otimização, fornece um caminho claro e eficaz para encontrar uma solução de baixo custo e que atenda os parâmetros necessários.

É importante destacar que, nos últimos anos outros métodos mais sofisticados vêm sendo aplicados à otimização de SDAs, pois não existe uma metodologia completamente aceita pela comunidade científica e técnicos do setor (Macêdo, 2023).

Dentro esses métodos destacam-se os algoritmos evolutivos, como os Algoritmos Genéticos, que têm demonstrado maior capacidade de explorar o espaço de soluções e alcançar resultados mais próximos ao ótimo global.

2.3 MÉTODO GRANADOS ORIGINAL

O Método Granados (MG), desenvolvido por Alfredo Granados em 1986, consiste em uma otimização iterativa que percorre a rede de forma progressiva. A cada passo, o Excesso de Pressão (EP) disponível em um ponto é aproveitado para reduzir o custo dos trechos seguintes (Granados, 1986).

O MG busca minimizar os custos de uma rede de distribuição ramificada pressurizada, em função de sua cota piezométrica de entrada do sistema fixa ou variável. Durante o processo de otimização, o método incorpora a variação de preços das tubulações conforme seus diferentes tipos, diâmetros e classes (Gomes, 2002).

O método original de otimização é dividido em duas etapas. A primeira define uma solução prévia, hidraulicamente viável, obtida a partir da adoção dos diâmetros mínimos admissíveis, com base nas velocidades máximas recomendadas para cada diâmetro, conforme apresentada na Tabela 1. Na segunda etapa, essa cota é gradualmente reduzida em sucessivas iterações, gerando novos custos para a rede a cada ajuste dos diâmetros dos trechos e análise dos Excessos de Pressão (EP) (Gomes, 2002).

Tabela 1 – Limites de velocidade máxima em função dos diâmetros das tubulações

Diâmetro (mm)	V_{máx} (m/s) *
≤100	2
125	2
150	2
200	2
250	2
300	2,1
350	2,2
400	2,3
450	2,4
500	2,5
600	2,6
700	2,7
800	2,8

Diâmetro (mm)	V_{máx} (m/s) *
900	2,9
1000	3
>1000	2 + D (m)

Fonte: Adaptado de Gomes (2002).

*Valores recomendados por Granados (1986)

A partir dos diâmetros mínimos, calcula-se a perda de carga e a cota piezométrica inicial do reservatório, sendo essa cota necessária para atender aos requerimentos de pressão nos pontos de consumo e superar as perdas de carga em cada trecho da rede.

Após obter a solução prévia, que inclui a cota de alimentação, diâmetros dos trechos e custo inicial de cada um deles, inicia-se a segunda etapa do método. Esta consiste em um processo iterativo que visa reduzir progressivamente a cota piezométrica de alimentação, com o aumento dos diâmetros comerciais dos trechos selecionados, com o mínimo impacto possível no custo da rede. O processo finaliza quando a cota piezométrica de alimentação almejada pelo projetista é atingida ou quando se chega à cota que proporciona o custo mínimo da RDA somada a energia de bombeamento.

O critério de decisão para a otimização iterativa, que constitui a segunda etapa e o núcleo do MG, é o conceito de Câmbio (Ca). O “Ca” de um trecho representa a relação custo-benefício de se alterar seu diâmetro para o imediatamente superior comercialmente. Em termos práticos, ele quantifica o custo adicional (em umt/m/m) necessário para se obter uma redução de 1 metro da perda de carga daquele trecho.

As principais vantagens do método residem na simplicidade conceitual e operacional quando comparado com técnicas de otimização mais complexas (como Algoritmos Genéticos), além de ser focado na economia e possuir bastante aplicabilidade para RDA, não só para implantação, mas também para a vida útil da rede. Dentre as desvantagens do método original, destaca-se a restrição de sua aplicação somente para redes ramificadas, além do fato de ter sido desenvolvido em outro país, o que pode fazer com que não atenda plenamente às normas técnicas vigentes no Brasil.

3 METODOLOGIA

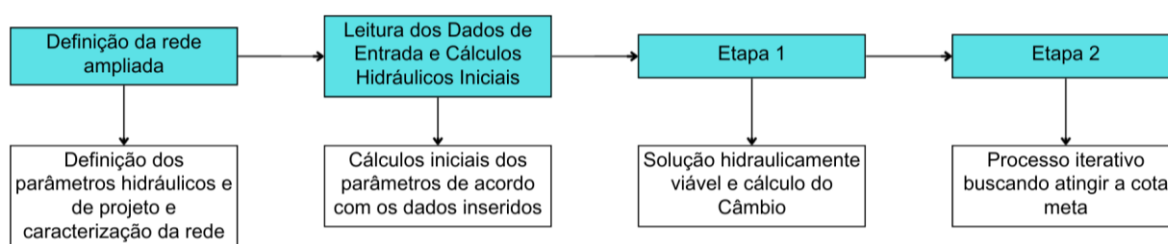
Este capítulo detalha o procedimento metodológico adotado neste estudo, apresentando as ferramentas utilizadas. Abordou-se a metodologia em três seções principais: as ferramentas para o desenvolvimento do Modelo Computacional, apresentação das 3 redes ramificadas hipotéticas e definição dos parâmetros no EPANET.

A modificação do MG justifica-se pela necessidade de adequação às normas técnicas vigentes no Brasil. De acordo com a NBR 12218 (ABNT, 2017), o dimensionamento das tubulações deve considerar um limite de perda de carga unitária em cada trecho de 10 m/km. Essa condição, entretanto, não é contemplada no MG, desenvolvida em outro país com base em normas locais. No método original, os diâmetros dos trechos são definidos exclusivamente com base na velocidade máxima admissível, conforme apresentado na Tabela 1.

3.1 AS FERRAMENTAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MODELO COMPUTACIONAL

A metodologia para otimização das redes ramificadas neste trabalho foi o Método Granados Modificado (MGM). Na Figura 5 está apresentado o fluxograma das etapas do método.

Figura 5 – Fluxograma geral das etapas do Método Granados Modificado



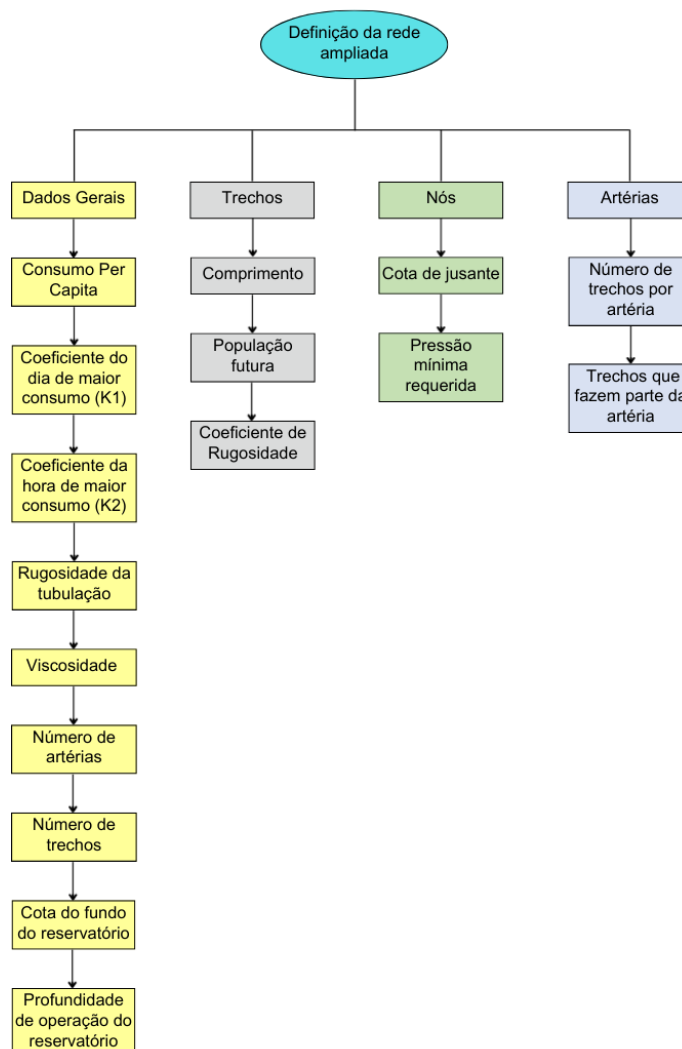
Fonte: O Autor (2025).

3.1.1 Definição da rede ampliada

Nesta etapa foram identificadas as características da RDA e definidos os parâmetros hidráulicos e de projeto para o desenvolvimento do MGM. Essas

informações estão agrupadas em quatro categorias principais: Dados Gerais; Trechos; Nós e Artérias, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma referente a “Definição da rede ampliada” do MGM



Fonte: O Autor (2025).

Nos Dados Gerais, foram estabelecidos parâmetros básicos como o consumo per capita (em L/hab.dia) e os coeficientes de dia de maior consumo e horário de maior consumo de água (K1 e K2, respectivamente). Também foram definidos os dados referentes ao material das tubulações, incluindo a rugosidade e a viscosidade, e temperatura média da água que influenciam no comportamento do escoamento. Embora o método de Hazen-Williams – adotado neste trabalho – não leve em consideração a viscosidade e o material da tubulação, esses fatores são importantes em outros métodos, como a Fórmula Universal de perda de carga (conforme descrito na Equação 2), podendo ser incorporados em estudos futuros.

Outros dados importantes definidos nesta categoria incluem a quantidade de artérias e trechos, a cota do fundo do reservatório e a profundidade de operação do reservatório (admitido constante nesse trabalho). O somatório desses dois últimos parâmetros corresponde à cota “meta” do nível de água no reservatório a ser atingida utilizada nas iterações na Etapa 2.

Na definição dos Trechos, foram informados:

- O comprimento de cada trecho;
- A população futura de projeto atendida por ele;
- A pressão requerida nos pontos de consumo, as quais devem ser superiores a 10 m.c.a, conforme a NBR 12218 (ABNT, 2017);
- Coeficiente de Rugosidade, aplicado no cálculo da perda de carga.

Para os Nós, estabeleceu-se a cota de jusante, sendo a altitude do ponto final de um trecho da tubulação, e a pressão mínima requerida. Por fim, para as Artérias especificou-se a quantidade de trechos que as compõem e a associação de cada trecho à respectiva artéria.

A interface do Modelo Computacional desenvolvido está apresentada na Figura 7 e as cores seguem o padrão adotado nas quatro categorias, conforme Figura 6.

Figura 7 – Interface da planilha das categorias adotadas para a “Definição da rede ampliada”

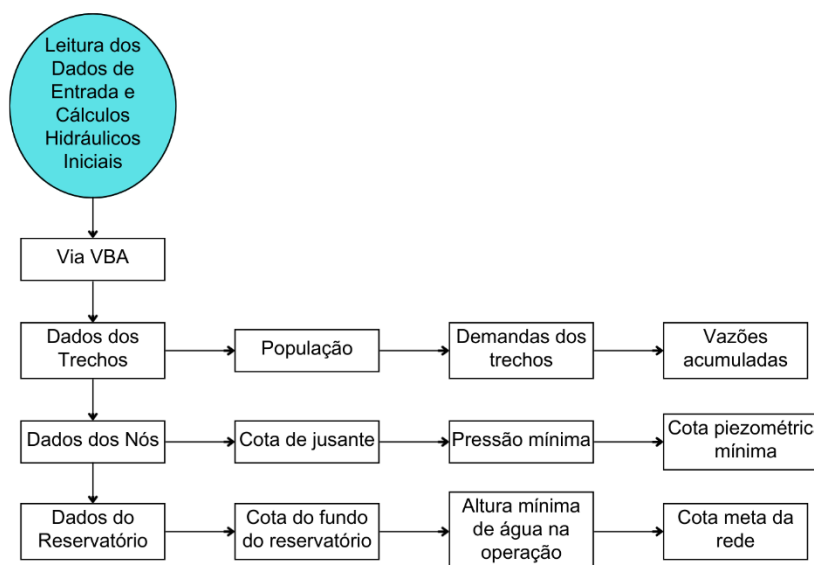
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1				DADOS GERAIS												
2	C per capita =	175	L/dia	$\epsilon =$	$v =$	C HW 1 =	115	Fórmula da Perda =	Hazen-Williams	Darcy-Weisbach	Numero de Artérias =	3				
3	K1 =	1.32		2.00E-04	1.01E-06	C HW 2 =	135	Fórmula de f =		Hazen-Williams	Numero de Trechos =	9				
4	K2 =	1.78						Num de Coeficientes =	2	Swamee-Jain	Cota Nível Água Poço de Sucção (m) =	193				
5										Barr	Altura Manométrica FIXA de Bombeamento (m) =	1				
6	Trecho	Comprimento (m)	População Futura	Demanda do Trecho (L/s)	Vazão Acumulada (L/s)	Cota do Terreno (m)	Pressão Requerida (m.c.a)	Cota Piezométrica Mínima (m)	Coeficiente de Rugosidade (C)	Função do delta	Número de Trechos das Artérias Artéria 1 = 5 Artéria 2 = 4 Artéria 3 = 4 Número dos Trechos das Artérias = Artéria 1 = 1 2 3 4 5 Artéria 2 = 1 6 7 8 Artéria 3 = 1 6 7 9					
7										CoefDeRug						
8										115						
9										135						
10	1	800	0			180.1	12									
11	2	310	713			180.1	12									
12	3	620	550			178.8	12									
13	4	189	630			177.1	12									
14	5	730	3200			174.8	15									
15	6	175	550			181.5	12									
16	7	168	2000			180.3	12									
17	8	220	490			178.7	15									
18	9	430	480			177.9	12									

Fonte: O Autor (2025).

3.1.2 Leitura dos Dados de Entrada e Cálculos Hidráulicos Iniciais

Através das sub-rotinas (macros) estabelecidas através do VBA, foi possível calcular, a partir dos dados de entrada da “Definição da rede ampliada”, as demandas de cada trecho, vazões acumuladas e cotas piezométricas mínimas dos trechos, como pode ser observado o fluxograma na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma da “Leitura dos Dados de Entrada e Cálculos Hidráulicos Iniciais”



Fonte: O Autor (2025).

A demanda individual de cada trecho, considera o consumo per capita, população futura e os coeficientes de pico, conforme Equação 3.

$$Q = \frac{C_{pc} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot Pop}{86400} \quad (3)$$

Para o cálculo das vazões acumuladas, o algoritmo percorre cada artéria no sentido de jusante para montante, somando as demandas individuais dos trechos a jusante e evitando duplicações para trechos comuns a mais de uma artéria. Esse procedimento é fundamental para garantir que os trechos mais a montante sejam dimensionados considerando toda a demanda acumulada a jusante.

Para obter a cota piezométrica mínima de projeto foi necessário somar a cota de jusante com a pressão mínima requerida em cada trecho. Essa informação é essencial para a próxima etapa, onde serão calculados os EPs de cada trecho para definir a cota de alimentação da rede.

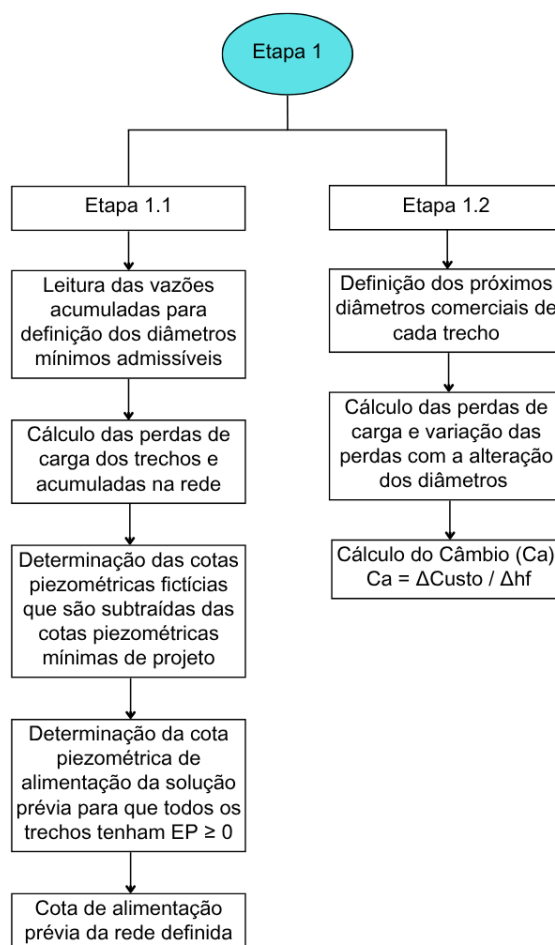
As etapas de “Definição da rede ampliada” e “Leitura dos Dados de Entrada e Cálculos Hidráulicos Iniciais” são responsáveis pelo dimensionamento hidráulico, servindo de base para as etapas posteriores, que objetivam otimizar a RDA.

3.1.3 Etapa 1

O objetivo desta etapa é obter uma solução prévia para o dimensionamento da RDA, definindo a cota piezométrica de alimentação necessária para garantir o atendimento hidráulico mínimo em todos os trechos da rede. Ela é dividida em dois processos, conforme é apresentado na Figura 9.

- “Etapa 1.1”, que calculou as perdas de carga com base nos diâmetros mínimos admissíveis, e determina as cotas fictícias, utilizadas para estimar a cota de alimentação da rede;
- “Etapa 1.2”, que avaliou as variações de custo e perda de carga associadas ao uso de diâmetros comerciais superiores, por meio do cálculo do câmbio (Ca).

Figura 9 – Fluxograma da “Etapa 1” do MGM



Fonte: O Autor (2025).

No Método Granados original, a definição dos diâmetros mínimos é realizada com base na velocidade máxima de escoamento, conforme indicado na Tabela 1. Conforme mencionado, neste estudo foi adotado um critério baseado na compatibilidade entre a perda de carga unitária (J), a vazão e o diâmetro da tubulação, conforme recomenda a NBR 12218 (ABNT, 2017), a fim de garantir que o valor de J não ultrapasse 10 m/km e que a pressão de serviço permaneça dentro dos limites adequados ao funcionamento da rede, entendida como a pressão efetivamente disponível na rede de distribuição de água durante o fornecimento. Na Figura 10 pode ser observada a interface da planilha da relação da perda de carga unitária, vazão e diâmetro.

Figura 10 – Interface da planilha da relação da perda de carga, vazão e diâmetro

	A	B	C	D	E	V	W	X	Y
1	J máximo (m/m) =	0,01		D com (")	D com (m)	Qmax (L/s)	Dmin(mm)	Preço(umt/m)	
2	g =	9,8		2	0,05	0,00	50	594	
3	ε =	2,00E-04		3	0,075	1,17	75	644	
4	v =	1,06E-06		4	0,1	3,41	100	825	
5	C (H-W) =	135		6	0,15	7,27	150	918	
6	1" comercial =	0,025	m	8	0,2	21,15	200	1249	
7	Fórmula da perda =	Hazen-Williams		10	0,25	45,10	250	1791	
8	Fórmula de f =			12	0,3	81,15	300	2503	
9				14	0,35	131,13	350	3370	
10				16	0,4	196,76	400	5000	
11	Swamee-Jain	Darcy-Weisbach		18	0,45	279,64	450	6870	
12	Barr	Hazen-Williams		20	0,5	381,29	500	8220	
13	Função do delta			24	0,6	503,16	600	10020	
14				28	0,7	813,11	700	12500	
15				32	0,8	1220,06	800	13890	
16				36	0,9	1733,96	900	16130	
17				40	1	2364,26	1000	18370	
18	Atingir Metas								
19									

Fonte: O Autor (2025).

Uma simplificação adotada neste estudo foi admitir, para os diâmetros internos dos trechos, os diâmetros nominais comerciais atualmente empregados em RDAs. Além disso, os preços (umt/m) foram considerados a partir de informações extraoficiais coletadas com a Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa).

Com base nas vazões acumuladas previamente calculadas, foram adotados os diâmetros comerciais mínimos admissíveis para cada trecho, que considerava o Coeficiente de Rugosidade (C) de Hazen-Williams. Nas Tabela 2 e 3 estão apresentados os valores de vazões máximas calculadas para cada diâmetro, considerando, respectivamente, os coeficientes de rugosidade de Hazen-Williams são 115 e 135. O valor de vazão igual a 0,00 L/s, apresentado na Figura 10, foi utilizado apenas para viabilizar o uso da função “PROCV” no Excel/VBA, com o objetivo de encontrar a vazão correspondente igual ou inferior à suportada pelo diâmetro.

Tabela 2 – Relação de diâmetros e vazões para C = 115

Dmin(mm)	Qmáx (L/s)
50	1,00
75	2,91
100	6,20
150	18,01
200	38,42
250	69,12
300	111,70
350	167,61
400	238,21
450	324,80
500	428,62
600	692,65
700	1039,31
800	1477,08
900	2014,00

Fonte: O Autor (2025).

Tabela 3 – Relação de diâmetros e vazões para C = 135

Dmin(mm)	Qmáx (L/s)
50	1,17
75	3,41
100	7,27
150	21,15
200	45,10
250	81,15
300	131,13
350	196,76
400	279,64
450	381,29
500	503,16
600	813,11
700	1220,06
800	1733,96
900	2364,26

Fonte: O Autor (2025).

Com o objetivo de evidenciar o impacto da adaptação utilizada no MGM, foram elaboradas as Tabela 4 e 5, que apresentam a relação entre os diâmetros das tubulações e as respectivas vazões máximas suportadas. Nessas tabelas, são

comparados os resultados obtidos pelo MG e pelo MGM, considerando os diferentes valores do coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams ($C = 115$ e $C = 135$).

Tabela 4 – Relação de diâmetros e vazões do MG e MGM para $C = 115$

Diâmetro (mm)	V_{máx} (m/s)	Vazão MG (L/s)	Vazão MGM (L/s)
50	2,00	3,93	1,00
75	2,00	8,84	2,91
100	2,00	15,71	6,20
150	2,00	35,34	18,01
200	2,00	62,83	38,42
250	2,00	98,17	69,12
300	2,10	148,44	111,70
350	2,20	211,66	167,61
400	2,30	289,03	238,21
450	2,40	381,70	324,80
500	2,50	490,87	428,62
600	2,60	735,13	692,65
700	2,70	1039,08	1039,31
800	2,80	1407,43	1477,08
900	2,90	1844,90	2014,00

Fonte: O Autor (2025).

Tabela 5 – Relação de diâmetros e vazões do MG e MGM para $C = 135$

Diâmetro (mm)	V_{máx} (m/s)	Vazão MG (L/s)	Vazão MGM (L/s)
50	2,00	3,93	1,17
75	2,00	8,84	3,41
100	2,00	15,71	7,27
150	2,00	35,34	21,15
200	2,00	62,83	45,10
250	2,00	98,17	81,15
300	2,10	148,44	131,13
350	2,20	211,66	196,76
400	2,30	289,03	279,64
450	2,40	381,70	381,29
500	2,50	490,87	503,16
600	2,60	735,13	813,11
700	2,70	1039,08	1220,06
800	2,80	1407,43	1733,96
900	2,90	1844,90	2364,26

Fonte: O Autor (2025).

A análise das Tabela 4 e 5 evidencia que a adaptação do método resulta em valores de vazão máxima inferiores aos obtidos pelo método original nos diâmetros menores, os quais correspondem aos mais comumente utilizados. Esse comportamento reflete a maior rigorosidade adotada pela NBR 12218 (ABNT, 2017) para garantir condições hidráulicas adequadas nesses trechos. Além disso, observa-se que o incremento no coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams (de $C = 115$ para $C = 135$) eleva de forma significativa as vazões calculadas, reforçando a influência direta desse parâmetro no dimensionamento das tubulações.

Observa-se que o Modelo Computacional desenvolvido permite a utilização de mais de um coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams (C), o que possibilitaria a expansão da rede com tubos novos.

Diante dessas informações foi calculada a perda de carga de cada trecho, utilizando a Equação de Hazen-Williams (Equação 1), e acumulada da rede, sendo esta obtida pelo somatório das perdas individuais de cada trecho ao longo do caminho entre o reservatório e os pontos de consumo, respeitando o sentido de escoamento da água. As demais etapas realizadas para determinar a solução prévia da rede foram:

- a) Considerou-se zero como a cota piezométrica fictícia no ponto de alimentação. A partir disso, subtraem-se, conforme a direção e sentido do fluxo de água na rede, os valores correspondentes às perdas de carga dos trechos, calculadas com base nos menores diâmetros admissíveis. Os resultados (todos com valores negativos) correspondem às cotas piezométricas fictícias (CPf).
- b) Com os valores dos CPf calculados, subtraem-se as cotas piezométricas mínimas de projeto (PM) e foram obtidos os Excessos de Pressão fictícios (EPf).
- c) Os valores obtidos das EPf também são negativos, dessa forma, inverteu-se o sinal do maior valor em módulo de EPf calculado e foi obtida a cota piezométrica de alimentação da solução prévia (Z_0).
- d) Em seguida, foi somado o valor do EPf com Z_0 , obtendo o EP de cada trecho, conforme equação abaixo.

$$EP = EPf + Z_0 \quad (4)$$

- e) Foi adotado um preço unitário para cada diâmetro, o qual não corresponde ao preço de mercado atual. Os preços simbólicos utilizados foram admitidos apenas para satisfazer a exigência do cálculo do câmbio do MG.

- f) Por fim, na “Etapa 1.2”, foram feitos os cálculos da perda de carga para os próximos 5 diâmetros comercialmente disponíveis de cada trecho, para que com isso seja possível calcular os câmbios (Ca) através da Equação 5, o qual representa o aumento do custo pela variação do decréscimo da perda de carga ao ser alterado o diâmetro do respectivo trecho.

$$Ca = \frac{\Delta \text{Custo}}{\Delta hf} \quad (5)$$

Nas Figura 11 e 12 são apresentadas as interfaces das Etapas 1.1 e 1.2, respectivamente, no Modelo Computacional desenvolvido, aplicado a rede hipotética de 18 trechos, que será apresentada no item 3.2. Nesse exemplo, observa-se que a cota piezométrica de alimentação na solução prévia é de 210,93m, valor calculado conforme os diâmetros admissíveis mínimos para viabilidade hidráulica da rede. Com essa cota inicial calculada, um dos trechos da rede terá EP zero, nesse caso, trata-se do trecho 18. A artéria que contém esse trecho é, portanto, definida como a artéria com EP zero (Art_EP_0).

Essa solução inicial serve como ponto de partida para o processo iterativo da “Etapa 2”, que visa otimizar os diâmetros até atingir a cota meta definida para cada rede hipotética.

Figura 11 – Interface no Modelo Computacional da “Etapa 1.1”

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Trecho	Q (L/s)	L (m)	D ₀ (mm)	hf ₀ (m)	Σhf ₀ (m)	CP ₁ (m)	PM (m)	EP ₁ (m)	EP (m)	C _{unit} (umt/m)	J (m/m)	J máx = 10E-03
2	1	69,16	800	250	5,95	5,95	-5,95	192,10	-198,05	12,88	1791	7,44E-03	
3	2	24,24	310	200	1,32	7,27	-7,27	192,10	-199,37	11,56	1249	4,27E-03	
4	3	20,84	620	200	2,00	9,28	-9,28	190,80	-200,08	10,85	1249	3,23E-03	
5	4	18,23	189	150	1,44	10,71	-10,71	189,10	-199,81	11,12	918	7,60E-03	
6	5	15,23	730	150	3,98	14,69	-14,69	185,40	-200,09	10,84	918	5,45E-03	
7	6	44,93	175	200	1,74	7,69	-7,69	193,50	-201,19	9,74	1249	9,93E-03	
8	7	14,13	168	150	1,07	8,76	-8,76	192,30	-201,06	9,87	918	6,38E-03	
9	8	2,33	220	75	1,09	9,85	-9,85	193,70	-203,55	7,38	644	4,95E-03	
10	9	2,28	430	75	2,76	11,52	-11,52	189,90	-201,42	9,51	644	6,41E-03	
11	10	28,17	320	200	1,34	9,03	-9,03	193,20	-202,23	8,70	1249	4,19E-03	
12	11	23,41	330	200	1,32	10,35	-10,35	193,00	-203,35	7,58	1249	4,00E-03	
13	12	7,48	175	150	0,26	10,61	-10,61	193,50	-204,11	6,82	918	1,46E-03	
14	13	3,55	380	100	1,01	11,61	-11,61	197,00	-208,61	2,32	825	2,65E-03	
15	14	2,27	473	75	3,01	13,61	-13,61	188,40	-202,01	8,92	644	6,36E-03	
16	15	13,94	610	150	3,80	14,15	-14,15	191,70	-205,85	5,08	918	6,22E-03	
17	16	11,00	210	150	0,84	14,99	-14,99	191,20	-206,19	4,74	918	4,02E-03	
18	17	8,09	220	150	0,37	15,36	-15,36	190,80	-206,16	4,77	918	1,69E-03	
19	18	5,71	480	100	3,07	18,43	-18,43	192,50	-210,93	0,00	825	6,39E-03	
20													
21								Zo =	210,93				

Fonte: O Autor (2025).

Figura 12 – Parte da planilha no Modelo Computacional da “Etapa 1.2”

	A	B	C	D	E	F
25						Câmbio
26	Trecho	D (mm)	hf (m)	Δhf (m)	C_{unit} (umt/m)	Ca
27	1	250	5,95		1791	
28		300	2,45	3,50	2503	162.601
29		350	1,16	1,29	3370	536.290
30		400	0,60	0,55	5000	2.358.747
31		450	0,34	0,26	6870	5.679.246
32		500	0,20	0,14	8220	7.913.115
57	6	200	1,74		1249	
58		250	0,59	1,15	1791	82.373
59		300	0,24	0,34	2503	361.229
60		350	0,11	0,13	3370	1.191.404
61		400	0,06	0,05	5000	5.240.110
62		450	0,03	0,03	6870	12.616.816

Fonte: O Autor (2025).

3.1.4 Etapa 2

Com a solução prévia na “Etapa 1” considerada hidraulicamente possível, inicia-se a última etapa, que consiste em um processo iterativo, que visa igualar a cota atual do nível de água (NA) do reservatório à cota meta prevista.

Esta etapa consiste em reduzir gradualmente a cota piezométrica de alimentação até a cota meta definida como dado de entrada do projeto. No entanto, cada redução de energia deve ser compensada por uma diminuição da perda de carga da rede, através do aumento do diâmetro de um ou mais trechos, como pode ser observado nos fluxogramas abaixo (Figura 13 a 16).

Figura 13 – Parte 1 e 2 do Fluxograma da “Etapa 2”

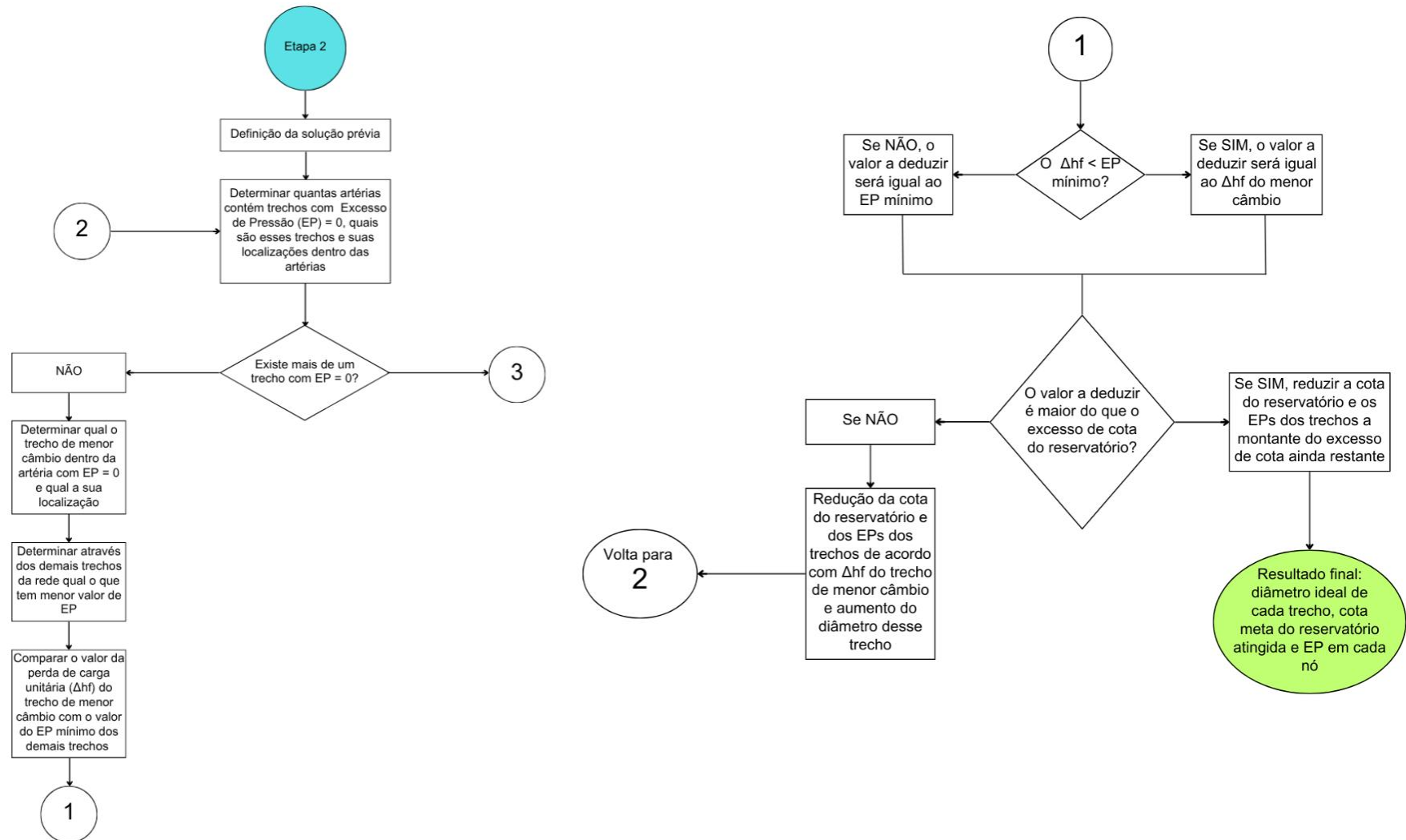
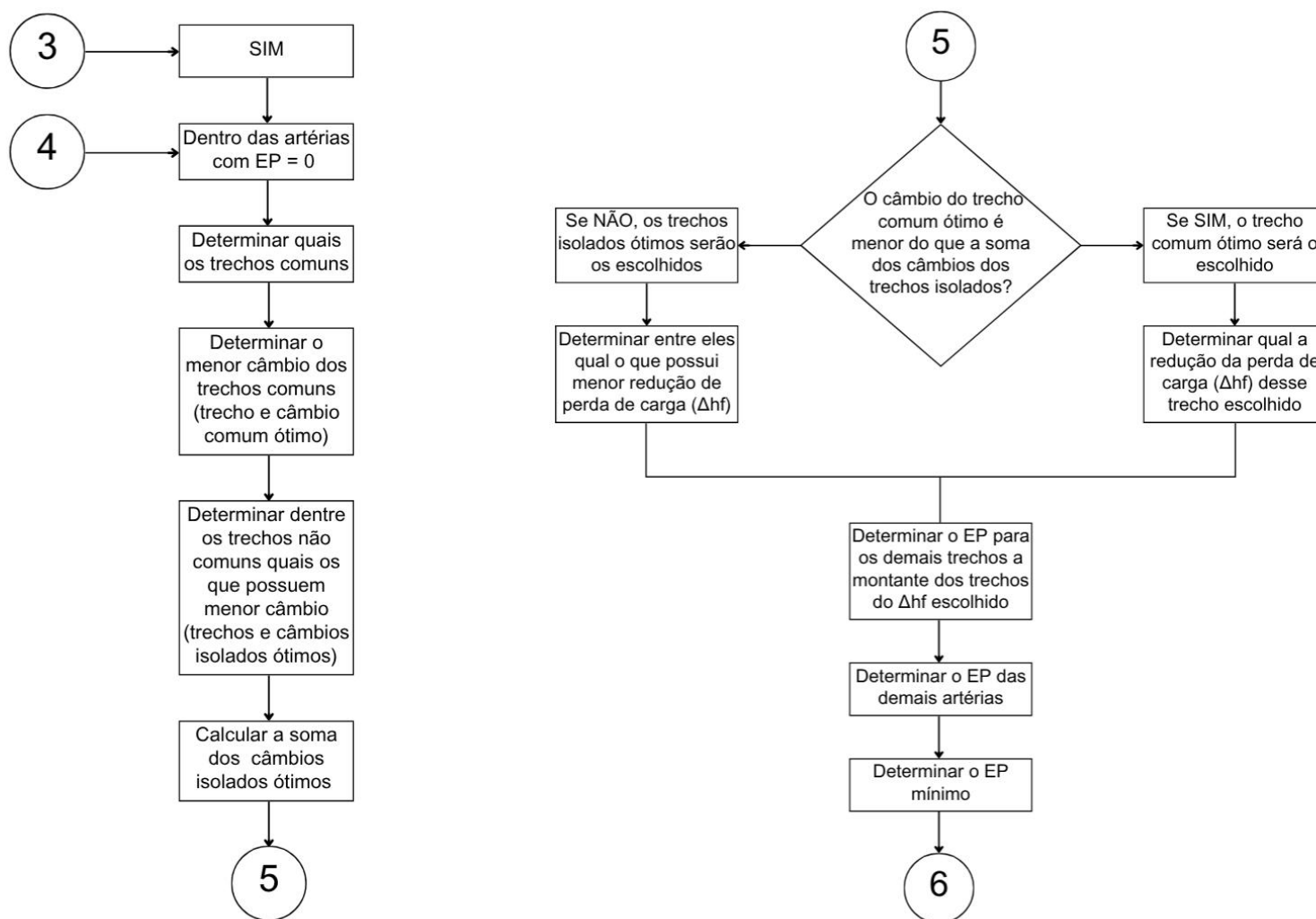
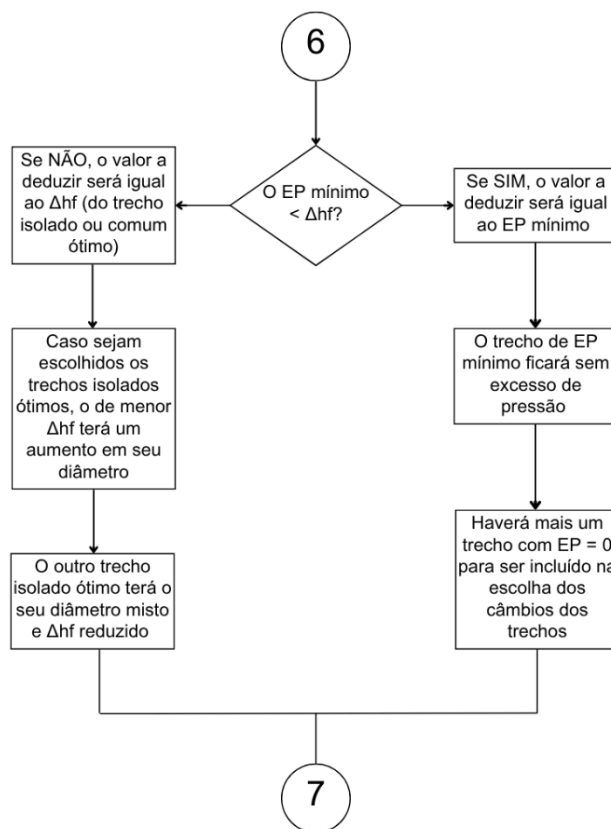


Figura 14 – Parte 3 e 4 do Fluxograma da “Etapa 2”



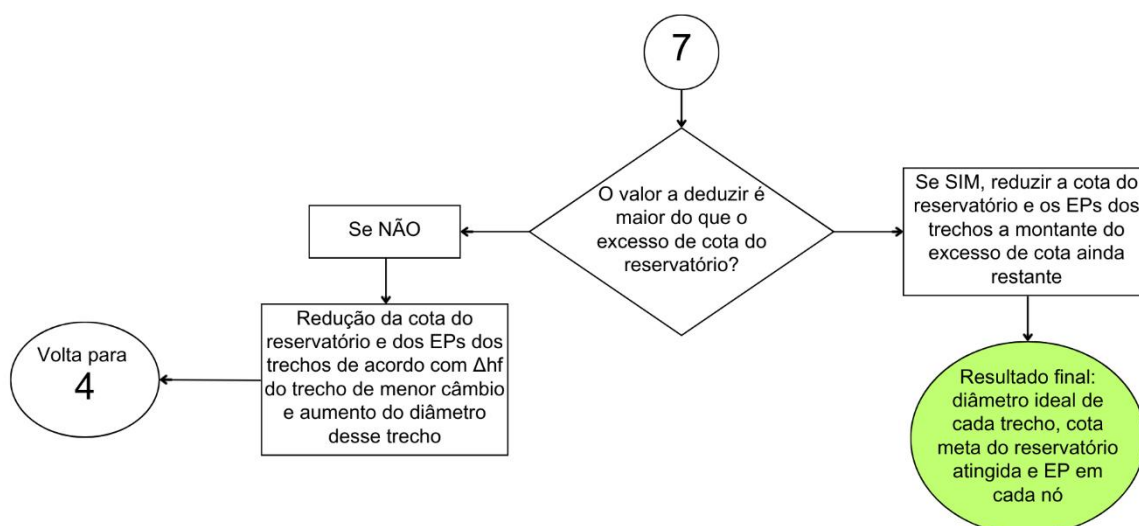
Fonte: O Autor (2025).

Figura 15 - Parte 5 do Fluxograma da “Etapa 2”



Fonte: O Autor (2025).

Figura 16 - Parte 6 do Fluxograma da “Etapa 2”



Fonte: O Autor (2025).

Para iniciar a “Etapa 2” do MGM, foram identificadas todas as artérias da rede que apresentam trechos com $EP = 0$, a partir da solução obtida na “Etapa 1”. Caso

exista apenas um trecho com EP igual a zero (o que geralmente ocorre), o algoritmo seleciona o trecho de menor câmbio, conforme a Equação 5 e calculados na “Etapa 1.2”, pertencente a essa Art_EP_0. Simultaneamente, é determinado o valor do EP mínimo entre os demais trechos da rede. A decisão sobre qual valor será utilizado para dedução da cota do reservatório, entre a redução de perda de carga (Δh_f) do trecho de câmbio ótimo ou EP mínimo, baseia-se na comparação entre esses dois valores escolhendo o menor valor (valor a deduzir).

Essa dedução é aplicada para todos os nós a montante, respeitando o limite de cota excedente da cota meta do reservatório. Após a dedução, o diâmetro do trecho de menor câmbio é aumentando ou o trecho terá diâmetro misto (trecho misto) se for selecionado o EP mínimo da rede como o valor a deduzir.

No caso de existirem múltiplas artérias com trechos com EP = 0, o algoritmo identifica os trechos comuns entre essas artérias, bem como os trechos isolados ótimos (os de menores Câmbios (Ca) de cada artéria). Em seguida, é realizado o cálculo do câmbio hidráulico ótimo entre os trechos comuns e, separadamente, entre os trechos não comuns. O algoritmo então compara as duas alternativas: se o câmbio ótimo comum for inferior à soma dos câmbios ótimos isolados, opta-se por esse trecho para a próxima modificação; caso contrário, selecionam-se os trechos isolados com os menores câmbios.

A seguir, determina-se o valor a deduzir da mesma forma da iteração com apenas um trecho com EP igual a zero.

A dedução da cota do reservatório e a atualização dos diâmetros ocorrem da mesma forma descrita anteriormente, respeitando o excesso de cota disponível e atualizando os parâmetros hidráulicos dos trechos e nós envolvidos. O processo iterativo finaliza quando atingi-se a cota meta do nível de água do reservatório definida previamente.

3.2 APRESENTAÇÃO DAS 3 REDES RAMIFICADAS HIPOTÉTICAS

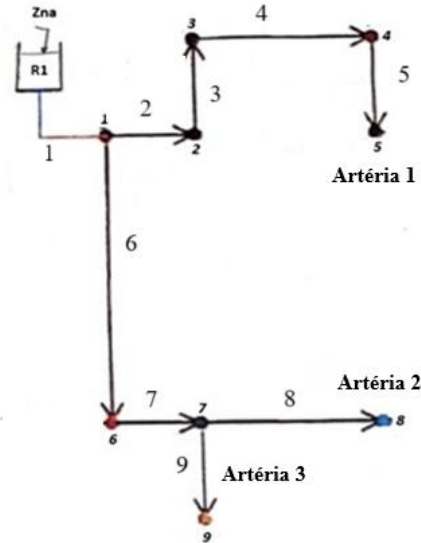
Para validar os resultados do Modelo Computacional desenvolvido em planilha eletrônica, foram realizados testes em três RDAs hipotéticas, compostas por 9, 13 e 18 trechos, respectivamente. Cada rede foi modelada com diferentes configurações de artérias, pontos de consumo e cota meta.

Durante as simulações, foi realizada uma análise criteriosa conforme os requisitos da norma técnica NBR 12218 (ABNT, 2017), especialmente no que diz respeito ao atendimento à pressão mínima admissível de 10 m.c.a nos pontos de consumo. Essa verificação foi essencial para assegurar que os resultados gerados pelo Modelo estivessem em conformidade com os padrões técnicos atuais de projeto de redes de abastecimento de água.

3.2.1 1ª Rede Ramificada: com 9 trechos

Inicialmente, o Modelo foi aplicado a uma rede ramificada com 1 reservatório e 9 trechos, os quais foram distribuídos em 3 artérias, conforme ilustrado na Figura 17. Essa primeira simulação serviu como base para a avaliação inicial da consistência hidráulica e da capacidade do algoritmo desenvolvido em selecionar os diâmetros ótimos de forma automatizada. Além disso, na Figura 18 são apresentados os dados de entrada adotados para essa rede, antes da aplicação do Modelo.

Figura 17 – 1ª Rede Ramificada: 9 trechos



Fonte: O Autor (2025).

Figura 18 – Informações da rede hipotética com 9 Trechos

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1				DADOS GERAIS						Darcy-Weisbach	Numero de Artérias =	3				
2	C percapita =	175	L/dia	$\epsilon =$	$v =$	C HW 1 =	115	Fórmula da Perda =	Hazen-Williams	Hazen-Williams	Numero de Trechos =	9				
3	K1 =	1,32		2,00E-04	1,01E-06	C HW 2 =	135	Fórmula de f =			Cota Nível Água Poço de Sucção (m) =	193				
4	K2 =	1,78						Num de Coeficientes =	2	Swamee-Jain	Altura Manométrica FIXA de Bombeamento (m) =	1				
5										Barr	Numero de Trechos das Artérias					
6										Função do delta	Artéria 1 =	5				
7											Artéria 2 =	4				
8											Artéria 3 =	4				
9										CoefDeRug	Numero dos Trechos das Artérias =	1	2	3	4	5
10	Trecho	Comprimento (m)	População Futura	Demanda do Trecho (L/s)	Vazão Acumulada (L/s)	Cota do Terreno (m)	Pressão Requerida (m.c.a)	Cota Piezométrica Mínima (m)	Coeficiente de Rugosidade (C)		Artéria 1 =	1	2	3	4	5
11	1	800	0			180,1	12		135		Artéria 2 =	1	6	7	8	
12	2	310	713			180,1	12		115		Artéria 3 =	1	6	7	9	
13	3	620	550			178,8	12		115							
14	4	189	630			177,1	12		135							
15	5	730	3200			174,8	15		135							
16	6	175	550			181,5	12		135							
17	7	168	2000			180,3	12		115							
18	8	220	490			178,7	15		135							
19	9	430	480			177,9	12		115							

Fonte: O Autor (2025).

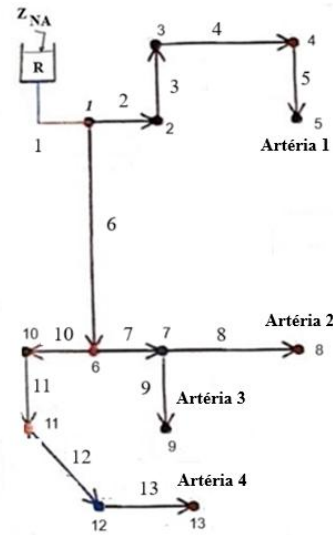
No canto direito da planilha na Figura 18 é possível observar a configuração das artérias e a distribuição dos trechos entre elas. A Arteria 1 é composta por 5 trechos e as Arterias 2 e 3 por 4 trechos cada uma, havendo trechos em comuns entre elas. Nesse exemplo, a cota meta foi de 194,00 m, sendo referente ao somatório da cota do fundo do reservatório e a altura mínima de água na operação do sistema.

3.2.2 2ª Rede Ramificada: com 13 trechos

Em seguida, o Modelo Computacional foi aplicado em uma segunda configuração hipotética, composta por uma rede ramificada com 13 trechos, distribuídos em 4 artérias distintas, conforme Figura 19. Essa nova simulação teve como objetivo avaliar o desempenho em uma rede com maior número de combinações possíveis de trechos e artérias, exigindo um processo de otimização mais abrangente.

Na Figura 20 são apresentados os dados de entrada utilizados para essa rede, incluindo as características geométricas e hidráulicas de cada trechos, bem como os parâmetros gerais da RDA. Também é apresentada a distribuição dos trechos entre as artérias, o que permite compreender a lógica estrutural da rede simulada. Nessa situação a cota meta do processo iterativo foi arbitrada em 198,00 m.

Figura 19 – 2ª Rede Ramificada: 13 trechos



Fonte: O Autor (2025).

Figura 20 – Informações da rede hipotética com 13 Trechos

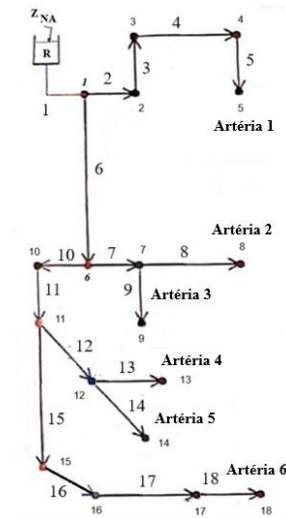
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	DADOS GERAIS										Darcy-Weisbach	Número de Artérias =	4				
2	C per capita =	175	L/dia	$\epsilon =$	$1,01E-06$	C HW 1 =	115	Fórmula da Perda =	Hazen-Williams	Hazen-Williams	Número de Trechos =	13					
3	K1 =	1,32				C HW 2 =	135	Fórmula de f =			Cota Nível Água Poço de Sucção (m) =	197					
4	K2 =	1,78				Num de Coeficientes =	2	Num de Coeficientes =	2	Swamee-Jain	Altura Manométrica FIXA de Bombeamento (m) =	1					
5										Barr	Número de Trechos das Artérias						
6										Função do delta	Artéria 1 =	5					
7											Artéria 2 =	4					
8											Artéria 3 =	4					
9											Artéria 4 =	6					
10											Número dos Trechos das Artérias =	1	2	3	4	5	6
11											Artéria 1 =	1	2	3	4	5	
12											Artéria 2 =	1	6	7	8		
13											Artéria 3 =	1	6	7	9		
14											Artéria 4 =	1	6	10	11	12	13
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	

Fonte: O Autor (2025).

3.2.3 3ª Rede Ramificada: com 18 trechos

Por fim, o Modelo Computacional foi aplicado a uma terceira rede hipotética, mais complexa frente as demais, composta por 18 trechos distribuídos em 6 artérias, conforme Figura 21, cuja cota meta foi de 200,00 m. Essa simulação teve como objetivo demonstrar que o método e o Modelo são capazes de ser aplicados em redes com mais trechos, nós e artérias, proporcionando maiores combinações na escolha dos trechos de câmbios ótimos.

Figura 21 – 3ª Rede Ramificada: 18 trechos



Fonte: O Autor (2025).

Figura 22 – Informações da rede hipotética com 18 Trechos

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
1	DADOS GERAIS										Darcy-Weisbach	Numero de Artérias =	6	Ler Dados						
2	C percapita =	175	L/dia	$\delta =$	$V =$	C HW 1 =	115	Fórmula da Perda =	Hazen-Williams	Hazen-Williams	Numero de Trechos =	18								
3	K1 =	1,32		2,00E-04	1,01E-06	C HW 2 =	135	Fórmula de f =			Cota Nível Água Poço de Sucção (m) =	199								
4	K2 =	1,78						Num de Coeficientes =	2	Swamee-Jain	Altura Manométrica FGA de Bombeamento (m) =	1								
5										Barr	Numero de Trechos das Artérias		Ler Dados							
6										Função do delta	Artéria 1 =	5								
7											Artéria 2 =	4								
8											Artéria 3 =	4								
9											Artéria 4 =	6	Ler Dados							
10											Artéria 5 =	6								
11											Artéria 6 =	8								
12											Numero dos Trechos das Artérias =									
13											Artéria 1 =	1	2	3	4	5	6	7	8	
14											Artéria 2 =	1	6	7	8					
15											Artéria 3 =	1	6	7	9					
16											Artéria 4 =	1	6	8	11	12	13			
17											Artéria 5 =	1	6	10	11	12	14			
18											Artéria 6 =	1	6	10	11	15	16	17	18	
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				
25																				
26																				

Fonte: O Autor (2025).

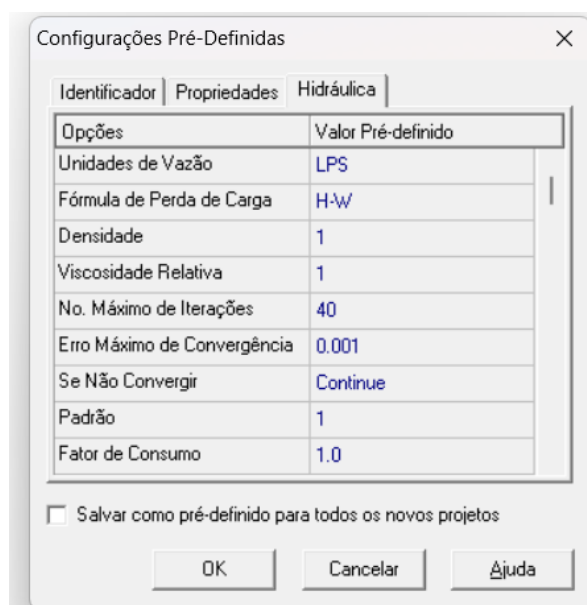
3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS NO EPANET

Para validar os resultados obtidos por meio do Modelo Computacional do MGM, além das comparações dos resultados obtidos do Modelo com aqueles obtidos sem linguagem de programação, foi realizada uma simulação no EPANET (versão 2.0), aplicada à RDA hipotética composta por 9 trechos.

O EPANET é um software desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA) (Rossman, 2000), a versão 2.0 (brasileira) foi elaborada pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em parceria com o EPA. Utilizado para a simulação hidráulica em redes de distribuição pressurizadas, ele permite modelar o comportamento da rede, fornecendo resultados como pressões nos nós, vazões nos trechos, perdas de carga e níveis de reservatórios.

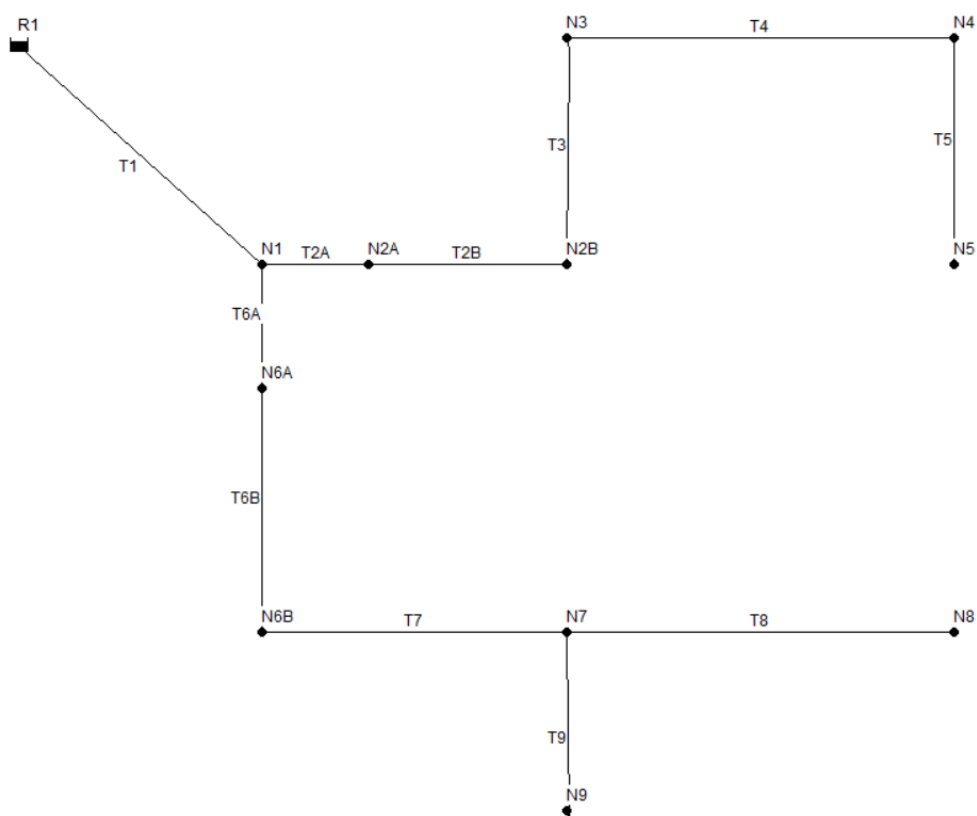
Para este estudo, primeiramente foi definida a equação da perda de carga (Hazen-Williams) e a unidade de trabalho em litros por segundo (LPS), conforme Figura 23. Em seguida, foi realizada a modelagem gráfica da rede, com a identificação dos trechos (prefixo T) e dos nós (prefixo N), conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 23 – Configurações definidas no EPANET



Fonte: O Autor (2025).

Figura 24 – Esquema da RDA hipotética de 9 trechos no EPANET



Fonte: O Autor (2025).

Em seguida, foram inseridas as informações correspondentes aos nós da rede no EPANET. O campo “Cota” foi preenchido com a cota de jusante de cada nó, enquanto o campo “Consumo Base” recebeu a demanda do trecho, calculada por meio da Equação 3, conforme descrito na etapa de “Leitura dos Dados de Entrada e Cálculos Hidráulicos Iniciais”. Os trechos mistos foram divididos com o final A (diâmetro superior) e B (diâmetro inferior), como apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Informações dos nós da RDA no EPANET

Tabela da Rede - Nós		
Identificador do Nó	Cota m	Consumo-Base LPS
Nó N1	180.1	0
Nó N2A	180.1	0.73
Nó N2B	180.1	2.66
Nó N3	178.8	2.62
Nó N4	177.1	3
Nó N5	174.8	15.23
Nó N6A	181.5	0.82
Nó N6B	181.5	1.79
Nó N7	180.3	9.52
Nó N8	178.7	2.33
Nó N9	177.9	2.28
RNF R1	194	#N/A

Fonte: O Autor (2025).

Para os trechos da rede, foram inseridas as seguintes informações no EPANET: o “Comprimento”, os “Diâmetros” obtidos na última iteração da “Etapa 2” do Modelo Computacional, e os respectivos coeficientes de rugosidade (“Rugosidade”), como pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Informações dos trechos da RDA no EPANET

Tabela da Rede - Trechos			
Identificador do Trecho	Comprimento m	Diâmetro mm	Rugosidade
Tubulação T1	800	400	135
Tubulação T2A	67	200	115
Tubulação T2B	243	250	115
Tubulação T3	620	200	115
Tubulação T4	189	200	135
Tubulação T5	730	200	135
Tubulação T6A	55	300	135
Tubulação T6B	120	350	135
Tubulação T7	168	300	115
Tubulação T8	220	200	135
Tubulação T9	430	75	115

Fonte: O Autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos pela aplicação do Método Granados Modificado para as três redes hipotéticas consideradas no estudo, com o objetivo de verificar a eficácia do Modelo Computacional proposto ao ser comparado com os resultados obtidos manualmente, além disso validar os resultados obtidos da RDA de 9 trechos com o EPANET.

4.1 DADOS DE ENTRADA

Conforme descrito anteriormente, o objetivo desta etapa inicial foi realizar a leitura dos dados inseridos manualmente na planilha e efetuar os cálculos da demanda dos trechos (com base na Equação 3) das vazões acumuladas e cotas piezométricas mínimas de projeto.

Após a execução da sub-rotina correspondente no *Visual Basic for Applications* (VBA), os resultados obtidos na leitura dos dados para a rede hipotética com 9 trechos são apresentados na Figura 27 nas colunas de cor branca.

Figura 27 – Resultados obtidos nos “Dados de Entrada” para a rede com 9 trechos

Trecho	Comprimento (m)	População Futura	Demanda do Trecho (L/s)	Vazão Acumulada (L/s)	Cota do Terreno (m)	Pressão Requerida (m.c.a)	Cota Piezométrica Mínima (m)	Coefficiente de Rugosidade (C)
1	800	0	-	40,99	180,1	12	192,1	135
2	310	713	3,39	24,24	180,1	12	192,1	115
3	620	550	2,62	20,84	178,8	12	190,8	115
4	189	630	3,00	18,23	177,1	12	189,1	135
5	730	3200	15,23	15,23	174,8	15	189,8	135
6	175	550	2,62	16,75	181,5	12	193,5	135
7	168	2000	9,52	14,13	180,3	12	192,3	115
8	220	490	2,33	2,33	178,7	15	193,7	135
9	430	480	2,28	2,28	177,9	12	189,9	115

Fonte: O Autor (2025).

Destaca-se na Figura 27 o valor máximo das vazões acumuladas, igual a 40,99 L/s, no trecho 1, que conecta diretamente o reservatório ao primeiro nó da rede. Esse trecho é comum a todas as artérias, o que justifica a concentração da maior vazão. Observa-se também que os trechos terminais de cada artéria – trechos 5, 8 e 9, respectivamente – apresentam valores para a vazão acumulada iguais às suas respectivas demandas, uma vez que não têm demandas a jusante.

Ressalta-se ainda que a cota piezométrica mínima de cada trecho foi obtida pela soma da cota do terreno (cota de jusante de cada trecho) com a pressão requerida, conforme estipulado pela NBR 12218 (ABNT, 2017).

Comparando as duas primeiras redes hipotéticas, há um aumento do número de trechos, nós e artérias, para 13, 13 e 4, respectivamente. Na Figura 28 são apresentados os resultados da segunda rede hipotética.

Figura 28 – Resultados obtidos nos “Dados de Entrada” para a rede com 13 trechos

Trecho	Comprimento (m)	População Futura	Demanda do Trecho (L/s)	Vazão Acumulada (L/s)	Cota do Terreno (m)	Pressão Requerida (m.c.a)	Cota Piezométrica Mínima (m)	Coefficiente de Rugosidade (C)
1	800	0	-	52,95	180,1	12	192,1	135
2	310	713	3,39	24,24	180,1	12	192,1	115
3	620	550	2,62	20,84	178,8	12	190,8	115
4	189	630	3,00	18,23	177,1	12	189,1	135
5	730	3200	15,23	15,23	173,4	12	185,4	135
6	175	550	2,62	28,71	181,5	12	193,5	135
7	168	2000	9,52	14,13	180,3	12	192,3	115
8	220	490	2,33	2,33	180,6	15	195,6	135
9	430	480	2,28	2,28	177,9	12	189,9	115
10	320	1000	4,76	11,96	181,2	12	193,2	135
11	330	420	2,00	7,20	181,0	12	193,0	115
12	175	348	1,66	5,20	181,5	12	193,5	135
13	380	745	3,55	3,55	182,0	15	197,0	135

Fonte: O Autor (2025).

Observa-se na Figura 28 que, nesta rede há um trecho terminal adicional (trecho 13). Nota-se também que, devido ao aumento no número de trechos em relação à rede anterior, a vazão acumulada máxima da rede é maior, atingindo 52,95 L/s.

A terceira simulação dessa etapa envolveu uma rede com 18 trechos e 6 artérias, representando a maior estrutura testada neste estudo. Esse cenário permitiu avaliar a escalabilidade do Modelo Computacional, bem como sua capacidade de lidar com um volume maior de dados de entrada com precisão. Na Figura 29 é apresentada os parâmetros hidráulicos e geométricos adotados, e observa-se que o Modelo manteve consistência nos cálculos. Destaca-se, ainda, a vazão acumulada máxima saindo do reservatório aumentou para 69,16 L/s.

Figura 29 – Resultados obtidos nos “Dados de Entrada” para a rede com 18 trechos

Trecho	Comprimento (m)	População Futura	Demanda do Trecho (L/s)	Vazão Acumulada (L/s)	Cota do Terreno (m)	Pressão Requerida (m.c.a)	Cota Piezométrica Mínima (m)	Coefficiente de Rugosidade (C)
1	800	0	-	69,16	180,1	12	192,1	135
2	310	713	3,39	24,24	180,1	12	192,1	115
3	620	550	2,62	20,84	178,8	12	190,8	115
4	189	630	3,00	18,23	177,1	12	189,1	135
5	730	3200	15,23	15,23	173,4	12	185,4	135
6	175	550	2,62	44,93	181,5	12	193,5	135
7	168	2000	9,52	14,13	180,3	12	192,3	115
8	220	490	2,33	2,33	178,7	15	193,7	135
9	430	480	2,28	2,28	177,9	12	189,9	115
10	320	1000	4,76	28,17	181,2	12	193,2	135
11	330	420	2,00	23,41	181,0	12	193,0	115
12	175	348	1,66	7,48	181,5	12	193,5	135
13	380	745	3,55	3,55	182,0	15	197,0	135
14	473	478	2,27	2,27	176,4	12	188,4	115
15	610	617	2,94	13,94	179,7	12	191,7	115
16	210	612	2,91	11,00	179,2	12	191,2	115
17	220	500	2,38	8,09	175,8	15	190,8	135
18	480	1200	5,71	5,71	177,5	15	192,5	135

Fonte: O Autor (2025).

4.2 ETAPA 1

Com a execução da sub-rotina na aba “Dados de Entrada”, foi iniciado o algoritmo destinado à realização dos cálculos correspondentes à “Etapa 1”, conforme especificado no item 3.1.3.

4.2.1 Etapa 1.1

Para a “Etapa 1.1”, foram realizadas as simulações das três configurações das redes hipotéticas. A primeira, composta por 9 trechos, teve seus resultados consolidados na Figura 30. Os diâmetros utilizados seguiram as recomendações da NBR 12218 (ABNT, 2017), que estabelece a seleção com base na perda de carga unitária máxima ($J_{\text{máxima}} = 10 \text{ m/km}$) e nas vazões acumuladas, conforme apresentado nas Tabela 2 e 3 e na Figura 10.

Ressalta-se que, conforme estabelecido na metodologia, a cota piezométrica de alimentação na solução prévia corresponde ao trecho que apresenta o maior módulo de Excesso de Pressão fictício (EPf). No caso em análise, trata-se do trecho 5, que é o terminal da artéria 1. A cota piezométrica inicial do reservatório nesse exemplo foi de 205,24 m. Dessa forma, como esperado, o Excesso de Pressão (EP) nesse trecho é nulo, informação essencial para a condução do processo iterativo na “Etapa 2”.

Figura 30 – Resultados obtidos da “Etapa 1.1” para a rede com 9 trechos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Trecho	Q (L/s)	L (m)	D ₀ (mm)	h _{f0} (m)	Σh _{f0} (m)	CP _f (m)	PM (m)	EP _f (m)	EP (m)	C _{unif} (umt/m)	J (m/m)	J máx = 10E-03
2	1	40,99	800	200	6,70	6,70	-6,70	192,10	-198,80	6,44	1249	8,38E-03	
3	2	24,24	310	200	1,32	8,03	-8,03	192,10	-200,13	5,11	1249	4,27E-03	
4	3	20,84	620	200	2,00	10,03	-10,03	190,80	-200,83	4,41	1249	3,23E-03	
5	4	18,23	189	150	1,44	11,46	-11,46	189,10	-200,56	4,68	918	7,60E-03	
6	5	15,23	730	150	3,98	15,44	-15,44	189,80	-205,24	0,00	918	5,45E-03	
7	6	16,75	175	150	1,14	7,84	-7,84	193,50	-201,34	3,90	918	6,50E-03	
8	7	14,13	168	150	1,07	8,91	-8,91	192,30	-201,21	4,03	918	6,38E-03	
9	8	2,33	220	75	1,09	10,00	-10,00	193,70	-203,70	1,54	644	4,95E-03	
10	9	2,28	430	75	2,76	11,67	-11,67	189,90	-201,57	3,67	644	6,41E-03	
11													
12								Zo =	205,24				

Fonte: O Autor (2025).

Observa-se que, nessa etapa, foram verificadas as condições da perda de carga unitária máxima (coluna L da Figura 30), uma vez que a solução prévia representa a situação mais crítica para o atendimento desse limite de 10 m/km.

Na segunda simulação dessa etapa, foi considerada a rede com 13 trechos, cujos resultados estão apresentados na Figura 31. Tal como no exemplo anterior, a soma acumulada das perdas de carga ($\Sigma\Delta h_{f0}$) permitiu calcular a cota piezométrica fictícia (CPf) e, conseqüentemente, os EPf de cada trecho. Ressalta-se que o valor da cota piezométrica de alimentação obtido foi de 205,06 m, neste caso ocorreu no trecho 13, sendo este terminal da artéria 4.

Conforme descrito na metodologia, o valor de EPf de cada trecho é obtido a partir da subtração entre a CPf e a cota piezométrica mínima de projeto (PM). A análise desse parâmetro permite a definição da cota inicial do reservatório para a solução prévia, a qual servirá de base para os ajustes hidráulicos subsequentes realizados na “Etapa 2”.

Figura 31 – Resultados obtidos na “Etapa 1.1” da rede com 13 trechos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Trecho	Q (L/s)	L (m)	D ₀ (mm)	h _{f0} (m)	Σh _{f0} (m)	CP _f (m)	PM (m)	EP _f (m)	EP (m)	C _{unif} (umt/m)	J (m/m)	J máx = 10E-03
2	1	52,95	800	250	3,63	3,63	-3,63	192,10	-195,73	9,33	1791	4,54E-03	
3	2	24,24	310	200	1,32	4,95	-4,95	192,10	-197,05	8,00	1249	4,27E-03	
4	3	20,84	620	200	2,00	6,95	-6,95	190,80	-197,75	7,30	1249	3,23E-03	
5	4	18,23	189	150	1,44	8,39	-8,39	189,10	-197,49	7,57	918	7,60E-03	
6	5	15,23	730	150	3,98	12,37	-12,37	185,40	-197,77	7,29	918	5,45E-03	
7	6	28,71	175	200	0,76	4,39	-4,39	193,50	-197,89	7,17	1249	4,34E-03	
8	7	14,13	168	150	1,07	5,46	-5,46	192,30	-197,76	7,29	918	6,38E-03	
9	8	2,33	220	75	1,09	6,55	-6,55	195,60	-202,15	2,91	644	4,95E-03	
10	9	2,28	430	75	2,76	8,22	-8,22	189,90	-198,12	6,94	644	6,41E-03	
11	10	11,96	320	150	1,11	5,51	-5,51	193,20	-198,71	6,35	918	3,48E-03	
12	11	7,20	330	150	0,60	6,11	-6,11	193,00	-199,11	5,95	918	1,83E-03	
13	12	5,20	175	100	0,94	7,05	-7,05	193,50	-200,55	4,51	825	5,38E-03	
14	13	3,55	380	100	1,01	8,06	-8,06	197,00	-205,06	0,00	825	2,65E-03	
15													
16								Zo =	205,06				

Fonte: O Autor (2025).

A última simulação da “Etapa 1.1” foi realizada para a rede com 18 trechos, representando a configuração mais extensa testada neste estudo. Os resultados estão

sintetizados na Figura 32, e seguem a mesma lógica aplicada nas simulações anteriores.

Neste cenário, o maior valor (em módulo) de EPf foi identificado no trecho 18, sendo este terminal da artéria 6 e com maior acúmulo de perda de carga da rede (18,43 m). Assim, a cota piezométrica inicial de alimentação adotada nessa solução prévia foi de 210,93 m, garantindo que o EP nesse trecho fosse igual a zero, conforme esperado.

Figura 32 – Resultados obtidos na “Etapa 1.1” da rede com 18 trechos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Trecho	Q (L/s)	L (m)	D ₀ (mm)	hf ₀ (m)	Σhf ₀ (m)	CP _f (m)	PM (m)	EP _f (m)	EP (m)	C _{unit} (umt/m)	J (m/m)	J máx = 10E-03
1	1	69,16	800	250	5,95	5,95	-5,95	192,10	-198,05	12,88	1791	7,44E-03	
2	2	24,24	310	200	1,32	7,27	-7,27	192,10	-199,37	11,56	1249	4,27E-03	
3	3	20,84	620	200	2,00	9,28	-9,28	190,80	-200,08	10,85	1249	3,23E-03	
4	4	18,23	189	150	1,44	10,71	-10,71	189,10	-199,81	11,12	918	7,60E-03	
5	5	15,23	730	150	3,98	14,69	-14,69	185,40	-200,09	10,84	918	5,45E-03	
6	6	44,93	175	200	1,74	7,69	-7,69	193,50	-201,19	9,74	1249	9,93E-03	
7	7	14,13	168	150	1,07	8,76	-8,76	192,30	-201,06	9,87	918	6,38E-03	
8	8	2,33	220	75	1,09	9,85	-9,85	193,70	-203,55	7,38	644	4,95E-03	
9	9	2,28	430	75	2,76	11,52	-11,52	189,90	-201,42	9,51	644	6,41E-03	
10	10	28,17	320	200	1,34	9,03	-9,03	193,20	-202,23	8,70	1249	4,19E-03	
11	11	23,41	330	200	1,32	10,35	-10,35	193,00	-203,35	7,58	1249	4,00E-03	
12	12	7,48	175	150	0,26	10,61	-10,61	193,50	-204,11	6,82	918	1,46E-03	
13	13	3,55	380	100	1,01	11,61	-11,61	197,00	-208,61	2,32	825	2,65E-03	
14	14	2,27	473	75	3,01	13,61	-13,61	188,40	-202,01	8,92	644	6,36E-03	
15	15	13,94	610	150	3,80	14,15	-14,15	191,70	-205,85	5,08	918	6,22E-03	
16	16	11,00	210	150	0,84	14,99	-14,99	191,20	-206,19	4,74	918	4,02E-03	
17	17	8,09	220	150	0,37	15,36	-15,36	190,80	-206,16	4,77	918	1,69E-03	
18	18	5,71	480	100	3,07	18,43	-18,43	192,50	-210,93	0,00	825	6,39E-03	
19													
20													
21													
								Zo =	210,93				

Fonte: O Autor (2025).

4.2.2 Etapa 1.2

A “Etapa 1.2” consistiu na análise técnica e econômica das alternativas dos diâmetros para cada trecho das redes apresentadas, com base nos parâmetros hidráulicos e nos custos associados às tubulações.

Para cada trecho das redes, foram consideradas diferentes opções de diâmetro com o cálculo correspondendo a:

- hf (m) (coluna C): perda de carga total associada à opção corresponde de diâmetro, conforme a equação de Hazen-Williams (Equação 3).
- Δhf (m) (coluna D): representa a variação da perda de carga ao ser alterado o diâmetro atual para o imediatamente superior.
- C_{unit} (umt/m) (coluna E): custo unitário referente ao diâmetro da tubulação, baseado na tabela de preços adotada nesse trabalho que não corresponde ao valor de mercado real necessariamente.

- Ca (coluna F): representa a relação custo-benefício de se alterar o diâmetro atual para o imediatamente superior (Gradiente de Câmbio – GC), conforme apresentado na Equação 5.

Cada trecho foi, portanto, avaliado para 6 diâmetros comerciais, e os resultados foram utilizados para subsidiar a escolha do diâmetro de acordo com o processo iterativo na próxima etapa do método, de acordo com o Δh_f e o Câmbio (Ca).

Com base nos resultados obtidos da “Etapa 1.2” da rede com 9 trechos, conforme ilustrado na Figura 33, foi possível observar padrões consistentes entre os diferentes diâmetros avaliados e seus impactos hidráulicos e econômicos em cada trecho da rede. Verificou-se que, conforme esperado, os menores diâmetros resultam em maiores perdas de carga, embora apresentem custos unitários mais baixos. Por outro lado, diâmetros maiores reduzem significativamente a perda de carga, no entanto, implicam em elevação substancial do Ca.

Figura 33 – Resultados obtidos na “Etapa 1.2” dos trechos 1 a 6 da rede com 9 trechos

	A	B	C	D	E	F
	Trecho	D (mm)	hf (m)	Δh_f (m)	C_{unit} (umt/m)	Câmbio
1		200	6,70		1249	
		250	2,26	4,44	1791	97.599
		300	0,93	1,33	2503	428.001
		350	0,44	0,49	3370	1.411.631
		400	0,23	0,21	5000	6.208.731
		450	0,13	0,10	6870	14.949.001
2		200	1,32		1249	
		250	0,45	0,88	1791	191.758
		300	0,18	0,26	2503	840.917
		350	0,09	0,10	3370	2.773.507
		400	0,05	0,04	5000	12.198.621
		450	0,03	0,02	6870	29.371.099
3		200	2,00		1249	
		250	0,67	1,33	1791	253.471
		300	0,28	0,40	2503	1.111.545
		350	0,13	0,15	3370	3.666.093
		400	0,07	0,06	5000	16.124.450
		450	0,04	0,03	6870	38.823.474
4		150	1,44		918	
		200	0,35	1,08	1249	57.819
		250	0,12	0,23	1791	437.083
		300	0,05	0,07	2503	1.916.739
		350	0,02	0,03	3370	6.321.780
		400	0,01	0,01	5000	27.804.865
5		150	3,98		918	
		200	0,98	3,00	1249	80.623
		250	0,33	0,65	1791	609.473
		300	0,14	0,19	2503	2.672.719
		350	0,06	0,07	3370	8.815.148
		400	0,03	0,03	5000	38.771.357
6		150	1,14		918	
		200	0,28	0,86	1249	67.590
		250	0,09	0,19	1791	510.949
		300	0,04	0,06	2503	2.240.664
		350	0,02	0,02	3370	7.390.148
		400	0,01	0,01	5000	32.503.833

Fonte: O Autor (2025).

Para as duas outras redes hipotéticas, a sub-rotina foi executada seguindo a mesma lógica aplicada na rede de 9 trechos, resultando em parâmetros importantes para o processo iterativo a ser executado na etapa seguinte. Nas Figura 34 e 35 destacam-se os resultados referentes aos trechos 1 e 6 das duas RDAs.

Figura 34 – Resultados obtidos na “Etapa 1.2” dos trechos 1 e 6 da rede com 13 trechos

	A	B	C	D	E	F
19						
20						Câmbio
21	Trecho	D (mm)	hf (m)	Δhf (m)	C_{unit} (umt/m)	Ca
22	1	250	3,63		1791	
23		300	1,49	2,14	2503	266.534
24		350	0,71	0,79	3370	879.083
25		400	0,37	0,34	5000	3.866.440
26		450	0,21	0,16	6870	9.309.378
27		500	0,12	0,08	8220	12.971.119
52	6	200	0,76		1249	
53		250	0,26	0,50	1791	188.580
54		300	0,11	0,15	2503	826.978
55		350	0,05	0,06	3370	2.727.535
56		400	0,03	0,02	5000	11.996.425
57		450	0,01	0,01	6870	28.884.264

Fonte: O Autor (2025).

Figura 35 – Resultados obtidos na “Etapa 1.2” dos trechos 1 e 6 da rede com 18 trechos

	A	B	C	D	E	F
25						Câmbio
26	Trecho	D (mm)	hf (m)	Δhf (m)	C_{unit} (umt/m)	Ca
27	1	250	5,95		1791	
28		300	2,45	3,50	2503	162.601
29		350	1,16	1,29	3370	536.290
30		400	0,60	0,55	5000	2.358.747
31		450	0,34	0,26	6870	5.679.246
32		500	0,20	0,14	8220	7.913.115
57	6	200	1,74		1249	
58		250	0,59	1,15	1791	82.373
59		300	0,24	0,34	2503	361.229
60		350	0,11	0,13	3370	1.191.404
61		400	0,06	0,05	5000	5.240.110
62		450	0,03	0,03	6870	12.616.816

Fonte: O Autor (2025).

4.3 ETAPA 2

Com a “Leitura dos Dados de Entrada e Cálculos Hidráulicos Iniciais” e execução da sub-rotina correspondente à “Etapa 1”, teve início a etapa final do processo – considerada o núcleo do MGM. A solução prévia obtida para cada configuração da rede serviu como ponto de partida para a aplicação do processo iterativo, cujo objetivo é ajustar os diâmetros até que a cota piezométrica do reservatório atinja a cota meta.

Além disso, o processo iterativo foi executado via VBA e de forma manual, de modo que os resultados pudessem ser comparados para comprovar a eficácia do Modelo desenvolvido.

O processo para executar a “Etapa 2” será apresentada para a rede hipotética com 13 trechos, primeiramente de forma completamente automatizada através do VBA. Sua solução prévia foi obtida na “Etapa 1.1” e é apresentada na Figura 36, com a cota do NA inicial do reservatório igual a 205,06 m e a cota meta sendo de 198,00 m.

Figura 36 – Solução prévia obtida para a rede com 13 trechos

	A	B	C	D	E	F	G	H
1			Solução Prévia =	205,06	m	Meta do Z NA =	198,00	m
2	Trecho	D ₀ (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δhf (m)			
3	1	250	266.534	9,33	2,14			
4	2	200	191.758	8,00	0,88			
5	3	200	253.471	7,30	1,33			
6	4	150	57.819	7,57	1,08			
7	5	150	80.623	7,29	3,00			
8	6	200	188.580	7,17	0,50			
9	7	150	68.796	7,29	0,81			
10	8	75	48.524	2,91	0,82			
11	9	75	37.471	6,94	2,08			
12	10	150	126.076	6,35	0,84			
13	11	150	239.585	5,95	0,46			
14	12	100	20.077	4,51	0,81			
15	13	100	40.800	0,00	0,87			

Fonte: O Autor (2025).

Como apresentado na “Etapa 1” (item 4.2) o trecho 13 foi identificado como o único com Excesso de Pressão igual a zero. Dessa forma, a análise inicial da “Etapa 2”, conforme descrita nos fluxogramas das Figura 13 a 16, foi conduzida para apenas um trecho com EP = 0. A partir disso, foram analisados os câmbios dos trechos (destacados em amarelo) pertencentes à artéria 4 que contém o trecho 13, os quais são os candidatos para terem seus diâmetros alterados. Pois, se fosse escolhido outro

trecho que não pertence a essa artéria, poderia ocorrer de algum trecho da rede apresentar Excesso de Pressão negativo, o que não é permitido.

Definida a artéria com EP igual a zero (Art_EP_0), determina-se qual o trecho com menor câmbio (Ca). Nesse caso, observa-se que o trecho 12 apresenta o menor câmbio entre os demais da mesma artéria.

Com base nisso, procedeu-se à redução do valor de $\Delta hf = 0,81$ m dos demais EPs da rede e da cota de alimentação do reservatório, já que todos os EPs apresentavam valores superiores ao valor a ser reduzido.

Com isso, o diâmetro do trecho 12 foi aumentado para 150 mm, de forma automatizada, resultando em um acréscimo no câmbio associado, porém acompanhado de uma redução na perda de carga do trecho, contribuindo para o reequilíbrio hidráulico da RDA.

É importante destacar que os valores dos parâmetros do trecho 13 permanecem inalterados, uma vez que este se encontra a jusante do trecho modificado.

A Figura 37 apresenta os resultados correspondentes à primeira iteração do processo, permitindo a análise detalhada das alterações realizadas na rede.

Figura 37 – 1ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos

	A	B	C	D	E
16					
17			1a Iteração	204,25	m
18	Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δhf (m)
19	1	250	266.534	8,52	2,14
20	2	200	191.758	7,19	0,88
21	3	200	253.471	6,49	1,33
22	4	150	57.819	6,76	1,08
23	5	150	80.623	6,48	3,00
24	6	200	188.580	6,36	0,50
25	7	150	68.796	6,48	0,81
26	8	75	48.524	2,09	0,82
27	9	75	37.471	6,13	2,08
28	10	150	126.076	5,54	0,84
29	11	150	239.585	5,14	0,46
30	12	150	588.222	4,51	0,10
31	13	100	40.800	0,00	0,87

Fonte: O Autor (2025).

Observa-se que, conforme mencionado anteriormente, houve alterações nos parâmetros hidráulicos e no câmbio do trecho 12, além da consequente modificação dos EPs nos trechos a montante da artéria com EP zero e nos demais trechos da rede. A análise seguiu com apenas um trecho apresentando EP igual a zero,

pertencente à mesma artéria anteriormente avaliada. Essa análise se manteve até que o valor de Δh_f do trecho de menor câmbio disponível se tornasse superior ao EP de algum trecho a montante da rede, e isso aconteceu na 4ª iteração dessa rede, conforme apresentado na Figura 38.

Figura 38 – 4ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos

	A	B	C	D	E
65			4a Iteração	202,04	m
66	Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δh_f (m)
67	1	250	266.534	6,31	2,14
68	2	200	191.758	4,98	0,88
69	3	200	253.471	4,28	1,33
70	4	150	57.819	4,55	1,08
71	5	150	80.623	4,27	3,00
72	6	250	826.978	4,65	0,15
73	7	150	68.796	4,78	0,81
74	8	75	48.524	0,39	0,82
75	9	75	37.471	4,42	2,08
76	10	200	953.072	4,68	0,18
77	11	150	239.585	4,27	0,46
78	12	150	588.222	3,64	0,10
79	13	150	1.195.362	0,00	0,11

Fonte: O Autor (2025).

Dessa forma, o trecho 11 foi identificado como o de menor câmbio da artéria 4. No entanto, o valor a ser reduzido de Δh_f é igual a 0,46 m, o qual é superior ao valor do menor EP dos demais trechos, que é o do trecho 8 com 0,39 m de excesso. Diante disso, o trecho 11 passou a ser trecho misto, enquanto os demais trechos a montante tiveram seus valores de EP reduzidos em 0,39 m, assim como a cota de alimentação do reservatório, a perda de carga do trecho 11 e de seu Δh_f , de acordo com a metodologia aplicada, como ilustrado na Figura 39.

Figura 39 – 5ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos

	A	B	C	D	E
81			5a iteração	201,65	m
82	Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δh_f (m)
83	1	250	266.534	5,92	2,14
84	2	200	191.758	4,60	0,88
85	3	200	253.471	3,89	1,33
86	4	150	57.819	4,16	1,08
87	5	150	80.623	3,88	3,00
88	6	250	826.978	4,26	0,15
89	7	150	68.796	4,39	0,81
90	8	75	48.524	0,00	0,82
91	9	75	37.471	4,03	2,08
92	10	200	953.072	4,29	0,18
93	11	150/200	239.585	4,27	0,07
94	12	150	588.222	3,64	0,10
95	13	150	1.195.362	0,00	0,11

Fonte: O Autor (2025).

A partir da quinta iteração, observaram-se dois trechos com EP igual a zero: o trecho 8, pertencente a artéria 2, e o trecho 13 pertencente a artéria 4. Nesse cenário, torna-se necessário analisar os câmbios dos trechos comuns às artérias envolvidas – neste caso, os trechos 1 e 6 (destacados em azul na Figura 39) –, bem como o somatório dos câmbios dos trechos isolados de menor câmbio de cada artéria, representados pelos trechos 8 e 11 (destacados em amarelo). Essa análise comparativa orienta a escolha mais vantajosa do ponto de vista econômico para dar continuidade ao processo iterativo.

Na quinta iteração da rede com 13 trechos, o menor câmbio foi identificado no trecho 1, classificado como trecho comum ótimo, uma vez que o somatório dos menores câmbios dos trechos 8 e 11 resultaria em um acréscimo no custo da rede igual a 288.110 umt/m, valor superior ao câmbio do trecho comum. Neste caso, como não existem trechos a montante do trecho selecionado, procedeu-se à redução da cota do reservatório em 2,14 m de forma automatizada. Além disso, o diâmetro do trecho 1 foi ampliado para 300 mm, o que implicou na alteração do seu respectivo câmbio e na redução da perda de carga, como pode ser visto na sexta iteração da rede na Figura 40.

Figura 40 – 6ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos

	A	B	C	D	E
97			6a Iteração	199,51	m
98	Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δhf (m)
99	1	300	879.083	5,92	0,79
100	2	200	191.758	4,60	0,88
101	3	200	253.471	3,89	1,33
102	4	150	57.819	4,16	1,08
103	5	150	80.623	3,88	3,00
104	6	250	826.978	4,26	0,15
105	7	150	68.796	4,39	0,81
106	8	75	48.524	0,00	0,82
107	9	75	37.471	4,03	2,08
108	10	200	953.072	4,29	0,18
109	11	150/200	239.585	4,27	0,07
110	12	150	588.222	3,64	0,10
111	13	150	1.195.362	0,00	0,11

Fonte: O Autor (2025).

Outra situação relevante ocorreu na sexta iteração da rede, em que o somatório dos câmbios isolados das artérias 2 e 4 (trechos 8 e 11, respectivamente) mostrou-se inferior ao menor câmbio dos trechos comuns. Por esse motivo, os trechos isolados ótimos foram selecionados no processo iterativo, conforme ilustrado na Figura 40.

Nessa condição, a definição do valor de Δhf a ser utilizado baseou-se no menor valor entre os dois trechos selecionados, sendo este o do trecho 11. Com isso, o diâmetro desse trecho, que anteriormente apresentava uma configuração mista, passou a ser completamente igual a 200 mm. Já o trecho 8 assumiu uma configuração mista de 75/100 mm e teve seu Δhf reduzido em 0,07 m, refletindo também na diminuição dos EPs dos trechos a montante, conforme apresentado na sétima iteração na Figura 41.

Figura 41 – 7ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos

	A	B	C	D	E
112					
113			7a iteração	199,44	m
114	Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δh_f (m)
115	1	300	879.083	5,85	0,79
116	2	200	191.758	4,53	0,88
117	3	200	253.471	3,83	1,33
118	4	150	57.819	4,09	1,08
119	5	150	80.623	3,81	3,00
120	6	250	826.978	4,19	0,15
121	7	150	68.796	4,32	0,81
122	8	75/100	48.524	0,00	0,75
123	9	75	37.471	3,97	2,08
124	10	200	953.072	4,22	0,18
125	11	200	1.811.145	4,27	0,10
126	12	150	588.222	3,64	0,10
127	13	150	1.195.362	0,00	0,11

Fonte: O Autor (2025).

O processo iterativo prosseguiu com o objetivo de alcançar a cota meta estabelecida (198,00 m). Na décima terceira iteração, a cota de alimentação encontrava-se em 198,02 m, e, conforme ilustrado na Figura 42, o valor de Δh_f a ser reduzido da cota de alimentação correspondia ao do trecho 6, que apresentava o menor câmbio entre os disponíveis, igual a 0,06 m. No entanto, a aplicação integral desse valor resultaria na ultrapassagem da cota meta. Por essa razão, procedeu-se à redução de 0,02 m, valor necessário para que a cota de alimentação coincidissem com a cota meta definida no início do projeto. Como consequência, o trecho 6 passou a apresentar um diâmetro misto, essa situação representa a décima quarta e última iteração, conforme apresentado na Figura 43.

Figura 42 – 13ª iteração da “Etapa 2” da rede com 13 trechos

	A	B	C	D	E
208			13a Iteração	198,02	m
209					
210	Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δhf (m)
211	1	350	3.866.440	5,21	0,34
212	2	200	191.758	3,89	0,88
213	3	200	253.471	3,19	1,33
214	4	150	57.819	3,46	1,08
215	5	150	80.623	3,18	3,00
216	6	300	2.727.535	3,71	0,06
217	7	150	68.796	3,84	0,81
218	8	75/100	48.524	0,00	0,27
219	9	75	37.471	3,48	2,08
220	10	250	4.179.503	3,92	0,05
221	11	250	7.942.409	4,07	0,03
222	12	200	4.446.665	3,53	0,02
223	13	200	9.036.341	0,00	0,02

Fonte: O Autor (2025).

Os valores correspondentes à última iteração para esta rede são apresentados na Figura 43, sendo a Figura 43a aqueles determinados via VBA e a 43b, aqueles sem a automatização.

Figura 43 – Última iteração via VBA e manual da “Etapa 2” para a rede com 13 trechos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
24												
25			14a Iteração	198,00	m					14a Iteração	198,00	m
26	Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δhf (m)			Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δhf (m)
27	1	350	3.866.440	5,19	0,34			1	350	3.866.440	5,19	0,34
28	2	200	191.758	3,87	0,88			2	200	191.758	3,87	0,88
29	3	200	253.471	3,17	1,33			3	200	253.471	3,17	1,33
30	4	150	57.819	3,44	1,08			4	150	57.819	3,44	1,08
31	5	150	80.623	3,16	3,00			5	150	80.623	3,16	3,00
32	6	300/350	2.727.535	3,71	0,04			6	300/350	2.727.535	3,71	0,04
33	7	150	68.796	3,84	0,81			7	150	68.796	3,84	0,81
34	8	75/100	48.524	0,00	0,27			8	75/100	48.524	0,00	0,27
35	9	75	37.471	3,48	2,08			9	75	37.471	3,48	2,08
36	10	250	4.179.503	3,92	0,05			10	250	4.179.503	3,92	0,05
37	11	250	7.942.409	4,07	0,03			11	250	7.942.409	4,07	0,03
38	12	200	4.446.665	3,53	0,02			12	200	4.446.665	3,53	0,02
39	13	200	9.036.341	0,00	0,02			13	200	9.036.341	0,00	0,02

a) Solução automática via VBA

b) Solução manual desenvolvida

Fonte: O Autor (2025).

Com isso, a cota de alimentação da rede, que na solução prévia era de 205,06 m, foi reduzida para 198,00 m ao final do processo iterativo, por meio da aplicação da metodologia do Método Granados Modificado. Essa redução representa um ganho significativo no dimensionamento hidráulico, refletindo diretamente na diminuição dos custos relacionados à implantação do sistema, contribuindo para uma solução mais eficaz e economicamente viável.

O processo iterativo foi aplicado de forma análoga à rede com 9 trechos, cuja cota inicial do reservatório era de 205,24 m, e a cota meta estabelecida foi de 194,00 m, conforme apresentada na Figura 44. Após dezessete iterações, o objetivo foi atingido, com ajustes nos diâmetros de sete trechos, ou seja de 77,77% da rede, dos quais dois finalizaram o processo com configuração mista (vide Figura 45a e 45b). Além disso, como pode ser observado na mesma figura, os resultados obtidos sem o uso de programação (representados à direita) coincidiram exatamente com os resultados gerados pela implementação via VBA (à esquerda), evidenciando a confiabilidade e a precisão do Modelo Computacional desenvolvido.

Figura 44 – Solução prévia obtida para a rede com 9 trechos

	A	B	C	D	E	F	G	H
1			Solução Prévia =	205,24	m	Meta do Z NA =	194,00	m
2	Trecho	D ₀ (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δhf (m)			
3	1	200	97.599	6,44	4,44			
4	2	200	191.758	5,11	0,88			
5	3	200	253.471	4,41	1,33			
6	4	150	57.819	4,68	1,08			
7	5	150	80.623	0,00	3,00			
8	6	150	67.590	3,90	0,86			
9	7	150	68.796	4,03	0,81			
10	8	75	48.524	1,54	0,82			
11	9	75	37.471	3,67	2,08			

Fonte: O Autor (2025).

Figura 45 – Última iteração via VBA e manual da “Etapa 2” para a rede com 9 trechos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
204			17a Iteração	194,00	m							
205	Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δhf (m)			Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δhf (m)
206	1	400	14.949.001	1,67	0,10			1	400	14.949.001	1,67	0,10
207	2	200/250	191.758	1,03	0,19			2	200/250	191.758	1,03	0,19
208	3	200	253.471	0,33	1,33			3	200	253.471	0,33	1,33
209	4	200	437.083	1,68	0,23			4	200	437.083	1,68	0,23
210	5	200	609.473	0,00	0,65			5	200	609.473	0,00	0,65
211	6	300/350	7.390.148	0,25	0,01			6	300/350	7.390.148	0,25	0,01
212	7	300	7.521.962	1,41	0,02			7	300	7.521.962	1,41	0,02
213	8	200	19.616.383	0,00	0,01			8	200	19.616.383	0,00	0,01
214	9	75	37.471	1,05	2,08			9	75	37.471	1,05	2,08
215												

a) Solução automática via VBA

b) Solução manual desenvolvida

Fonte: O Autor (2025).

Por fim, na simulação referente à rede com 18 trechos, a cota meta estabelecida para processo iterativo foi de 200,00 m, já a cota inicial de alimentação foi de 210,93 m, conforme apresentado na Figura 46. O objetivo foi alcançado após dez iterações, por meio da aplicação da metodologia do Método Granados Modificado, seguindo os mesmos princípios adotados no exemplo da RDA com 13 trechos. A

convergência rápida e a consistência dos ajustes reforçaram a robustez do procedimento implementado.

Figura 46 – Solução prévia obtida para a rede com 18 trechos

	A	B	C	D	E	F	G	H
1			Solução Prévia =	210,93	m	Meta do Z NA =	200,00	m
2	Trecho	D ₀ (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δhf (m)			
3	1	250	162.601	12,88	3,50			
4	2	200	191.758	11,56	0,88			
5	3	200	253.471	10,85	1,33			
6	4	150	57.819	11,12	1,08			
7	5	150	80.623	10,84	3,00			
8	6	200	82.373	9,74	1,15			
9	7	150	68.796	9,87	0,81			
10	8	75	48.524	7,38	0,82			
11	9	75	37.471	9,51	2,08			
12	10	200	195.293	8,70	0,89			
13	11	200	204.418	7,58	0,87			
14	12	150	300.651	6,82	0,19			
15	13	100	40.800	2,32	0,87			
16	14	75	37.762	8,92	2,27			
17	15	150	70.588	5,08	2,86			
18	16	150	109.341	4,74	0,64			
19	17	150	259.811	4,77	0,28			
20	18	100	16.891	0,00	2,64			

Fonte: O Autor (2025).

Nesse caso, já na solução prévia, o trecho de menor câmbio pertencente à artéria com EP = 0 (trecho 18) apresentava um valor de Δhf superior ao EP mínimo da rede, o que indicou que, já na primeira iteração haveria mais de um trecho com Excesso de Pressão igual a zero. Ao longo do processo iterativo, foram realizados ajustes nos diâmetros de oito trechos da rede, o que corresponde a 44,44% da rede. Esse percentual é inferior ao observado na configuração da RDA com 9 trechos, porém, em ambos os casos, os resultados foram obtidos de acordo com os critérios estabelecidos na metodologia, demonstrando sua aplicabilidade em diferentes configurações de rede, como pode ser observado na Figura 47a e 47b.

Figura 47 – Última iteração via VBA e manual da “Etapa 2” para a rede com 18 trechos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
211			10a iteração	200,00	m					10a iteração	200,00	m
212	Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δh_f (m)			Trecho	D (mm)	Ca(umt/m)	EP (m)	Δh_f (m)
213	1	300/350	536.290	6,24	0,50			1	300/350	536.290	6,24	0,50
214	2	200	191.758	4,92	0,88			2	200	191.758	4,92	0,88
215	3	200	253.471	4,22	1,33			3	200	253.471	4,22	1,33
216	4	150	57.819	4,48	1,08			4	150	57.819	4,48	1,08
217	5	150	80.623	4,21	3,00			5	150	80.623	4,21	3,00
218	6	300	1.191.404	4,60	0,13			6	300	1.191.404	4,60	0,13
219	7	150	68.796	4,73	0,81			7	150	68.796	4,73	0,81
220	8	75	48.524	2,24	0,82			8	75	48.524	2,24	0,82
221	9	75	37.471	4,37	2,08			9	75	37.471	4,37	2,08
222	10	250	856.417	4,45	0,27			10	250	856.417	4,45	0,27
223	11	250	896.435	4,20	0,26			11	250	896.435	4,20	0,26
224	12	200	2.272.771	3,64	0,04			12	200	2.272.771	3,64	0,04
225	13	150	1.195.362	0,00	0,11			13	150	1.195.362	0,00	0,11
226	14	75	37.762	5,73	2,27			14	75	37.762	5,73	2,27
227	15	150/200	70.588	2,44	2,13			15	150/200	70.588	2,44	2,13
228	16	150	109.341	2,10	0,64			16	150	109.341	2,10	0,64
229	17	150	259.811	2,13	0,28			17	150	259.811	2,13	0,28
230	18	150	494.884	0,00	0,32			18	150	494.884	0,00	0,32

a) Solução automática via VBA

b) Solução manual desenvolvida

Fonte: O Autor (2025).

Em todas as configurações analisadas, as pressões disponíveis atenderam os critérios estabelecidos pela NBR 12218 (ABNT, 2017), que determina o valor mínimo de 10 metros de coluna de água (m.c.a) nos pontos de consumo. Durante todo o processo iterativo, esse requisito foi rigorosamente respeitado, assegurando que o dimensionamento hidráulico resultasse em condições adequadas de fornecimento de vazão e pressão para os usuários finais das redes de abastecimento de água.

4.4 COMPARATIVO COM OS RESULTADOS OBTIDOS NO EPANET

Para validar os resultados obtidos por meio do Modelo Computacional do MGM, além das análises manuais, foi realizada uma simulação no EPANET (versão 2.0), aplicada à RDA hipotética composta por 9 trechos.

A simulação foi realizada com base nos diâmetros obtidos na última iteração da rede, conforme apresentado na Figura 45. Durante essa análise, foi necessário dividir os trechos 2 e 6 da RDA, uma vez que, ao final do processo iterativo, apresentaram diâmetros mistos. Para calcular a demanda correspondente a cada segmento desses trechos, foi determinado o comprimento proporcional associado a cada diâmetro, com base na perda de carga unitária. Esse cálculo foi realizado por meio da aplicação das equações a seguir (Gomes, 2002) e pode ser visualizado o comprimento de cada segmento dos trechos mistos na Figura 48.

$$L_i = \frac{L(j - j_{ii})}{(j_i - j_{ii})} \quad (6)$$

$$L_{ii} = L - L_i \quad (7)$$

Figura 48 – Resultados dos comprimentos dos diâmetros dos trechos mistos da RDA 9 trechos

Comprimento Trechos Mistos							
Trecho	Diâmetro (mm)		L do Trecho (m)	Perda de Carga Unitária			
2	200	L_200 =	67	j_2_200 =	0,00427	j_2 =	0,00205
2	250	L_250 =	243	j_2_250 =	0,00144		
6	300	L_300 =	55	j_6_300 =	0,00022	j_6 =	0,00014
6	350	L_350 =	120	j_6_350 =	0,00010		

Fonte: O Autor (2025).

Com base nas informações inseridas, conforme apresentado no item 3.3 foi realizada a simulação no EPANET, e os resultados obtidos para os nós estão apresentados na Figura 49. Observa-se que a vazão do reservatório (RNF R1) foi de -40,98 L/s, valor que representa a vazão necessária para abastecer a rede. Esse resultado é praticamente igual a vazão acumulada do trecho 1 da RDA, conforme apresentado na Figura 27. Observa-se que resultados apresentados na coluna “Pressão” estão superiores a 10 m.c.a, atendendo o critério estabelecido pela NBR 12218 (ABNT, 2017). Os trechos mistos foram divididos com o final A (diâmetro superior) e B (diâmetro inferior).

Figura 49 – Resultados dos nós na simulação no EPANET

Tabela da Rede - Nós		
Identificador do Nó	Consumo LPS	Pressão m
Nó N1	0.00	13.67
Nó N2A	0.73	13.39
Nó N2B	2.66	13.07
Nó N3	2.62	12.39
Nó N4	3.00	13.74
Nó N5	15.23	15.07
Nó N6A	0.82	12.26
Nó N6B	1.79	12.25
Nó N7	9.52	13.41
Nó N8	2.33	15.01
Nó N9	2.28	13.11
RNF R1	-40.98	0.00

Fonte: O Autor (2025).

Para comparar os resultados obtidos dos nós pelo EPANET e pelo VBA/Excel, elaborou-se a Tabela 6. Observa-se que a diferença entre os valores obtidos é menor do que 0,5% em todos os nós analisados. Esses resultados validam a eficácia do Modelo Computacional desenvolvido.

Tabela 6 – Comparativo dos resultados obtidos dos nós no EPANET e via VBA/Excel

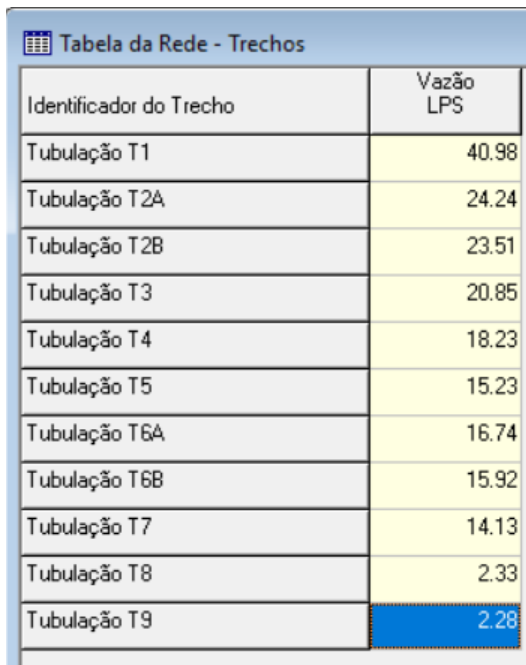
Resultados das pressões obtidas (m)			
ID do Nó	EPANET	VBA/Excel	Diferença
1	13,67	13,67	0,00%
2	13,07	13,03	-0,31%
3	12,39	12,33	-0,48%
4	13,74	13,68	-0,44%
5	15,07	15,00	-0,46%
6	12,25	12,25	0,00%
7	13,41	13,41	0,00%
8	15,01	15,00	-0,07%
9	13,11	13,05	-0,46%

Fonte: O Autor (2025).

Por fim, com os resultados obtidos para os trechos após a simulação, é possível observar as vazões acumuladas (“Vazão”) na Figura 50, cujos valores se mostraram

compatíveis com aqueles calculados na etapa de “Leitura dos Dados de Entrada e Cálculos Hidráulicos Iniciais”.

Figura 50 – Resultados dos trechos na simulação no EPANET



Identificador do Trecho	Vazão LPS
Tubulação T1	40.98
Tubulação T2A	24.24
Tubulação T2B	23.51
Tubulação T3	20.85
Tubulação T4	18.23
Tubulação T5	15.23
Tubulação T6A	16.74
Tubulação T6B	15.92
Tubulação T7	14.13
Tubulação T8	2.33
Tubulação T9	2.28

Fonte: O Autor (2025).

A Tabela 7 apresenta a comparação das vazões acumuladas obtidas pelo EPANET e pela rotina automatizada em VBA/Excel. Observa-se que as diferenças dos valores obtidos foram inferiores a 0,10%, o que comprova a consistência dos resultados e a compatibilidade do Modelo Computacional desenvolvido em relação a softwares de referência.

Tabela 7 – Comparativo dos resultados obtidos dos trechos no EPANET e via VBA/Excel

Resultados das vazões obtidas (L/s)			
ID do Trecho	EPANET	VBA/Excel	Diferença
1	40,98	40,99	0,02%
2	24,24	24,24	0,00%
3	20,85	20,84	-0,05%
4	18,23	18,23	0,00%
5	15,23	15,23	0,00%
6	16,74	16,75	0,06%
7	14,13	14,13	0,00%
8	2,33	2,33	0,00%
9	2,28	2,28	0,00%

Fonte: O Autor (2025).

5 CONCLUSÕES

O abastecimento de água deve garantir qualidade, acessibilidade e regularidade, enfrentando desafios relacionados à má distribuição. A rede de distribuição é um dos componentes mais onerosos de uma SAA, demandando equilíbrio entre critérios hidráulicos e custos. Nesse contexto, o Método Granados (MG) surge como uma alternativa para minimizar os custos em redes ramificadas pressurizadas por gravidade.

O presente trabalho teve como objetivo principal desenvolver e aplicar o Método Granados Modificado (MGM) para a otimização de três redes hipotéticas ramificadas de água, com a implementação de um Modelo Computacional em Microsoft Excel através da linguagem de programação *Visual Basic for Application* capaz de automatizar todos os cálculos necessários. Entre eles, o processo iterativo de cálculo (“Etapa 2”) seleciona os diâmetros das tubulações de forma economicamente eficaz. A abordagem adotada mostrou-se bem-sucedida, demonstrando que é possível obter soluções otimizadas com ferramentas acessíveis.

A metodologia proposta foi testada em três redes hipotéticas com diferentes configurações (com 9, 13 e 18 trechos), e os resultados obtidos comprovaram a aplicabilidade do Modelo Computacional desenvolvido. Em todos os casos, foi possível atingir as cotas metas estabelecidas para o nível do reservatório, atendendo os critérios hidráulicos estabelecidos na etapa inicial, como a perda de carga unitária máxima e a pressão mínima exigida nos pontos de consumo, conforme determina a NBR 12218 (ABNT, 2017).

Os resultados do Modelo foram validados inicialmente sem o uso de linguagem de programação, apresentando valores idênticos aos obtidos pela rotina em VBA. Além disso, no caso da rede de 9 trechos, a validação realizada por meio do EPANET indicou diferenças inferiores a 0,5% em relação ao Modelo Computacional, confirmando sua confiabilidade.

Dentre as principais contribuições do estudo, destaca-se a reformulação da definição dos diâmetros mínimos com base na perda de carga unitária máxima em conformidade com a NBR 12218 (ABNT, 2017), substituindo o critério original de velocidade máxima do Método Granados (MG) original. Essa adaptação permitiu alinhar o Modelo às exigências normativas brasileiras, tornando-o mais aplicável aos projetos desenvolvidos no país.

A aplicação do MGM mostrou ser capaz de fornecer soluções eficazes com menor esforço computacional em comparação a métodos mais complexos como os algoritmos evolutivos. No entanto, reconhece-se que o MG possui como limitação o fato de ser aplicado apenas em redes ramificadas, enquanto o Modelo Computacional desenvolvido possui como limitação a desconsideração de sistemas de bombeamentos.

Conclui-se, portanto, que a proposta apresentada neste trabalho oferece uma alternativa viável, didática e eficaz para o dimensionamento de redes ramificadas, contribuindo para o meio acadêmico, ao incentivar o uso de técnicas de otimização em projetos hidráulicos.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a ampliação do Modelo Computacional com a inclusão de dispositivos hidráulicos, como válvulas e bombas hidráulicas, tornando a simulação mais próxima das condições reais de operação. Além disso, sugere-se a validação do Modelo utilizando outras equações para o cálculo de perdas de carga, como a Fórmula Universal de Darcy-Weisbach.

Outra proposta relevante consiste na aplicação do processo iterativo a redes reais, especialmente aquelas que envolvem sistemas de bombeamento, acompanhada de uma análise dos custos de implantação e operação. Tais avanços teriam como objetivo aumentar a aplicabilidade e robustez do Modelo Computacional frente aos desafios enfrentados na prática profissional.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12218**: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.

ALEN SOBRINHO, P.; CONTRERA, R. C. Redes de Distribuição de Água. Apresentação da disciplina Saneamento II. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. Design of optimal water distribution systems. **Water Resources Research**, v. 13, 1977.

AZEVEDO NETTO, J.; FERNANDEZ, M.; ARAÚJO, R.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. Ed. Edgard Blucher Ltda. 8ed. São Paulo - SP: 2015.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. rev. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. di B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. v. 1. São Carlos: Rima, 2005.

GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico**. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, p. 67 – 84, 2002.

GRANADOS, A. **Infraestructuras de regadios – Redes colectivas de riego a presión**. Madrid: Servicio de Publicación de E. T. S. I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, 1986.

GRIBBIN, J. E. **Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais**. Tradução da 4. edição norte-americana, trad. Andrea Pisan Soares Aguiar; revisão técnica de Marcelo Libânio. São Paulo: Cengage Learning (Trilha), 2014.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. de. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

MACÊDO, J. E. S. **Desenvolvimento de modelos de otimização baseados em técnicas evolutivas para o projeto de redes de distribuição de água**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

OMS – Organização Mundial da Saúde/ WHO – World Health Organization. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: special focus on gender**. New York: United Nations Children’s Fund (UNICEF) and World Health Organization (WHO), 2023. Disponível em: <https://washdata.org>. Acesso em: 2 ago. 2025.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 4a ed, São Carlos S.P: Escola de Engenharia de São Carlos USP, 2006.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2. Users manual**. US Environmental Protection Agency (EPA), USA, 2000.

SNISA – **Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico**, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, 2024. Disponível em: <https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/dashboard?modulo=agua>. Acesso em: 16/09/2025

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.