U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA E TÉCNICA DE APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS

INÊS PAULINO MONTEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE

Orientadora: Professora Doutora Cristina Maria Monteiro dos Santos

Coorientadora: Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho

JULHO 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Ao meu pai,

O meu anjo no céu.

À minha mãe,

O meu anjo na terra.

Eu quero, posso e escolho.

Professora Adelina Pereira

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, à minha amiga eterna, que nunca me deixará e que sempre acreditará em mim e nos meus sonhos, independentemente da escala. Obrigada, mãe, por me ensinares a ser forte.

Ao meu irmão, a luz dos meus dias, o menino dos meus olhos, o meu remédio. Obrigada, meu pequeno grande, por me motivares e moveres a minha vida, por me adorares como ninguém.

Aos meus avós, Lúcia e Paulino, a quem devo todo o amor do mundo.

À minha madrinha e à minha tia Beatriz, por serem almas que gostam da minha e que me guiam sem dia de folga. Aos meus tios Bruno, Dany, Nelson e Isaías, por me ensinarem o valor da coragem e do trabalho. À Lu, ao João e à Maryline, por fazerem parte da minha vida.

Aos meus amigos, aqueles que nunca largaram a minha mão. Em especial, à Eduarda e à Nádia, por me conhecerem como ninguém e por serem a minha casa; à Sara, longe, mas sempre perto; à Isabel, Rafinha e Mariana por termos crescido juntos.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, não apenas pelo conhecimento adquirido, mas sobretudo pelas pessoas que me deu a oportunidade de conhecer. Aos meus amigos do Pré-Funeral e associados, porque esta caminhada não teria sido a mesma sem vocês.

Obrigada à Sofia e ao Rodrigo, amigos espetaculares que terão a minha dedicação até ao fim dos meus dias. À Nelinha, que tem um coração maior que o mundo. Ao Tomás, meu vizinho.

Ao Manuel, a minha maior surpresa. Agradeço-te pela amizade, pelo amor e pela presença constante. Obrigada por me incentivares a procurar sempre o melhor de mim, pelo cuidado e pela pessoa que és. Espero que tenhas tanto orgulho em mim como eu tenho em ti.

À Professora Cristina e à Professora Elsa, pela orientação, disponibilidade e sabedoria ao longo desta fase final. Ao Professor Miguel Castro, por me ter encorajado. À Professora Mª de Lurdes.

À EDP Produção, S.A. e a todos os colegas com quem tive o privilégio de trabalhar e conviver. Em particular, à Paula e à Mónia, pela oportunidade. Ao Pedro, por me integrar. À Catarina e ao Sérgio, pela paciência, disponibilidade, ensinamentos e incentivo constante. Obrigada por serem pessoas verdadeiramente excecionais. À minha doce Elisa, ao Paulo, Filipe, André e Senhor Moura, não só pela instrução, mas por me fazerem sentir parte de vocês. Ao Pedrito.

Agradeço à vida por todas as boas pessoas que colocou no meu caminho. Esta dissertação é também vossa.

RESUMO

A presente dissertação insere-se no domínio dos recursos hídricos, com foco na estimativa de afluências em aproveitamentos hidroelétricos e na caracterização hidrológica e técnica de alguns dos principais aproveitamentos da cascata do Douro. O principal objetivo consistiu na análise e comparação de diferentes metodologias de estimativa de afluências, confrontando abordagens baseadas em dados de exploração e informação hidrometeorológica com uma metodologia baseada em modelação hidrológica.

Numa primeira fase, foram abordados os princípios da monitorização hidrológica, incluindo os métodos de medição de níveis e caudais, as curvas de vazão e as principais fontes de incerteza associadas aos dados. Foi ainda realizado o enquadramento da bacia hidrográfica do Douro, da sua relevância no contexto hidroelétrico nacional e das metodologias atualmente utilizadas para a determinação de afluências nos aproveitamentos da cascata.

Posteriormente, as afluências foram estimadas através do método tradicional, baseado em balanços hídricos e em relações apoiadas em dados hidrométricos. Em paralelo, foi desenvolvida uma abordagem de modelação hidrológica utilizando o software HEC-HMS, permitindo simular a resposta hidrológica das bacias contribuintes para os aproveitamentos de Vilar-Tabuaço, Régua e Crestuma-Lever.

Os resultados demonstraram que a modelação hidrológica foi capaz de reproduzir, de forma globalmente consistente, as afluências estimadas pelos métodos tradicionalmente utilizados. A comparação entre abordagens evidenciou que a modelação hidrológica constitui uma ferramenta complementar relevante para a estimativa e validação de afluências, contribuindo para uma melhor compreensão dos processos hidrológicos e das incertezas associadas aos resultados obtidos.

Em síntese, o trabalho demonstra que a integração entre monitorização hidrológica, métodos operacionais de cálculo e modelação hidrológica permite aumentar a robustez das estimativas de afluências e apoiar uma caracterização hidrológica mais rigorosa dos aproveitamentos hidroelétricos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: afluências, hidrometria, balanço hídrico, modelação hidrológica, aproveitamentos hidroelétricos

ABSTRACT

This dissertation falls within the field of water resources engineering, focusing on inflow estimation in hydroelectric schemes and on the hydrological and technical characterization of some of the main hydropower developments within the Douro River cascade. The main objective was to analyse and compare different inflow estimation methodologies, contrasting approaches based on operational data and hydrometeorological information with a methodology based on hydrological modelling.

In the first stage, the principles of hydrological monitoring were addressed, including water level and discharge measurement methods, rating curves, and the main sources of uncertainty associated with hydrological data. An overview of the Douro River basin, its relevance within the Portuguese hydropower sector, and the methodologies currently used for inflow estimation in the cascade's hydropower schemes was also provided.

Subsequently, inflows were estimated using the traditional method based on water balance calculations and relationships supported by hydrometric data. In parallel, a hydrological modelling approach was developed using the HEC-HMS software, enabling the simulation of the hydrological response of the catchments contributing to the Vilar-Tabuaço, Régua, and Crestuma-Lever hydropower schemes.

The results showed that hydrological modelling was able to reproduce, in a globally consistent manner, the inflows estimated through the methods traditionally employed in operational practice. The comparison between approaches highlighted that hydrological modelling constitutes a valuable complementary tool for inflow estimation and validation, contributing to a better understanding of hydrological processes and of the uncertainties associated with the obtained results.

In summary, the study demonstrates that the integration of hydrological monitoring, operational calculation methods, and hydrological modelling can enhance the robustness of inflow estimates and support a more rigorous hydrological characterization of the hydroelectric schemes under study.

KEYWORDS: inflows, hydrometry, water balance, hydrological modelling, hydropower scheme

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS I

RESUMO III

ABSTRACT V

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS XV

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO 1

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO 3

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 3

2 ESTADO DA ARTE 5

2.1 AQUISIÇÃO E VALIDAÇÃO DE DADOS PARA ESTIMATIVA DE AFLUÊNCIAS 5

2.1.1 Redes de Monitorização Hidrometeorológica em Portugal 6

2.1.1.1 A Rede Pública (SNIRH) 7

2.1.1.2 A Rede Privada de Exploração Hidroelétrica 8

2.1.2 Variáveis hidrológicas 9

2.1.2.1 Critérios de Localização de Estações Hidrométricas 9

2.1.2.2 Medição de Níveis Hidrométricos 11

2.1.2.2.1 Método de Leitura Direta 11

2.1.2.2.2 Método de Leitura Indireta 12

2.1.2.3 Medição de Caudais 15

2.1.2.3.1 Molinete Hidráulico: Método Convencional Tradicional 16

2.1.2.3.2 Sensor Eletromagnético 17

2.1.2.3.3 Perfilador Acústico com Efeito Doppler: ADCP 18

2.1.2.4 Curvas de Vazão 22

2.1.3 Variáveis Meteorológicas 23

2.1.4 Incerteza Associada a Dados Hidrométricos e Medição de Caudais 24

2.2 SÉRIES TEMPORAIS HIDROLÓGICAS E DETERMINAÇÃO DE AFLUÊNCIAS 24

2.2.1 Séries Históricas e Tratamento de Dados Hidrológicos 24

2.2.2 Balanço Hídrico em Aproveitamentos Hidroelétricos 25

2.2.3 Enquadramento Metodológico 27

2.2.4 Incerteza Associada à Estimativa de Afluências 28

2.3 CARACTERIZAÇÃO TÉCNICA E OPERACIONAL DE APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS 29

2.3.1 Parâmetros Fundamentais: Cotas, Volumes e Potência Instalada 29

2.3.2 Curvas de Capacidade das Albufeiras 30

2.3.3 O sistema Valoragua e Estimativas de Produção 32

3 CASO DE ESTUDO 35

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO DOURO 35

3.2 CASCATA DO DOURO E APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS DA EDP 37

3.2.1 Enquadramento da Cascata do Douro 37

3.2.2 Caracterização Técnica dos Ativos 39
3.2.2.1 Aproveitamento Hidroelétrico de Vilar-Tabuaço 39
3.2.2.2 Aproveitamento Hidroelétrico da Régua 41
3.2.2.3 Aproveitamento Hidroelétrico de Crestuma-Lever 42

4 METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE AFLUÊNCIAS 43
4.1 MÉTODO TRADICIONAL 43
4.1.1 Enquadramento e Fundamentação do Método 43
4.1.2 Fontes de Dados 44
4.1.3 Procedimento de Cálculo 45
4.1.4 Vantagens e Limitações 47
4.2 MODELO HIDROLÓGICO 48
4.2.1 Fontes de Dados 49
4.2.2 Procedimentos de Modelação 50
4.2.3 Vantagens e Limitações 54

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 57
5.1 MÉTODO TRADICIONAL 58
5.1.1 Caso 1: Aproveitamento Hidroelétrico de Vilar-Tabuaço 58
5.1.1.1 Cálculo A: Método Threshold 59
5.1.1.2 Cálculo B: Médias Móveis 66
5.1.2 Aproveitamento Hidroelétrico da Régua 67
5.1.3 Aproveitamento Hidroelétrico de Crestuma-Lever 72
5.1.3.1 Cálculo A: Relação Espacial com Estação Hidrométrica 73
5.1.3.2 Cálculo B: Método Threshold 75
5.1.3.3 Cálculo C: Equações lineares 77
5.1.3.4 Comparação de metodologias e análise por volumes 79
5.2 MODELO HIDROLÓGICO 81
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO TRADICIONAL E O MODELO HIDROLÓGICO 83
5.3.1 Aproveitamento Hidroelétrico de Vilar-Tabuaço 87
5.3.1.1 Comparação entre caudal observado e simulado 87
5.3.1.2 Comparação entre caudal calculado e simulado 91
5.3.2 Aproveitamento Hidroelétrico da Régua 93
5.3.2.1 Comparação entre caudal observado e simulado 94
5.3.2.2 Comparação entre caudal calculado e simulado 96
5.3.3 Aproveitamento Hidroelétrico de Crestuma-Lever 102
5.3.3.1 Comparação entre caudal observado e simulado 102
5.3.3.2 Comparação entre caudal calculado e simulado 105

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 111
6.1 CONCLUSÕES 111
6.2 TRABALHOS FUTUROS 112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 115

ANEXOS 121

A.1 ORIGEM E EVOLUÇÃO DA REDE HIDROMETEOROLÓGICA DA EDP PRODUÇÃO 123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição geográfica das estações meteorológicas e hidrométricas (SNIRH, 2025) 8
Figura 2. Distribuição geográfica das estações meteorológicas e hidrométricas (Watt Now, 2025).....9
Figura 3. Confluência e localização adequada de uma secção de medição (W. Boiten, 2000).....10
Figura 4. Escala vertical - Estação Hidrométrica de Sampaio, Ribeira de Sampaio 11
Figura 5. Limnígrafo e limnigrama (EDP, 2021).....13
Figura 6. Sistema de boia e contrapeso (EDP, 2021).....13
Figura 7. Sistema de telemetria - Estação Hidrométrica de Safara, Rio Ardila 14
Figura 8. Sonda de pressão (EDP, 2021) 15
Figura 9. Molinete hidráulico (VVA Industrial, 2025).....16
Figura 10. Sensor eletromagnético (Ott, 2025).....17
Figura 11. Perfilador acústico com efeito doppler (TELEDYNE, 2025) 18
Figura 12. ADCP instalado num trimaran em configuração de transporte 18
Figura 13. Dispositivo de comunicação sem fios utilizado na ligação entre o ADCP e o software 19
Figura 14. Distinção entre leito móvel e leito fixo (EDP, 2022).....19
Figura 15. Dispositivo lança-cabos pneumático.....20
Figura 16. Perfil de velocidades (EDP, 2025) 21
Figura 17. Esquema das zonas cegas do ADCP (a) e áreas estimadas por extrapolação (b) (Priego-Hernandez et al. (2019)).....21
Figura 18. Curva de vazão tipo (Rain&Flow, 2025) 22
Figura 19. Balanço hídrico (Adaptado de Lima (s.d.), 2025) 27
Figura 20. Rede hidrográfica internacional do Douro (CADC, 2025).....36
Figura 21. Cascata do Douro Internacional (EDP, 2017) 38
Figura 22. Bacia do Douro (Adaptado: EDP, 2014) 38
Figura 23. Barragem e albufeira de Vilar-Tabuaço (Rio-Távora).....39
Figura 24. Localização da central e barragem/albufeira de Vilar-Tabuaço (Fonte: Google Maps) 40
Figura 25. Barragem da Régua (Rio Douro) 41
Figura 26. Barragem de Crestuma-Lever (Rio Douro).....42
Figura 27. Bacia hidrográfica, rede de estações hidrometeorológicas e posicionamento dos aproveitamentos (Watt Now, 2025).....45
Figura 28. Esquema topológico da bacia hidrográfica do Douro (HEC-HMS).....48
Figura 29. Interface de dados do modelo (HEC-HMS) 50
Figura 30. Esquema conceptual do modelo Soil Moisture Accounting (SMA), evidenciando os principais processos hidrológicos e fluxos entre reservatórios (Adaptado de USACE) 51
Figura 31. Hidrograma conceptual representativo da resposta hidrológica de uma bacia (Adaptado de Chow et al., 1988) 52
Figura 32. Reconfiguração da estrutura da bacia do Douro (HEC-HMS).....54
Figura 33. Enquadramento geográfico do aproveitamento hidroelétrico de Vilar-Tabuaço (Watt Now, 2025) 59
Figura 34. Representação esquemática do caudal de base e da onda de cheia (Adaptado de Chow

et al., 1988)....61
Figura 35. Excerto de análises de caudais (1) - Vilar-Tabuaço (Excel)....62
Figura 36. Gráfico de dispersão (Excel)....62
Figura 37. Evolução temporal da diferença quadrática (Excel)....63
Figura 38. Excerto de folha de cálculo referente a Vilar-Tabuaço (Excel)....64
Figura 39. Algoritmo esquemático - Valor final 1 (a)....64
Figura 40. Algoritmo esquemático - Valor final 1 (b)....65
Figura 41. Comparação entre o caudal estimado e pluviosidade (Excel)....65
Figura 42. Análise temporal para o período de janeiro a junho de 2025: (a) hidrograma dos caudais afluentes e médias móveis; (b) hietograma das estações de Ferreirim, Ponte do Abade e Vilar (Excel)....66
Figura 43. Enquadramento geográfico da Barragem da Régua (Watt Now, 2025)....68
Figura 44. Excerto de análise gráfica - Estimativa de Caudais Afluentes da Régua (Excel)....68
Figura 45. Excerto de cálculo do AH da Régua (Excel)....69
Figura 46. Séries estimativas de afluências e dados pluviométricos (Excel)....71
Figura 47. Comparação dos volumes anuais (hm^3) e respetivos desvios percentuais (Excel)....71
Figura 48. Enquadramento geográfico da Barragem de Crestuma-Lever (Watt Now, 2025)....73
Figura 49. Gráfico de dispersão (Excel)....76
Figura 50. Relação entre os caudais afluentes estimados e os registos de precipitação (Excel)....77
Figura 51. Diagramas de dispersão entre os caudais observados sem e com transposição espacial (Excel)....78
Figura 52. Comparação de volumes específicos anuais afluentes às secções de algumas das barragens do curso principal do Douro (Excel)....79
Figura 53. Comparação de volumes anuais pelas diferentes formas de cálculo (Excel)....80
Figura 54. Excerto de análise de caudais médios diários (Excel)....80
Figura 55. Comparação entre Run1 e Run2 em Saucelle (Excel)....82
Figura 56. Análise gráfica entre caudais médios diários observados (balanço hídrico) e simulados em Vilar-Tabuaço (2006-2025) (Excel)....88
Figura 57. Testes de qualidade do ajuste entre caudais observados e simulados - Vilar-Tabuaço (Excel)....88
Figura 58. Excerto de gráfico entre caudais médios diários observados (balanço hídrico) e simulados em Vilar-Tabuaço (2011-2014) (Excel)....89
Figura 59. Excerto de gráfico entre caudais médios diários observados (balanço hídrico) e simulados em Vilar-Tabuaço (2019-2022) (Excel)....90
Figura 60. Análise gráfica entre caudais médios diários calculados e simulados em Vilar-Tabuaço (2006-2025) (Excel)....91
Figura 61. Testes de qualidade do ajuste entre caudais calculados e simulados - Vilar-Tabuaço (Excel)....91
Figura 62. Caudais classificados (2006-2025) – Vilar-Tabuaço (Excel)....92
Figura 63. Análise gráfica entre caudais médios diários observados e simulados na Régua (2006-2025) (Excel)....94
Figura 64. Testes de qualidade do ajuste entre caudais observados e simulados – Régua (Excel)....95
Figura 65. Excerto de análise gráfica entre caudais médios diários observados e simulados na Régua (2006-2025) (Excel)....95

Figura 66. Análise gráfica entre caudais médios diários calculados e simulados na Régua (2006-2025) (Excel) 96
Figura 67. Testes de qualidade do ajuste entre caudais calculados e simulados – Régua (Excel)....97
Figura 68. Troço do esquema topológico, evidenciando a periferia da bacia da Régua (HEC-HMS) 98
Figura 69. Análise gráfica entre caudais médios diários calculados e simulados na Régua (2011-2020) (Excel) 99
Figura 70. Troço estrutural do modelo, evidenciando a Sink-5 a jusante da Régua (HEC-HMS)....100
Figura 71. Testes de qualidade do ajuste entre caudais calculados e simulados (Sinks) – Régua (Excel) 101
Figura 72. Caudais classificados (2006-2025) - Régua (Sinks) (Excel) 101
Figura 73. Análise gráfica entre caudais médios diários observados e simulados em Crestuma-Lever (2005-2025) (Excel)....102
Figura 74. Extrato de análise gráfica entre caudais médios diários observados e simulados em Crestuma-Lever (2012-2016) (Excel)....103
Figura 75. Esquema topológico do modelo, evidenciando a periferia da bacia de Crestuma-Lever (HEC-HMS) 104
Figura 76. Testes de qualidade do ajuste entre caudais observados e simulados – Crestuma (Excel) 104
Figura 77. Análise gráfica entre caudais médios diários calculados e simulados em Crestuma-Lever (2005-2025) (Excel)....106
Figura 78. Testes de qualidade do ajuste entre caudais calculados e simulados – Crestuma (Excel)....106
Figura 79. Testes de qualidade do ajuste entre caudais calculados e simulados (Sinks) – Crestuma (Excel) 108
Figura 80. Caudais classificados em Crestuma-Lever, 2005-2025 (Sinks) (Excel)....109
Figura 81. Interface do Watt Now - Plataforma interna (EDP, 2025)....125

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A	Área da bacia hidrográfica
a	Fator de amortecimento ou coeficiente de ajuste do modelo
b	Fator de ganho associado à resposta hidrológica
Cmd	Caudal médio diário
E	Evaporação da superfície livre da albufeira
ET	Evapotranspiração
GWh	Gigawatt-hora
hm³	Hectómetro cúbico
km²	Quilómetro quadrado
m³/s	Metro cúbico por segundo
MW	Megawatt
NPA	Nível de Pleno Armazenamento
NmE	Nível mínimo de Exploração
P	Precipitação incidente sobre a albufeira ou sobre a bacia
Q	Caudal
Q_{afl}	Caudal afluente
Q_{efl}	Caudal efluente
Q_{obs}	Caudal observado
Q_{sim}	Caudal simulado
R^2	Coeficiente de correlação
S	Fator de escala associado à relação de áreas
T	Valor limiar ou *threshold*
V	Volume armazenado
$\Delta S/\Delta t$	Variação temporal do armazenamento

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler / Perfilador Acústico com Efeito Doppler

AH	Aproveitamento Hidroelétrico
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CADC	Comissão para a Aplicação e Desenvolvimento da Convenção de Albufeira
C3S	Copernicus Climate Change Service
CDS	Climate Data Store
EDP	Energias de Portugal
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA5	Quinta geração de reanálise climática do ECMWF
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rain&Flow	Plataforma de armazenamento e tratamento de dados hidrométricos
GODP	Generation Operation Data Platform
GPinfo	Plataforma de informação de exploração utilizada para dados operacionais dos aproveitamentos
HEC	Hydrologic Engineering Center
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
HEC-Runner	Ferramenta auxiliar utilizada no tratamento e inserção de séries meteorológicas no modelo
IAEA	International Atomic Energy Agency
Iberia01	Dataset regional de precipitação para a Península Ibérica
MMQ	Método dos mínimos quadrados
NSE	Coeficiente de Eficiência de Nash–Sutcliffe
PBIAS	Percent Bias / Viés percentual
RMSE	Root Mean Square Error / Raiz do erro quadrático médio
RSR/ RMSE*STDEV	Rácio entre RMSE e desvio-padrão das observações
SMA	Soil Moisture Accounting
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
USACE	United States Army Corps of Engineers
Watt Now	Plataforma de registo e acompanhamento de visitas e informação operacional de estações
WMO	World Meteorological Organization

1
INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

A água constitui um recurso natural essencial ao equilíbrio ambiental e, como tal, a sua exploração e desenvolvimento socioeconómico deve estar associada à segurança energética, assumindo particular relevância no contexto dos aproveitamentos hidroelétricos. A compreensão dos regimes hidrológicos e a sua adequada caracterização são, por isso, elementos fundamentais no planeamento, dimensionamento e exploração sustentável destes sistemas, sendo determinantes para a avaliação da disponibilidade hídrica, da produtibilidade energética e da resiliência face a condições de variabilidade e mudança [1], [2].

Os regimes de escoamento fluvial apresentam uma natureza intrinsecamente variável, resultante da interação complexa entre fatores climáticos, características fisiográficas das bacias e intervenções humanas [2]. Conforme evidenciado por estudos de longo prazo, as séries temporais de caudais estão longe de ser estacionárias, registando alterações significativas ao longo do tempo, frequentemente associadas tanto à variabilidade climática como a pressões antropogénicas, como alterações no uso do solo, alterações climáticas ou aumento das necessidades hídricas. Esta transitoriedade de eventos meteorológicos coloca desafios acrescidos à modelação hidrológica e obriga ao desenvolvimento de metodologias robustas que permitam interpretar corretamente os sinais presentes nos dados históricos [3].

Neste contexto, a caracterização hidrológica assenta na análise e tratamento de séries históricas de afluências, frequentemente obtidas a partir de redes de monitorização hidrométrica e complementadas por dados meteorológicos [4].

Estes dados constituem a base para a definição de indicadores fundamentais, tais como caudais médios, extremos e regimes sazonais, os quais condicionam diretamente o dimensionamento de infraestruturas hidráulicas, a definição de regimes de exploração e a avaliação de caudais

ecológicos. No âmbito dos aproveitamentos hidroelétricos, estas séries são determinantes para estudos de potencial de produção energética, análise de viabilidade técnico-económica e apoio à decisão na gestão dos ativos.

A evolução histórica da gestão dos recursos hídricos em Portugal reflete uma mudança de paradigma, passando de uma abordagem centrada predominantemente na exploração e aproveitamento dos recursos hídricos para uma visão integrada e sustentável dos recursos. Esta transição implicou a incorporação de dimensões ambientais, sociais e territoriais na gestão da água, privilegiando a abordagem por bacia hidrográfica e a articulação entre diferentes usos e utilizadores. Esta perspetiva integrada é particularmente relevante em sistemas complexos como o rio Douro, onde coexistem múltiplos aproveitamentos hidroelétricos e uma forte interação entre fatores naturais e pressões antrópicas [4].

Adicionalmente, a gestão de sistemas fluviais, em particular em zonas de transição como os estuários, exige a consideração de processos hidrodinâmicos e hidromorfológicos complexos, incluindo fenómenos como intrusão salina, transporte sedimentar e interação com o meio marinho. No caso do estuário do Douro, os instrumentos de ordenamento territorial evidenciam a necessidade de integrar estas componentes na gestão, promovendo simultaneamente a proteção ambiental, a mitigação de riscos, nomeadamente cheias, e a valorização socioeconómica da região ribeirinha [5].

Face a este enquadramento, o desenvolvimento de metodologias de caracterização hidrológica e técnica de aproveitamentos hidroelétricos assume um papel central na engenharia de recursos hídricos. Estas metodologias integram abordagens tradicionais, baseadas em dados observados e relações empíricas, com ferramentas avançadas de modelação hidrológica e climática, permitindo melhorar a precisão das estimativas de afluências, reduzir incertezas e suportar decisões estratégicas em contexto de crescente variabilidade hidrológica.

A presente dissertação foi desenvolvida em ambiente empresarial, no âmbito de um estágio realizado na EDP Produção S.A, integrado nas atividades do Centro de Produção Douro. Neste contexto, o trabalho surge da necessidade de caracterizar e melhorar o conhecimento das afluências aos aproveitamentos hidroelétricos da cascata do Douro, contribuindo para o apoio à análise hidrológica, à exploração dos aproveitamentos e à avaliação de cenários de suporte à tomada de decisão. A estreita ligação ao contexto operacional permitiu enquadrar o trabalho em problemas reais de engenharia, assegurando simultaneamente a sua relevância prática e científica.

Este trabalho tem como objetivo a análise e desenvolvimento de metodologias aplicadas à caracterização hidrológica de um conjunto de aproveitamentos hidroelétricos, com base na integração de dados históricos, métodos de cálculo de afluências e ferramentas de modelação. Pretende-se, desta forma, contribuir para a melhoria da fiabilidade das estimativas hidrológicas e para a otimização da gestão de sistemas hidroelétricos, num contexto de crescente exigência técnica e ambiental.

1.2 Objetivos do Trabalho

O presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento e a aplicação de metodologias de caracterização hidrológica e técnica de aproveitamentos hidroelétricos, com foco na melhoria da estimativa de afluências e no suporte à gestão eficiente dos recursos hídricos. De forma mais específica, pretende-se: analisar a importância dos dados hidrometeorológicos na caracterização de regimes hidrológicos; caracterizar as redes de monitorização hidrometeorológica e a sua aplicação em contexto de exploração hidroelétrica; estudar e aplicar o método tradicionalmente utilizado na estimação de afluências, baseado no balanço hídrico e na utilização de dados hidrometeorológicos; explorar metodologias alternativas de cálculo de afluências através da modelação hidrológica; identificar as limitações associadas às duas metodologias; aplicar as metodologias estudadas em três casos de estudo da bacia do Douro; e comparar diferentes abordagens de cálculo de afluências, evidenciando vantagens, limitações e aplicabilidade em contexto operacional.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, complementados por referências bibliográficas e anexos. A estrutura adotada procura assegurar uma progressão lógica entre o enquadramento teórico, a caracterização do caso de estudo, a apresentação das metodologias aplicadas e a discussão crítica dos resultados obtidos.

O Capítulo 1 introduz o tema da dissertação, enquadrando a relevância da caracterização hidrológica e técnica de aproveitamentos hidroelétricos no contexto da gestão de recursos hídricos e da exploração hidroenergética. Neste capítulo são apresentados a motivação do trabalho, os objetivos gerais e específicos e a organização global do documento.

O Capítulo 2 apresenta o estado da arte, abordando os principais conceitos associados à

caracterização hidrológica e à estimativa de afluências. São ainda discutidos aspetos relacionados com o balanço hídrico em aproveitamentos hidroelétricos, a incerteza associada à estimativa de caudais e os parâmetros técnicos fundamentais para a caracterização de albufeiras e centrais hidroelétricas.

O Capítulo 3 corresponde à descrição do caso de estudo, centrado na bacia hidrográfica do Douro e na sua cascata hidroelétrica. Neste capítulo é apresentada a caracterização geral da bacia, o enquadramento da cascata do Douro e a descrição técnica dos aproveitamentos selecionados para análise, nomeadamente Vilar-Tabuaço, Régua e Crestuma-Lever.

O Capítulo 4 descreve as metodologias de cálculo de afluências consideradas no trabalho. São apresentadas, por um lado, as bases conceptuais e operacionais do método tradicional, assente em dados hidrometeorológicos, dados de exploração dos aproveitamentos hidroelétricos, e, por outro, a estrutura do modelo hidrológico desenvolvido em HEC-HMS, incluindo as fontes de dados, os procedimentos de modelação. Adicionalmente, neste capítulo, são apresentadas as principais vantagens e limitações de cada abordagem.

O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos. Inicialmente são analisadas as metodologias tradicionalmente utilizadas pela EDP na estimativa dos caudais afluentes aplicadas a cada aproveitamento, seguindo-se a avaliação dos resultados obtidos por aplicação do modelo hidrológico.

Efetua-se ainda a comparação entre caudais observados, calculados pela via tradicional e simulados por modelação hidrológica. Esta análise é suportada por indicadores estatísticos de desempenho, bem como por interpretação gráfica e hidrológica dos resultados.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as principais conclusões da dissertação, bem como propostas de desenvolvimento futuro decorrentes dos resultados obtidos e das limitações identificadas.

2
ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta os principais conceitos teóricos que suportam a caracterização hidrológica e a estimativa de afluências em aproveitamentos hidroelétricos. Inicialmente são abordados os princípios de monitorização hidrológica e aquisição de dados, seguindo-se a análise das séries temporais e dos métodos de estimação de afluências. Por fim, são apresentados os principais parâmetros técnicos associados aos aproveitamentos hidroelétricos e à sua exploração.

2.1 Aquisição e Validação de Dados para Estimativa de Afluências

A gestão dos recursos hídricos e a exploração de aproveitamentos hidroelétricos dependem do conhecimento adequado do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas. Esta caracterização assenta na análise de séries históricas representativas, capazes de refletir a variabilidade natural dos regimes de escoamento e de incluir diferentes condições hidrológicas, desde períodos de seca até eventos de cheia. Neste contexto, a hidrometeorologia assume um papel fundamental, através da monitorização de níveis e caudais e da produção dos dados que suportam a caracterização hidrológica, a estimativa de afluências e a gestão dos recursos hídricos [6].

Na atualidade, é de grande importância o contexto da gestão de recursos hídricos, impulsionado pelas crescentes pressões e preocupações ambientais devidas a uma maior expectativa de captação futura. Dada a vital importância da água, são inegociáveis estratégias de planeamento e do seu uso sustentável.

Antes de qualquer imposição de estratégia deve zelar-se pela gestão adequada e eficiente dos recursos hídricos disponíveis. Assim, é imprescindível conhecer os cursos de água e seus aspetos característicos, como a sua sazonalidade, o regime de vazões e eventuais registos de

pluviosidade das bacias nas quais os mesmos se integram, no espaço e no tempo. Esta exigência implica um trabalho contínuo de recolha, calibração e interpretação de dados. A fiabilidade desta análise depende diretamente da extensão das séries históricas disponíveis. Quanto mais longo for o período de monitorização, idealmente abrangendo várias décadas, maior será a representatividade estatística da amostra, pois permite capturar a variabilidade natural do sistema hidrológico, incluindo a ocorrência de eventos extremos indispensáveis à análise, como períodos de seca severa e de cheias prolongadas, dado o contexto atual de alterações climáticas. Ainda que o estudo não contemple projeções climáticas específicas, a extensão temporal dos registos permite mitigar incertezas e captar com maior fidelidade a dinâmica e a variabilidade histórica de eventos.

A hidrometria é a ciência responsável pela medição e análise do recurso água. Para tal, utilizam-se métodos e técnicas de instrumentação. No seu âmbito, destaca-se a fluviometria, disciplina focada na monitorização contínua de níveis hídricos e consequente determinação de caudais em sistemas fluviais. Estes dados são essenciais para a caracterização hidrológica, o planeamento e gestão de recursos hídricos e o apoio à conceção e exploração de infraestruturas hidráulicas. A sua monitorização contínua suporta a gestão estratégica e sustentável dos recursos hídricos e o planeamento dos diferentes usos da água, garantindo a articulação entre as reservas disponíveis e as necessidades da população [6].

No contexto da produção de energia, o conhecimento detalhado do regime hidrológico é indispensável para otimizar a operação das albufeiras. Estes dados fornecem aos gestores a capacidade de antecipar a disponibilidade hídrica, permitindo planear a exploração dos aproveitamentos hidroelétricos de forma a maximizar a sua rentabilidade e a eficiência na gestão do recurso. Conclui-se, assim, que as séries históricas de afluências médias diárias desempenham um papel transversal. A sua relevância não se esgota nos estudos de base para apoio à decisão de investimento inicial; pelo contrário, a sua importância acompanha todo o ciclo de vida do aproveitamento hidroelétrico, desde os estudos preliminares e fase de projeto, passando pela operação contínua, até ao seu eventual descomissionamento [7].

2.1.1 Redes de Monitorização Hidrometeorológica em Portugal

A transição de um conceito teórico para a quantificação prática e física em hidrologia requer a implementação de infraestruturas no campo, nomeadamente estações meteorológicas e hidrométricas. As primeiras são fundamentais para a monitorização contínua de variáveis climáticas que incidem sobre a bacia vertente, com especial destaque para a precipitação. Por

sua vez, as estações hidrométricas funcionam como pontos de observação posicionados em secções transversais estratégicas dos cursos de água, estando equipadas com instrumentos para a medição contínua de níveis hidrométricos, cotas e caudais.

A nível de território nacional português, a gestão, manutenção e processamento de dados hidrometeorológicos é assegurada por entidades do setor público e do setor privado, que desempenham papéis complementares na aquisição e disponibilidade de dados.

No âmbito privado distinguem-se as diversas empresas concessionárias dos aproveitamentos hidroelétricos distribuídos pela geografia nacional, dada a importância das suas redes de monitorização próprias.

2.1.1.1 A Rede Pública (SNIRH)

No âmbito público, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) é responsável pela gestão institucional da rede hidrométrica nacional. A informação recolhida pelas redes de monitorização da APA, assim como de outras entidades regionais, como os arquipélagos dos Açores e da Madeira, é centralizada, processada, validada e divulgada através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) [8].

O SNIRH tem como missão essencial manter e desenvolver a estrutura tecnológica necessária à disponibilização pública de dados de natureza hidrometeorológica, de qualidade da água, ecológica ou ambiental, possibilitando, assim, o conhecimento sobre as águas nacionais. Através deste portal informático, o SNIRH centraliza e disponibiliza informação relevante para a caracterização dos recursos hídricos, o suporte à gestão da água e a monitorização de fenómenos extremos, como cheias e secas. A disponibilização de séries históricas de acesso livre constitui, deste modo, uma fonte de referência para a realização de estudos hidrológicos e para o desenvolvimento de projetos no domínio dos recursos hídricos.

Além disso, o sistema oferece suporte técnico especializado a uma vasta comunidade de utilizadores, incluindo universidades, consultores, entidades judiciais e órgãos da Comissão Europeia, e disponibiliza informação e cooperação técnica a países de língua oficial portuguesa.

Face à relevância da rede pública, a APA assegura a monitorização de diversas secções nodais estratégicas, cuja distribuição espacial, integrando estações meteorológicas e hidrométricas, se encontra ilustrada na Figura 1.



Figura 1. Distribuição geográfica das estações meteorológicas e hidrométricas (SNIRH, 2025)

2.1.1.2 A Rede Privada de Exploração Hidroelétrica

Para além da rede pública, existem redes privadas de monitorização hidrometeorológica. Entre estas destaca-se a rede da EDP Produção S.A, dada a sua relevância para o presente trabalho. Nesse contexto, a entidade de acolhimento possui e gere uma rede hidrometeorológica, desenvolvida para assegurar a disponibilização de informação hidrológica e meteorológica fiável, constituindo um suporte fundamental às diferentes fases do ciclo de vida dos aproveitamentos hidroelétricos, desde os estudos e projetos iniciais até à sua exploração e gestão operacional. Esta rede de sensores garante a transmissão em intervalos diários, onde estes mesmos são recolhidos, transmitidos e integrados em sistemas corporativos de armazenamento, tratamento e validação de informação hidrometeorológica [9].

A distribuição espacial das estações meteorológicas e hidrométricas da rede de monitorização da EDP encontra-se representada na Figura 2, evidenciando a abrangência territorial da infraestrutura e a sua importância para o acompanhamento hidrometeorológico das bacias hidrográficas onde se inserem os principais aproveitamentos hidroelétricos da empresa.

A relevância da rede de monitorização da EDP evidencia-se também na sua capacidade de integração com o sistema nacional. Assim, a utilização conjunta de dados provenientes das

redes pública (APA/SNIRH) e privada permite complementar a informação disponível para a caracterização hidrológica das bacias, constituindo um importante suporte à estimativa de afluências e à calibração e validação de modelos hidrológicos.

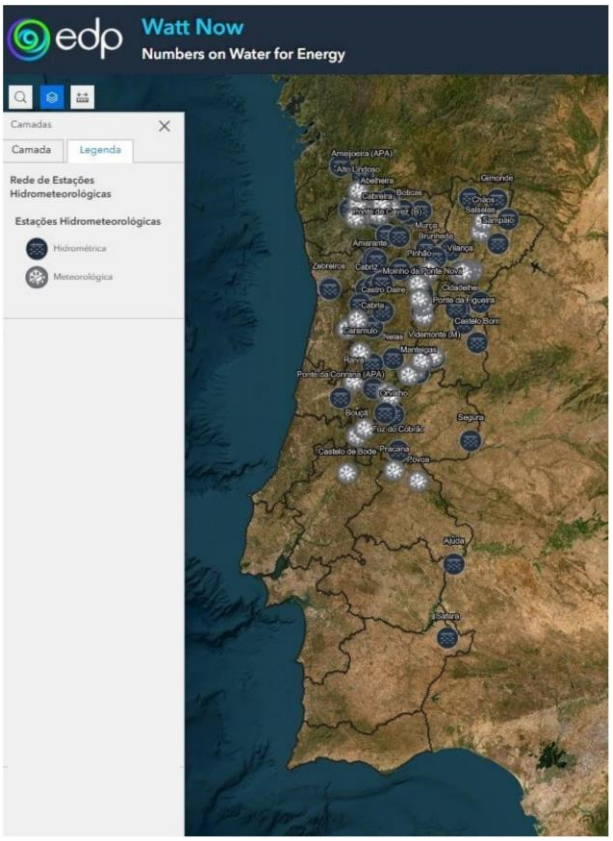


Figura 2. Distribuição geográfica das estações meteorológicas e hidrométricas (*Watt Now*, 2025)

A evolução histórica da rede e os principais marcos associados ao seu desenvolvimento apresentam-se no Anexo A.1.

2.1.2 Variáveis hidrológicas

2.1.2.1 Critérios de Localização de Estações Hidrométricas

É de extrema importância que se articulem os conceitos práticos e físicos da hidrologia na decisão da localização das estações hidrométricas, aplicáveis tanto ao setor público como ao privado, dada a necessidade de recolha de dados que retratem fielmente as condições naturais do escoamento. A definição espacial destas estações é planeada de modo estratégico, com a finalidade de garantir uma cobertura representativa da bacia hidrográfica em estudo [10].

Como primeiro passo, deve identificar-se uma secção do curso de água que assegure a obtenção de resultados fidedignos continuamente.

Numa fase preliminar são avaliados vários possíveis locais com base no estudo da bacia, de modo a selecionar os troços mais adequados.

A caracterização das condições físicas da região hidrográfica, como a sua forma e área, características inseridas no estudo da fisiografia, é feita através de material topográfico, mapas, fotografias aéreas ou imagens de satélite.

A variabilidade dos regimes naturais e a consequente alteração da dinâmica fluvial sugerem que, mesmo após a seleção de um local, este permanece sujeito a reavaliações periódicas. Tendo isto em consideração, devem-se escolher locais onde as margens do rio sejam resistentes à erosão de preferência, e em locais de leito fixo, para que as eventuais mudanças sazonais não alterem a relação da curva de vazão. Os trechos retos, como o troço representado por *Q section* na Figura 3, são bons candidatos à localização de uma estação hidrométrica. São valorizadas margens bem definidas, altas e estáveis.

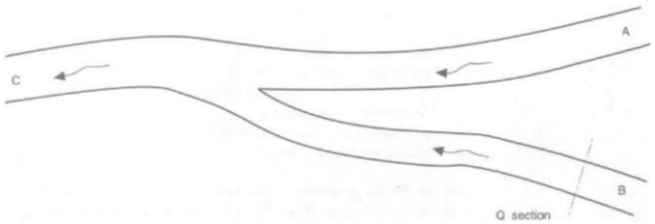


Figura 3. Confluência e localização adequada de uma secção de medição (W. Boiten, 2000)

Para que os dados recolhidos traduzam o comportamento hidrológico real, deve evitar-se a implementação de estações em zonas de confluências ou sujeitas a efeitos de regolfo variável, ou seja provocado por controlos de jusante [11].

De igual modo, devem ser evitadas zonas assoreadas ou de águas estagnadas, uma vez que a acumulação de sedimentos altera a geometria da secção e as velocidades reduzidas dificultam a medição dos caudais. Importa ressalvar que a proximidade a açudes apenas deve ser evitada se as estruturas não estiverem bem caracterizadas. Pelo contrário, a presença de controlos hidráulicos artificiais, como açudes de medida, revela-se frequentemente vantajosa para estabilizar a secção, garantindo uma relação mais estável entre o nível e o caudal.

Adicionalmente, devem ter-se em conta as condições de acesso ao local, de modo a garantir que as operações de manutenção e calibração sejam realizadas em segurança, mesmo em situações de cheia. Um acesso fácil permite ainda assegurar a regularidade das visitas técnicas, essencial para a continuidade e qualidade dos registos.

2.1.2.2 Medição de Níveis Hidrométricos

A determinação dos níveis de água baseia-se na conjugação de medições diretas e indiretas. Enquanto as metodologias diretas, como a leitura visual em réguas limnimétricas, fornecem um referencial físico absoluto e indispensável para a calibração no local, os métodos indiretos recorrem à instrumentação tecnológica, como sensores de pressão ou radares, permitindo a aquisição contínua de dados e a sua transmissão em tempo real. A sinergia e a redundância geradas por ambas as abordagens são fundamentais para mitigar a incerteza inerente aos dados hidrológicos, garantindo a validação cruzada da informação que suportará as fases subsequentes do estudo, nomeadamente a construção das curvas de vazão e a estimativa de caudais [12].

2.1.2.2.1 Método de Leitura Direta

Os métodos diretos de medição de nível consistem na utilização de instrumentos de leitura direta pela observação visual imediata do nível da superfície da água pelo operador no local, não exigindo a interposição de mecanismos de conversão. O aparelho de medição representativo deste género clássico e até mais utilizado, de natureza analógica, denomina-se escala hidrométrica ou régua limnimétrica, visível na Figura 4. Este tipo de aparelho consiste numa régua graduada em centímetros, normalmente posicionada nas encostas do leito do rio.

Para garantir a qualidade da medição, estas réguas são frequentemente instaladas em conjuntos escalonados a diferentes cotas. Esta disposição traduz-se na capacidade de abranger várias alturas de água, permitindo que o nível seja mensurado de forma contínua, tanto em condições de estiagem como de cheia, acompanhando a flutuação dos diferentes níveis [10], [13].

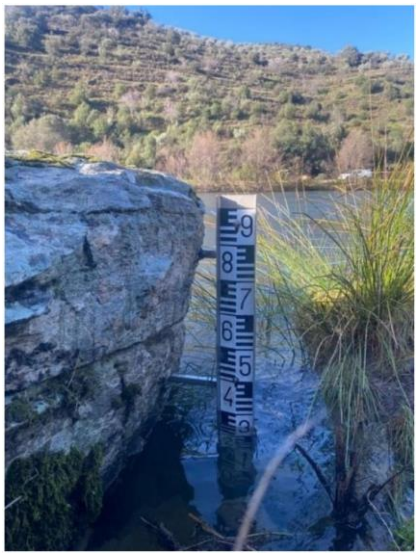


Figura 4. Escala vertical - Estação Hidrométrica de Sampaio, Ribeira de Sampaio

O zero da escala deve ser localizado de modo que não se verifiquem leituras negativas e, sempre que possível, referenciado ao nivelamento geral nacional, para uma maior coerência. O acesso às escalas deve ser fácil e de boa visibilidade, facilitando assim o acesso aos operadores.

Atualmente, no âmbito da empresa EDP Produção S.A., embora a crescente automatização das redes de monitorização, as escalas são utilizadas como instrumento de medição complementar, tendo um papel relevante de aferição visual de segurança e corretivo dos aparelhos dos métodos de leitura indireta.

As visitas de manutenção que permitem aferir o nível da água em estações hidrométricas são, presentemente, efetuadas por um prestador de serviços que regista os dados de aferição numa plataforma própria da empresa, o *Watt Now*. Nesta plataforma, as estações podem ser identificadas não só através da sua nomenclatura, mas também através da sua localização espacial, o que facilita a consulta e o planeamento das visitas. Para cada intervenção encontram-se disponíveis aspetos descritivos do estado do local, como a necessidade ou não de desmatação das zonas de acesso, a realização da limpeza da escala e o nível de água registado. Estas informações são complementadas por registos fotográficos, que permitem documentar as condições observadas e servir de memória futura em caso de esclarecimento necessário. Deste modo, o histórico das visitas constitui um apoio relevante à validação dos dados registados automaticamente.

2.1.2.2.2 Método de Leitura Indireta

Nos métodos de leitura indireta, o nível da água não é observado diretamente pelo operador. Em vez disso, a sua variação é determinada através da medição de uma grandeza física intermédia, como o deslocamento mecânico, a pressão hidrostática ou o tempo de propagação de um sinal, recorrendo à instrumentação específica. Dada a variedade tecnológica disponível, os principais equipamentos de medição indireta abordados nesta secção incluem os limnígrafos clássicos de flutuador, sensores de pressão e os sensores por radar [14].

O limnímetro de flutuador, também denominado limnígrafo clássico, visível na Figura 5, é um dos instrumentos tradicionais mais utilizados. Este equipamento baseia-se num sistema de boia-contrapeso, que acompanha mecanicamente o deslocamento vertical da superfície da água. Trata-se de um mecanismo que regista as oscilações do nível de forma gráfica e contínua em papel (registo analógico) ou através de um codificador digital, que converte o movimento mecânico em dados eletrónicos [15].

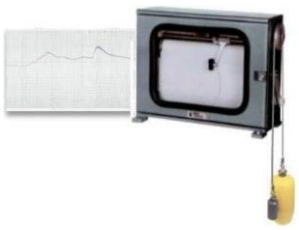


Figura 5. Limnígrafo e limnigrama (EDP, 2021)

O limnímetro clássico, ilustrado na Figura 6, trata-se de um sistema puramente mecânico que regista as oscilações do nível da água através de forma gráfica contínua, em papel, de forma analógica ou através de um codificador digital que traduz a variação do nível em dados eletrónicos [15].

São, maioritariamente, instalados em infraestruturas de abastecimento de água ou em instalações portuárias. Especificamente, no âmbito do presente estudo, destacam-se aqueles instalados em barragens ou no interior de poços estabilizadores, usados para atenuar a ondulação que poderá estar associada ao local da medição.

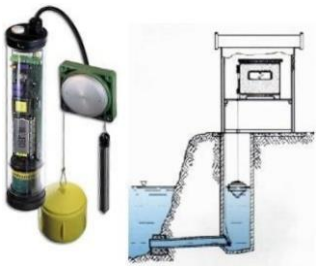


Figura 6. Sistema de boia e contrapeso (EDP, 2021)

Para que as oscilações de nível sejam captadas pela boia ou flutuador, que repousa sob a superfície da água, é indispensável a ação de um contrapeso. Este elemento garante que o cabo de interligação entre a boia e o contrapeso se mantenha sob tensão contínua, permitindo que o sistema acompanhe as variações de nível com precisão. Adicionalmente, o cabo de interligação tem a função de converter o movimento linear ascendente e descendente numa rotação mecânica através da roldana do sistema de transmissão.

Para estabelecer a distinção entre os métodos de registo, importa referir que o sistema analógico, ou clássico, utiliza uma pena para transcrever as oscilações do nível da água para um papel milimétrico (limnigrama), acoplado a um tambor rotativo movido por relojoaria de precisão. Atualmente, e tal como previamente referido, este mecanismo atua em conjunto com um sistema digital para otimizar o armazenamento e a integração de dados.

A principal vantagem desta configuração é a redundância obtida pelo registo simultâneo no limnígrafo analógico e no *datalogger* digital [15]. Este último adquire e armazena localmente as medições para posterior transmissão telemétrica a partir da própria estação, conforme ilustra a Figura 7. Esta digitalização permite reduzir significativamente o trabalho de conversão de dados, já que as medições são enviadas automaticamente via modem para os servidores, alimentando a plataforma interna *Rain&Flow*.



Figura 7. Sistema de telemetria - Estação Hidrométrica de Safara, Rio Ardila

As sondas de pressão, como a ilustrada na Figura 8, determinam indiretamente o nível hídrico recorrendo ao princípio da pressão hidrostática, segundo o qual a pressão exercida num ponto submerso é proporcional à altura da coluna de água acima desse ponto. Estes instrumentos de medição dividem-se essencialmente em duas categorias: sondas piezoresistivas e sondas de pressão de ar.

O funcionamento das sondas piezoresistivas exige a instalação do transdutor no leito do curso de água, garantindo a sua submersão permanente, mesmo em períodos de estiagem. O equipamento integra uma membrana que, sob o efeito da pressão exercida pela coluna de água, induz uma deformação mecânica no elemento piezoresistivo interno. Esta deformação altera as propriedades elétricas do material, gerando um sinal elétrico analógico, sob a forma de tensão ou corrente, diretamente proporcional à altura da massa líquida. Este sinal é subsequentemente transmitido ao sistema de aquisição de dados, onde é convertido em nível e armazenado para posterior análise.

No caso das sondas de pressão de ar, promove-se a injeção contínua de ar comprimido através de um tubo submerso, instalado a uma cota previamente definida [15].



Figura 8. Sonda de pressão (EDP, 2021)

A pressão necessária para expulsar uma bolha de gás na extremidade do tubo é equivalente à pressão hidrostática exercida pela coluna de água nesse exato ponto. Esta pressão é lida pelo transdutor, que a converte no respetivo nível hídrico.

Transitando para tecnologias de medição sem contacto, destaca-se a utilização de sistemas de radar. Este tipo de equipamento funciona através da emissão de ondas eletromagnéticas em direção à superfície da água, calculando o nível do reservatório com base no tempo de reflexão do sinal. A título de exemplo da aplicação prática desta tecnologia, importa referir que a EDP instalou recentemente um equipamento radar na estação da Abelheira.

2.1.2.3 Medição de Caudais

A determinação de caudais em canais abertos é um dos processos mais críticos para a obtenção de curvas de vazão. A qualidade dos caudais medidos condiciona diretamente a fiabilidade dos dados utilizados em estudos hidrológicos e na calibração de modelos. Este processo pressupõe a escolha de metodologias, tipologias e abordagens distintas aplicadas em campo, para uma melhor análise das características hidromorfológicas do troço, uma vez que a precisão dos resultados está intrinsecamente relacionada com o sucesso do método aplicado [16].

A medição direta de caudais baseia-se geralmente na determinação da velocidade do escoamento em diferentes pontos da secção transversal do rio, combinada com a respetiva geometria.

Os principais equipamentos existentes para a medição de velocidades de rios são:

- Molinete Hidráulico;
- Sensor Eletromagnético;
- Perfilador Acústico com Efeito Doppler (ADCP);

No âmbito do presente estudo, o foco restringe-se aos três instrumentos de medição apresentados, dado que ainda se mantêm presentes na prática de campo.

A seleção do equipamento de medição é estritamente condicionada pelas características locais e condições de escoamento. Os molinetes hidráulicos mantêm-se como o método convencional de medição de velocidades em rios.

Já os sensores eletromagnéticos destacam-se em secções com elevada concentração de sedimentos ou vegetação, pois a ausência de elementos móveis previne problemas de obstrução. Atualmente, os ADCP são amplamente utilizados pela rapidez de execução e por permitirem a medição simultânea de velocidades e profundidades, gerando uma elevada densidade de informação. Contudo, a sua viabilidade decresce significativamente em contextos de reduzida profundidade ou de caudais muito baixos, cenários em que a preferência recai sobre métodos mais apropriados a essas condições, como o molinete ou o sensor eletromagnético.

2.1.2.3.1 Molinete Hidráulico: Método Convencional Tradicional

O molinete hidráulico, ilustrado na Figura 9, trata-se de um instrumento destinado a medir mecanicamente a velocidade da água num dado ponto de um curso. Este equipamento traduz a energia cinética que passa por uma dada secção do rio em movimento mecânico de rotação. A velocidade média da corrente nesse ponto é obtida em função do número de rotações por segundo induzidas na hélice, ou num sistema análogo [17], [18].

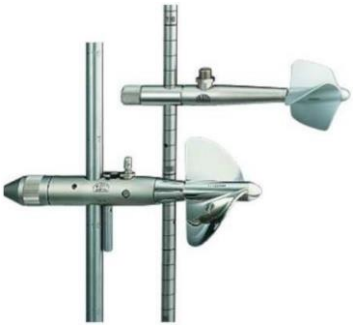


Figura 9. Molinete hidráulico (VVA Industrial, 2025)

Com o intuito de determinar a velocidade do fluido, o aparelho é colocado num determinado ponto e é contado, com o aparelho submerso, o número de rotações da hélice, durante um período pré-estabelecido ou então é contabilizado o tempo que demora a atingir um determinado número de rotações. A velocidade é obtida através da tabela de calibração do aparelho ou pela equação de calibração. Atualmente, o aparelho já dispõe de um circuito elétrico que permite o envio de sinais luminosos ou acústicos ao operador, que correspondem a um determinado número de rotações, ou então a um contador, conjugado com um cronómetro dotado de sistema registador. A credibilidade destes equipamentos é suportada por um longo e fiável histórico de medições.

2.1.2.3.2 Sensor Eletromagnético

Como alternativa ao equipamento mais tradicional, a EDP Produção S.A. utiliza este equipamento que permite a medição pontual de velocidades, segundo princípios da lei da física da tipologia clássica. A vantagem do sensor eletromagnético, Figura 10, relaciona-se com uma maior capacidade de medição em ambientes com muita matéria orgânica, uma vez que a presença de detritos pode obstruir a hélice do molinete tradicional, inviabilizando uma medição fidedigna [18].



Figura 10. Sensor eletromagnético (Ott, 2025)

O sensor é independente de parâmetros como a temperatura e salinidade, o que torna este equipamento apropriado para medições de corrente em rios com ervas em crescimento, grande concentração de sedimentos e águas rasas.

A digitalização por detrás deste equipamento passa pela ligação a um computador portátil para que se possam modelar os diagramas de corrente. O princípio de funcionamento do sensor eletromagnético baseia-se na lei de Faraday da indução eletromagnética, sendo a velocidade do escoamento inferida a partir da diferença de potencial induzida pelo movimento de um fluido condutor através de um campo magnético.

De acordo com a documentação técnica e operacional da rede hidrometeorológica da EDP Produção S.A., este tipo de sensor apresenta vantagens significativas relativamente aos molinetes hidráulicos tradicionais, nomeadamente por não possuir partes móveis, o que elimina erros associados à fricção mecânica, desgaste e obstrução por matéria sólida ou vegetação.

Esta característica torna o equipamento particularmente adequado para utilização em cursos de água com elevada carga de sedimentos ou crescimento de macrófitas, contextos nos quais os métodos convencionais podem apresentar limitações na fiabilidade das medições.

No contexto das campanhas de medição de caudal realizadas pela EDP, este equipamento é frequentemente integrado no método velocidade-área, sendo as medições de velocidade efetuadas em múltiplas verticais ao longo da secção transversal, conforme recomendações normas internacionais, permitindo assim a estimativa do caudal com elevada precisão.

2.1.2.3.3 Perfilador Acústico com Efeito Doppler: ADCP

Como alternativa, e para melhoria da qualidade de medição de caudais, surge o Perfilador Acústico com Efeito Doppler, conhecido como ADCP, conforme a Figura 11.



Figura 11. Perfilador acústico com efeito doppler (TELEDYNE, 2025)

Trata-se de um aparelho de medição contínua de caudais, baseado no efeito Doppler para a medição de velocidades e profundidades, permitindo a construção computacional da batimetria do leito do rio. O perfilador é acoplado a um barco, do tipo catamaran ou trimaran, como se demonstra na Figura 12.

Na prática, no âmbito do trabalho de campo, fazer uma medição de caudal utilizando um ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) exige alguma precisão tanto na montagem física como na calibração. Antes de se colocar o aparelho na água, deve assegurar-se de que a comunicação entre o sensor e o computador portátil se encontra estável. Para estipular esta mesma comunicação entre aparelhos, conectam-se através de via Bluetooth e cabo RS232/USB, referente à Figura 13, [18] [19].



Figura 12. ADCP instalado num trimaran em configuração de transporte



Figura 13. Dispositivo de comunicação sem fios utilizado na ligação entre o ADCP e o software

Para que se garanta um bom funcionamento do equipamento, deve proceder-se à sua calibração. Este processo consiste em rodar o equipamento, ainda fora de água, enquanto procedimento prévio obrigatório à medição, de modo que se evitem erros de orientação associados a interferências direcionais. Assim, o sistema identifica e corrige erros magnéticos internos, normalmente associados à geolocalização.

Caso não exista informação histórica fiável sobre o comportamento da secção, deve realizar-se um teste de leito móvel, referente à Figura 14, [18].

O cenário ideal corresponde a leito não móvel, isto é, à ausência de transporte significativo do material de fundo do rio. A verificação desta condição é essencial uma vez que a existência de leito móvel pode conduzir à subestimação da velocidade da corrente e, consequentemente, do caudal, na medida em que o equipamento pode intercetar incorretamente a velocidade do barco, relativamente ao fundo. Em caso de leito móvel, o equipamento disponibilizado pela empresa, através do software auxiliar, executa as eventuais correções necessárias para que haja a distinção entre as partículas que se movem e a posição relativa da embarcação. Em situação de leito fixo, o ponto inicial e final de medição são coincidentes, ou pelo menos muito próximos, o que constitui uma verificação prática adicional da qualidade do ensaio.

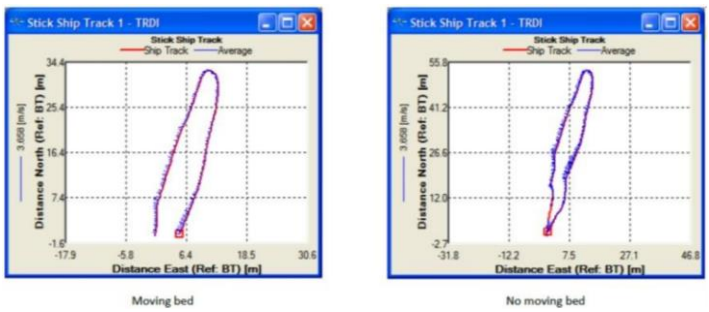


Figura 14. Distinção entre leito móvel e leito fixo (EDP, 2022)

Ao colocar o equipamento à superfície da água, é importante ter em conta que a proa do barco está voltada a montante, favorecendo um melhor desempenho do equipamento, dada a sua forma adaptada. O aparelho deve ser deslocado ao longo da secção do curso de água através de uma corda suspensa. Uma das formas de instalação inicial desta linha é por lançamento balístico, recorrendo a um dispositivo lança-cabos pneumático, ilustrado na Figura 15, que utiliza a libertação súbita de ar comprimido, nomeadamente pequenos cilindros de CO_2, para projetar a corda para a margem oposta, permitindo assim a passagem do equipamento de uma margem para a outra.



Figura 15. Dispositivo lança-cabos pneumático

À medida que o equipamento se move, mede a velocidade da corrente e do próprio sistema flutuante. Esta grandeza é medida através do efeito *Doppler*, *shifts* de pulsos acústicos refletidos a partir do leito, designados por *pings*. Estes pulsos interagem com as partículas e regressam ao sensor, sendo a diferença de frequência utilizada para calcular a velocidade da corrente [20].

Segundo a metodologia do software, deve introduzir-se a distância à margem e explicitar qual das margens o aparelho se encontra. Dado o início da medição, deve verificar-se se o número de verticais medidas é superior a 10 e se verificam menos de 25% de feixes ruins, para que o gráfico da transversal mostre uma secção com fundo bem definido e com qualidade. Só assim se poderá proceder com a passagem do barco de uma margem à outra.

A passagem do aparelho não deve ser nem apressada nem lenta, dado que uma das condições para que se verifique o sucesso da medição é que a velocidade do barco deve ser inferior à da corrente. Devem efetuar-se, pelo menos, quatro passagens entre margens. Em trabalho de campo, deve adotar-se uma perspetiva mais sensível e analisar-se qual o caudal medido nas

diversas passagens e efetuar as necessárias para que se chegue a um conjunto coerente e tecnicamente representativo de medições. Na aplicação desta técnica, a obtenção do perfil completo de velocidades, Figura 16, encontra limitações físicas nas fronteiras do escoamento, não sendo possível medir em toda a coluna de água.

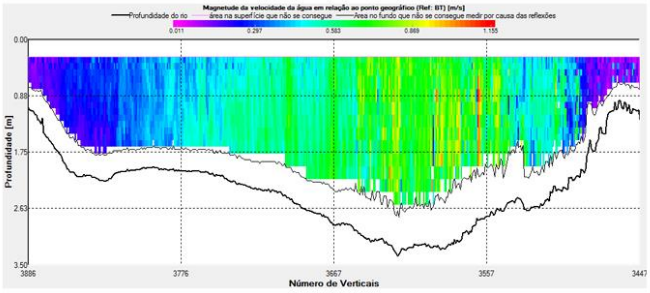


Figura 16. Perfil de velocidades (EDP, 2025)

Imediatamente abaixo do transdutor ocorre a denominada distância em branco (*blanking distance*), Figura 17. Esta zona cega superficial justifica-se pelo tempo necessário para que as vibrações mecânicas do equipamento se atenuem após a emissão dos pulsos acústicos, viabilizando a transição para o modo de receção [21], [22].

Por sua vez, a medição na proximidade do leito é condicionada pela interferência dos lóbulos laterais (*side-lobe interference*), também visível na Figura 17. Nesta região, o forte eco acústico refletido pelo fundo mascara o sinal, significativamente mais fraco, proveniente das partículas em suspensão, impedindo o sensor de avaliar as velocidades com precisão. Consequentemente, o escoamento nestas zonas não medidas (superfície e fundo) tem de ser estimado através de algoritmos de extrapolação implementados no software de processamento [22].

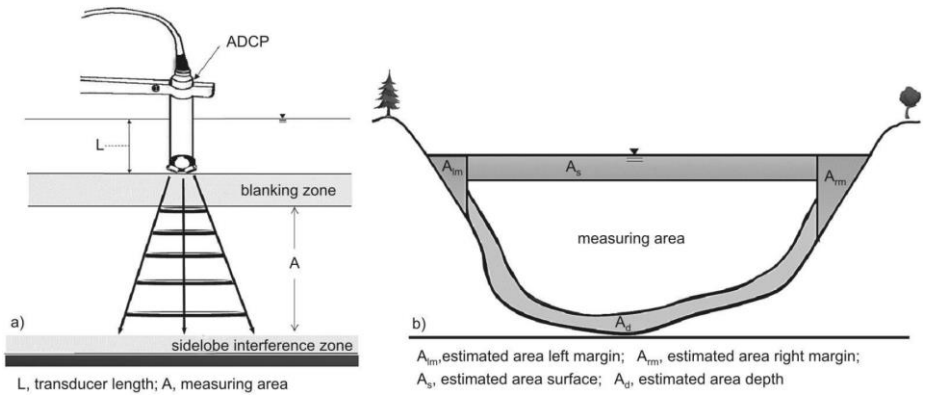


Figura 17. Esquema das zonas cegas do ADCP (a) e áreas estimadas por extrapolação (b) (Priego-Hernandez et al. (2019)).

2.1.2.4 Curvas de Vazão

A curva de vazão, expressa a relação entre a altura de nível numa determinada secção e o caudal escoado correspondente. A partir da realização de medições isoladas é possível relacionar os caudais com os níveis de água medidos. A fiabilidade desta curva depende intrinsecamente do sucesso das campanhas de medição de campo.

Na Figura 18 apresenta-se um exemplo típico de curva de vazão. Para a obtenção de uma curva de vazão são necessárias várias medições para diferentes condições hidrológicas. Estas podem ser categorizadas como não estáticas e podem necessitar de atualização ao longo do tempo. Assim, a validade de uma curva de vazão depende da estabilidade da secção de medição e da representatividade das campanhas realizadas, sendo necessária à sua atualização sempre que ocorram alterações significativas das condições hidráulicas ou morfológicas do curso de água. Entre essas alterações destacam-se, por exemplo, modificações do leito, deposição ou erosão de sedimentos, crescimento de vegetação, influência de estruturas hidráulicas ou alterações das condições de escoamento [23].

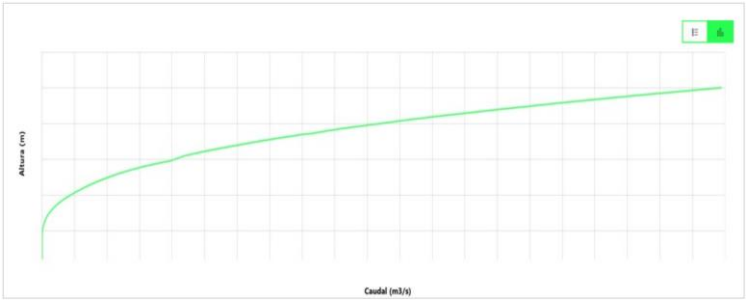


Figura 18. Curva de vazão tipo (*Rain&Flow*, 2025)

Através desta relação, torna-se possível converter registos contínuos de nível em séries temporais de caudal, indispensáveis para a estimativa de afluências e calibração e validação de modelos hidrológicos. Os caudais estimados a partir destas curvas encontram diversas aplicações no contexto da gestão dos recursos hídricos e da exploração hidroelétrica. Entre estas, incluem-se o acompanhamento das afluências aos aproveitamentos, a gestão das albufeiras, a verificação do cumprimento de caudais ecológicos e o apoio à tomada de decisão em situações hidrológicas excecionais, como secas ou cheias.

Consequentemente, a fiabilidade das estimativas de caudal depende diretamente da qualidade da curva de vazão utilizada. A realização periódica de medições de controlo e a atualização da relação nível-caudal são fundamentais para reduzir as incertezas associadas aos resultados obtidos.

2.1.3 Variáveis Meteorológicas

As variáveis meteorológicas constituem um dos principais fatores de controlo dos processos hidrológicos que ocorrem numa bacia hidrográfica, influenciando diretamente a disponibilidade, circulação e armazenamento da água no sistema. Entre as variáveis mais relevantes destacam-se a precipitação, a temperatura e a evaporação, cuja interação condiciona o balanço hídrico e a resposta hidrológica das bacias hidrográficas [24].

A precipitação representa a principal entrada de água no sistema hidrológico, influenciando diretamente os processos de infiltração, armazenamento, escoamento superficial e recarga subterrânea. A sua distribuição espacial e temporal constitui um dos fatores mais determinantes na variabilidade dos caudais observados, assumindo um papel fundamental na ocorrência de eventos extremos, como cheias e secas. Em consequência, a precipitação é geralmente considerada a variável meteorológica com maior influência na modelação hidrológica e na estimação de disponibilidades hídricas [25].

A temperatura desempenha igualmente um papel relevante no ciclo hidrológico, influenciando diversos processos físicos responsáveis pelas transferências de água e energia entre a superfície terrestre e a atmosfera. As variações de temperatura afetam a intensidade dos processos de evaporação, a dinâmica da humidade do solo e, consequentemente, a disponibilidade de água nas diferentes componentes do sistema hidrológico. Adicionalmente, a temperatura apresenta uma forte variabilidade sazonal, contribuindo para as flutuações observadas nos regimes hidrológicos ao longo do ano [25].

A evaporação corresponde ao processo de transformação da água do estado líquido para o estado gasoso, promovendo a sua transferência para a atmosfera. Este fenómeno ocorre em superfícies livres de água, zonas húmidas e superfícies de solo expostas, sendo influenciado por fatores como a temperatura, a radiação solar, a humidade atmosférica e o vento. A evaporação representa uma das principais perdas de água do sistema e condicionando a quantidade de água disponível para armazenamento, infiltração e geração de escoamento [26]. A interação entre precipitação, temperatura e evaporação determina, em larga medida, o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas. Enquanto a precipitação controla as entradas de água no sistema, a temperatura e a evaporação condicionam os mecanismos de perda e redistribuição da água armazenada. A correta caracterização destas variáveis é essencial para a compreensão dos processos hidrológicos e para o desenvolvimento de estudos de gestão de recursos hídricos, previsão hidrológica e modelação de afluências [27].

2.1.4 Incerteza Associada a Dados Hidrométricos e Medição de Caudais

A utilização de dados hidrológicos e meteorológicos está inevitavelmente associada a diferentes fontes de incerteza, cuja compreensão é fundamental para a interpretação dos resultados obtidos na estimativa de afluências e na modelação hidrológica.

Estas incertezas podem resultar dos processos de medição, das limitações dos equipamentos utilizados e da própria representatividade espacial e temporal dos dados recolhidos.

A determinação de caudais está associada a uma incerteza, cuja quantificação é vital para o estudo de afluências e eventual modelação hidrológica. A incerteza total na medição consiste na combinação de algumas vertentes, nomeadamente:

- Incerteza associada aos dados meteorológicos: resultante de erros de medição, falhas de registo e limitações da representatividade espacial das estações meteorológicas. Particularmente no caso da precipitação, a variabilidade espacial pode dificultar a caracterização das condições médias de uma bacia hidrográfica influenciando os resultados da modelação hidrológica;
- Incerteza instrumental: associada à precisão, resolução, calibração e manutenção dos instrumentos de monitorização, incluindo sensores de nível e meteorológicos, bem como equipamentos de medição de caudal;
- Incerteza associada às medições de caudal: decorrente das limitações dos métodos utilizados, das condições hidráulicas observadas durante as campanhas de campo, da definição, da geometria, da secção e das simplificações inerentes ao cálculo do caudal a partir de medições pontuais ou perfis de velocidade;
- Incerteza associada ao processo e validação de dados: associados a procedimentos de controlo de qualidade, preenchimento de falhas e seleção de métodos de tratamento às séries temporais.

2.2 Séries Temporais Hidrológicas e Determinação de Afluências

2.2.1 Séries Históricas e Tratamento de Dados Hidrológicos

Para a modelação de afluências, estudam-se séries históricas de níveis e caudais de rios, a fim de, por meio da transposição com dados meteorológicos, se caracterizar o comportamento dinâmico de uma bacia hidrográfica ao longo do tempo. Este processo permite estabelecer relações entre variáveis hidrológicas e meteorológicas, nomeadamente precipitação, evapotranspiração e temperatura, sendo fundamental para a compreensão dos mecanismos de

geração de escoamento e da resposta hidrológica da bacia [28]. O tratamento e o arquivo deste tipo de dados não consistem apenas num detalhe de boas práticas administrativas, mas sim num conjunto de dados científicos fundamentais para a caracterização do regime hidrológico, quantificação e eventual previsão de afluências, por meio de modelação, a fim de apoiar futuras decisões a longo prazo.

O conhecimento da frequência e magnitude de eventos é vital para identificar padrões de sazonalidade e eventos extremos nos diferentes regimes, servindo como fundamentação de decisões necessárias relativas à gestão de albufeiras. Neste contexto, as séries temporais hidrológicas assumem um papel central na gestão de recursos hídricos, uma vez que constituem a base de dados essencial para a calibração e validação de modelos hidrológicos, permitindo simular diferentes cenários hidrológicos e apoiar a gestão operacional e estratégica dos sistemas hídricos. Para além disso, a informação proveniente de séries históricas permite a estimação do comportamento hidrológico em bacias vizinhas ou semelhantes. Esta abordagem, frequentemente designada por regionalização hidrológica, revela-se particularmente relevante em bacias com escassez de dados, permitindo transferir conhecimento entre sistemas hidrologicamente comparáveis e reduzir a incerteza associada às estimativas de afluências.

Adicionalmente, importa salientar que a qualidade das séries históricas desempenha um papel determinante na fiabilidade das análises realizadas, sendo fundamental assegurar processos rigorosos de validação, correção de falhas e homogeneização de dados, de forma a evitar a propagação de erros nos modelos aplicados.

Por fim, num contexto de crescente variabilidade climática e pressão sobre os recursos hídricos, a análise de séries temporais assume uma importância acrescida, na medida em que permite identificar tendências de longo prazo, avaliar alterações no regime hidrológico e apoiar estratégias de adaptação e mitigação face a eventos extremos.

2.2.2 Balanço Hídrico em Aproveitamentos Hidroelétricos

O planeamento e a exploração de aproveitamentos hidroelétricos assentam, fundamentalmente, na aplicação do princípio de conservação do balanço hídrico. No contexto de aproveitamentos hidroelétricos, segundo os conceitos da conservação da massa, permite obter uma relação quantitativa entre os volumes de água afluentes e efluentes e, indiretamente, entre armazenados num determinado intervalo temporal, [29].

Este estudo quantitativo do balanço serve não só para se perceber os recursos hídricos disponíveis, mas também para se definirem estratégias que envolvem a exploração de albufeiras, conciliando a produção energética com a segurança hidráulica.

Num aproveitamento hidroelétrico, a albufeira desempenha tanto as funções de armazenamento de água como de regularização de caudais.

A variabilidade sazonal e temporal das afluências está associada, naturalmente, à diversidade de eventos hidrometeorológicos ao longo do tempo, o que, com um maior detalhe na análise do balanço hídrico resulta num maior apoio de sistemas de modelação e simulação de modelos [29], [30].

Através da Equação 2.1, a dinâmica de enchimento e vazamento da albufeira é traduzida pela taxa de variação temporal do volume de água armazenado na albufeira ao longo do tempo, sendo as afluências totais (RI) compostas pelos escoamentos superficiais naturais provenientes da bacia em estudo e, em caso de sistemas de aproveitamentos hidroelétricos em cascata, pelos caudais descarregados pelos aproveitamentos a montante, bem como por eventuais caudais bombados de jusante para montante, no caso de centrais com bombagem reversível.

Os caudais efluentes traduzem as quantidades de água extraídas da albufeira, como o caudal turbinado, destinado à energia elétrica, os caudais descarregados, em caso de episódios hidrológicos extremos, e o caudal ecológico, necessário para que não se prejudiquem as condições ambientais e os habitats de espécies a jusante.

A última parcela da expressão matemática encerra em si o culminar de gestão do aproveitamento em si, resultando de um processo contínuo e otimizado das entidades gestoras.

$$\frac{dS}{dt} = RI + P - E - Q_{out} \tag{2.1}$$

Onde:

- $\frac{dS}{dt}$ é a variação do armazenamento de água no tempo;
- RI representa o volume afluente da bacia em estudo (*inflow*);
- P é a precipitação sobre a albufeira;
- E representa a parcela correspondente à evaporação da superfície livre;
- Q_{out}corresponde aos caudais efluentes associados.

Esta fórmula pode ser traduzida, equivalentemente, através de um esquema ilustrativo, referente à Figura 19, [30].

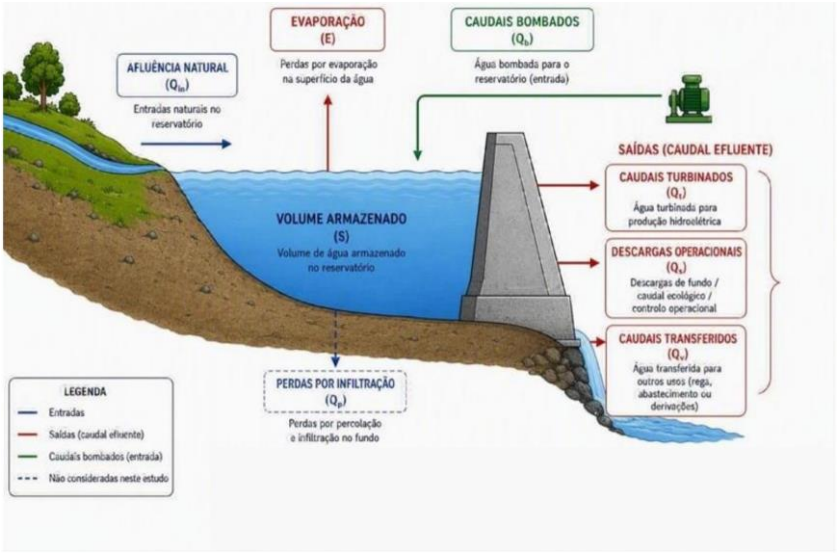


Figura 19. Balanço hídrico (Adaptado de Lima (s.d.), 2025)

2.2.3 Enquadramento Metodológico

A determinação de afluências a aproveitamentos hidroelétricos pode ser suportada por diversas abordagens metodológicas, cuja escolha depende da disponibilidade de dados, da confiança no método, praticidade e objetivos do estudo. De forma geral, estas abordagens incluem metodologias baseadas em observações hidrológicas, modelação hidrológica, métodos estatísticos, técnicas de regionalização e, mais recentemente, metodologias suportadas por aprendizagem automática.

No contexto operacional da EDP Produção S.A, a estimativa de afluências tem sido tradicionalmente efetuada através de uma metodologia baseada em observações hidrológicas, recorrendo a registos hidrometeorológicos, dados de exploração dos aproveitamentos e princípios de balanço hídrico.

Por constituir a abordagem historicamente utilizada pela empresa, esta metodologia é designada internamente por Método Tradicional. Importa, contudo, clarificar que esta designação corresponde a uma terminologia utilizada no contexto operacional da entidade de acolhimento e não a uma classificação metodológica universal, dado que os modelos precipitação-escoamento constituem igualmente abordagens amplamente consolidadas na literatura hidrológica, sendo consideradas também clássicas. Neste contexto, o presente

trabalho centra-se na análise de duas metodologias, uma delas prática histórica e outra em desenvolvimento: o Método Tradicional, baseado em observações hidrológicas e a Modelação Hidrológica, baseada em modelos precipitação-escoamento.

2.2.4 Incerteza Associada à Estimativa de Afluências

A acentuada variabilidade espacial e temporal das afluências, intrinsecamente associada à natureza estocástica dos eventos hidrometeorológicos, exige, assim, uma caracterização detalhada do balanço hídrico, a qual consubstancia a base de dados primária para alimentar e calibrar sistemas avançados de modelação e simulação operacional.

O reconhecimento da existência de incerteza assume um grande papel no planeamento e gestão de recursos hídricos, uma vez que o rigor do balanço hídrico de um aproveitamento hidroelétrico está condicionado à qualidade dos dados de entrada. Esta incerteza manifesta-se em diversas escalas, desde a instrumentação pontual até à modelação distribuída da bacia hidrográfica, exigindo um escrutínio técnico aprofundado para garantir a fiabilidade operacional.

No plano hidrométrico, a determinação de caudais a partir de registos contínuos de nível padece de erros inerentes à natureza dinâmica das secções de controlo e à complexidade da hidráulica fluvial. Uma das grandes dificuldades reside na obtenção de uma curva de vazão estável e fidedigna, sendo que o erro associado a esta relação é frequentemente a componente dominante no erro total do caudal calculado. A necessidade de extrapolação analítica para níveis de cheia, em que as medições físicas diretas são escassas ou inexistentes, introduz desvios quantitativos substanciais que podem comprometer o fecho da equação da continuidade na albufeira. Acresce ainda, a esta complexidade, uma limitação estritamente operacional, resultante das insuficientes campanhas regulares de medição direta de caudais. Dado que a construção, calibração e atualização de curvas de vazão exigem medições regulares *in situ*, com alguma regularidade, para que se permita acompanhar as alterações morfológicas do leito. A monitorização em periodicidade ideal é limitada pela disponibilidade de recursos humanos e logísticos. Complementarmente, a gestão de sistemas hídricos em bacias de grande escala lida com a problemática recorrente das zonas não monitorizadas. A contribuição das sub-bacias sem instrumentação hidrométrica pode representar uma parcela significativa do balanço total.

A incerteza propaga-se ainda através da resolução temporal e espacial dos processos hidráulicos no sistema hídrico. A representação fiel do comportamento de um sistema de grande escala exige uma integração rigorosa entre a hidrologia e a hidráulica, sublinhando que a incerteza na

calibração de modelos hidrodinâmicos afeta diretamente a precisão com que os volumes afluentes são integrados e distribuídos no tempo. A dinâmica das zonas de inundação e a retenção hídrica nas albufeiras introduzem fenómenos de amortecimento e atraso nos hidrogramas que, se não forem corretamente quantificados, geram discrepâncias sistemáticas no balanço de massas global.

Em última análise, a aglomeração destas fontes de incerteza obriga a que a afluência calculada deixe de ser encarada como um valor determinístico absoluto e passe a ser validada através de processos de controlo de qualidade e modelações independentes. Esta abordagem permite mitigar o erro e garantir que as decisões de gestão do parque hidroelétrico assentam em pressupostos analíticos de elevada resiliência e rigor científico.

2.3 Caracterização Técnica e Operacional de Aproveitamentos Hidroelétricos

2.3.1 Parâmetros Fundamentais: Cotas, Volumes e Potência Instalada

A caracterização de aproveitamentos hidroelétricos assenta num conjunto de parâmetros hidráulicos e operacionais que definem as condições do seu funcionamento, baseando-se na capacidade de armazenamento, na regularização de caudais e, numa perspetiva de negócio, na produção de energia elétrica.

As cotas de exploração definem os diferentes níveis operacionais da albufeira. O Nível de Pleno Armazenamento, conhecido como NPA, corresponde ao nível máximo de água de exploração do reservatório, [31]. Por sua vez, o Nível Mínimo de Exploração, NmE, estabelece o limite inferior para o funcionamento eficiente das turbinas, de modo que se garantam as condições hidráulicas favoráveis e adequadas para a produção energética, normalmente relacionadas com a queda. Em situações hidrológicas extremas, a cota de máxima cheia define o Nível Máximo de Cheia (NMC) durante eventos meteorológicos excecionais, assegurando a segurança estrutural do paramento da barragem e de todos os órgãos associados [31].

Associados às cotas encontram-se, naturalmente, diferentes volumes característicos do reservatório. O volume total representa a capacidade máxima de armazenamento da albufeira, enquanto o útil corresponde à parcela de água mobilizável para fins de exploração hidroelétrica, abastecimento ou regularização hidrológica.

O volume morto, localizado abaixo da tomada de água, corresponde à fração não utilizável em condições normais de exploração e desempenha frequentemente um papel importante na

retenção de sedimentos. Em muitos sistemas hidroelétricos, considera-se ainda o volume de regularização, associado à capacidade do reservatório para compensar variações temporais das afluências naturais, permitindo uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos ao longo do tempo.

A relação entre as afluências e os volumes armazenados assume particular relevância na exploração de reservatórios. Em períodos de elevada precipitação e aumento dos caudais afluentes, o reservatório tende a acumular volumes significativos de água, se tiver volume de encaixe disponível, ou seja, caso o reservatório se encontre a cotas mais baixas de armazenamento, promove-se o enchimento da albufeira, aumentando a disponibilidade hídrica para efeitos de turbinamentos. Em contrapartida, durante períodos de estiagem, normalmente em períodos de verão, os volumes armazenados permitem assegurar a continuidade da produção energética e a satisfação das necessidades ambientais e operacionais a jusante, desde que a albufeira se encontre a cotas mais elevadas. Desta forma, o reservatório funciona como um mecanismo de regularização hidrológica, reduzindo a variabilidade natural dos caudais fluviais.

A medição dos caudais afluentes é normalmente realizada através de estações hidrométricas equipadas com limnígrafos, sensores de pressão ou radares de superfície, permitindo o registo contínuo dos níveis de água e a posterior conversão em caudal através de curvas de vazão previamente calibradas. Estes dados são fundamentais para a previsão hidrológica, para a gestão de cheias e para a otimização da exploração energética do sistema. A monitorização contínua das afluências constitui um elemento essencial para a gestão eficiente dos aproveitamentos hidroelétricos.

2.3.2 Curvas de Capacidade das Albufeiras

As curvas de capacidade constituem instrumentos fundamentais na análise e gestão de albufeiras, permitindo estabelecer relações funcionais entre a cota da superfície livre, o volume armazenado e a área inundada [32]. Estas relações são indispensáveis para a caracterização do sistema, para efeitos de simulação do comportamento hidrológico do reservatório e definição das estratégias de exploração do aproveitamento hidroelétrico.

As curvas cota–volume e cota–área são normalmente obtidas a partir de levantamentos topográficos e batimétricos realizados antes do enchimento da albufeira. A integração das curvas hipsométricas do vale inundado permite determinar, para cada cota de exploração, o volume acumulado e a correspondente superfície inundada. A interpretação das curvas de

capacidade assume particular importância na avaliação da resposta da albufeira às afluências naturais. A variação da cota da albufeira ao longo do tempo reflete diretamente alterações no volume armazenado, permitindo inferir os processos de enchimento e esvaziamento do sistema.

No contexto da medição de caudais, as curvas de capacidade desempenham um papel essencial na determinação indireta das afluências. Quando combinadas com registos temporais dos níveis da albufeira e dos caudais descarregados, estas curvas permitem calcular a variação do volume armazenado durante um determinado intervalo temporal [32].

Consequentemente, é possível estimar os caudais afluentes através da aplicação da equação da continuidade, constituindo uma ferramenta particularmente relevante em sistemas onde a monitorização direta dos escoamentos é limitada.

As curvas de capacidade assumem igualmente grande relevância na gestão operacional dos reservatórios hidroelétricos. Através destas relações é possível avaliar a disponibilidade hídrica associada a diferentes cotas de exploração, estimar volumes úteis remanescentes e apoiar a tomada de decisão em situações de cheia ou de seca prolongada. Em cenários de elevada afluência, a análise da capacidade disponível no reservatório permite antecipar descargas necessárias para garantir a segurança hidráulica da barragem. Em períodos de escassez hídrica, estas curvas auxiliam na definição de estratégias de utilização racional da água armazenada.

Outro aspeto relevante prende-se com a evolução sedimentar das albufeiras, mais até de uma vertente de interesse geológico. A deposição progressiva de sedimentos no fundo da albufeira conduz à redução gradual da capacidade útil de armazenamento, alterando as relações cota–volume inicialmente definidas [33].

Este fenómeno pode comprometer a eficiência hidráulica e energética do aproveitamento, tornando necessária a atualização periódica das curvas de capacidade através de novos levantamentos batimétricos. Adicionalmente, a área inundada associada a cada cota de exploração influencia diretamente as perdas por evaporação verificadas na superfície livre da albufeira.

Assim, as curvas cota–área assumem também relevância na quantificação das perdas hídricas e na análise do balanço hídrico global do sistema, particularmente em regiões sujeitas a elevadas temperaturas e forte radiação solar.

Em síntese, as curvas de capacidade constituem ferramentas indispensáveis para a caracterização hidráulica, hidrológica e operacional dos reservatórios hidroelétricos.

A sua utilização permite compreender a dinâmica de armazenamento da albufeira, apoiar a gestão das afluências e otimizar a exploração energética e hidráulica dos sistemas de aproveitamento hídrico.

2.3.3 O sistema Valoragua e Estimativas de Produção

O sistema Valoragua, [34] é uma poderosa ferramenta de suporte à otimização da operação de sistemas eletroprodutores. Do ponto de vista teórico, esta plataforma interna baseia-se na formulação da operação dos aproveitamentos, refletindo uma necessidade de considerar simultaneamente a inconstância da procura de energia e disponibilidade de recursos.

O modelo foca-se na possível representação de cenários futuros, ao longo do período de horizonte em estudo, onde a principal funcionalidade do sistema baseia-se na determinação de políticas de operação que minimizem o custo global do sistema eletroprodutor, admitindo assim as normas de segurança das infraestruturas, na medida em que a água armazenada nos reservatórios possa representar um recurso de poder energético e capacidade de regulação de caudais, tanto em regime de seca quanto de cheia. No contexto desta estimativa problemática encontra-se a caracterização das afluências, a qual impõe a utilização de ferramentas analíticas baseadas em séries temporais hidrológicas.

Pretende-se, com este sistema, estabelecer o equilíbrio ótimo entre o consumo, a produção de energia e regulação de recursos hídricos de modo que seja possível ter um plano otimizado e delineado para decisões de turbinamentos, de acordo com os critérios de eficiência.

Para que se trace o caminho ótimo, são ponderados vários cenários de afluências, provenientes estes de séries históricas ou sintéticas, possibilitando diversas estimativas de produção elétrica e identificação de indicadores de risco, como condições hidrológicas ainda adversas ou a frequência de défice de precipitação, levando a secas extremas.

Este modelo não só atenta para uma representação detalhada de barragens em cascata, mas também para a rede elétrica e as unidades de produção de energia térmica, com vistas ao balanço energético [34]. Para além do mais, a decisão de gestão de recursos hídricos e potência firme da rede considera o interesse económico de produção de outras alternativas energéticas, dada a vulnerabilidade associada à incerteza da perspetiva futura da meteorologia e dos padrões climáticos.

A entrada natural de caudais nas albufeiras consiste na variável mais crítica a estimar quando se planeia o setor. É importante uma estimativa consideravelmente equilibrada, uma vez que

uma sobrestimação pode pôr em causa uma rotura de abastecimento elétrico, em casos extremos, ou, por outro lado, a libertação desnecessária de água que poderia ser turbinada pode gerar um prejuízo financeiro. A previsibilidade de volumes associada ao rigor na quantificação das afluências assume um papel basilar uma vez que dita importantes decisões.

3
CASO DE ESTUDO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO DOURO

O rio Douro, rio internacional, é caracterizado pela sua difícil leitura de escoamento, ora sereno, ora turbulento. Desde a sua nascente até à foz percorre cerca de 900 quilómetros através de relevos e vales acidentados, associados a climas e ecossistemas de transição entre as influências atlântica e mediterrânica. Esta diversidade geomorfológica e climática traduz-se numa resposta hidrológica altamente variável ao longo do curso do rio, com forte influência da altitude, da litologia e da distribuição espacial da precipitação, [35].

A dimensão da sua rede hidrográfica, ilustrada na Figura 20, traduz-se numa área de drenagem total de aproximadamente 97700 km². A sua natureza transfronteiriça é evidenciada pela assimetria territorial da bacia, onde cerca de 81% da área se encontra em Espanha, ocupando grande parte da Meseta Ibérica, e apenas os restantes 19% se desenvolvem em território português. Esta configuração implica que a grande maioria dos volumes afluentes que chegam a Portugal depende intrinsecamente do regime pluviométrico e da gestão de recursos hídricos efetuada a montante, no país vizinho. Esta dependência introduz um fator adicional de complexidade na gestão hidroelétrica nacional, uma vez que os caudais afluentes são fortemente condicionados por decisões operacionais externas, nomeadamente descargas em barragens espanholas e regimes de regularização a montante [35].

Ao longo do seu percurso, o caudal do rio aumenta significativamente, dados os inúmeros afluentes que nele desaguam, formando assim a maior bacia hidrográfica da Península Ibérica. Rio transfronteiriço, alimenta-se, maioritariamente, em território espanhol pelo Pisuerga, Valderaduey e o Esla, admitindo a margem direita.

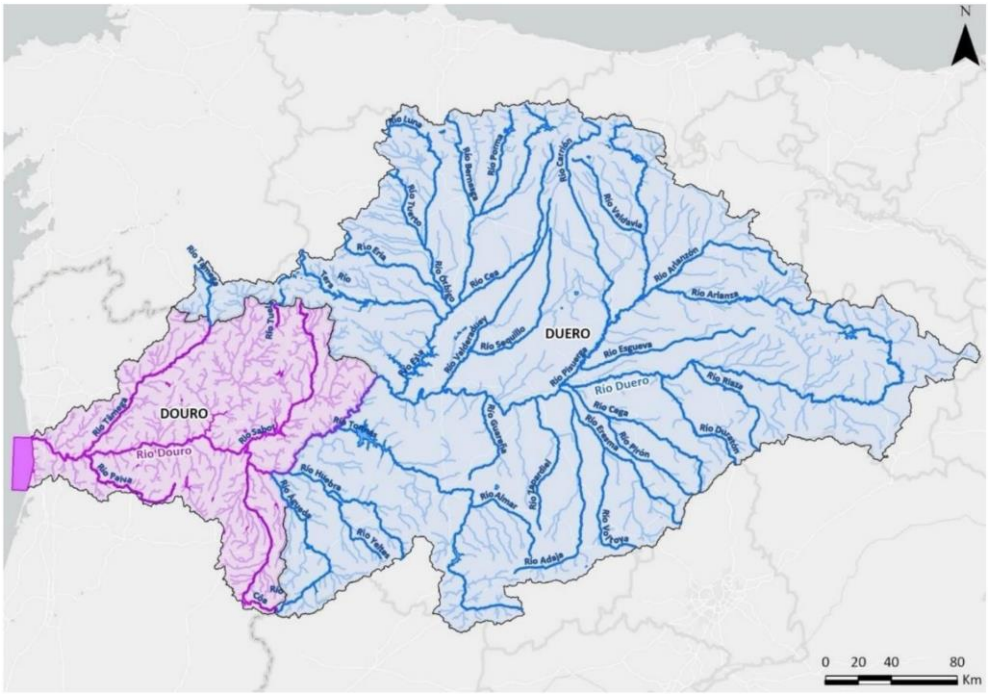


Figura 20. Rede hidrográfica internacional do Douro (CADC, 2025)

Numa margem oposta e ainda em território vizinho, destacam-se o Adaja e Cega. Em troço fronteiriço, recebe os rios Tormes, o Huebra e Águeda. Estes contributos afluentes são determinantes para o regime hidrológico do Douro, influenciando significativamente o volume e a variabilidade dos caudais, em particular durante episódios de precipitação intensa na Meseta.

No Douro nacional, destacam-se, segundo a perspetiva espacial, os cursos à direita: Sabor, Tua, Corgo, Tâmega e Sousa, enquanto, do outro lado, as grandes fontes de alimento se destacam pelas afluências do Côa, Távora, Varosa e Paiva. A contribuição destes afluentes nacionais é particularmente relevante para a regularização dos caudais em períodos de estiagem, contribuindo para a sustentabilidade do sistema hidroelétrico em regime de exploração contínua [35].

Na última metade do século XX, o rio foi regularizado pela construção de barragens e formação de albufeiras que, para além de permitirem uma melhor navegabilidade do rio, tanto em termos comerciais como turísticos, permitem ainda a produção elétrica e o controlo de caudais do rio. Ainda assim, nos invernos mais chuvosos, continuam a verificar-se inundações nas suas margens [36].

A característica determinante, numa perspetiva do setor energético, é a orografia da bacia envolvente do rio em questão. Do ponto de vista da engenharia, esta topografia acidentada representa um potencial hidroelétrico de exceção. A capacidade natural de converter a enorme

energia potencial da água em energia cinética motivou, na primeira metade do século XX, estudos profundos para o aproveitamento integral do rio. Este esforço conjunto culminou num acordo diplomático e técnico, o Tratado Luso-Espanhol de 1927, que regulou a partilha internacional do desnível do rio e lançou as bases para a construção de um dos mais notáveis sistemas de geração de energia da Europa.

Este enquadramento institucional permitiu uma exploração coordenada dos recursos hídricos, garantindo uma utilização eficiente do potencial energético e evitando conflitos entre os dois países na gestão do rio [36].

3.2 Cascata do Douro e Aproveitamentos Hidroelétricos da EDP

3.2.1 Enquadramento da Cascata do Douro

Para compreender a verdadeira dimensão do que historicamente e politicamente se designou por Saltos do Douro, é necessário cruzar a geografia com a diplomacia.

Geograficamente, após percorrer a extensa e elevada planície da Meseta Ibérica, o rio atinge a fronteira, deparando-se com a necessidade de descer drasticamente de altitude num curto espaço de terreno. Esta topografia gerou um desnível vertiginoso que coincide exatamente com a linha de fronteira. Este desnível longitudinal constitui o principal fator responsável pela elevada capacidade de produção hidroelétrica, permitindo a instalação de aproveitamentos com grande queda útil e elevada eficiência energética.

Para assegurar uma gestão partilhada e eficiente, estabeleceu-se um acordo diplomático que determinou a divisão territorial da exploração no troço internacional do rio Douro, visando a maximização da produção hidroelétrica.

Neste contexto, a exploração dos aproveitamentos hidroelétricos foi dividida de forma equitativa entre os dois países. Portugal assegurou o direito de exploração da metade a montante, onde construiu as barragens de Miranda, Picote e Bemposta, enquanto Espanha assumiu a exploração exclusiva da metade a jusante, edificando as barragens de Castro, Aldeadávila e Saucelle, tal como ilustrado na Figura 21.

Esta divisão evitou a sobreposição de interesses, lançando as bases para um dos mais notáveis sistemas de geração de energia da Europa.

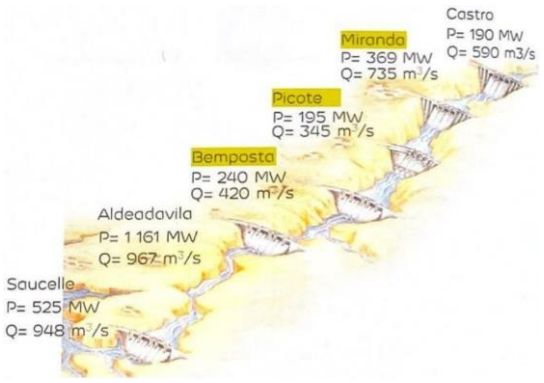


Figura 21. Cascata do Douro Internacional (EDP, 2017)

A distribuição espacial da bacia do Douro e dos principais aproveitamentos hidroelétricos que a integram encontra-se representada na Figura 22, permitindo visualizar a organização territorial do sistema hidroelétrico e compreender a lógica de exploração em cascata que caracteriza este rio.

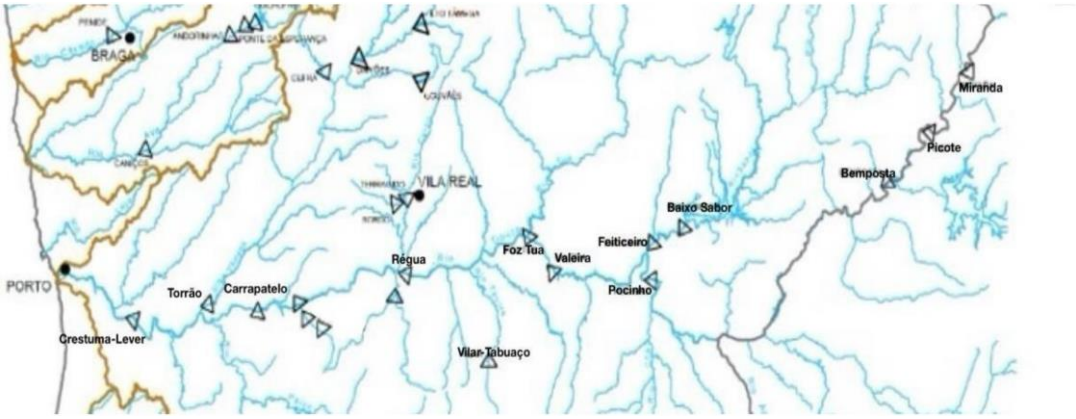


Figura 22. Bacia do Douro (Adaptado: EDP, 2014)

A intervenção humana transformou os imponentes Saltos do Douro num sofisticado sistema de albufeiras em cascata, mitigando a turbulência natural do rio em prol do armazenamento e controlo de caudais. Este conceito de exploração em cascata permite que os caudais turbinados a montante sejam reaproveitados a jusante, maximizando a eficiência global do sistema hidroelétrico e garantindo uma gestão integrada dos volumes de água.

No Douro nacional, a cascata inclui as barragens do Pocinho, Valeira, Régua, Carrapatelo e, próximo à foz, Crestuma-Lever. A disposição sequencial destes aproveitamentos permite não só a produção de energia elétrica de forma contínua, mas também o controlo eficaz dos níveis de água ao longo do rio, viabilizando a navegação, controlo de cheias e gestão de caudais ecológicos.

3.2.2 Caracterização Técnica dos Ativos

No contexto da bacia hidrográfica do Douro, embora o estudo das afluências tenha sido realizado para os locais de todos os aproveitamentos hidroelétricos, importa detalhar a análise individual de alguns ativos específicos. Neste sentido, a seleção dos aproveitamentos de Vilar-Tabuaço, Régua e Crestuma-Lever para esta caracterização técnica não se prende apenas com fatores físicos, mas justifica-se fundamentalmente pelas diferenças metodológicas inerentes ao cálculo das afluências em cada um destes locais. Estes três casos permitem ilustrar os diferentes desafios de cálculo e abordagens exigidos por realidades distintas: um aproveitamento implantado num afluente da margem esquerda do Douro, com forte componente de armazenamento e grande queda; um aproveitamento do curso principal, integrado no troço nacional do rio e fortemente articulado com a navegabilidade; e, por último, o escalão terminal do sistema, que já se inscreve no troço flúvio-marítimo e assume um papel de regulação final antes da foz.

3.2.2.1 Aproveitamento Hidroelétrico de Vilar-Tabuaço

O aproveitamento hidroelétrico de Vilar-Tabuaço, ilustrado na Figura 23, localiza-se no rio Távora, afluente da margem esquerda do Douro, integrando-se, portanto, num curso secundário do rio, mas pertencente ao conjunto de aproveitamentos que complementam o sistema hidroelétrico da bacia [37].

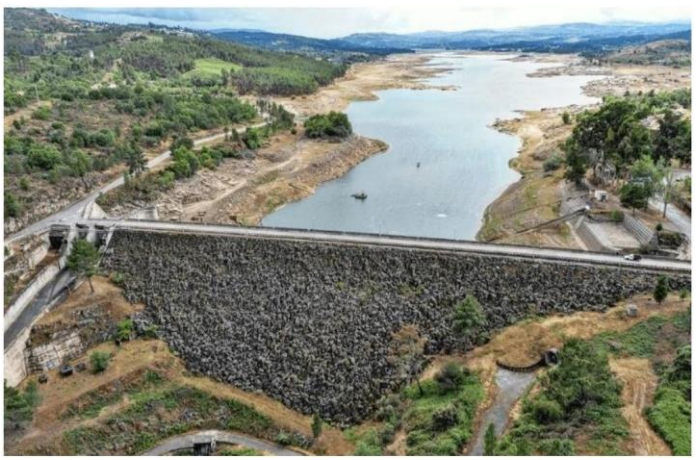


Figura 23. Barragem e albufeira de Vilar-Tabuaço (Rio Távora)

Trata-se de um esquema de derivação com significativa capacidade de armazenamento, cuja bacia hidrográfica domina uma área de aproximadamente 359 km². Este aproveitamento apresenta uma particularidade dado que, a barragem no rio Távora, localiza-se na freguesia de Vilar, concelho de Moimenta da Beira, e refere expressamente que a central de Tabuaço se

localiza no concelho homónimo, o que evidencia a separação física entre a barragem, a albufeira e o centro produtor. A Figura 24 ilustra a localização relativa destes principais elementos do aproveitamento, evidenciando a distância existente entre a barragem de Vilar e a central de Tabuaço.



Figura 24. Localização da central e barragem/albufeira de Vilar-Tabuaço (Fonte: Google Maps)

Do ponto de vista da configuração física, trata-se de um aproveitamento constituído essencialmente por uma barragem de enrocamento, dotada de descarregador de superfície junto ao encontro da margem direita, e por um circuito hidráulico em derivação de grande desenvolvimento.

A barragem de Vilar entrou em serviço em 1965 e a albufeira associada caracteriza-se por um Nível de Pleno Armazenamento de 552 m, ao qual corresponde uma capacidade útil de 95,5 hm^3. A albufeira desenvolve-se ao longo de cerca de 15,5 km, inunda aproximadamente 670 ha e possui uma capacidade total próxima dos 100 hm^3.

O aproveitamento está ainda sujeito à coexistência com outros usos da água, nomeadamente a captação para abastecimento público a partir da albufeira. Contudo, para efeitos do cálculo do balanço hídrico desenvolvido na presente dissertação, o volume correspondente a esta captação não foi considerado, assumindo-se como negligenciável face à ordem de grandeza dos volumes afluentes, turbinados e descarregados, ainda que o seu peso relativo possa aumentar em períodos de estiagem.

A elevada capacidade de armazenamento disponível torna particularmente relevante a estimativa rigorosa das afluências a este aproveitamento, uma vez que os volumes armazenados influenciam diretamente a exploração hidroelétrica e a gestão dos recursos hídricos da sub-bacia do Távora e do sistema do Douro, nomeadamente no planeamento da produção e na gestão dos níveis da albufeira.

3.2.2.2 Aproveitamento Hidroelétrico da Régua

O aproveitamento hidroelétrico da Régua, ilustrado na Figura 25, integra-se diretamente no curso principal do Douro e constitui um dos escalões centrais do troço nacional, inserindo-se plenamente na lógica de exploração em cascata anteriormente descrita. A barragem localiza-se na freguesia de Canelas, concelho de Peso da Régua, muito próxima do lugar de Bagaúste, cerca de 4 km a montante da cidade de Peso da Régua, e o conjunto do aproveitamento estende a sua influência sobre vários concelhos da região duriense. Este enquadramento territorial ajuda a perceber a centralidade do empreendimento, não apenas do ponto de vista energético, mas também da articulação com os usos regionais da água e com a navegabilidade do rio. Do ponto de vista hidrológico, domina uma área de drenagem de aproximadamente 91 mil km², correspondendo à contribuição acumulada da generalidade da bacia internacional do Douro a montante desta secção [38].A albufeira apresenta um Nível de Pleno Armazenamento (NPA) à cota 73,5 m e um Nível Mínimo de Exploração (NmE) à cota 72,0 m. A capacidade total de armazenamento é da ordem de 95 hm³, sendo o volume útil explorável entre o NPA e o NmE de aproximadamente 12 hm³.



Figura 25. Barragem da Régua (Rio Douro)

No quadro geral da cascata do Douro, o aproveitamento da Régua pode ser interpretado como um escalão de regularização intermédia, cuja importância decorre tanto da produção de energia como da estabilização dos níveis de exploração num troço central do Douro Vinhateiro.

Ao situar-se num segmento em que o rio já apresenta declives menores do que no Douro Internacional, a barragem traduz a mudança de paradigma de exploração: menos dependência da grande queda natural e maior dependência do caudal disponível e da coordenação entre escalões.

3.2.2.3 Aproveitamento Hidroelétrico de Crestuma-Lever

O aproveitamento hidroelétrico de Crestuma-Lever, ilustrado na Figura 26, corresponde ao último escalão do Douro em território português antes da foz, assumindo uma função de fecho da cascata. A sua posição é particularmente relevante porque já se inscreve no troço flúvio-marítimo do Douro, isto é, numa zona em que a proximidade do estuário e da área metropolitana do Porto introduz exigências acrescidas de controlo hidráulico, qualidade da água e compatibilização de usos. A área de drenagem dominada por este aproveitamento é de 96 mil km², aproximadamente [39]. A infraestrutura entrou em funcionamento em 1986, possuindo uma albufeira com NPA de 13,20 m e capacidade útil de 22,5 hm³.

A albufeira estende-se por cerca de 44 km, inunda aproximadamente 1298 ha e localiza-se a cerca de 13 km da cidade do Porto, o que reforça a sua natureza estratégica na regulação do troço inferior do rio.



Figura 26. Barragem de Crestuma-Lever (Rio Douro)

Crestuma-Lever funciona como porta de entrada e saída do sistema interior, articulando os escalões do Douro Nacional com a proximidade da foz. Esta função, associada à produção elétrica e à captação para abastecimento público, demonstra como o aproveitamento se situa num ponto particularmente sensível de convergência entre produção, abastecimento, navegação e gestão urbana da água. Por constituir o escalão terminal do sistema, as afluências estimadas em Crestuma-Lever refletem o comportamento hidrológico integrado de toda a área contribuinte situada a montante. O rigor da sua quantificação assume especial importância, uma vez que este aproveitamento representa o ponto final de controlo dos escoamentos da bacia do Douro em território nacional, condicionando a gestão das descargas e dos volumes restituídos ao estuário.

4
METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE AFLUÊNCIAS

4.1 MÉTODO TRADICIONAL

A metodologia tradicional de cálculo de afluências utilizada pela EDP Produção S.A tem como objetivo determinar os volumes afluentes aos aproveitamentos hidroelétricos com base na integração de dados de monitorização hidrometeorológica e de exploração. Para a sua aplicação são utilizados registos provenientes de estações hidrométricas e meteorológicas, bem como informação operacional dos aproveitamentos hidroelétricos, incluindo níveis de armazenamento, volumes armazenados, caudais efluentes e, quando aplicável, volumes bombados [40].

A estimativa das afluências é efetuada através da análise quantitativa de dados observados, recorrendo à aplicação de balanços hídricos e ao estabelecimento de relações hidrológicas entre as secções de medição e os aproveitamentos hidroelétricos em estudo. Esta abordagem permite determinar os volumes afluentes a partir da informação efetivamente observada no sistema, refletindo simultaneamente as condições hidrológicas e operacionais verificadas durante o período analisado. Os resultados obtidos são posteriormente sujeitos a uma análise de coerência hidrológica, através da comparação com os registos de precipitação e com o comportamento hidrológico esperado para cada bacia hidrográfica. Este procedimento permite identificar eventuais inconsistências nos resultados e apoiar a validação das afluências calculadas.

4.1.1 Enquadramento e Fundamentação do Método

A fundamentação deste método passa pela Equação da Continuidade ou, também por alguns, denominada Conservação da Massa, aplicada a um volume de água admitido pela albufeira. O balanço hídrico é expresso pela relação fundamental entre as taxas de fluxo de entrada, saída e variação do valor numérico de armazenamento.

Neste contexto, a aplicação da equação da continuidade a uma albufeira permite assumir que qualquer variação do volume armazenado numa albufeira resulta diretamente do desequilíbrio entre os caudais afluentes e efluentes, integrado ao longo de um determinado intervalo temporal. Desta forma, o armazenamento assume um papel fundamental como variável de controlo, permitindo inferir indiretamente os caudais não observados a partir de grandezas mensuráveis.

Do ponto de vista da exploração hidroelétrica, esta formulação constitui a base para a estimação de afluências naturais. Assim, recorre-se frequentemente à combinação entre o balanço hídrico e dados hidrométricos observados em estações próximas, assumindo que estas representam adequadamente o comportamento hidrológico natural da bacia.

4.1.2 Fontes de Dados

Para a aplicação desta metodologia é necessária a integração de informação proveniente de diferentes sistemas de monitorização e gestão de dados. No contexto da EDP Produção S.A, os dados de exploração dos aproveitamentos hidroelétricos são disponibilizados através da plataforma interna, GODP (*Generation Operation Data Platform*), sucessora do sistema GPinfo.

A plataforma atual funciona como repositório operacional central, agregando as variáveis utilizadas nos cálculos hidrológicos, nomeadamente níveis de armazenamento, volumes armazenados e caudais afluentes, efluentes, turbinados, bombados e transferidos. A centralização desta informação facilita o acesso aos dados de exploração e assegura a coerência entre as diferentes séries utilizadas.

Esta abordagem insere-se numa lógica de modelação concentrada, na qual a bacia hidrográfica é tratada como um sistema global, sem distinção explícita da variabilidade espacial dos processos no seu interior. Esta simplificação permite reduzir significativamente a complexidade do problema, tornando o método operacionalmente mais simples, embora à custa de uma menor capacidade de representação de detalhe dos processos hidrológicos.

Complementarmente, a componente de monitorização hidrometeorológica é suportada por plataformas especializadas, também de domínio empresarial, como o *Rain&Flow* e o *Watt Now*. O *Rain&Flow* permite o armazenamento, consulta e validação de séries temporais hidrológicas e meteorológicas, enquanto o *Watt Now*, Figura 27, assegura a rastreabilidade das intervenções realizadas nas estações, incluindo operações de manutenção, inspeções e registo de ocorrências.

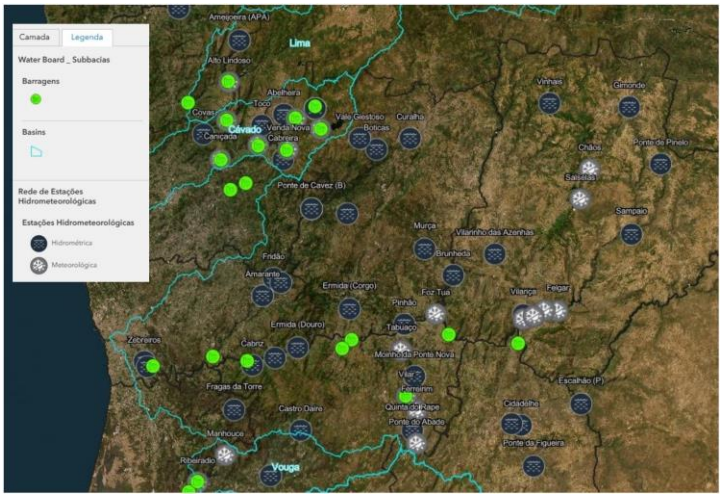


Figura 27. Bacia hidrográfica, rede de estações hidrometeorológicas e posicionamento dos aproveitamentos (*Watt Now*, 2025)

Por outro lado, a aplicação desta metodologia é fortemente condicionada pela qualidade, representatividade e consistência das séries temporais utilizadas. Neste contexto, os dados provenientes das estações hidrométricas assumem particular relevância. A fiabilidade das medições de nível depende do correto funcionamento dos equipamentos de monitorização, da manutenção regular das estações e da atualização periódica das respetivas curvas de vazão. Assim, a integração entre dados automáticos e medições de campo constitui um aspeto crítico destas fontes de dados. As observações realizadas em visitas técnicas, nomeadamente através de escalas limnimétricas, funcionam como referência para validação e calibração dos registos automáticos, assegurando a sua consistência e validade ao longo do tempo. Este tipo de abordagem permite mitigar limitações associadas a falhas instrumentais.

A validade das relações estabelecidas entre as estações hidrométricas e os aproveitamentos hidroelétricos depende diretamente da robustez destes procedimentos, condicionando a precisão das afluências obtidas através do método baseado em observações dado que, pequenas imprecisões nos dados de entrada, falhas de observação ou erros associados às medições podem propagar-se ao longo dos cálculos e comprometer o equilíbrio do balanço hídrico, influenciando a fiabilidade das afluências estimadas.

4.1.3 Procedimento de Cálculo

Após a seleção da eventual estação hidrométrica a utilizar, procede-se à validação e eventual correção das séries observadas. Sempre que são identificadas inconsistências ou anomalias nos dados, podem ser aplicados diferentes procedimentos de correção e reconstrução das séries temporais, dependendo da natureza do problema identificado.

Entre estes incluem-se ajustes constantes ou progressivos dos registos, preenchimento de lacunas por interpolação, correlação com estações hidrométricas vizinhas ou outras técnicas consideradas adequadas à situação em análise. O objetivo consiste em garantir a coerência temporal das séries e preservar a representatividade hidrológica dos dados utilizados nas etapas subsequentes do cálculo das afluências.

Após a validação dos níveis observados, estes são convertidos em caudais através das curvas de vazão em vigor para cada estação hidrométrica. Os caudais obtidos constituem a base para as etapas subsequentes da metodologia.

Uma vez que não existem, de forma geral, medições diretas dos caudais afluentes na secção correspondente aos aproveitamentos hidroelétricos, torna-se necessário proceder à transferência da informação observada nas estações hidrométricas para os locais de interesse. Para tal, são selecionadas estações consideradas representativas do comportamento hidrológico natural da bacia afluente ao aproveitamento em estudo.

A transposição dos caudais é frequentemente efetuada através de relações espaciais entre áreas drenantes, assumindo que o escoamento específico apresenta comportamento semelhante entre a estação de referência e a secção de cálculo. Deste modo, os caudais observados são ajustados em função da área contribuinte associada ao aproveitamento, obtendo-se uma estimativa preliminar das afluências naturais.

Paralelamente, são reunidos os dados de exploração do aproveitamento hidroelétrico em análise, incluindo níveis de armazenamento, caudais afluentes, caudais turbinados, descarregados, bombados e transferidos. Sempre que a sua influência seja considerada relevante para a escala temporal e características da albufeira, podem igualmente ser consideradas as perdas associadas à evaporação.

Com base na integração dos caudais transpostos e dos dados de exploração, procede-se à aplicação da equação do balanço hídrico, permitindo determinar as afluências ao aproveitamento através da relação entre entradas, saídas e variação do armazenamento observada no sistema.

Por fim, os resultados obtidos são sujeitos a uma análise de coerência hidrológica suportada pela informação proveniente das estações pluviométricas e meteorológicas da região. Esta análise constitui uma etapa fundamental do processo, exigindo conhecimento do comportamento hidrológico da bacia por parte do analista. Aumentos significativos das afluências devem encontrar suporte em eventos de precipitação compatíveis com a respetiva

magnitude e distribuição temporal. De igual modo, a fase de recessão dos hidrogramas deverá apresentar um comportamento gradual e coerente com os processos naturais de escoamento e drenagem da bacia, sendo descidas excessivamente abruptas frequentemente indicativas de inconsistências nos dados ou na metodologia aplicada.

4.1.4 Vantagens e Limitações

Este método apresenta diversas vantagens que justificam a sua utilização generalizada no contexto da exploração hidroelétrica. A principal mais-valia desta metodologia reside na utilização de dados diretamente observados, o que lhe confere uma forte ligação à realidade operacional dos aproveitamentos, garantindo que as estimativas refletem o comportamento físico efetivo do sistema. Trata-se de uma abordagem concetualmente simples e baseada no princípio físico do balanço de massas, o que permite a possibilidade de validação direta através de observações de campo, conferindo maior robustez e confiança às séries geradas.

No entanto, a aplicação deste método é acompanhada de limitações metodológicas. Desde logo, a sua precisão apresenta uma total dependência da disponibilidade e qualidade dos dados observados.

Uma das principais fontes de erro do método reside na incerteza associada às curvas de vazão, uma vez que a transformação das leituras de nível em caudais está sujeita a desvios decorrentes da instabilidade geométrica das secções de controlo ou de imprecisões nas campanhas de calibração. A precisão depende fortemente da qualidade dos dados hidrométricos e da frequência das visitas de calibração, podendo erros instrumentais não corrigidos propagar-se ao longo das séries temporais.

O método evidencia também limitações na extrapolação de resultados para locais sem observação. A aplicação de fatores de transposição espacial, como a relação de áreas, pressupõe homogeneidade hidrológica, o que acarreta limitações, especialmente quando se verificam diferenças fisiográficas ou de uso do solo.

Adicionalmente, do ponto de vista da sua execução prática, a análise exige um esforço significativo por parte do executante. Uma vez que estes estudos são, por norma, aplicados a períodos temporais bastante extensos, a validação contínua deste elevado volume de dados torna-se um processo complexo e moroso, dificultando a identificação célere de eventuais anomalias. Assim, embora constitua uma ferramenta sólida e amplamente utilizada, este método baseado em observações deve ser aplicado com consciência dos seus pressupostos.

4.2 MODELO HIDROLÓGICO

O *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) é um modelo hidrológico semi-distribuído desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *U.S. Army Corps of Engineers*. O software foi concebido para simular os processos hidrológicos que ocorrem numa bacia hidrográfica, permitindo transformar dados meteorológicos, nomeadamente precipitação e evapotranspiração, em escoamento superficial em secções de interesse [41]. O HEC-HMS integra diferentes métodos de representação dos processos de perdas, transformação precipitação-escoamento, propagação em linhas de água e modelação do escoamento de base, possibilitando a sua aplicação em estudos de previsão de cheias, gestão de recursos hídricos, dimensionamento de infraestruturas hidráulicas e estimação de caudais em bacias hidrográficas [42]. A sua flexibilidade, ampla utilização em contexto científico e operacional e capacidade de integração de diferentes fontes de dados justificam a sua seleção para o presente trabalho. A Figura 28 apresenta a discretização da bacia hidrográfica do Douro implementada no HEC-HMS, evidenciando as sub-bacias, troços de propagação e restantes elementos hidrológicos considerados na modelação.

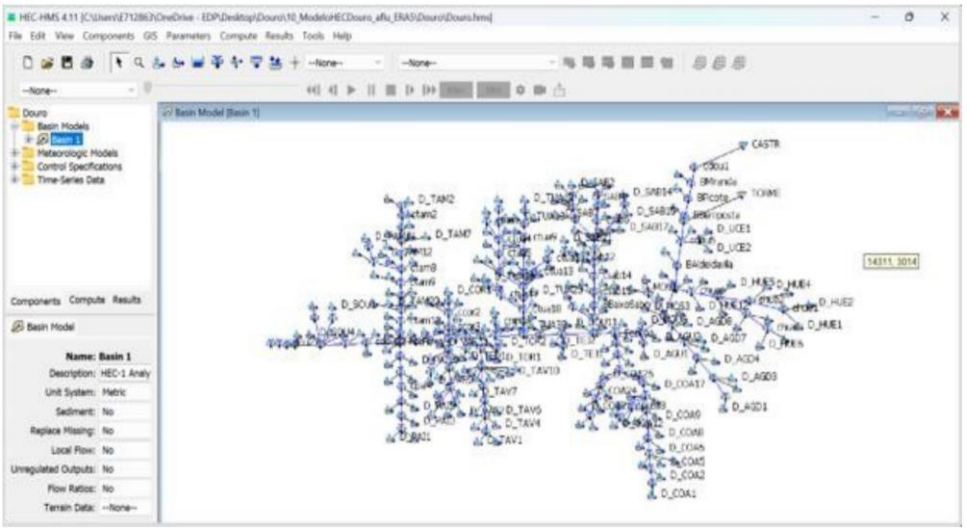


Figura 28. Esquema topológico da bacia hidrográfica do Douro (HEC-HMS)

A modelação hidrológica, neste caso, uma alternativa de método de cálculo de quantificação de afluências, baseia-se na representação e processamento de variáveis do ciclo hidrológico. Este conceito de previsão de quantidades de água aos aproveitamentos permite a transformação de precipitação ocorrida na bacia hidrográfica em estudo em escoamento num ponto de saída. Este processamento de dados inclui, para além da precipitação, a evapotranspiração, infiltração e o escoamento superficial.

4.2.1 Fontes de Dados

A fiabilidade dos resultados produzidos pelo modelo depende diretamente da qualidade, consistência e representatividade dos dados de entrada utilizados. Deste modo, a seleção das fontes de informação constitui uma etapa fundamental do processo de modelação, uma vez que condiciona a parametrização dos diferentes componentes do modelo e influencia o seu desempenho na reprodução da resposta hidrológica da bacia.

A abordagem metodológica adotada para a determinação de afluências médias diárias baseia-se na aplicação do modelo hidrológico HEC-HMS à bacia hidrográfica do rio Douro. O modelo utilizado encontra-se previamente desenvolvido e calibrado pela EDP Produção S.A., um processo que recorreu aos dados de precipitação e temperatura do dataset regional Iberia01, baseado na interpolação espacial de uma densa rede de estações meteorológicas na Península Ibérica.

No âmbito do presente trabalho, a simulação hidrológica assentou exclusivamente na utilização do *dataset* de reanálise ERA5-Land. Desenvolvido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) no âmbito do *Copernicus Climate Change Service*, este conjunto de dados combina observações reais de satélites e estações meteorológicas com modelação numérica avançada. Deste conjunto de dados, foram extraídas e utilizadas especificamente as séries temporais de precipitação e temperatura. A seleção do *ERA5-Land* justifica-se por critérios essencialmente operacionais e práticos: a extensa abrangência das séries temporais, a elevada disponibilidade e a atualização contínua dos dados, que permitem a extração de registos até 5 dias antes da data de análise. As séries meteorológicas extraídas compreendem o período temporal de 1971 a 2025.

Contudo, a utilização direta de reanálises globais apresenta limitações locais. Constatou-se que os dados do *ERA5-Land* tendiam a subestimar a precipitação na região. Para mitigar este erro, as séries meteorológicas foram sujeitas a uma correção interna. Foi aplicado o método de correção estatística *Empirical Quantile Mapping*, cujo objetivo é aproximar a distribuição estatística dos registos do *ERA5-Land* à distribuição observada no Iberia01 (sendo a evapotranspiração de referência do Iberia01 previamente derivada a partir dos seus dados de temperatura). Esta etapa de correção de enviesamento (*bias correction*) é crucial, pois garante que as séries de entrada mantêm a representatividade local do modelo calibrado.

Para além dos inputs meteorológicos, a representatividade física do modelo exige uma variável de controlo.

Neste contexto, foram utilizados os caudais efluentes observados no aproveitamento hidroelétrico de Saucelle. Importa referir que estes caudais têm como base dados horários partilhados pela concessionária atual deste aproveitamento, Iberdrola, à EDP. Estes dados hidrométricos abrangem o período de registo entre 1958 a 2025, tal como ilustrado na Figura 29.

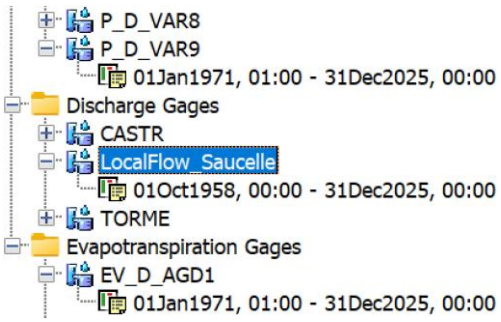


Figura 29. Interface de dados do modelo (HEC-HMS)

O funcionamento do modelo hidrológico requer uma parametrização e avaliação do desempenho do modelo, bem como informação fisiográfica da bacia hidrográfica, incluindo áreas de drenagem, características do relevo, rede hidrográfica, ocupação do solo e propriedades dos solos. A integração destes diferentes conjuntos de informação permite representar os processos de armazenamento, infiltração, transformação, precipitação-escoamento e propagação dos caudais ao longo da bacia hidrográfica.

4.2.2 Procedimentos de Modelação

O modelo hidrológico utilizado neste trabalho já se encontrava previamente desenvolvido e calibrado no âmbito de estudos internos realizados para a bacia do Douro.

A presente dissertação não contemplou a construção de raiz nem a calibração do modelo, centrando-se exclusivamente na sua adaptação e aplicação para a geração de séries de afluências. Por este motivo, optou-se por não detalhar a parametrização individual das diversas sub-bacias, uma vez que essa componente não foi objeto de análise ou alteração no âmbito deste estudo.

O documento foca-se apenas na apresentação da estrutura geral do modelo e na caracterização dos métodos hidrológicos adotados. A representação da resposta hidrológica da bacia assenta em metodologias concetuais específicas para a simulação dos processos físicos, nomeadamente a contabilização da humidade do solo (*Soil Moisture Accounting - SMA*), a intercetação e o armazenamento superficial.

A secção seguinte descreve o funcionamento geral destas componentes e a forma como interagem na transformação da precipitação em escoamento, [44].

A organização da parametrização segue a decomposição clássica dos processos hidrológicos, incluindo as componentes de intercetação, ou seja, o processo em que a precipitação é retida pela vegetação, como as copas das árvores, folhas, galhos e troncos ou por estruturas urbanas antes de chegar ao solo armazenamento superficial, transformação da precipitação em escoamento, perdas por infiltração e escoamento de base. Cada uma destas componentes é definida de forma individualizada para as diversas sub-bacias, permitindo incorporar a variabilidade espacial da bacia hidrográfica do Douro.

A Figura 30 apresenta o esquema conceptual do método *Soil Moisture Accounting* implementado no HEC-HMS, evidenciando a representação dos principais reservatórios de armazenamento de água no sistema e os fluxos hidrológicos considerados pelo modelo para simular a transformação da precipitação em escoamento [44].

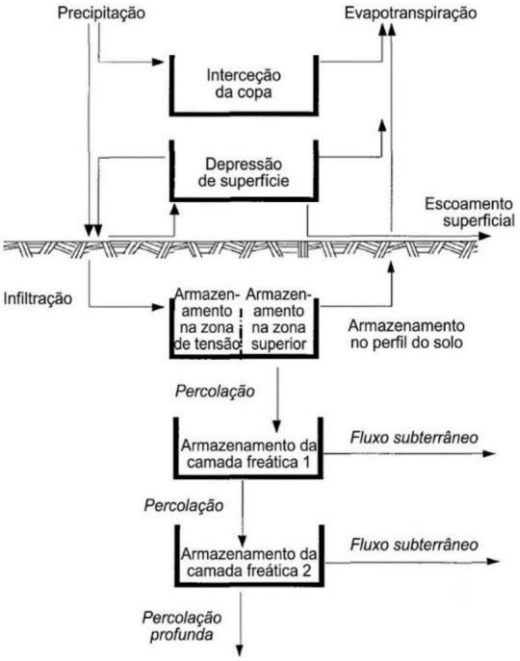


Figura 30. Esquema conceptual do modelo *Soil Moisture Accounting* (SMA), evidenciando os principais processos hidrológicos e fluxos entre reservatórios (Adaptado de USACE)

No que se refere à intercetação da precipitação, foi adotado o método *Simple Canopy*, no qual são considerados parâmetros associados à capacidade de armazenamento da cobertura vegetal e às condições iniciais de humidade. Esta componente permite simular a retenção inicial da precipitação pela vegetação, condicionando a fração de água que contribui para os restantes processos hidrológicos.

Relativamente ao armazenamento superficial considera-se a existência de diferentes planos representativos das características topográficas de cada sub-bacia [45]. A parametrização inclui parâmetros relacionados com a inclinação média, a capacidade de armazenamento superficial e o estado inicial de armazenamento, permitindo modelar o comportamento do escoamento superficial de forma diferenciada no espaço [46].

A transformação da precipitação em escoamento direto é descrita com recurso ao método de onda cinemática (*Kinematic Wave*), o qual permite representar a propagação do escoamento ao longo de planos e canais. A parametrização associada a este processo inclui características geométricas e hidráulicas dos elementos do sistema, como o comprimento, declive, rugosidade e geometria dos canais, assegurando uma representação detalhada da resposta hidrológica.

No que respeita às perdas por infiltração e armazenamento no solo, adota-se uma abordagem conceptual baseada no balanço hídrico. Este modelo permite simular os processos de infiltração, armazenamento de água no solo e transferência para reservatórios subterrâneos, através de parâmetros relacionados com a capacidade de armazenamento, taxas de percolação e fração de área impermeável.

A resposta hidrológica da bacia aos eventos de precipitação pode ser interpretada através do hidrograma conceptual representado na Figura 31, no qual se evidenciam as diferentes componentes do escoamento que contribuem para o caudal total observado num determinado ponto da rede hidrográfica [47].

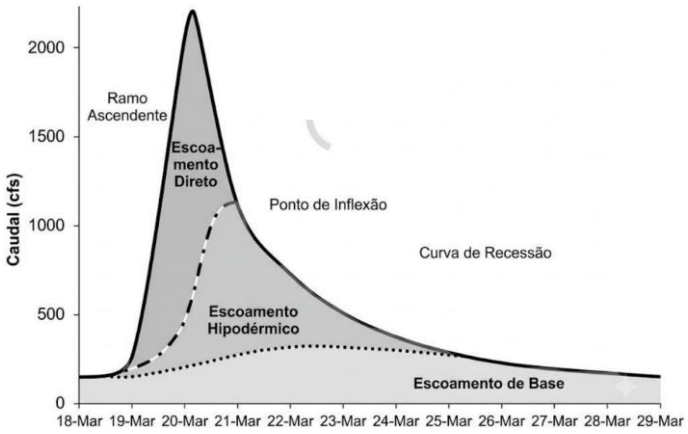


Figura 31. Hidrograma conceptual representativo da resposta hidrológica de uma bacia (Adaptado de Chow et al., 1988)

Entre estas destacam-se o escoamento direto, resultante da precipitação efetiva, o escoamento subsuperficial, associado à circulação da água nas camadas superiores do solo, e o escoamento de base, correspondente à contribuição gradual dos aquíferos para o curso de água.

Por fim, o escoamento de base é representado através de um modelo de reservatórios lineares, no qual o escoamento subterrâneo é simulado por meio de uma ou mais camadas de armazenamento com comportamento linear.

Esta componente permite considerar a contribuição retardada das águas subterrâneas para o caudal total, sendo essencial para a reprodução do comportamento hidrológico em períodos sem precipitação. De forma global, a parametrização adotada permite uma representação integrada e fisicamente coerente dos processos hidrológicos na bacia do Douro, constituindo a base para a simulação numérica e posterior calibração do modelo.

De forma a adequar o modelo aos objetivos específicos desta dissertação, procedeu-se à sua reconfiguração, incluindo a revisão da discretização da bacia, dos pontos de controlo e dos elementos hidrológicos considerados já previamente definidos. Estas alterações tiveram como objetivo garantir a compatibilidade entre a estrutura do modelo e os dados hidrológicos e meteorológicos disponíveis para análise, assegurando simultaneamente a representatividade hidrológica da área em estudo [48]. Neste contexto, foram efetuadas adaptações à configuração original da bacia, nomeadamente ao nível da delimitação da área contributiva modelada e da definição das secções de controlo utilizadas na avaliação dos resultados.

Originalmente, o modelo hidrológico apresentava como secções de entrada o aproveitamento de Castro e o rio Tormes. Contudo, face à indisponibilidade de registos de caudais recentes e contínuos para o Tormes, tornou-se imperativo ajustar o domínio espacial da modelação.

Por conseguinte, optou-se por assumir o início da simulação no aproveitamento de Saucelle, local para o qual se dispunha da informação hidrométrica adequada e atualizada.

A Figura 32 apresenta a configuração final da bacia hidrográfica do Douro adotada no modelo hidrológico após as alterações realizadas. Atendendo à disponibilidade dos dados de observação utilizados na análise, procedeu-se à remoção de elementos da configuração original localizados fora da área contributiva relevante para o presente estudo. Esta simplificação permitiu reduzir a complexidade do modelo, concentrando a simulação nas sub-bacias com influência direta na resposta hidrológica avaliada, sem comprometer a representatividade global dos processos hidrológicos considerados.

Importa salientar que o processo realizado correspondeu a uma adaptação de um modelo previamente desenvolvido, não tendo sido efetuada uma construção integral do modelo nem uma calibração de raiz dos seus parâmetros.

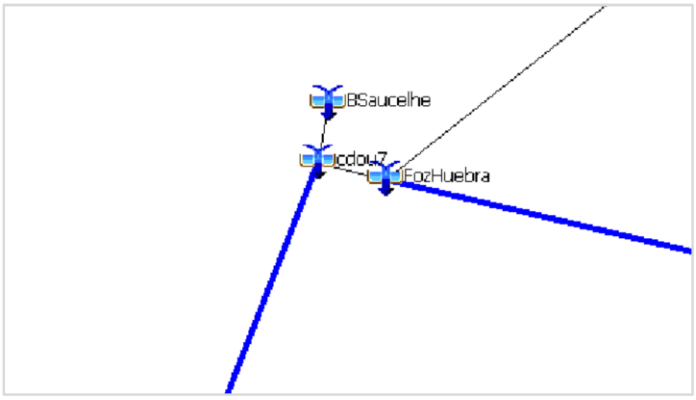


Figura 32. Reconfiguração da estrutura da bacia do Douro (HEC-HMS)

4.2.3 Vantagens e Limitações

Uma das principais vantagens da modelação hidrológica reside na sua capacidade de representar de forma integrada os diferentes processos hidrológicos que ocorrem na bacia, nomeadamente a intercetação pela cobertura vegetal, o armazenamento superficial, a infiltração, a percolação e o escoamento subterrâneo, garantindo uma representação fisicamente coerente do sistema hidrológico. Adicionalmente, a possibilidade de realizar simulações contínuas no tempo permite considerar a evolução do armazenamento de água no solo e nos aquíferos, o que constitui uma mais-valia em relação a modelos baseados exclusivamente em eventos isolados.

Importa, no entanto, salientar que a calibração de modelos hidrológicos pode constituir um processo exigente e moroso. Este tipo de calibração implica normalmente um elevado número de iterações, com ajustes sucessivos dos parâmetros até se alcançar uma concordância satisfatória entre caudais simulados e observados. A forte dependência da modelação face à calibração, aliada à sua complexidade, deve ser reconhecida como uma limitação no contexto da modelação hidrológica.

Outra limitação relevante prende-se com a natureza conceptual do modelo utilizado. Embora o modelo SMA permita uma representação global dos fluxos hidrológicos, este baseia-se em simplificações dos processos físicos através de reservatórios agregados e relações empíricas. Como tal, pode não captar adequadamente a heterogeneidade espacial real da bacia, nomeadamente ao nível das propriedades dos solos, da geologia ou da ocupação do território, aspetos que influenciam significativamente os processos de infiltração, armazenamento e escoamento.

Importa salientar a sensibilidade do modelo ao processo de calibração manual e à qualidade dos dados de entrada. A calibração manual implica necessariamente um grau de subjetividade

na seleção e ajuste dos parâmetros, dependente da experiência do modelador, podendo conduzir a soluções distintas igualmente aceitáveis. Paralelamente, eventuais incertezas associadas aos dados de precipitação, evapotranspiração e caudais observados refletem-se diretamente nos resultados obtidos, condicionando a fiabilidade das simulações.

5
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos para os três casos de estudo considerados: os aproveitamentos hidroelétricos de Vilar-Tabuaço, Régua e Crestuma-Lever, recorrendo às duas abordagens analisadas ao longo da dissertação: o Método Tradicional de estimativa de afluências e a Modelação Hidrológica desenvolvida em HEC-HMS. Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos através da metodologia tradicional, seguindo-se a análise dos resultados da modelação hidrológica e, por fim, a comparação entre ambas as abordagens.

No caso da metodologia tradicional, foram utilizados os resultados históricos previamente calculados pela EDP para os períodos em que estes se encontravam disponíveis, dado o elevado grau de confiança associado aos respetivos cálculos. Assim, para Vilar-Tabuaço foram utilizados os resultados existentes de 2006 até 2024, tendo sido as estimativas de afluências calculadas, através do Método Tradicional, apenas o ano de 2025, enquanto para a Régua foram efetuados cálculos para o período de 2021 a 2025. Para Crestuma-Lever foi calculada a série correspondente ao período de 2005 a 2025. Para os casos de estudo mencionados por último, foram utilizados os resultados históricos já existentes, desde 2006, uma vez que estes eram considerados fiáveis e adequados aos objetivos do presente estudo.

Relativamente à modelação hidrológica, a disponibilidade dos dados de entrada permitiu a simulação contínua do período compreendido entre 1972 e 2025. Desta forma, além da comparação entre metodologias para os períodos coincidentes, a modelação possibilitou igualmente a análise da variabilidade hidrológica num horizonte temporal significativamente mais extenso. A avaliação dos resultados baseia-se na análise gráfica das séries temporais, na análise de volumes e na utilização de indicadores estatísticos de desempenho, permitindo discutir a representatividade e aplicabilidade de cada metodologia para a estimativa de afluências aos aproveitamentos em estudo.

Por questões de confidencialidade e em conformidade com as políticas internas da EDP Produção S.A, os valores absolutos obtidos não são apresentados, sendo a análise baseada na comparação relativa e na avaliação do desempenho das metodologias aplicadas.

5.1 MÉTODO TRADICIONAL

Neste capítulo procede-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos na estimativa de afluências para os diferentes casos de estudo selecionados na bacia hidrográfica do rio Douro. Tendo em conta a variabilidade da informação de base, a análise de cada aproveitamento é antecedida por um enquadramento introdutório que detalha e justifica a abordagem adotada. Esta diferenciação metodológica revela-se necessária face às distintas disponibilidades e níveis de credibilidade dos dados existentes, que condicionaram a seleção dos métodos de cálculo e, em alguns casos, das próprias formulações utilizadas. Assim, embora assentes no mesmo enquadramento metodológico, os cálculos apresentados poderão recorrer a combinações distintas de variáveis e fontes de informação, em função dos dados disponíveis para cada período e caso de estudo.

5.1.1 Caso 1: Aproveitamento Hidroelétrico de Vilar-Tabuaço

No estudo de afluências pelo método tradicional, foram integradas diversas fontes de dados de entrada. A estimativa baseou-se nas séries de caudais médios diários da estação hidrométrica de Quinta do Rape (QR), complementadas pelos dados operacionais de exploração do aproveitamento de Vilar-Tabuaço, nomeadamente caudais afluentes e por valores de caudais calculados através de metodologias anteriores.

Adicionalmente, foram consideradas de modo qualitativo as séries de precipitação diária provenientes das estações pluviométricas da área de influência, tais como as de Ferreirim, Ponte do Abade e Vilar. A seleção destes postos, representados na Figura 33, cujos registos foram extraídos do sistema *Rain&Flow*, justificou-se pela sua óbvia disponibilidade de dados e pela proximidade geográfica ao aproveitamento, garantindo uma representação fidedigna da pluviosidade local.

Embora estas não integrem diretamente a formulação matemática do cálculo das afluências, a sua análise permitiu interpretar episódios de aumento súbito de caudal e validar indiretamente a coerência física das variações observadas nas séries hidrométricas e operacionais.

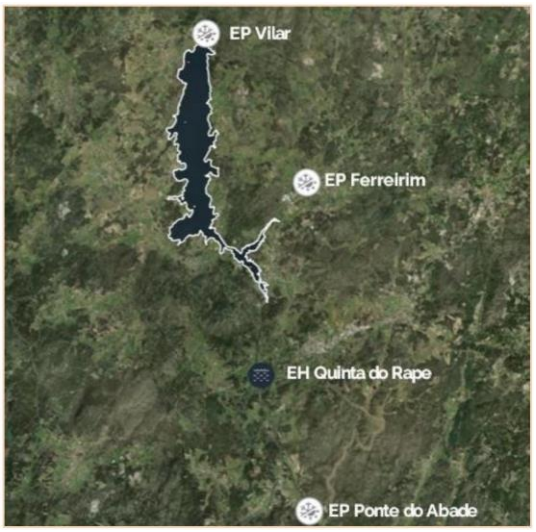


Figura 33. Enquadramento geográfico do aproveitamento hidroelétrico de Vilar-Tabuaço (*Watt Now*, 2025)

A metodologia desenvolvida assentou num procedimento sequencial de tratamento de dados. A primeira fase consistiu na organização e validação das séries temporais, através da identificação de descontinuidades, valores anómalos e discrepâncias entre fontes, garantindo a consistência das séries de entrada para mitigar a propagação de erros no cálculo do balanço hídrico. Seguiu-se a harmonização das grandezas expressas em diferentes unidades e escalas temporais. Numa fase final, os caudais obtidos foram convertidos para volumes equivalentes ao intervalo temporal de análise, possibilitando a comparação direta com os volumes históricos.

Para a determinação das afluências, foram desenvolvidas e comparadas duas abordagens de cálculo, designadas na presente dissertação por Cálculo A e Cálculo B. Ambas têm como premissa a relação entre os caudais observados na estação de Quinta do Rape e as afluências ao aproveitamento de Vilar-Tabuaço, diferindo metodologicamente na forma como modelam a variabilidade dos caudais e a resposta do sistema perante eventos hidrológicos extremos.

5.1.1.1 Cálculo A: Método Threshold

O Método *Threshold* assenta numa formulação empírica por troços, concebida para representar de forma diferenciada o comportamento hidrológico da bacia em função da magnitude do caudal observado na estação hidrométrica de referência.

A hipótese subjacente a esta abordagem consiste em admitir que a relação entre o caudal medido na Quinta do Rape e a afluência ao aproveitamento não é estritamente linear para todos os regimes de escoamento.

Em particular, em períodos de cheia ou de precipitação intensa, a resposta da bacia apresenta um comportamento mais amortecido, influenciado por fenómenos de propagação, armazenamento temporário e não linearidade na geração de escoamento. Importa salientar que esta abordagem foi desenvolvida especificamente para o caso em análise, no contexto de uma exploração particular dos dados disponíveis de modo a ter perceção matemática sob a realidade aproximada relativamente à hidrologia.

Para acomodar esta realidade, foi introduzido um valor limite de caudal base, também designado por *threshold*, cuja definição conceptual e calibração são detalhadas nos parágrafos seguintes, responsável por separar dois domínios de comportamento hidrológico. Para valores inferiores a esse limite, foi adotada uma relação linear simples, em que o caudal estimado no aproveitamento é proporcional ao caudal observado na estação hidrométrica. Para valores superiores ao caudal base a formulação passa a incluir um segundo coeficiente de ajuste, que permite reduzir a inclinação da relação e, consequentemente, amortecer os picos de cheia. Desta forma, o modelo evita a sobrestimação dos caudais afluentes em situações extremas, traduzindo de forma mais plausível a resposta física do sistema.

Conceptualmente, esta metodologia pode ser expressa através de uma função por ramos:

$$\begin{aligned} Q_{VT} &= a \cdot Q_{qr} \cdot S, \quad Q_{qr} < T \\ Q_{VT} &= a \cdot T \cdot S + b \cdot (Q_{qr} - T), \quad Q_{qr} \geq T \end{aligned} \tag{5.1}$$

Na qual, são representadas as seguintes variáveis:

- Q_{VT} é o caudal estimado para o aproveitamento de Vilar-Tabuaço;
- Q_{qr} é o caudal observado na estação hidrométrica de Quinta do Rape;
- S é o fator de escala associado à relação de áreas;
- T é o valor do *threshold*, o caudal de base;
- a é o fator de amortecimento;
- b é o fator de ganho.

O parâmetro *b* representa o fator de ganho associado à componente de forçamento hidrológico, controlando a magnitude da resposta do caudal às variações da variável independente. Este parâmetro traduz a eficiência com que o *input* hidrológico se converte em caudal, em contraposição ao parâmetro a que incorpora os efeitos de amortecimento e memória do sistema.

Para caudais inferiores ao *threshold*, a relação assume um comportamento aproximadamente linear, característico de condições dominadas pelo escoamento de base.

Neste domínio, a resposta da bacia é relativamente estável, sendo controlada essencialmente por escoamentos subterrâneos e processos de drenagem lenta.

Para caudais superiores ao caudal base, a formulação mantém a continuidade no ponto de transição e introduz um termo adicional associado ao excedente de caudal. Este termo, controlado pelo parâmetro *b*, permite representar o comportamento do sistema em situações de maior intensidade hidrológica, nomeadamente a formação e propagação de ondas de cheia. A resposta da bacia torna-se mais rápida e dinâmica, refletindo a influência direta de eventos de precipitação.

Esta distinção entre regimes pode ser interpretada com base no hidrograma típico de uma bacia hidrográfica, onde se identifica uma componente de caudal de base aproximadamente constante e uma componente associada à onda de cheia, caracterizada por um aumento rápido do caudal seguido de uma fase de recessão. O caudal base atua, neste contexto, como o ponto de transição entre estas duas componentes, como representado na Figura 34.

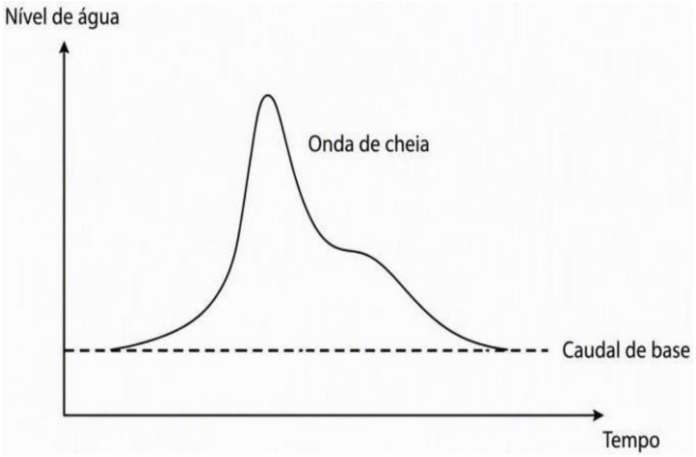


Figura 34. Representação esquemática do caudal de base e da onda de cheia (Adaptado de Chow et al., 1988)

No caso em estudo, o fator de escala *S* foi definido com base na relação entre a área drenante do aproveitamento hidroelétrico e a área drenante associada à estação hidrométrica, tendo sido considerado o valor de 2,111. Este parâmetro permite ajustar a magnitude dos caudais observados à escala espacial do aproveitamento, constituindo um primeiro nível de correção física do modelo.

Apesar da sua fundamentação física, verificou-se que a aplicação direta da relação entre áreas resultava em valores de caudal superiores aos observados no aproveitamento. Tal evidencia que a simples transposição baseada na proporcionalidade entre áreas drenantes não reproduz

integralmente o comportamento hidrológico da bacia em estudo, tornando necessária a calibração dos parâmetros da expressão *threshold* de forma a melhorar o ajuste aos dados observados, tal como ilustrado na Figura 35.

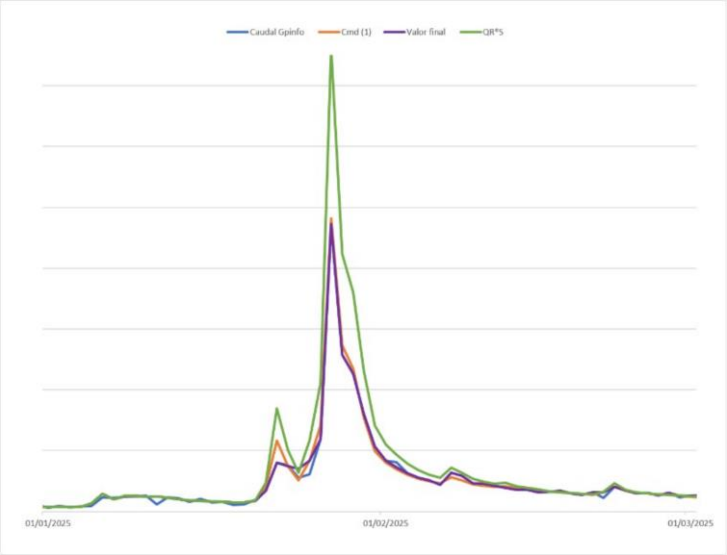


Figura 35. Excerto de análises de caudais (1) - Vilar-Tabuaço (Excel)

A definição inicial do *threshold* foi suportada por uma análise gráfica da relação entre os caudais observados e os valores associados ao aproveitamento, através da representação de um diagrama de dispersão.

A observação deste gráfico, ilustrado na Figura 36, permitiu identificar a existência de dois comportamentos distintos, um associado a baixos caudais, com reduzida variabilidade, e outro caracterizado por maior dispersão e crescimento acentuado dos valores, correspondente a situações de caudal elevado. Com base nesta análise, foi adotado um valor inicial de *threshold* igual a 10, considerado como uma aproximação adequada para delimitar a transição entre regimes. Este valor constituiu um ponto de partida para o processo de calibração posterior.

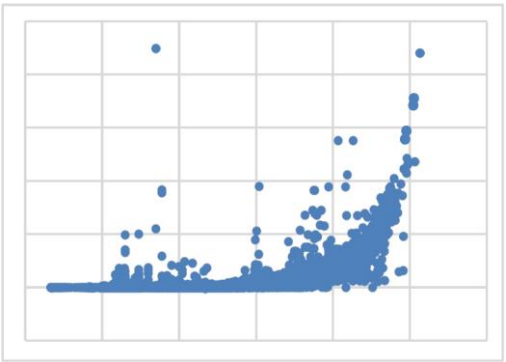


Figura 36. Gráfico de dispersão (Excel)

Os restantes parâmetros iniciais considerados no modelo corresponderam aos valores $a = 1$ e $b = 0{,}7$, definidos como aproximações iniciais para o comportamento linear e para o amortecimento dos caudais elevados, respetivamente. Estes valores não resultam de uma calibração direta, mas sim de uma escolha inicial, ou seja, de uma estimativa empírica apenas para fornecer um ponto de partida que permite iniciar o processo iterativo de otimização.

A determinação final dos parâmetros foi realizada através da aplicação do método dos mínimos quadrados, recorrendo a um processo iterativo de calibração com o objetivo de minimizar a soma das diferenças quadráticas, estando estas ilustradas graficamente na Figura 37, entre os caudais estimados e as séries de referência disponíveis. O período considerado para este ajuste correspondeu aos anos compreendidos entre 2006 e 2021, totalizando 16 anos de dados, considerados representativos do comportamento hidrológico do sistema.

Como resultado do processo de calibração, foram obtidos valores ajustados para os parâmetros, verificando-se uma redução significativa do valor do *threshold,* de valor inicial de 10 relativamente ao valor inicial, bem como um ajuste dos coeficientes a e b.

Em particular, observou-se uma ligeira diminuição do parâmetro a, o que indica que, no regime de caudais baixos, a simples transposição por relação de áreas sobrestima ligeiramente as afluências ao aproveitamento, em coerência com o verificado anteriormente. Já o parâmetro b sofreu uma redução mais acentuada, traduzindo um maior amortecimento da resposta acima do *threshold* e, consequentemente, uma atenuação dos picos de cheia estimados.

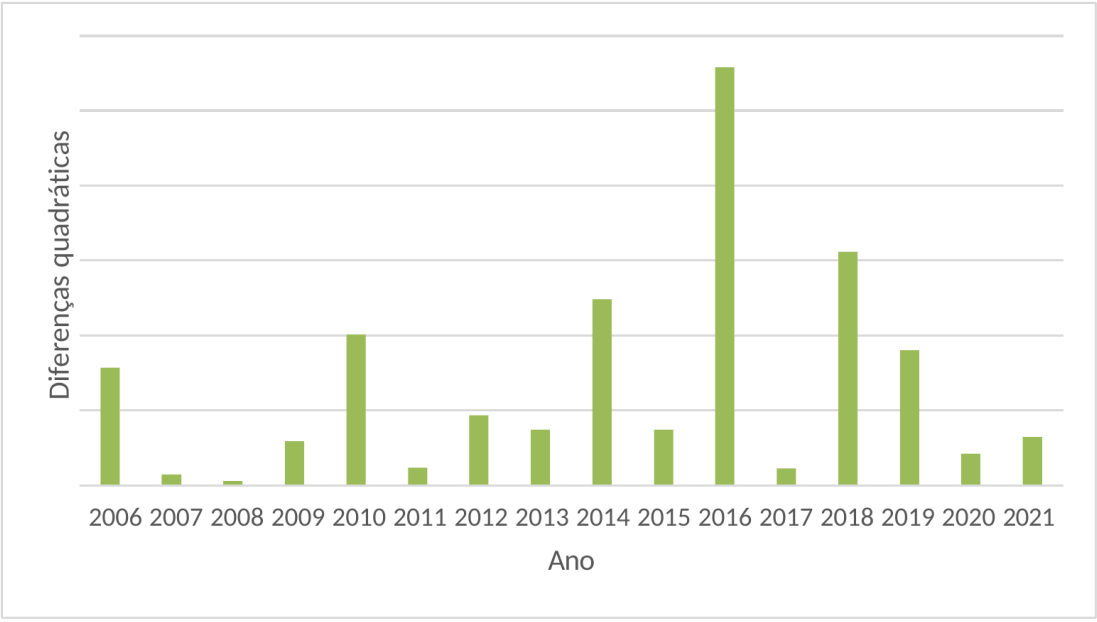


Figura 37. Evolução temporal da diferença quadrática (Excel)

Ainda no âmbito deste cálculo foram construídas duas colunas auxiliares de forma a distinguir a sensibilidade e compatibilidade da formulação matemática com a hidrologia. Definiram-se assim "Valor final (1) (a)" e "Valor final (1) (b)", nas quais são geradas duas estimativas distintas para o caudal final.

A Figura 38 representa um excerto de folha de cálculo auxiliar de afluências de Vilar-Tabuaço.

B	C	D	E	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Data	Caudal (QR)	Caudal Gpinfo	Cma (TC)	Cmd (1)	QR*S	Dif - MMQ (1)	Valor final (1) (a)	EP % (1a)	Valor final (1) (b)	EP % (1b)	Influência	Valor final
23/10/2025	0,03	-0,33	16,890	0,063	0,063		0,063	0,000	0,063	0,000	(a/b)	0,063
24/10/2025	0,03	0,22	13,890	0,063	0,063		0,063	0,000	0,063	0,000	(a/b)	0,063
25/10/2025	0,16	1,36	10,690	0,334	0,338		1,360	0,000	0,334	1,026	(a)	1,360
26/10/2025	0,23	-0,16	18,420	0,480	0,486		0,480	0,419	0,480	0,419	(a/b)	0,899
27/10/2025	0,21	0,08	15,240	0,438	0,443		0,438	0,000	0,438	0,000	(a/b)	0,438
28/10/2025	0,15	0,33	22,690	0,313	0,317		0,330	0,000	0,313	0,017	(a)	0,330
29/10/2025	0,11	0,45	16,380	0,230	0,232		0,450	0,000	0,230	0,220	(a)	0,450
30/10/2025	0,1	0	19,740	0,209	0,211		0,209	1,196	0,209	1,196	(a/b)	1,405
31/10/2025	0,72	2,36	16,050	1,503	1,520		2,360	0,000	1,503	0,857	(a)	2,360
01/11/2025	11,3	11	13,330	17,117	23,863		11,000	0,000	11,000	0,000	(a/b)	11,000
02/11/2025	2,09	2,97	11,150	4,362	4,414		2,970	1,392	4,362	0,000	(b)	4,362
03/11/2025	1,24	0,53	10,370	2,588	2,619		0,530	2,058	2,588	0,000	(b)	2,588
04/11/2025	0,92	1,32	10,440	1,920	1,943		1,320	0,600	1,920	0,000	(b)	1,920
05/11/2025	7,12	11,33	8,840	11,664	15,036		11,330	0,000	11,664	0,334	(a)	11,330
06/11/2025	6,99	8,67	8,290	11,495	14,761		11,495	0,000	11,495	0,000	(a/b)	11,495
07/11/2025	13	15,19	8,170	19,335	27,453		15,190	0,000	15,190	0,000	(a/b)	15,190
08/11/2025	5,94	7,42	8,380	10,125	12,544		7,420	2,705	10,125	0,000	(b)	10,125
09/11/2025	3,31	4,66	8,990	6,694	6,990		4,660	2,034	6,694	0,000	(b)	6,694
10/11/2025	2,6	3,77	8,230	5,426	5,491		5,426	1,656	5,426	1,656	(a/b)	3,770
11/11/2025	2,44	2,71	6,870	5,092	5,153		5,092	2,382	5,092	2,382	(a/b)	2,710

Figura 38. Excerto de folha de cálculo referente a Vilar-Tabuaço (Excel)

A primeira, designada como "Valor final (1) (a)", ilustrada na Figura 39, resulta da aplicação de um conjunto de regras condicionais que privilegiam a continuidade da série temporal e a coerência com a evolução observada nos instantes adjacentes. Esta abordagem inclui verificações da tendência temporal e mecanismos de controlo de variações abruptas, evitando descontinuidades artificiais e assegurando que os valores estimados permanecem fisicamente admissíveis, nomeadamente garantindo a não ocorrência de caudais negativos.

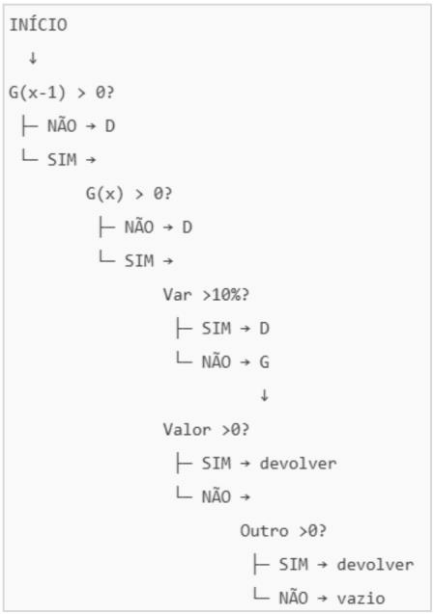


Figura 39. Algoritmo esquemático - Valor final 1 (a)

A segunda estimativa, identificada como "Valor final (1) (b)", representada na Figura 40, baseia-se predominantemente na evolução do indicador hidrológico de caudal médio diário Cmd (1), sendo utilizada como alternativa nos casos em que a primeira abordagem não assegura uma representação consistente do comportamento esperado do sistema. Esta formulação permite incorporar a dinâmica hidrológica local, refletindo o regime de escoamento associado às condições observadas.

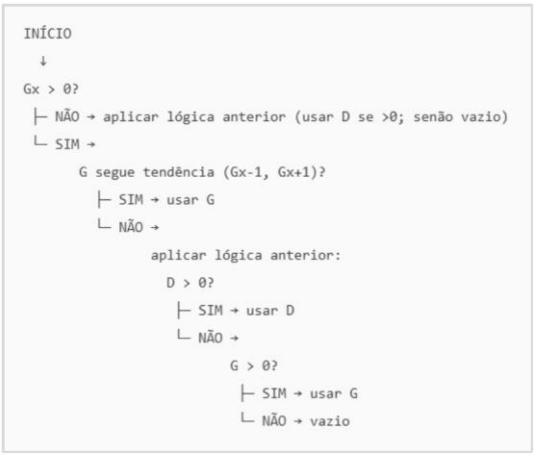


Figura 40. Algoritmo esquemático - Valor final 1 (b)

Por fim, é efetuada uma escolha entre as duas estimativas, dando assim resultado ao "Valor final" e representado no excerto da análise temporal do gráfico ilustrado da Figura 41.

Este processo de seleção procura garantir que, para cada instante temporal, é adotado o valor mais coerente do ponto de vista hidrológico, tendo em conta simultaneamente a continuidade temporal, a consistência física e a informação disponível nas diferentes fontes.

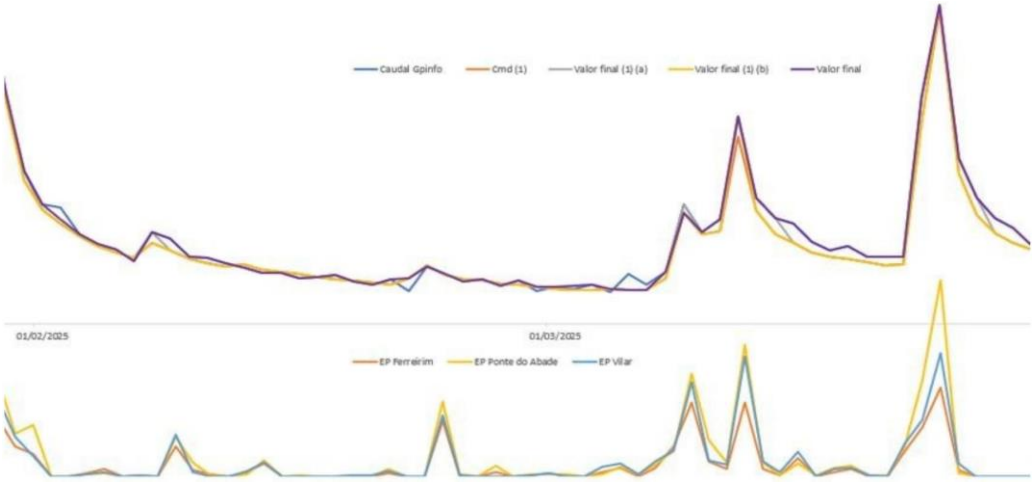


Figura 41. Comparação entre o caudal estimado e pluviosidade (Excel)

Em síntese, o cálculo A corresponde a uma formulação empírica contínua calibrada por mínimos quadrados, que integra simultaneamente uma componente linear para regimes de baixo caudal e um mecanismo de amortecimento progressivo para caudais elevados, permitindo representar de forma coerente a resposta hidrológica do sistema e a transição entre escoamento de base e eventos de cheia.

5.1.1.2 Cálculo B: Médias Móveis

Em paralelo, foi desenvolvido o cálculo B com base na análise da relação direta entre os dados hidrométricos e os valores de afluência ao aproveitamento, recorrendo a técnicas de suavização temporal e tratamento estatístico das séries.

Esta metodologia baseia-se na combinação entre os valores observados de caudal afluente e valores suavizados obtidos através da aplicação de médias móveis de três e cinco observações consecutivas de caudais médios diários, ilustrado na Figura 42. Ao contrário de uma simples média móvel, o método utiliza um fator de ponderação dinâmico que varia em função da proximidade entre o valor observado e a tendência local da série temporal, permitindo adaptar o grau de suavização às características dos dados.

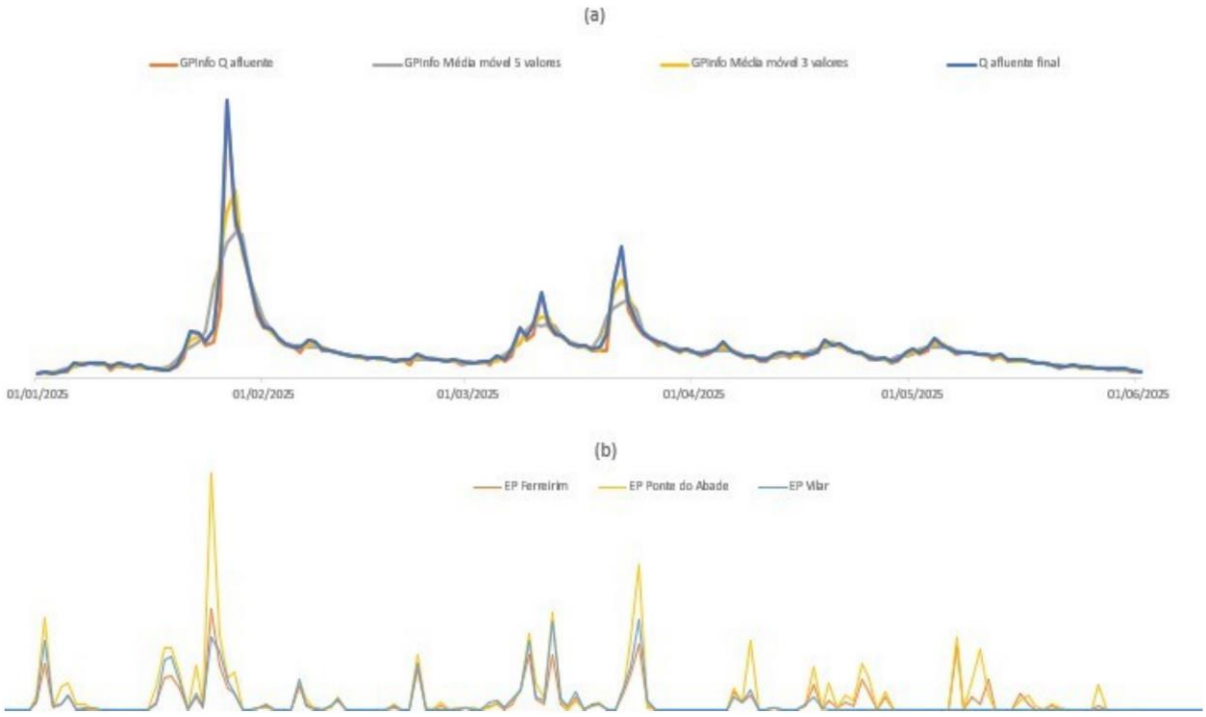


Figura 42. Análise temporal para o período de janeiro a junho de 2025: (a) hidrograma dos caudais afluentes e médias móveis; (b) hietograma das estações de Ferreirim, Ponte do Abade e Vilar (Excel)

Quando o valor observado apresenta um comportamento coerente com a evolução recente da série, é-lhe atribuído um peso mais elevado, preservando a informação registada. Por outro lado, quando são identificados desvios significativos relativamente às médias móveis, é atribuída maior importância aos valores suavizados, reduzindo a influência de oscilações pontuais ou potenciais erros de medição.

Ao contrário do cálculo A, esta metodologia não introduz explicitamente uma distinção entre regimes de escoamento, funcionando essencialmente como um filtro aplicado à série original.

Como consequência, a resposta obtida apresenta maior estabilidade, mas uma menor capacidade de representar variações rápidas associadas a eventos extremos.

Em particular, a suavização aplicada ao cálculo final tende a atenuar parcialmente os picos de cheia, embora de forma menos pronunciada do que numa abordagem baseada exclusivamente em médias móveis. Esta característica permite reduzir o ruído da série sem eliminar completamente a resposta a eventos hidrológicos significativos, promovendo um equilíbrio entre estabilidade e capacidade de representação da variabilidade temporal observada.

5.1.2 Aproveitamento Hidroelétrico da Régua

No caso do aproveitamento hidroelétrico da Régua, a estimativa das afluências foi desenvolvida a partir de uma abordagem integrada que combinou, por um lado, o balanço hídrico da cascata hidroelétrica e, por outro, de uma relação de estações hidrométricas estabelecida entre secções de referência do rio Douro.

Esta opção metodológica resultou da necessidade de articular diferentes fontes de informação, cada uma com vantagens e limitações próprias, de modo a construir uma série final de afluências tão coerente quanto possível de forma a representar o comportamento hidrológico real do sistema.

Numa primeira fase, foi considerado o balanço hídrico associado à cascata, tendo em conta a localização e contributos dos aproveitamentos situados a montante da Régua, nomeadamente Foz Tua, Valeira e Tabuaço, bem como o contributo afluente à própria Régua, assim como a relação com a estação hidrométrica, como ilustrado na Figura 43.

Em termos conceptuais, este balanço traduz a aplicação do princípio da conservação da massa, admitindo que a afluência observada na secção da Régua resulta da combinação entre os caudais provenientes dos aproveitamentos a montante e o contributo próprio gerado na bacia própria.

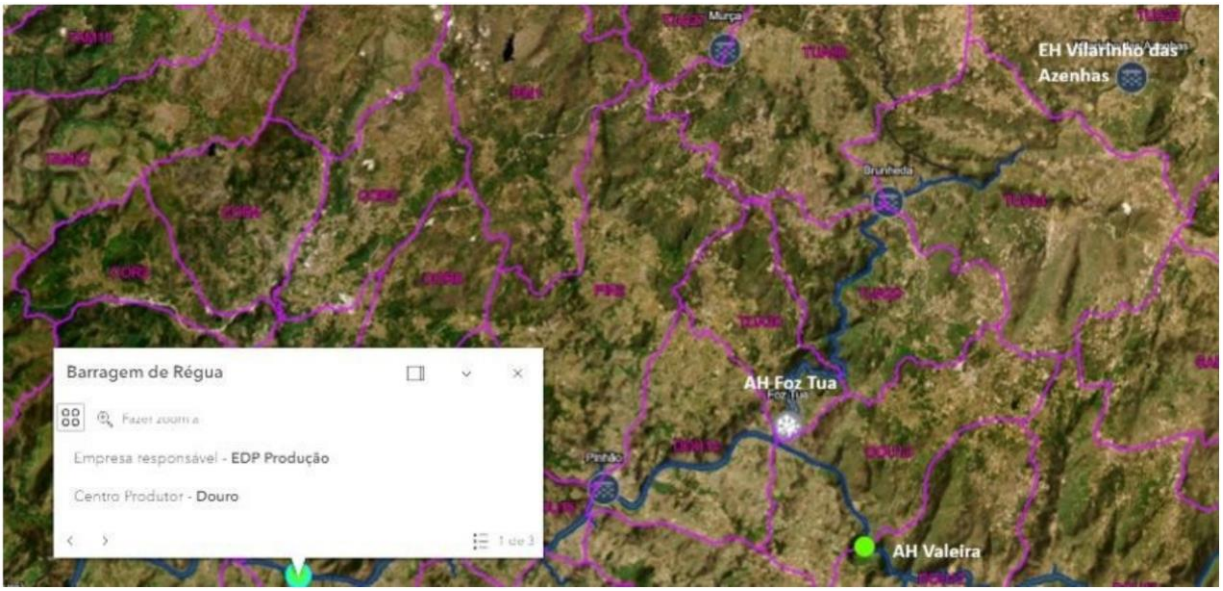


Figura 43. Enquadramento geográfico da Barragem da Régua (*Watt Now*, 2025)

Para apoiar esta análise, foram considerados os dados de exploração disponíveis, bem como séries derivadas através da aplicação de médias móveis, utilizadas para reduzir a variabilidade de curto prazo e evidenciar a tendência temporal dos caudais.

A comparação entre estas séries permitiu avaliar a consistência dos dados e apoiar a definição do valor final de afluência adotado. A partir dos dados de exploração, foi assim possível estruturar uma primeira aproximação às afluências, decompondo o sistema entre a componente propagada a partir de montante e a componente local.

A Figura 44 apresenta um excerto da análise gráfica desenvolvida para a avaliação das afluências à Régua.

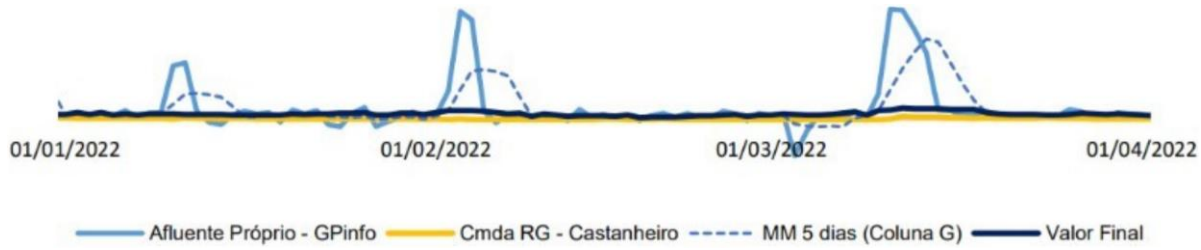


Figura 44. Excerto de análise gráfica - Estimativa de Caudais Afluentes da Régua (Excel)

Em termos práticos, a análise dos dados evidencia que, em determinados intervalos temporais, os valores registados não resultam exclusivamente de afluências naturais, mas incorporam também efeitos artificiais associados à exploração do sistema, nomeadamente operações de turbinamentos e bombagem entre aproveitamentos. Esta influência manifesta-se através de

inconsistências no balanço hídrico, retratado graficamente na Figura 45 e fundamentada através da Figura 44, em que os caudais afluentes não são compatíveis com a resposta hidrológica expectável da bacia, refletindo a interferência direta da gestão operacional da cascata.

Data	Afluente RG	Efluente VR	Efluente FZ	Bombado FZ	Efluente TC	Afluente Próprio RG (EXPLO)	Cmda - Castanheiro	Cmda RG - Castanheiro	Valor Final
27/01/2022	267,36	275,60	2,87	0,00	4,60	-15,71	7,07	1,64	1,64
28/01/2022	226,98	223,95	3,48	0,00	3,94	-4,39	7,06	1,63	1,63
29/01/2022	223,52	214,12	0,00	0,00	4,85	4,55	7,77	1,80	1,80
30/01/2022	183,39	162,99	0,00	0,00	1,21	19,19	8,32	1,92	1,92
31/01/2022	224,35	207,14	6,91	0,00	1,21	9,09	3,87	0,89	0,89
01/02/2022	80,21	68,46	0,00	0,00	0,89	10,86	7,08	1,64	1,64
02/02/2022	69,90	38,97	24,14	61,74	0,47	68,06	3,06	0,71	0,71
03/02/2022	76,78	28,40	36,72	245,97	0,48	257,15	8,38	1,94	1,94
04/02/2022	154,34	117,36	34,08	235,09	0,47	237,52	5,65	1,31	1,31
05/02/2022	68,96	47,53	0,00	0,00	0,47	20,96	5,93	1,37	1,37
06/02/2022	35,63	29,91	12,09	0,00	0,47	-6,84	6,39	1,48	1,48
07/02/2022	39,20	13,45	10,34	0,00	0,48	14,93	2,78	0,64	0,64

Figura 45. Excerto de cálculo do AH da Régua (Excel)

Foi precisamente por esta razão que, embora o balanço hídrico da cascata tenha sido considerado e utilizado como enquadramento físico do problema, a metodologia final assentou maioritariamente na relação hidrométrica, entendida como mais robusta do ponto de vista da coerência com o comportamento natural do escoamento.

Neste contexto, recorreu-se à relação entre os níveis medidos nas estações hidrométricas de Vilarinho das Azenhas e os caudais em Castanheiro, ambas pertencentes à rede de monitorização da EDP, aproveitando o facto de os registos hidrométricos apresentarem maior continuidade e menor interferência por operações de exploração.

A opção por utilizar níveis em Vilarinho das Azenhas e caudais em Castanheiro prende-se com a disponibilidade e qualidade dos dados em cada uma destas secções. Os níveis hidrométricos são, em muitos casos, a variável observada com maior continuidade e estabilidade, podendo posteriormente ser convertidos em caudais através de uma curva de vazão ajustada. Esta estratégia permite transformar uma variável de observação direta, de fácil medição e boa continuidade temporal, numa variável hidrológica de interesse, isto é, o caudal. Neste caso específico, a conversão foi realizada aplicando a curva de vazão histórica da estação de Castanheiro aos níveis medidos em Vilarinho das Azenhas, dada a inexistência de curva associada à última estação referida.

Um aspeto igualmente fundamental desta abordagem corresponde à consideração do desfasamento temporal entre as secções das duas estações hidrométricas mencionadas anteriormente. Uma variação observada a montante não se traduz instantaneamente a jusante, pois o escoamento necessita de tempo para se propagar ao longo do leito fluvial. Com base na análise das séries temporais e no comportamento observado do sistema, foi considerado um

atraso de aproximadamente 8 horas, permitindo sincronizar os sinais hidrológicos e melhorar a coerência da relação estabelecida. Esta consideração é particularmente importante em eventos de cheia, em que a posição temporal do pico do hidrograma influencia significativamente a interpretação dos resultados.

Uma vez obtida a série de caudais em Castanheiro, foi necessário adaptá-la à realidade da secção da Régua. Para esse efeito, foi utilizado um fator de transposição igual a 1,30, obtido a partir da moda dos volumes históricos registados entre Castanheiro e Régua, e que apresenta uma ordem de grandeza coerente com a razão entre as áreas das bacias associadas.

Este valor funciona como um coeficiente empírico de ajuste entre as duas secções, traduzindo a diferença global entre os volumes afluentes observados em Castanheiro e os que efetivamente se verificam na Régua.

A estimativa das afluências à Régua foi obtida a partir dos dados de Castanheiro, recorrendo à aplicação do fator de relação de áreas permitiu representar o contributo adicional da bacia intermédia entre ambas as secções. A metodologia adotada procurou integrar tanto a propagação dos caudais provenientes de montante como o escoamento gerado localmente, obtendo-se uma série final temporalmente alinhada com a Régua.

Utilizou-se a informação proveniente de estações meteorológicas e pluviométricas distribuídas ao longo da bacia, designadamente as estações designadas nas folhas de cálculo como EM Alijó, EM Macedo de Cavaleiros, EM Vinhais, EP Tabuaço, EP Vilar, EM Fonte Longa e EM Folgares. A seleção destas estações não foi feita apenas com base na proximidade à Régua, mas também em função da sua capacidade para garantir uma cobertura espacial representativa das diferentes zonas da bacia que contribuem para o escoamento observado na secção em análise e, assim, poder ter confirmação do comportamento hidrológico, conforme ilustrado na Figura 46.

A inclusão de estações mais afastadas, como Macedo de Cavaleiros ou Vinhais, justifica-se precisamente pelo facto de estas representarem áreas de montante e zonas com grande relevância na formação dos caudais que mais tarde se propagam até à Régua. Já estações como Tabuaço, Vilar, Fonte Longa ou Folgares permitem caracterizar com maior detalhe a precipitação na envolvente intermédia e mais próxima do troço em estudo, sendo particularmente úteis na interpretação de eventos localizados de resposta rápida.

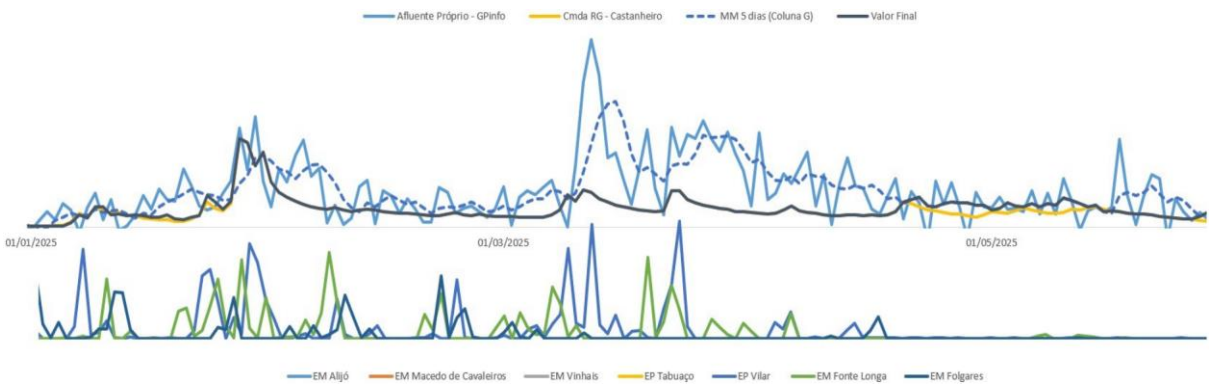


Figura 46. Séries estimativas de afluências e dados pluviométricos (Excel)

A análise conjunta destas estações permitiu confirmar que os principais aumentos de caudal observados nas séries hidrométricas correspondem a episódios de precipitação significativa distribuídos ao longo da bacia. Esta verificação é fundamental porque reforça a coerência física da metodologia: os resultados não decorrem apenas de um ajuste empírico entre secções, mas encontram suporte em processos meteorológicos efetivamente observados.

Para além disso, a utilização de várias estações contribui para diminuir a sensibilidade a falhas ou enviesamentos de registos individuais, reforçando a robustez da interpretação hidrológica.

Numa avaliação final, verificou-se que a série ajustada por relação com Castanheiro apresenta uma coerência volumétrica superior à obtida pela utilização direta dos dados de exploração. A Figura 47 compara os volumes anuais obtidos pelas diferentes séries e os respetivos desvios percentuais.

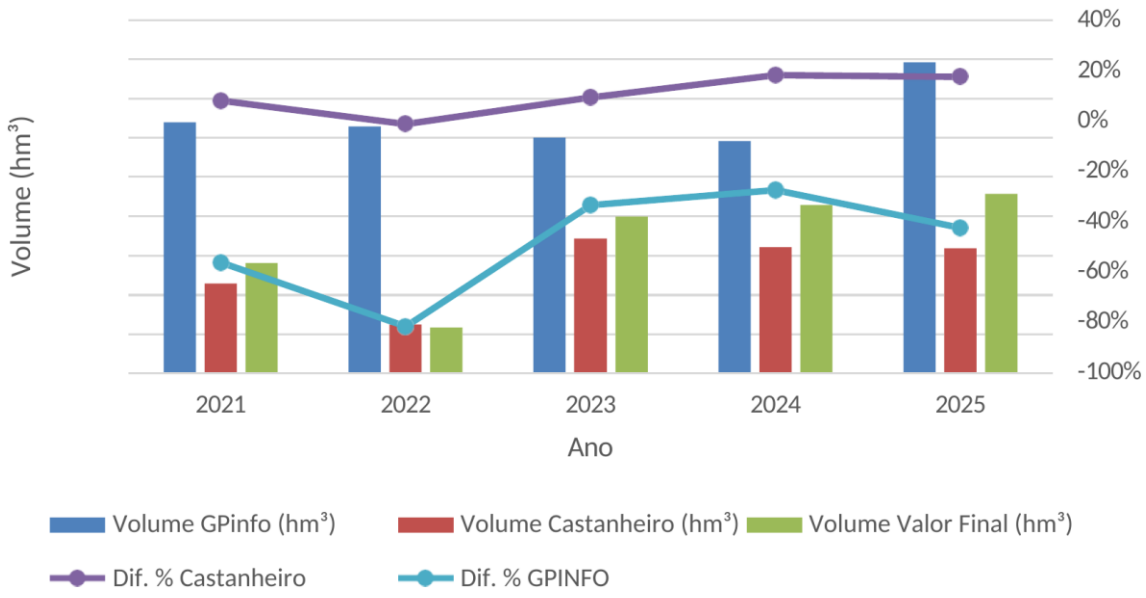


Figura 47. Comparação dos volumes anuais (hm³) e respetivos desvios percentuais (Excel)

Esta conclusão confirmou que, embora o balanço hídrico da cascata seja essencial para enquadrar fisicamente o problema, a série final de afluências da Régua devia assentar predominantemente na relação hidrométrica, por apresentar maior consistência e menor vulnerabilidade a perturbações operacionais.

Em síntese, a metodologia aplicada à Régua baseou-se numa abordagem híbrida em que o balanço da cascata foi utilizado no enquadramento, mas em que a estimativa final das afluências resultou maioritariamente da transformação da série hidrométrica de Castanheiro, ajustada por um fator empírico derivado da relação histórica entre secções e validada com o apoio de informação pluviométrica e meteorológica distribuída espacialmente. A escolha desta abordagem foi justificada pela maior fiabilidade dos dados hidrométricos face às limitações dos dados de exploração na bacia do Douro.

5.1.3 Aproveitamento Hidroelétrico de Crestuma-Lever

No processo de construção da série de caudais foram testadas três metodologias distintas, com o objetivo de identificar a formulação que melhor representasse o comportamento hidrológico do sistema em estudo.

As abordagens consideradas incluíram uma metodologia baseada diretamente na estação hidrométrica de referência, uma metodologia baseada em equações e outra num *threshold*. Embora todas as metodologias utilizem como base a série de caudais médios diários registada na estação hidrométrica de Fragas da Torre (FGT) e os dados de exploração do sistema, diferem na forma como relacionam estas duas fontes de informação para estimar as afluências ao aproveitamento. A primeira metodologia baseia-se na aplicação direta de uma relação de áreas drenantes, assumindo que os caudais observados em Fragas da Torre podem ser transferidos para a secção em estudo através de um fator de proporcionalidade associado às áreas das respetivas bacias hidrográficas. A segunda metodologia procura estabelecer uma correlação empírica [49] entre os caudais observados na estação hidrométrica e os valores de afluência obtidos a partir do balanço hídrico calculado com base nos dados de exploração.

Por fim, a terceira metodologia recorre a uma função *threshold* de dois ramos, desenvolvida igualmente a partir da relação entre os dados hidrométricos e os valores obtidos por balanço hídrico, permitindo representar de forma diferenciada distintos regimes hidrológicos observados na série. Os dados de entrada utilizados corresponderam, em primeiro lugar, aos caudais médios diários provenientes da exploração para as centrais de Crestuma, Carrapatelo e

Torrão, designadamente o caudal médio diário afluente a Crestuma, os caudais médios diários efluentes de Carrapatelo e Torrão, bem como o caudal bombado em Torrão, representada a localização destes aproveitamentos na Figura 48.

Paralelamente, foi considerada a série de caudais médios diários registada na estação hidrométrica de Fragas da Torre, que constituiu a principal referência hidrológica externa ao sistema de exploração.

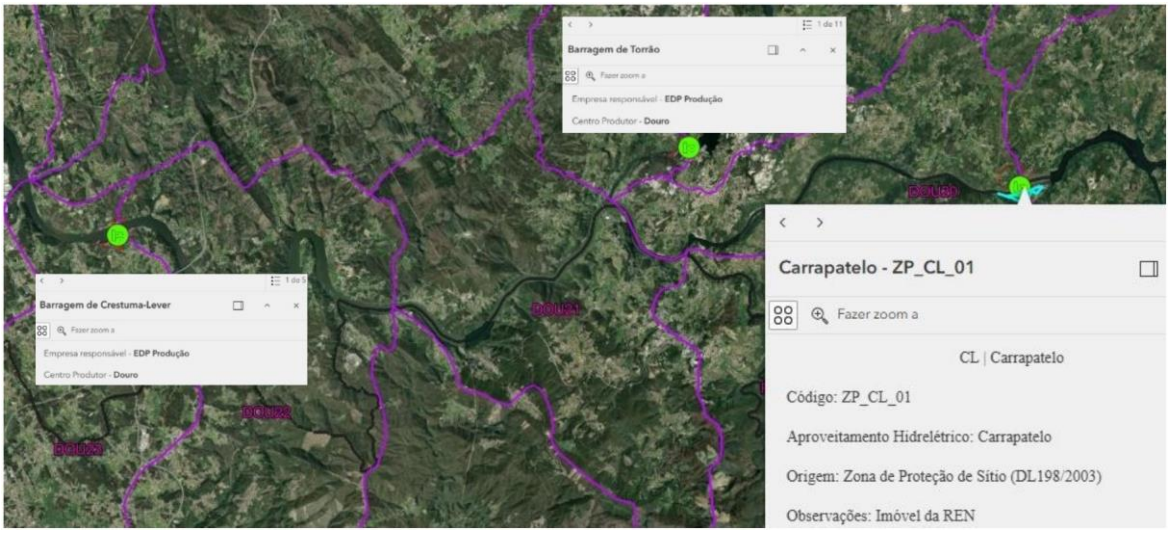


Figura 48. Enquadramento geográfico da Barragem de Crestuma-Lever (*Watt Now*, 2025)

5.1.3.1 Cálculo A: Relação Espacial com Estação Hidrométrica

A primeira metodologia considerada para a construção da matriz de caudais assentou numa transposição por proporção de áreas a partir da estação hidrométrica de Fragas da Torre como referência principal para a estimativa dos caudais no sistema em estudo. Esta abordagem constituiu a base metodológica inicial do trabalho, por assentar numa série hidrológica observada, exterior ao sistema de exploração, e por permitir estabelecer uma ligação direta entre os registos hidrométricos disponíveis e a resposta hidrológica pretendida.

A adoção deste conceito fundamentou-se na necessidade de dispor de uma referência observacional independente dos balanços internos do sistema. A estação hidrométrica foi, assim, considerada como a principal fonte de informação hidrológica externa, assumindo-se que os seus registos apresentavam um comportamento suficientemente representativo para servir de base à estimativa dos caudais. De forma a adaptar os valores observados na estação à escala espacial do sistema em análise, foi utilizado um fator de ajuste espacial correspondente à relação de áreas entre o elemento hidrológico de origem e o aproveitamento em estudo.

No ficheiro de cálculo, esta relação encontra-se explicitamente identificada como EH/AH=1,86; funcionando como coeficiente de transposição espacial entre os caudais observados na estação e os valores estimados para o sistema.

A aplicação deste fator traduz a hipótese de que, numa primeira aproximação, existe proporcionalidade entre a área drenada e o caudal associado, permitindo escalar os valores observados para a dimensão da área de interesse. Esta formulação apresenta vantagens evidentes.

Em primeiro lugar, permite trabalhar com uma série baseada em observação direta, o que lhe confere maior robustez hidrológica.

Em segundo, fornece uma estimativa inicial coerente com a variabilidade temporal observada na estação, preservando a sequência de comportamento dos eventos hidrológicos ao longo do tempo.

Contudo, a utilização direta da estação hidrométrica implica também limitações que importa reconhecer. A aplicação de um fator de relação de áreas pressupõe que a resposta hidrológica específica da estação e da área em estudo seja suficientemente semelhante, o que nem sempre se verifica de forma rigorosa. Fatores como diferenças na precipitação local, nas características fisiográficas da bacia, nos processos de armazenamento ou mesmo na influência de estruturas hidráulicas podem introduzir desvios significativos entre o comportamento observado na estação e o comportamento efetivo do sistema.

A abordagem baseada na estação constituiu, portanto, o ponto de partida do trabalho, funcionando como referência hidrológica principal e como base para o desenvolvimento de formulações simplificadas que procuraram reproduzir, de forma mais expedita, os resultados obtidos a partir desta metodologia inicial.

Contudo, a avaliação dos resultados revelou discrepâncias significativas na análise de caudais específicos ao longo da cascata do Douro em regime de caudal base, os valores em Crestuma revelavam-se desproporcionalmente mais elevados, apresentando uma ordem de grandeza muito superior face aos registados em Fragas da Torre, o que contraria a homogeneidade expectável neste regime. As abordagens por *threshold* e por equações lineares foram, nesta sequência consideradas, mas não surgem independentes da estação, mas sim como tentativas de simplificar o cálculo e reduzir o tempo necessário à estimativa dos caudais, preservando, tanto quanto possível, a coerência com a resposta hidrológica de referência.

5.1.3.2 Cálculo B: Método Threshold

A segunda metodologia desenvolvida corresponde a uma tentativa de simplificação de tornar o cálculo dos caudais mais rápido e operacionalmente mais eficiente, sem perder de forma significativa a coerência com a estimativa de referência.

Esta assenta na definição de um modelo segmentado por *threshold*, no qual a relação entre a variável de entrada e o caudal estimado é descrita por uma função linear por troços.

A formulação adotada baseia-se em três parâmetros principais: o *threshold* T, que define o ponto de transição entre dois regimes de comportamento, e dois coeficientes de inclinação, a e b, que controlam a resposta do modelo abaixo e acima desse limiar.

O objetivo explícito indicado no ficheiro de cálculo consiste na minimização conjunta destes três parâmetros, através de um procedimento de calibração baseado na soma dos mínimos quadrados. O processo de ajuste conduziu aos valores T=3,30, a=7,878 e b=0,265, tendo sido obtida uma soma MMQ igual a 26 312 151,9; sendo a calibração feita desde o ano 1998, agregando assim os desvios quadráticos desde essa mesma data, resultando numa robustez estatística ao modelo, incluindo períodos de diversos eventos hidrológicos.

A expressão implementada traduz uma função contínua por troços. Matematicamente, esta relação pode ser descrita por:

$$Q_{est} = \begin{cases} Q_{in} \cdot a \cdot R, & se\ \ Q_{in} < T \\ (Q_{in} - T) \cdot b \cdot R + T \cdot a \cdot R, & se\ \ Q_{in} \geq T \end{cases} \quad (5.2)$$

Na qual,

- Q_{est} representa o caudal estimado;
- Q_{in} corresponde à variável de entrada;
- R trata-se do fator de relação de área;
- T representa o caudal base;
- a trata-se do fator de amortecimento;
- b representa o valor associado ao fator de ganho.

Do ponto de vista metodológico, esta abordagem apresenta uma vantagem importante face à metodologia baseada na estação: permite substituir a utilização direta da série hidrométrica por uma expressão simples, parametrizada e facilmente replicável.

Assim, o modelo *threshold* pretende constituir uma tentativa de acelerar o cálculo, mantendo uma estrutura suficientemente flexível para preservar parte da variabilidade observada no método de referência.

A vantagem é não evitar uma única relação linear para toda a gama de caudais. A Figura 49 apresenta a relação entre os caudais observados na estação hidrométrica de Fragas da Torre e os valores de afluência calculados por balanço hídrico, ilustrando um gráfico representativo de dispersão.

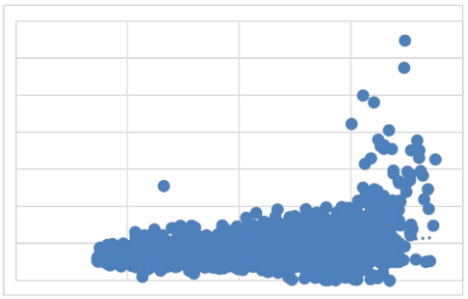


Figura 49. Gráfico de dispersão (Excel)

Embora tenha sido testada uma formulação baseada numa função threshold de dois ramos, a distribuição dos pontos não evidencia a existência de duas tendências claramente diferenciadas. Consequentemente, o valor de interseção entre os ramos apresenta uma reduzida fundamentação física, resultando numa separação pouco robusta dos dados e numa definição pouco clara da transição entre regimes.

Estes resultados sugerem que a hipótese de dois regimes hidrológicos distintos não é particularmente adequada para o conjunto de dados analisado, justificando o fraco desempenho da metodologia quando comparada com as restantes abordagens testadas.

A interpretação física do valor calibrado do threshold levanta também algumas reservas, dado que é extremamente reduzido quando comparado com a ordem de grandeza dos caudais que efetivamente atravessam Crestuma-Lever.

Ainda assim, a função por ramos determinada acompanha, de forma geral, a tendência média dos dados, como se pode verificar graficamente.

No entanto, é de salientar que, em casos de picos de cheia, a função por ramos não se adequa aos valores esperados segundo a relação espacial com a estação hidrométrica e nos caudais de menor grandeza tende a sobrestimar, tal como ilustrado na Figura 50.

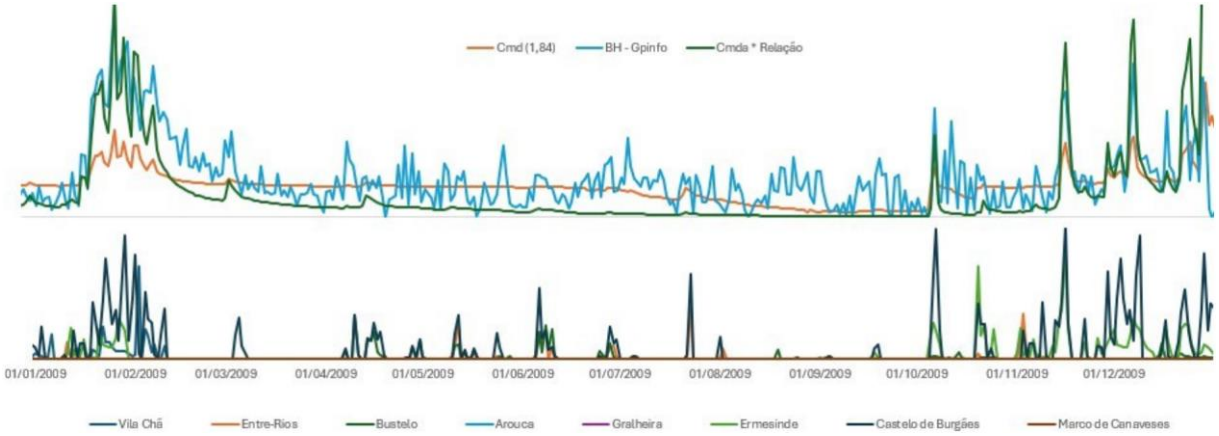


Figura 50. Relação entre os caudais afluentes estimados e os registos de precipitação (Excel)

5.1.3.3 Cálculo C: Equações lineares

A metodologia baseada em equações lineares foi desenvolvida como alternativa à formulação por *threshold*, na sequência das limitações identificadas na interpretação física desta última.

Neste contexto, foram testadas equações lineares com o objetivo de avaliar se uma formulação mais simples, sem introdução de limiar, permitiria descrever de forma aceitável a relação entre as variáveis. As equações consideradas foram as seguintes:

$$y = 0{,}501x - 31{,}218 \tag{5.3}$$

$$y = 0{,}7028x \tag{5.4}$$

$$y = 0{,}82x - 31{,}849 \tag{5.5}$$

$$y = 1{,}1807x \tag{5.6}$$

No entanto, a análise dos resultados revelou que, independentemente da formulação adotada, os modelos lineares apresentam uma limitação comum: os valores de R^2 obtidos são reduzidos, como representado na Figura 51. Este facto indica que as equações lineares explicam apenas uma parte limitada da variabilidade observada nos dados, permanecendo uma fração significativa da dispersão sem explicação.

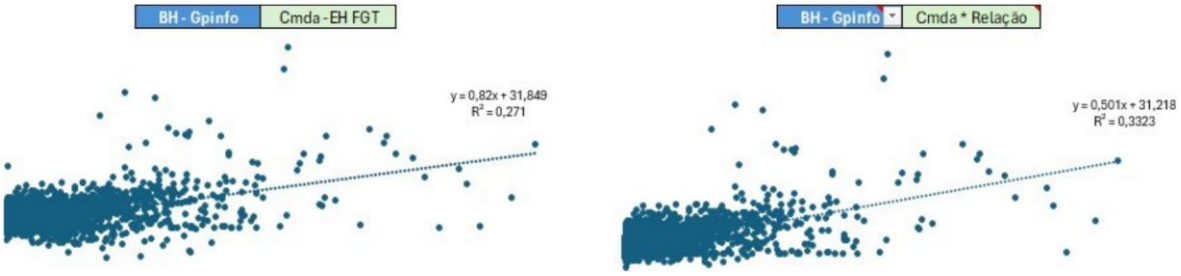


Figura 51. Diagramas de dispersão entre os caudais observados sem e com transposição espacial (Excel)

Em termos estatísticos, um baixo valor de R^2 traduz uma fraca capacidade do modelo para reproduzir a relação entre as variáveis ao longo do tempo, evidenciando que a hipótese de proporcionalidade linear constante não é adequada ao comportamento do sistema.

Adicionalmente, foram analisadas outras formas funcionais, nomeadamente relações quadráticas, exponenciais e logarítmicas, não se tendo verificado melhorias significativas no ajuste aos dados. Este resultado sugere que a elevada dispersão observada está associada à complexidade da relação hidrológica entre as variáveis, e não apenas à forma matemática da equação adotada.

Esta limitação é coerente com a análise gráfica dos dados, na qual se observa uma dispersão considerável da nuvem de pontos, particularmente para valores mais elevados da variável explicativa. Nestes domínios, a variabilidade aumenta de forma significativa, revelando que o sistema não apresenta uma resposta linear homogénea.

Assim, embora as equações lineares consigam captar uma tendência média global, não são capazes de representar de forma satisfatória a variabilidade associada aos diferentes regimes hidrológicos.

Deste modo, e apesar da sua simplicidade e facilidade de implementação, a hipótese de utilização de equações lineares foi considerada inadequada para os objetivos do estudo.

O baixo valor de R^2, aliado à incapacidade de reproduzir de forma consistente a evolução temporal dos caudais e dos volumes anuais, conduziu à rejeição desta abordagem.

Assim, as equações lineares devem ser interpretadas como uma etapa exploratória no desenvolvimento metodológico, útil para avaliar o potencial de simplificação do modelo, mas insuficiente para representar a complexidade do comportamento hidrológico do sistema em análise.

5.1.3.4 Comparação de metodologias e análise por volumes

Para validar a coerência hidrológica global das diferentes abordagens, estudaram-se os volumes totalizadores da série temporal em estudo.

Esta análise permitiu comparar os resultados obtidos pelas diferentes metodologias com os volumes de referência associados ao sistema de exploração, constituindo um critério determinante na seleção da formulação mais adequada.

No caso da metodologia baseada na estação hidrométrica, os volumes obtidos apresentam uma tendência global coerente com a evolução esperada do sistema, refletindo adequadamente a variabilidade interanual dos caudais.

Esta metodologia, por se basear numa série observada independente e ajustada pela relação de área, permite preservar o comportamento hidrológico global e constitui, por isso, uma abordagem metodológica, tal como ilustrado na Figura 52.

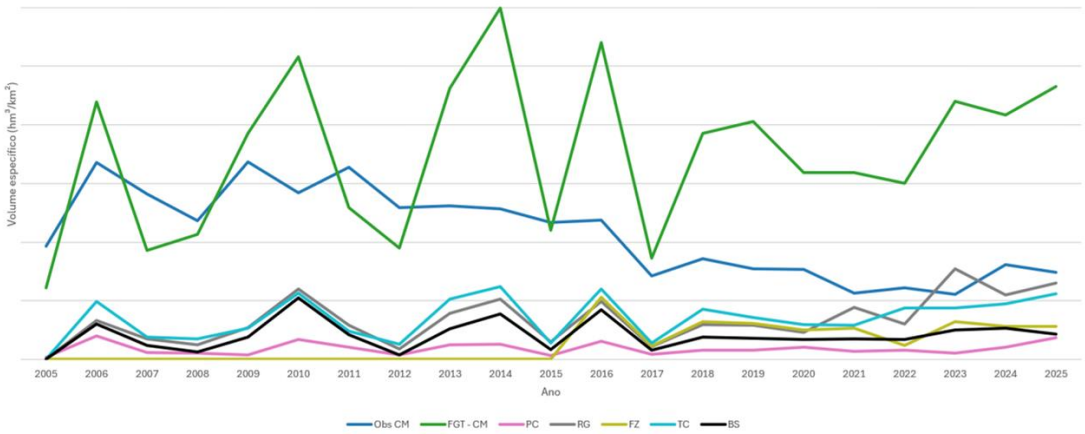


Figura 52. Comparação de volumes específicos anuais afluentes às secções de algumas das barragens do curso principal do Douro (Excel)

A análise comparativa dos volumes anuais reforça esta conclusão. Observa-se que os volumes de exploração de Crestuma-Lever apresentam uma tendência própria, distinta da observada nas restantes séries consideradas. Esta diferença poderá estar associada à influência das condicionantes operacionais do sistema, nomeadamente dos caudais provenientes de Carrapatelo e Torrão e dos volumes bombados, que condicionam o balanço de exploração e afastam esta série do comportamento hidrológico natural da bacia. Segundo a Figura 53, a comparação entre os volumes anuais evidencia que as metodologias baseadas na *threshold,* Crestuma T*,* e nas equações lineares produzem, em diversos anos, volumes acumulados coerentes com a estimativa relativa à estação Fragas da Torre, Crestuma FGT.

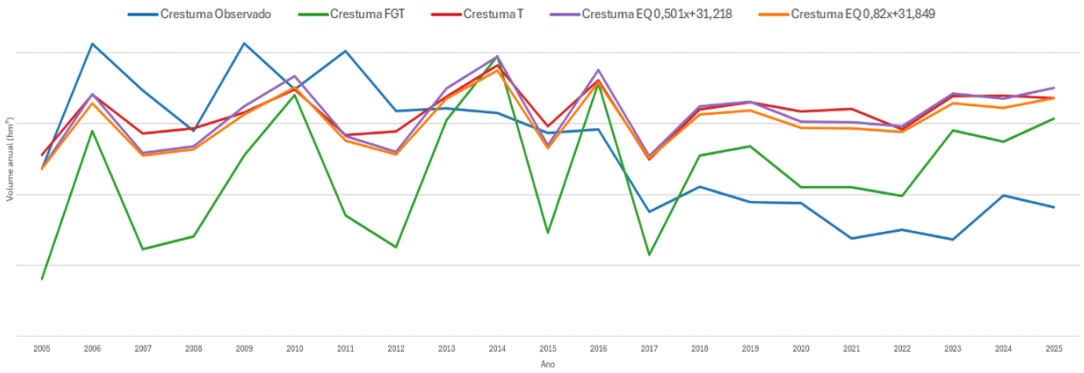


Figura 53. Comparação de volumes anuais pelas diferentes formas de cálculo (Excel)

Contudo, a análise conjunta da evolução temporal dos específicos anuais demonstra que esta concordância resulta, em larga medida, de uma compensação entre erros de sinal contrário. Verifica-se uma tendência para subestimar os períodos de maior disponibilidade hídrica e sobrestimar em períodos secos, reduzindo artificialmente a amplitude da variabilidade observada, conforme ilustrado na Figura 54.

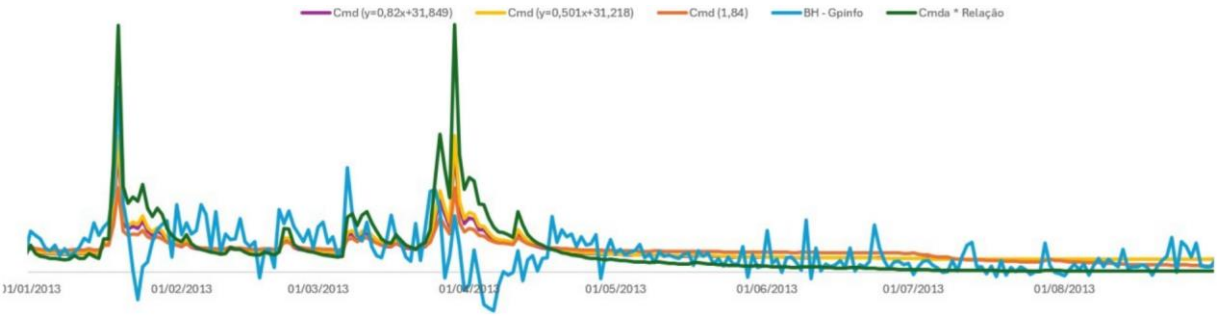


Figura 54. Excerto de análise de caudais médios diários (Excel)

Consequentemente, apesar de reproduzirem adequadamente os volumes totais, estas metodologias não representam de forma satisfatória os extremos hidrológicos nem a dinâmica interanual da série, motivo pelo qual foram consideradas inadequadas para a estimativa das afluências.

Em conclusão, a metodologia baseada na estação hidrométrica de referência foi considerada a mais adequada, uma vez que apresenta maior coerência tanto ao nível da variabilidade temporal dos caudais como na reprodução dos volumes anuais acumulados.

As restantes metodologias, embora úteis como exercícios de simplificação e análise, evidenciaram limitações significativas quando avaliadas à luz de um critério hidrológico integrado, justificando a sua não adoção como solução final para a construção da matriz de caudais.

5.2 MODELO HIDROLÓGICO

Neste subcapítulo é realçado o objetivo de analisar a capacidade do modelo para reproduzir o comportamento hidrológico do sistema ao longo do período de estudo. A análise centra-se nos caudais simulados nos principais pontos da bacia, com especial foco nos aproveitamentos hidroelétricos considerados, permitindo avaliar qualitativamente a resposta do modelo antes da comparação com as metodologias baseadas nos dados de exploração. Procura-se identificar eventuais diferenças na magnitude dos caudais simulados, na representação dos eventos hidrológicos mais significativos e na resposta global do sistema. Esta análise constitui uma etapa importante da avaliação do modelo, permitindo enquadrar os resultados obtidos no presente estudo relativamente a uma configuração previamente utilizada e validada para aplicações internas.

Importa referir que o modelo foi alimentado com séries de dados de caudais com extensão temporal significativa, compreendendo o período entre 1958 e 2025 e de precipitações e evapotranspirações compreendidas entre 1971 e 2025, o que permitiu garantir uma base robusta para a simulação hidrológica e a representação de diferentes condições hidrometeorológicas.

No caso dos aproveitamentos de Vilar-Tabuaço e Régua, a análise foi restringida ao período compreendido entre 2006 e 2025, uma vez que apenas a partir de 2006 se verificou um aumento significativo da fiabilidade e consistência dos dados de exploração disponíveis, permitindo uma comparação mais robusta entre caudais simulados, calculados e observados. Por outro lado, no caso de Crestuma-Lever, foi considerado o período com início em 2005, refletindo o intervalo temporal utilizado no desenvolvimento do método tradicional de estimação das afluências. Esta opção assegura a coerência entre metodologias, permitindo uma avaliação comparativa mais consistente, ainda que se reconheçam as limitações inerentes à qualidade e representatividade dos dados de exploração neste aproveitamento.

Adicionalmente, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados obtidos através da simulação desenvolvida no âmbito da presente dissertação (*Run 2*) e os resultados produzidos por uma simulação previamente existente (*Run 1*), utilizada internamente para outros fins de modelação hidrológica, ilustrada graficamente na Figura 55. Esta comparação incidiu exclusivamente sobre o período temporal comum a ambas as simulações, de forma a garantir a consistência da análise e a comparabilidade dos resultados. A *Run 1* integra informação de entrada proveniente dos pontos de controlo de Castro e Tormes, enquanto a *Run 2* corresponde à configuração implementada e analisada no presente trabalho.

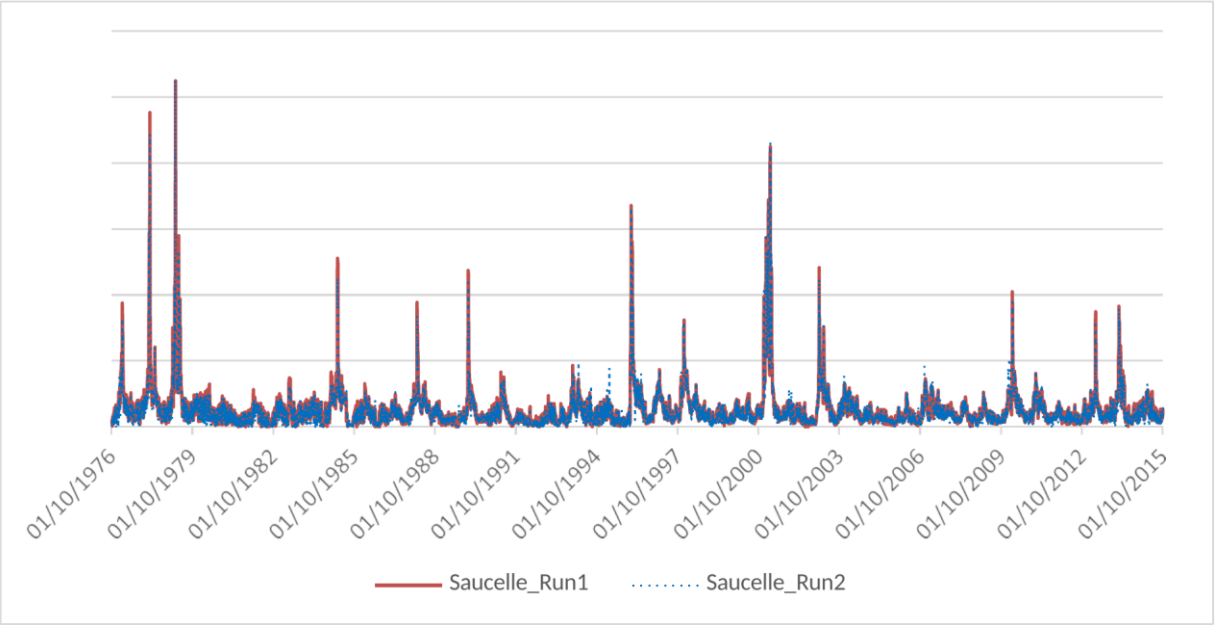


Figura 55. Comparação entre *Run1* e *Run2* em Saucelle (Excel)

A comparação entre ambas as simulações permitiu avaliar o impacto das diferentes condições de entrada na resposta hidrológica do modelo, bem como analisar a capacidade da nova configuração para reproduzir os padrões de escoamento simulados na versão previamente existente. Uma vez que a série de dados associada às estações de Castro e Tormes apenas se encontra disponível até 2015, a comparação entre ambas as simulações foi efetuada para o período comum compreendido entre 1976 e 2015. Esta análise permitiu avaliar o impacto da alteração da condição de entrada e verificar a consistência dos resultados obtidos ao longo da cascata do Douro.

Entre as duas simulações foram calculadas as diferenças percentuais obtidas nos principais locais de análise, evitando a apresentação dos valores absolutos associados às séries simuladas. Esta abordagem permite avaliar o impacto da alteração da condição de fronteira a montante, mantendo o foco na interpretação relativa dos resultados. Ao longo do curso principal do Douro, verifica-se uma redução gradual das diferenças percentuais entre o *Run1* e o *Run2* de montante para jusante. A maior diferença ocorre em Saucelle, com cerca de 6%, seguindo-se Pocinho e Valeira, ambos com aproximadamente 5%.

Nos aproveitamentos localizados mais a jusante, nomeadamente Régua e Carrapatelo, as diferenças reduzem-se para cerca de 4%, atingindo aproximadamente 3% em Crestuma-Lever. Nos pontos de controlo localizados nos afluentes do Douro, designadamente Foz Côa, Foz Águeda, Foz Tua, Baixo Sabor e Torrão, não se observam diferenças entre as duas simulações, registando-se diferenças percentuais iguais a 0%.

Este comportamento era expectável, uma vez que a alteração introduzida ocorreu exclusivamente na condição de fronteira a montante do curso principal do Douro, não afetando diretamente a modelação hidrológica das restantes bacias contribuintes. Verifica-se ainda que, de forma geral, o *Run2* apresenta valores ligeiramente inferiores aos obtidos no *Run1* ao longo da cascata do Douro. Este resultado sugere que a utilização dos caudais efluentes observados em Saucelle como condição de entrada conduz a volumes afluentes ligeiramente inferiores aos considerados na configuração original baseada nas estações de Castro e Tormes, sendo esta diferença posteriormente propagada ao longo do sistema. A diminuição progressiva da diferença percentual observada de montante para jusante pode ser explicada pelo aumento da área drenada e pela incorporação sucessiva dos contributos dos diversos afluentes ao longo da bacia.

À medida que o escoamento progride no curso principal do Douro, o volume total de água em circulação torna-se significativamente superior, reduzindo a influência relativa da diferença inicialmente introduzida na condição de fronteira a montante. Consequentemente, embora a diferença absoluta entre as simulações possa manter-se, o seu peso relativo face ao caudal total diminui gradualmente, traduzindo-se em diferenças percentuais cada vez menores nos aproveitamentos mais a jusante.

Globalmente, os resultados demonstram que a substituição da condição de entrada baseada nas estações de Castro e Tormes pelos caudais observados em Saucelle não altera de forma significativa o comportamento do modelo. As diferenças verificadas são reduzidas e tendem a atenuar-se ao longo da cascata hidroelétrica, evidenciando a robustez da nova configuração adotada e suportando a sua utilização para a utilização de um período alargado das simulações até 2025.

5.3 Comparação entre o Método Tradicional e o Modelo Hidrológico

A avaliação do desempenho de modelos hidrológicos ou de metodologias de estimativa de caudais assenta, de forma geral, em diferentes classes de indicadores estatísticos, os quais permitem quantificar a qualidade do ajuste entre valores observados e simulados.

Estes indicadores podem ser agrupados, de forma conceptual, em três grandes categorias: medidas de correlação, medidas de eficiência do modelo e medidas de erro e viés. Esta distinção é fundamental, uma vez que cada métrica traduz uma dimensão específica do

desempenho do modelo, não sendo, por si só, suficiente para uma avaliação robusta. Assim, a avaliação do ajuste deve assentar numa leitura integrada de indicadores complementares, de forma a captar simultaneamente a estrutura temporal da série, a eficiência global da simulação, a magnitude relativa dos erros e a eventual existência de tendências sistemáticas.

No presente trabalho, esta avaliação é realizada com base no coeficiente de correlação (R^2), no coeficiente de eficiência de *Nash–Sutcliffe* (NSE), numa métrica de erro baseada no RMSE normalizado pelo desvio-padrão das observações e no viés percentual (PBIAS), os quais constituem um conjunto de indicadores amplamente reconhecido na literatura para análise do desempenho de modelos hidrológicos [50].

As medidas de correlação avaliam o grau de associação estatística entre as séries simuladas e observadas, refletindo a capacidade do modelo em reproduzir a variabilidade temporal dos caudais.

O coeficiente de correlação (R^2) é a métrica mais comum nesta categoria, quantificando a proporção da variabilidade dos dados observados explicada pelo modelo. Valores elevados de R^2 indicam que o modelo consegue reproduzir adequadamente a dinâmica temporal do sistema.

No entanto, importa salientar que o R^2 não avalia diretamente a exatidão dos valores simulados, podendo assumir valores elevados mesmo quando existem desvios sistemáticos entre as séries. Assim, trata-se de uma medida de consistência estrutural, mas não de qualidade absoluta do ajuste. Do ponto de vista matemático, o seu cálculo baseia-se na covariância entre observações e simulações, normalizada pelos respetivos desvios-padrão, sendo depois elevado ao quadrado, o que conduz a um valor compreendido entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2, maior é a capacidade do modelo em acompanhar a evolução temporal dos caudais observados, o que significa que o modelo reproduz adequadamente o padrão global da resposta hidrológica, incluindo a sucessão relativa de eventos. Podendo apresentar valores elevados mesmo na presença de desvios sistemáticos, o R^2 não deve ser interpretado isoladamente como indicador de bom desempenho hidrológico, sendo necessária a sua complementação com métricas adicionais. Em termos qualitativos, podem considerar-se muito bons os valores de R^2 superiores a 0,65, bons os valores entre 0,55 e 0,65, satisfatórios os valores entre 0,40 e 0,55 e insatisfatórios os valores iguais ou inferiores a 0,40, de acordo com os critérios propostos por Moriasi et al. e adotados pelo HEC-HMS na avaliação do desempenho para caudais diários [43]. As medidas de eficiência procuram avaliar a capacidade global do modelo em reproduzir simultaneamente a variabilidade e a magnitude

dos caudais observados, constitui uma das métricas mais utilizadas em hidrologia. Neste contexto, o coeficiente de eficiência de *Nash–Sutcliffe* (NSE) é amplamente utilizado em hidrologia. Esta métrica compara o erro do modelo com a variabilidade natural da série observada, permitindo aferir se o modelo apresenta um desempenho superior a uma estimativa baseada na média dos dados observados.

O NSE é particularmente sensível aos valores extremos, designadamente aos picos de cheia, sendo por isso relevante na avaliação de modelos aplicados à simulação de eventos hidrológicos críticos. No entanto, esta sensibilidade pode conduzir a uma sobrevalorização do desempenho em situações de boa reprodução de picos, mesmo que existam desvios em regimes de caudal mais baixo. O cálculo deste baseia-se na razão entre a soma dos quadrados dos erros de simulação e a variabilidade da série observada, permitindo avaliar até que ponto o modelo reproduz melhor os dados do que uma estimativa baseada na média dos valores observados.

Um valor de NSE igual a 1 corresponde a ajuste perfeito, um valor igual a 0 significa que o modelo não supera a média observada e valores negativos indicam desempenho inferior a essa referência mínima.

Esta métrica integra simultaneamente informação relativa à variabilidade e à magnitude do erro, sendo por isso considerada um indicador global de desempenho do modelo. O NSE é particularmente sensível a erros em valores elevados da série, sendo fortemente influenciado pela reprodução de picos de cheia, o que pode enviesar a avaliação do desempenho em regimes de caudal reduzido. Assim, apesar da sua relevância, deve ser interpretado em conjunto com outras métricas.

Em termos qualitativos, consideram-se geralmente muito bons os valores de NSE superiores a 0,65, bons os valores entre 0,55 e 0,65, satisfatórios os valores entre 0,40 e 0,55 e insatisfatórios os valores iguais ou inferiores a 0,40.

No que respeita às medidas de erro, o erro quadrático médio (RMSE) permite quantificar a magnitude média dos desvios entre valores simulados e observados, sendo calculado pela raiz quadrada da média dos quadrados dos erros. A elevação dos erros ao quadrado confere maior peso aos desvios de maior magnitude, tornando esta métrica particularmente sensível a erros associados a eventos hidrológicos extremos. No presente trabalho, utiliza-se uma forma normalizada do RMSE, em que este é relacionado com o desvio-padrão das observações, permitindo expressar o erro de forma relativa à variabilidade natural da série. Esta abordagem é conceptualmente equivalente ao rácio RSR, frequentemente utilizado em modelação

hidrológica. Ao contrário das métricas anteriores, valores mais baixos deste indicador correspondem a melhor desempenho, uma vez que traduzem menor dispersão dos erros e maior precisão do ajuste. Em termos qualitativos, valores iguais ou inferiores a 0,60 são considerados muito bons, valores entre 0,60 e 0,70 bons, entre 0,70 e 0,80 satisfatórios e superiores a 0,80 insatisfatórios.

Por fim, as medidas de viés, nomeadamente o PBIAS, permitem avaliar a existência de desvios sistemáticos entre valores simulados e observados, quantificando a tendência média do modelo ao longo do período de análise. O cálculo do PBIAS baseia-se na soma das diferenças entre valores simulados e observados, normalizada pela soma dos valores observados e expressa em percentagem. Este indicador permite distinguir entre erros aleatórios e tendências sistemáticas, indicando se o modelo apresenta uma tendência global de sobrestimação ou subestimação.

Na interpretação desta métrica, deve utilizar-se o valor absoluto para classificação qualitativa, sendo o sinal apenas indicativo da direção do viés. Importa ainda salientar que diferentes softwares podem adotar convenções distintas para o sinal do PBIAS. Em termos qualitativos, valores absolutos de PBIAS inferiores a 15% são considerados muito bons, entre 15% e 20% bons, entre 20% e 30% satisfatórios e iguais ou superiores a 30% insatisfatórios.

Em síntese, a utilização combinada de R^2, NSE, métricas de erro e PBIAS permite uma avaliação integrada e metodologicamente consistente do desempenho do modelo, assegurando a consideração simultânea da variabilidade temporal, da qualidade global do ajuste, da magnitude dos erros e da existência de desvios sistemáticos. A utilização isolada de um único indicador pode conduzir a interpretações erróneas do desempenho do modelo. Por exemplo, uma elevada correlação não garante um bom ajuste em termos absolutos, e uma boa eficiência pode mascarar desvios sistemáticos relevantes.

Deste modo, a avaliação da qualidade do ajuste deve basear-se numa análise integrada de diferentes métricas, permitindo captar de forma abrangente as várias dimensões do desempenho: capacidade de reproduzir a variabilidade temporal, precisão dos valores simulados e ausência de viés sistemático.

Este princípio é amplamente reconhecido na literatura hidrológica, sendo recomendado o uso combinado de várias estatísticas para assegurar uma avaliação robusta e consistente dos modelos. Assim, nos seguintes casos de estudo, a avaliação do desempenho do método tradicional foi efetuada através da comparação entre os caudais considerados como observados, correspondentes aos valores de exploração e os caudais calculados, resultantes da

aplicação do método tradicional. Importa desde logo sublinhar que os valores de exploração refletem não apenas o comportamento hidrológico natural da bacia, mas também a influência de processos operacionais, podendo incorporar efeitos associados à gestão da cascata hidroelétrica.

5.3.1 Aproveitamento Hidroelétrico de Vilar-Tabuaço

No caso de Vilar-Tabuaço, a avaliação do desempenho das diferentes abordagens foi estruturada segundo duas comparações distintas, utilizando a série histórica de 2006-2025, para uma maior coerência estatística e hidrológica, dado o período comum, com uma série suficientemente extensa.

A data de início remete para o ano de marco inicial de maior confiança nos dados de exploração. A primeira corresponde à comparação entre os valores observados e os valores simulados, sendo os valores observados representados pelos dados de exploração e os valores simulados obtidos através do modelo hidrológico.

Como o modelo hidrológico foi calibrado com recurso aos dados de exploração é expetável que as comparações dos resultados da modelação com os mesmos sejam satisfatórias. A segunda corresponde à comparação entre os valores calculados e os valores simulados, sendo os valores calculados aqueles que resultam da aplicação do método tradicional.

5.3.1.1 Comparação entre caudal observado e simulado

A comparação entre os valores observados e os valores simulados deve ser interpretada com particular cuidado, uma vez que os valores observados correspondem a dados de exploração e não a uma série hidrológica "natural" no sentido estrito. Estes valores resultam do balanço hídrico da albufeira, calculado a partir dos caudais turbinados e descarregados e da variação do volume armazenado. Por isso, estão sujeitos às incertezas de cada uma destas parcelas e às condicionantes operacionais do aproveitamento. Consequentemente, as diferenças entre as duas séries não devem ser atribuídas exclusivamente ao modelo hidrológico, podendo também refletir limitações dos próprios dados de referência.

Nesta comparação, refletida na Figura 56, o que está em avaliação não é apenas a capacidade do modelo em reproduzir a resposta natural da bacia, mas também a sua aptidão para se aproximar de uma série que já traduz, pelo menos parcialmente, a realidade operacional do sistema.

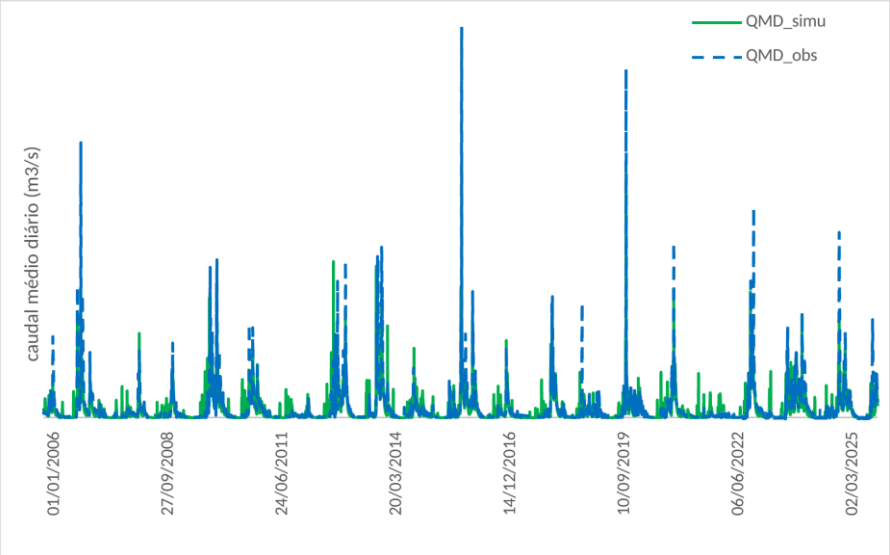


Figura 56. Análise gráfica entre caudais médios diários observados (balanço hídrico) e simulados em Vilar-Tabuaço (2006-2025) (Excel)

Em conjunto, os resultados dos indicadores apresentados na Figura 57 evidenciam que o modelo hidrológico apresenta uma capacidade razoável para reproduzir a variabilidade temporal da série de exploração, acompanhando de forma global a evolução dos caudais ao longo do período em análise.

Testes de qualidade do ajuste			
R2	NSE	RMSE*STDEV	PBIAS
0,74	0,73	0,52	-8,3%
Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom

Figura 57. Testes de qualidade do ajuste entre caudais observados e simulados - Vilar-Tabuaço (Excel)

Os indicadores demonstram que a simulação consegue representar adequadamente a variabilidade temporal da série, reproduzir satisfatoriamente a magnitude dos caudais e manter erros e desvios sistemáticos relativamente reduzidos.

Apesar de, em episódios de maior variabilidade se identificarem algumas diferenças maiores, facto que prejudica o NSE, e de se observar uma ligeira tendência para subestimação dos caudais, refletida pelo PBIAS negativo, o conjunto dos indicadores sugere que o modelo constitui uma representação robusta do comportamento hidrológico do sistema.

O valor de R^2 indica que a variabilidade global da série é muito bem reproduzida pelo modelo. Contudo, a avaliação da capacidade do modelo para reproduzir adequadamente a magnitude dos caudais é assegurada pelos restantes indicadores de desempenho considerados. Esta leitura é reforçada pelo valor de NSE, que evidencia que a simulação apresenta capacidade preditiva

efetiva e claramente superior a uma estimativa baseada apenas na média dos valores observados. O modelo hidrológico contém, assim, informação relevante sobre o comportamento da bacia e consegue descrever de forma integrada a evolução dos caudais. Ainda assim, o facto de este valor não se situar num intervalo mais elevado mostra que a correspondência entre simulação e exploração continua a ser condicionada por discrepâncias relevantes, sobretudo em episódios de maior variabilidade. Dado que o NSE é particularmente sensível à reprodução de eventos mais intensos, este resultado sugere que a simulação representa a dinâmica global, mas não reproduz com igual rigor a magnitude de todos os picos presentes na série operacional.

A métrica de erro normalizado (RMSE*STDEV) confirma esta leitura primordial. O valor obtido mostra que o erro da simulação, quando relativizado pela variabilidade da série, é moderado e compatível com um ajuste globalmente aceitável. Em termos práticos, isto significa que o modelo consegue reproduzir a ordem de grandeza geral do comportamento observado, mas continua a apresentar desvios quantitativos em determinados intervalos temporais, como ilustrado na Figura 58.

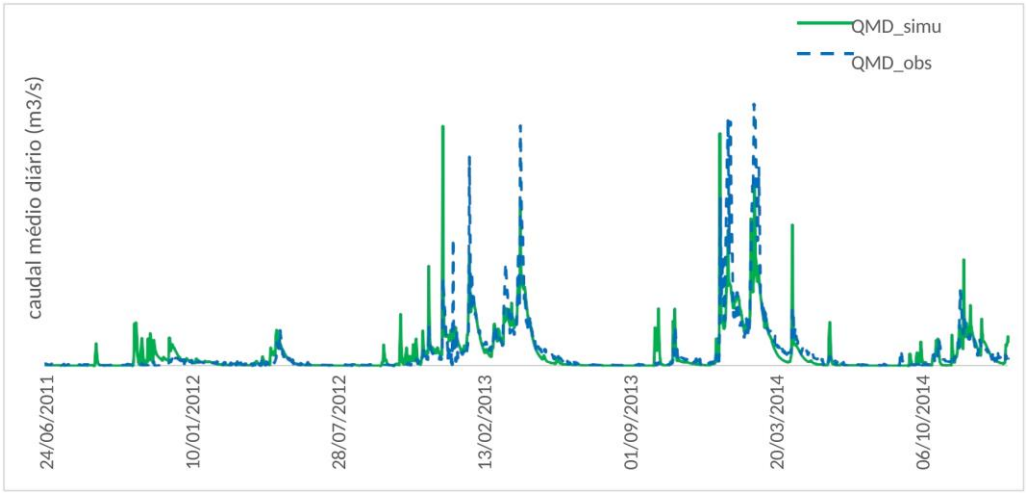


Figura 58. Excerto de gráfico entre caudais médios diários observados (balanço hídrico) e simulados em Vilar-Tabuaço (2011-2014) (Excel)

O PBIAS, que revela a existência de um desvio sistemático entre a série simulada e a série de exploração. Independentemente da convenção de sinal utilizada, o valor absoluto deste indicador mostra que a simulação não reproduz de forma neutra os valores observados, apresentando uma tendência média consistente de afastamento, no entanto, parece um valor bastante satisfatório. Esta conclusão é coerente com a diferença verificada entre os caudais médios diários, sendo o valor simulado inferior ao observado.

Assim, ainda que o modelo hidrológico represente razoavelmente a forma global da série, não reproduz com a mesma qualidade a sua magnitude média, o que é particularmente relevante quando se pretende comparar volumes ou analisar quantitativamente o regime de escoamento. A análise gráfica apresentada na Figura 59 confirma esta interpretação estatística.

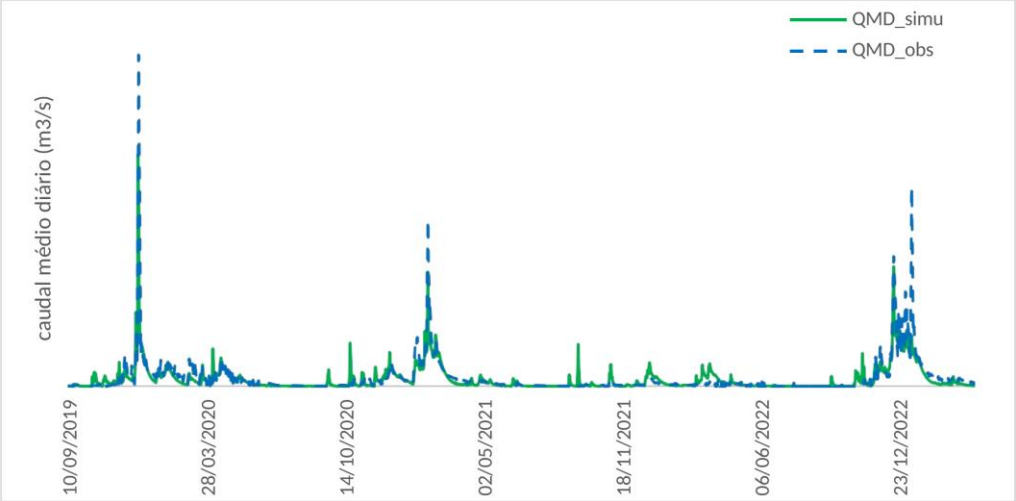


Figura 59. Excerto de gráfico entre caudais médios diários observados (balanço hídrico) e simulados em Vilar-Tabuaço (2019-2022) (Excel)

O hidrograma evidencia que os principais eventos presentes nos dados de exploração são, em termos gerais, identificados pela simulação, o que demonstra que a resposta temporal do sistema é captada pelo modelo.

No entanto, a amplitude de vários desses eventos não é totalmente reproduzida, observando-se diferenças entre os valores simulados e os valores de exploração, sobretudo em períodos de caudal mais elevado. A comparação gráfica reforça esta conclusão, mostrando que a simulação acompanha razoavelmente o comportamento médio da série, mas diverge mais significativamente nos valores extremos, o que traduz limitações na representação dos caudais mais elevados e, em menor grau, dos regimes de caudal reduzido.

Esta distinção é particularmente relevante em contexto empresarial, uma vez que os dados de exploração refletem uma resposta já influenciada pela operação dos aproveitamentos. Por esse motivo, a sua utilização como referência hidrológica exige prudência, justificando o recurso a metodologias alternativas que procuram estimar afluências menos condicionadas pelos efeitos da exploração e mais representativas do comportamento hidrológico do sistema.

Em síntese, a comparação entre observado e simulado mostra que o modelo hidrológico consegue reproduzir de forma satisfatória a estrutura global da série de exploração, mas revela

limitações na representação quantitativa dos caudais e na eliminação de desvios sistemáticos. Assim, a simulação apresenta utilidade clara como ferramenta de leitura do comportamento geral do sistema, mas a interpretação do seu desempenho deve ser enquadrada pela natureza operacional dos dados de referência.

5.3.1.2 Comparação entre caudal calculado e simulado

A comparação entre os valores calculados e os valores simulados assume um significado distinto. Neste caso, deixa de estar em causa a aproximação a uma série de exploração operacional e passa a estar em análise a relação entre duas formas de estimar o comportamento hidrológico do sistema: por um lado, o método tradicional, que fornece os valores calculados; por outro, o modelo hidrológico, que gera os valores simulados com base numa representação mais explícita dos processos físicos. Esta comparação, ilustrada na Figura 60 é particularmente importante porque permite avaliar até que ponto ambas as abordagens convergem entre si e em que aspetos se afastam, revelando diferenças conceptuais e estruturais entre metodologias.

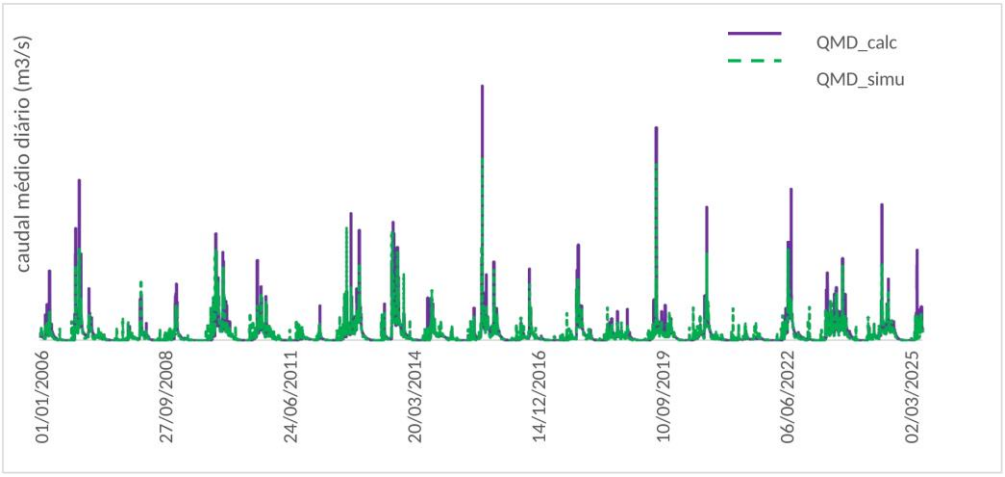


Figura 60. Análise gráfica entre caudais médios diários calculados e simulados em Vilar-Tabuaço (2006-2025) (Excel)

Os indicadores apresentados na Figura 61 evidenciam que existe uma proximidade global entre os valores calculados e os valores simulados, especialmente no que respeita ao comportamento médio da série e à evolução geral do regime de caudais.

Testes de qualidade do ajuste			
R2	NSE	RMSE*STDEV	PBIAS
0,76	0,75	0,50	-9,1%
Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom

Figura 61. Testes de qualidade do ajuste entre caudais calculados e simulados - Vilar-Tabuaço (Excel)

Contudo, as diferenças tornam-se mais evidentes quando se analisam os extremos, particularmente os caudais mais elevados. Nestes intervalos, a divergência entre as duas curvas aumenta, evidenciando que o método tradicional e a simulação hidrológica não reproduzem da mesma forma os episódios de maior intensidade. Esta diferença é coerente com a natureza simplificada do método tradicional, que tende a traduzir o comportamento do sistema de forma mais agregada, e com a abordagem processual do modelo hidrológico, que procura representar explicitamente a geração e propagação do escoamento.

Em consequência, embora ambas as metodologias possam convergir no comportamento médio, não são necessariamente equivalentes na representação dos eventos mais críticos. De forma geral, ambas as abordagens reproduzem uma sequência semelhante, conforme a Figura 62, o que indica que assentam numa leitura coerente do funcionamento global do sistema.

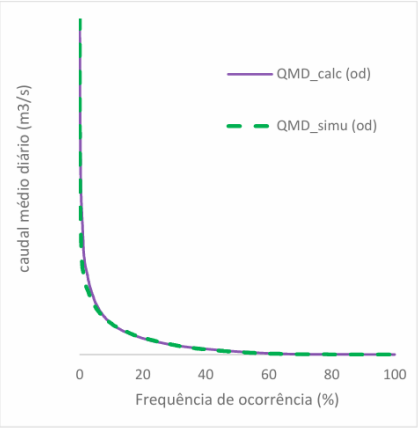


Figura 62. Caudais classificados (2006-2025) – Vilar-Tabuaço (Excel)

Esta proximidade é particularmente visível na comparação entre os valores mais frequentes das duas séries, sugerindo que tanto o método tradicional como o modelo hidrológico conduzem a estimativas comparáveis para os intervalos de ocorrência mais comum. Do ponto de vista interpretativo, é importante que a comparação mostre que o Método Tradicional funciona como uma aproximação globalmente coerente, mas mais sensível à complexidade temporal e física do sistema do que o modelo hidrológico. A qualidade da simulação depende, naturalmente, da estrutura do modelo, dos dados de entrada e da calibração adotada. Assim, a diferença entre abordagens não deve ser lida apenas em termos de "melhor" ou "pior", mas antes em função do objetivo da análise: o Método Tradicional pode fornecer estimativas consistentes quando os dados de exploração são representativos da secção em estudo, enquanto a Modelação Hidrológica permite complementar essa informação através da representação explícita dos processos hidrológicos da bacia.

Deste modo, as duas abordagens devem ser encaradas como ferramentas complementares, cuja aplicação conjunta pode contribuir para uma estimativa mais robusta das afluências. Do ponto de vista empresarial e operacional, as simulações têm uma utilidade clara sempre que permitem obter rapidamente ordens de grandeza, apoiar análises exploratórias ou comparar cenários de forma expedita.

Contudo, quando o objetivo passa por sustentar decisões mais exigentes, interpretar episódios extremos, ou aproximar as afluências naturais de forma tecnicamente mais fundamentada, as limitações inerentes a essa simplificação tornam-se mais relevantes. Neste sentido, a comparação entre os dois modos de estimação de afluências é particularmente útil, pois permite perceber até que ponto uma metodologia simplificada se mantém adequada e em que situações deve ser complementada por abordagens mais robustas.

Em síntese, a comparação entre calculado e simulado evidencia uma boa coerência entre ambas as séries no comportamento global e médio do sistema, mas revela diferenças significativas nos extremos e na forma como cada abordagem representa a variabilidade mais intensa, dadas as imprevisões hidrológicas.

Esta leitura confirma que a Modelação Hidrológica constitui uma ferramenta útil de aproximação, mas também que o Método Tradicional oferece uma capacidade interpretativa superior quando se pretende analisar com maior rigor o funcionamento hidrológico do aproveitamento.

5.3.2 Aproveitamento Hidroelétrico da Régua

À semelhança do procedimento adotado para o caso de estudo anterior, a avaliação do desempenho na Régua baseou-se em duas comparações distintas, recorrendo à série histórica de 2006–2025.

Numa primeira análise, os caudais calculados foram comparados com os dados de exploração, procurando verificar a consistência das estimativas obtidas face aos valores observados.

Numa segunda análise, os caudais calculados foram comparados com os resultados da modelação hidrológica, permitindo avaliar a coerência entre ambas as abordagens e explorar o potencial da modelação hidrológica como ferramenta complementar na estimativa de afluências. A adoção destas duas comparações responde a objetivos analíticos distintos e complementares.

5.3.2.1 Comparação entre caudal observado e simulado

A comparação entre os valores observados e os valores simulados deve ser interpretada tendo em consideração a natureza dos dados de exploração utilizados como referência. Tal como referido anteriormente, estes dados representam o comportamento efetivamente observado no aproveitamento, refletindo não apenas a resposta hidrológica da bacia, mas também os efeitos associados à exploração e à gestão do sistema hidroelétrico. Ainda assim, sublinha-se a aproximação disponível à realidade operacional do aproveitamento e representam, por isso, um elemento fundamental na avaliação da qualidade da simulação. Optou-se pela utilização da bacia total em detrimento da bacia própria, uma vez que, conforme demonstrado no capítulo referente à Metodologia Tradicional, os caudais obtidos para a bacia intermédia a partir dos dados de exploração evidenciaram valores anómalos em diversos períodos de análise.

À semelhança do procedimento adotado para o caso de estudo anterior, a avaliação do desempenho na Régua baseou-se em duas comparações distintas, recorrendo à série histórica de 2006–2025. Numa primeira análise, os caudais calculados pela modelação foram comparados com os dados de exploração, procurando verificar a consistência das estimativas obtidas face aos valores observados, ilustrado na Figura 63.

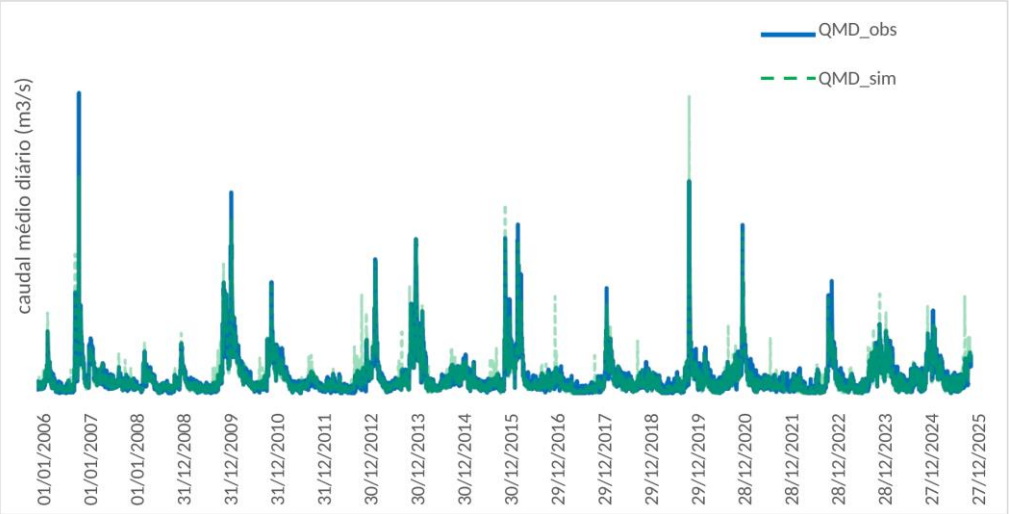


Figura 63. Análise gráfica entre caudais médios diários observados e simulados na Régua (2006-2025) (Excel)

Os indicadores apresentados na Figura 64 evidenciam um desempenho global muito satisfatório do modelo hidrológico. O valor elevado de R^2 demonstra que a estrutura temporal dos caudais observados é reproduzida de forma consistente, revelando que a simulação consegue

acompanhar adequadamente a sucessão dos principais eventos hidrológicos ao longo do período em análise. Esta conclusão é reforçada pelo valor de NSE, que confirma a existência de uma capacidade preditiva elevada e demonstra que o modelo contém informação hidrologicamente relevante para descrever a evolução dos caudais observados.

Testes de qualidade do ajuste			
R2	NSE	RMSE*STDEV	PBIAS
0,89	0,89	0,33	0,2%
Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom

Figura 64. Testes de qualidade do ajuste entre caudais observados e simulados – Régua (Excel)

A proximidade entre os caudais médios diários observados e simulados constitui igualmente um resultado importante, sendo corroborada pelo valor muito reduzido de PBIAS. Os indicadores de desempenho mantêm-se em níveis classificados como "Muito bom", evidenciando que a introdução da alteração estrutural necessária para representar a realidade hidrológica local preservou a qualidade global da simulação. Assim, considera-se que a adaptação implementada é adequada para a aplicação do modelo neste caso de estudo, permitindo representar de forma consistente o comportamento hidrológico observado. A análise gráfica apresentada na Figura 65 confirma esta interpretação estatística.

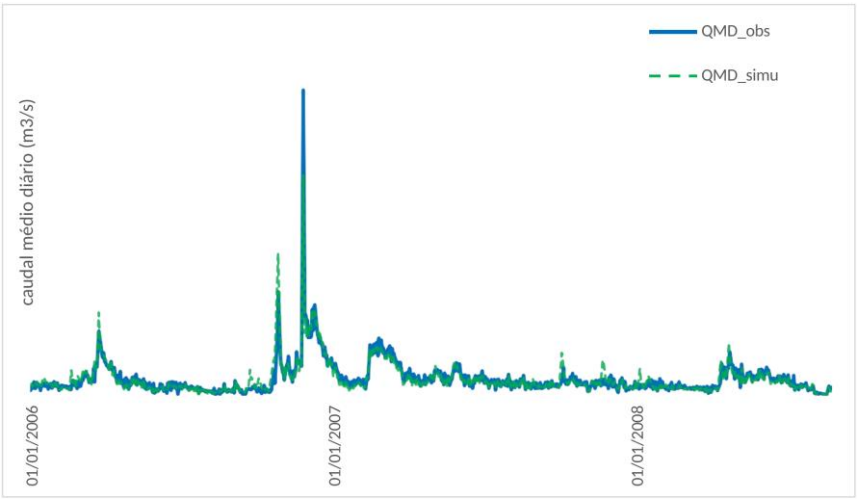


Figura 65. Excerto de análise gráfica entre caudais médios diários observados e simulados na Régua (2006-2025) (Excel)

De forma geral, os principais eventos presentes na série de exploração são identificados pela simulação, verificando-se uma boa correspondência temporal entre ambas as séries. Embora alguns episódios apresentem diferenças ao nível da magnitude dos picos de caudal, o comportamento global é reproduzido de forma muito satisfatória, observando-se uma concordância consistente ao longo da maioria do período analisado.

Esta leitura revela-se particularmente relevante quando enquadrada na posição da Régua na cascata do Douro. O aproveitamento integra uma área drenada acumulada muito extensa, refletindo a resposta conjunta de uma parte significativa da bacia hidrográfica do Douro.

Assim, os resultados obtidos demonstram que o modelo hidrológico é capaz de reproduzir adequadamente o comportamento agregado do sistema, representando de forma satisfatória a resposta global observada no aproveitamento. Sob uma perspetiva exploratória empresarial, estes valores de desfecho constituem uma evidência importante da robustez da modelação desenvolvida, uma vez que demonstram que a simulação consegue aproximar-se da realidade operacional observada com um elevado grau de fiabilidade. Consequentemente, o modelo apresenta potencial para apoiar análises hidrológicas, estudos de comportamento do sistema e avaliações comparativas das afluências em contexto operacional.

Em síntese, a comparação entre observado e simulado evidencia uma elevada capacidade do modelo para reproduzir a evolução temporal e a magnitude global dos caudais observados na Régua, confirmando a adequação da estrutura de modelação adotada para representar o comportamento hidrológico global do sistema.

5.3.2.2 Comparação entre caudal calculado e simulado

A comparação entre os valores calculados e os valores simulados, ilustrados na Figura 66, apresenta resultados substancialmente diferentes daqueles observados na análise anterior.

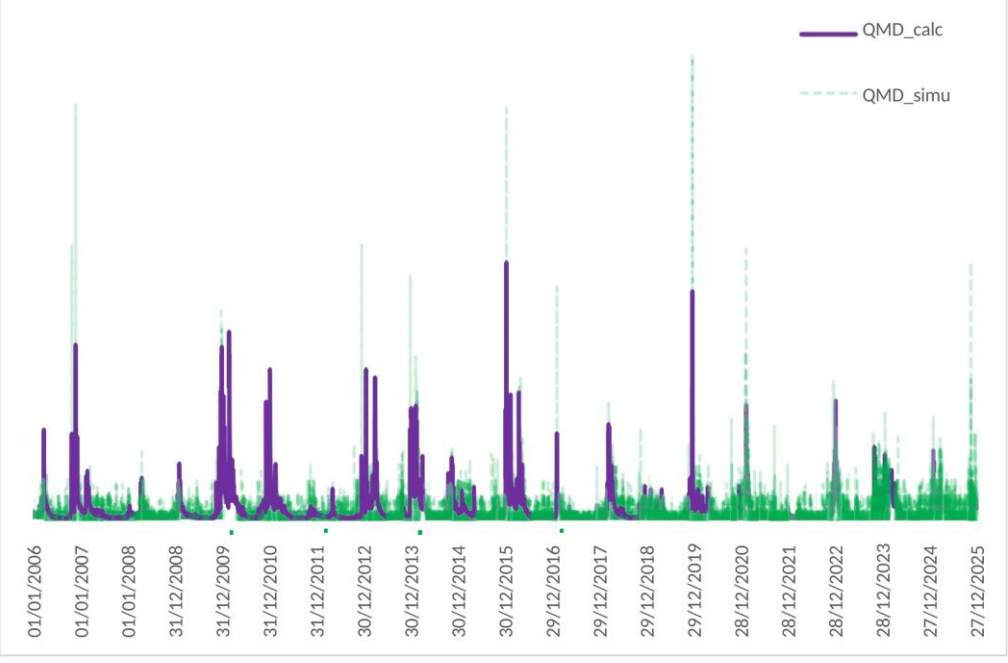


Figura 66. Análise gráfica entre caudais médios diários calculados e simulados na Régua (2006-2025) (Excel)

Importa salientar que a presente comparação é efetuada em termos de bacia intermédia, uma vez que os caudais calculados através do Método Tradicional correspondem às afluências próprias do aproveitamento.

No caso da Régua, esta distinção assume particular relevância devido à reduzida expressão da bacia intermédia associada ao aproveitamento quando comparada com a dimensão da bacia total drenada até esta secção da cascata. Acresce ainda o facto de os caudais da bacia intermédia serem pouco significativos quando comparados com os caudais resultantes da operação: turbinados, descarregados e bombados.

Os indicadores estatísticos revelam uma reduzida concordância entre ambas as séries, evidenciada por valores baixos de R^2, um valor negativo de NSE e um enviesamento médio relativamente significativo, tal como representado na Figura 67.

Testes de qualidade do ajuste			
R2	NSE	RMSE*STDEV	PBIAS
0,21	-0,75	1,32	-36,5%
Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório

Figura 67. Testes de qualidade do ajuste entre caudais calculados e simulados – Régua (Excel)

À primeira vista, os resultados apresentados poderiam sugerir uma limitação importante da modelação hidrológica. Contudo, essa interpretação não seria hidrologicamente correta, uma vez que as duas séries comparadas representam realidades distintas e apresentam níveis de sensibilidade muito diferentes.

A análise em bacia intermédia permite isolar a contribuição hidrológica própria de cada aproveitamento, constituindo uma abordagem particularmente adequada para estudos de suporte a perspetivas de mercado e de exploração do sistema hidroelétrico. Para a Régua procura estimar-se a contribuição própria existente entre aproveitamentos, removendo as principais contribuições provenientes de montante. Entre estas destacam-se os sistemas da Valeira, do Foz Tua e de Vilar-Tabuaço, que representam uma parcela dominante da resposta hidrológica observada no eixo principal do Douro. Consequentemente, a série calculada corresponde apenas à componente residual gerada na área intermédia remanescente, cuja dimensão é reduzida quando comparada com a área total contribuinte do sistema.

Esta característica tem implicações metodológicas muito relevantes. Quando a afluência própria resulta da diferença entre grandezas muito superiores, pequenas incertezas associadas aos caudais de montante, à propagação dos hidrogramas, aos volumes considerados ou aos próprios

descontos efetuados podem originar variações significativas na série residual obtida. Deste modo, erros absolutos relativamente reduzidos podem transformar-se em desvios relativos elevados, contribuindo para a degradação dos indicadores estatísticos de desempenho.

A própria estrutura do modelo HEC-HMS, esquema topológico, representada na Figura 68, ajuda a enquadrar este resultado. Conforme se observa no esquema de modelação, o nó associado à Régua encontra-se inserido numa rede hidráulica que integra várias contribuições provenientes do eixo principal do Douro e dos respetivos afluentes.

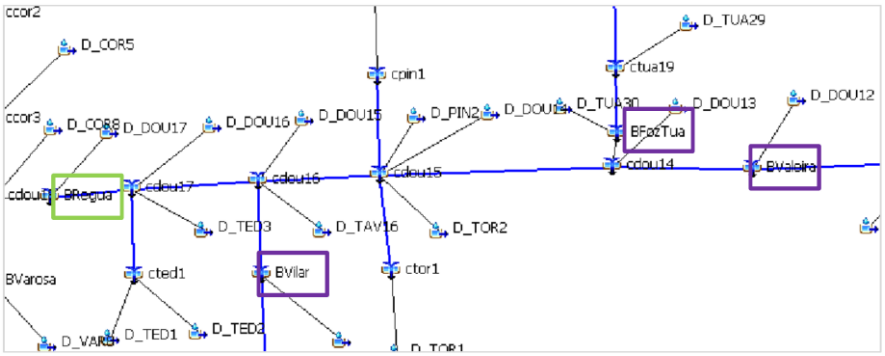


Figura 68. Troço do esquema topológico, evidenciando a periferia da bacia da Régua (HEC-HMS)

Importa ainda referir que a própria metodologia tradicional adotada para a Régua assenta numa abordagem híbrida, combinando relações hidrométricas, balanços de cascata e ajustes empíricos desenvolvidos especificamente para este aproveitamento. Em particular, parte das afluências foi estimada com recurso aos níveis registados na estação hidrométrica de Vilarinho das Azenhas, convertidos em caudais através da curva de vazão de Castanheiro e posteriormente transpostos para a secção da Régua.

No entanto, tratando-se de uma secção fluvial com características morfológicas variáveis e sem um histórico de medições suficientemente denso para assegurar a completa estabilidade da curva de vazão utilizada, subsistem incertezas associadas à própria estimativa dos caudais. A estas acrescem as incertezas decorrentes do fator de transposição e do desfasamento temporal considerados entre secções. Consequentemente, as diferenças observadas entre as duas séries não refletem apenas limitações da modelação hidrológica, mas também as incertezas inerentes ao próprio processo de estimação das afluências.

A análise gráfica apresentada na Figura 69 reforça esta interpretação. Apesar de se observarem alguns períodos em que ambas as séries apresentam comportamentos semelhantes, verificam-se divergências significativas ao nível da magnitude dos eventos e da variabilidade temporal.

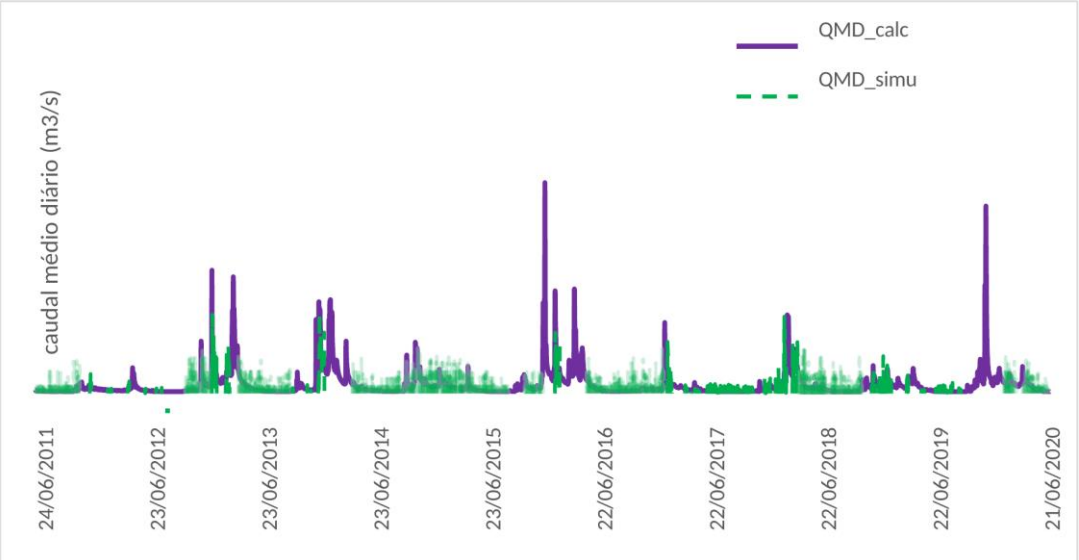


Figura 69. Análise gráfica entre caudais médios diários calculados e simulados na Régua (2011-2020) (Excel)

A degradação dos indicadores nesta análise resulta sobretudo da reduzida dimensão relativa da bacia intermédia considerada e da elevada sensibilidade inerente à estimativa de uma afluência residual obtida por diferença entre contribuições muito superiores ou até devido a desfasamentos temporais.

Sob uma perspetiva hidrológica, estes resultados evidenciam uma das principais dificuldades associadas à estimação de afluências próprias em aproveitamentos inseridos numa cascata fortemente regulada. Quanto menor for a contribuição própria relativamente ao caudal total que atravessa o sistema, maior tende a ser a influência das incertezas associadas às contribuições de montante e maior se torna a sensibilidade dos resultados obtidos. Face aos resultados obtidos para a Régua, considerou-se pertinente avaliar uma abordagem alternativa para a definição das contribuições intermédias, recorrendo à utilização de *sinks* no modelo HEC-HMS.

Na abordagem inicialmente adotada, a afluência própria do aproveitamento resulta da diferença entre caudais acumulados em diferentes secções da cascata, procurando remover as contribuições associadas aos principais aproveitamentos localizados a montante. Embora esta metodologia seja coerente com a lógica utilizada na estimação tradicional das afluências, apresenta uma limitação importante: a afluência própria passa a corresponder à diferença entre grandezas significativamente superiores. Consequentemente, pequenas incertezas associadas à simulação dos caudais afluentes de montante ou à sua propagação ao longo da rede hidrográfica podem amplificar-se na série residual obtida, degradando significativamente os indicadores de desempenho.

Em contraste, e como se observa na Figura 70, a utilização de *sinks* permite definir explicitamente as áreas intermédias contribuintes no interior do modelo. No HEC-HMS, os *sink elements* funcionam como pontos terminais onde o escoamento gerado numa determinada área drenante é acumulado e removido da restante rede hidrográfica, possibilitando a quantificação direta da resposta hidrológica dessa bacia sem necessidade de recorrer ao desconto de caudais acumulados em secções situadas a montante.

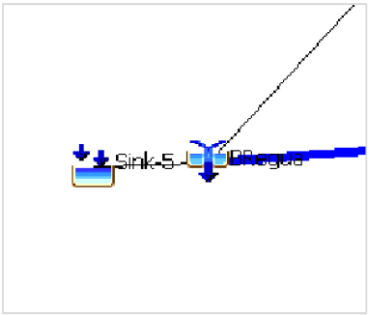


Figura 70. Troço estrutural do modelo, evidenciando a Sink-5 a jusante da Régua (HEC-HMS)

Desta forma, a afluência associada a cada área intermédia passa a ser calculada diretamente a partir dos processos de transformação precipitação-escoamento simulados pelo modelo, reduzindo a dependência dos erros propagados ao longo da cascata.

Enquanto a metodologia baseada no desconto de afluências depende do desempenho da simulação em múltiplos aproveitamentos localizados a montante, a abordagem baseada em *sinks* permite isolar diretamente a contribuição hidrológica da área efetivamente associada ao aproveitamento em análise.

Esta diferença conceptual revela-se particularmente importante em aproveitamentos como a Régua, onde a afluência própria representa apenas uma pequena parcela do caudal total que atravessa o sistema.

Nestas condições, a determinação da afluência por diferença entre contributos acumulados tende a amplificar as incertezas inerentes à simulação dos volumes de montante, enquanto a utilização de *sinks* permite uma representação mais direta da resposta hidrológica da área intermédia considerada.

Assim, a análise complementar baseada em *sinks* não deve ser encarada apenas como uma alternativa de configuração do modelo, mas sobretudo como um exercício de avaliação metodológica. A comparação entre abordagens permitiu investigar até que ponto as limitações observadas resultavam do desempenho da modelação hidrológica ou, em alternativa, da própria definição da afluência intermédia utilizada na comparação.

Os resultados sugerem que a forma como a bacia própria é conceptualizada e extraída do modelo pode influenciar significativamente o desempenho final da simulação, particularmente em sistemas fortemente regulados e caracterizados por extensas cascatas hidroelétricas.

A comparação entre ambas as abordagens, sintetizada pelos indicadores da Figura 71, evidencia diferenças relevantes na forma como a afluência própria da Régua é representada.

Testes de qualidade do ajuste			
R2	NSE	RMSE*STDEV	PBIAS
0,76	0,75	0,50	-4,5%
Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom

Figura 71. Testes de qualidade do ajuste entre caudais calculados e simulados (*Sinks*) – Régua (Excel)

Quando a contribuição intermédia é obtida através da subtração das afluências provenientes dos aproveitamentos de montante, a série resultante torna-se fortemente dependente da acumulação de incertezas associadas à simulação dos diferentes contributos da cascata e aos respetivos tempos de propagação.

Por sua vez, a abordagem baseada em *sinks* permite quantificar diretamente a resposta hidrológica da área intermédia associada ao aproveitamento, reduzindo a influência dos erros propagados ao longo da rede hidrográfica e diminuindo a sensibilidade associada ao cálculo de uma afluência residual.

Adicionalmente, a melhoria observada reforça a interpretação de que parte das discrepâncias inicialmente identificadas não estava necessariamente associada ao desempenho do modelo hidrológico, mas sim à forma como a afluência intermédia era definida e extraída para efeitos de comparação. A Figura 72 apresenta as curvas de caudais classificados obtidas com esta abordagem para a Régua.

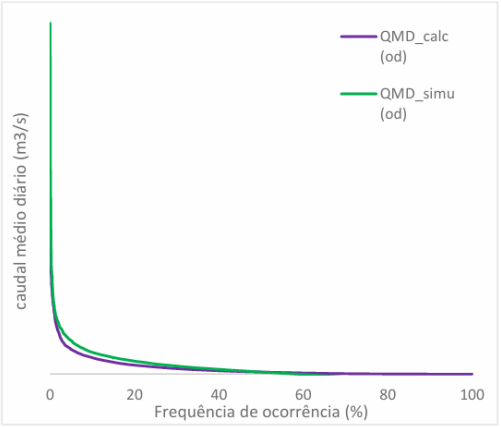


Figura 72. Caudais classificados (2006-2025) - Régua (*Sinks*) (Excel)

Em síntese, a comparação entre calculado e simulado evidencia limitações relevantes na concordância entre ambas as metodologias. Contudo, estas diferenças são explicadas principalmente pela natureza residual da afluência própria da Régua e pela forte influência exercida pelas contribuições acumuladas de montante. Assim, mais do que representar uma falha da modelação hidrológica, os resultados obtidos evidenciam a complexidade associada à quantificação de afluências próprias em aproveitamentos localizados em secções avançadas da cascata do Douro.

5.3.3 Aproveitamento Hidroelétrico de Crestuma-Lever

No caso de Crestuma-Lever, a avaliação do desempenho das diferentes abordagens foi estruturada segundo duas comparações distintas, utilizando a série histórica de 2005–2025. A escolha deste período está associada à metodologia tradicional desenvolvida para este aproveitamento, garantindo coerência temporal entre os valores calculados, simulados e observados no mesmo intervalo considerado para a construção e validação das metodologias de estimação das afluências.

5.3.3.1 Comparação entre caudal observado e simulado

A comparação entre os caudais observados e simulados entre ambas as séries ao longo do período de estudo encontra-se ilustrada na Figura 73.

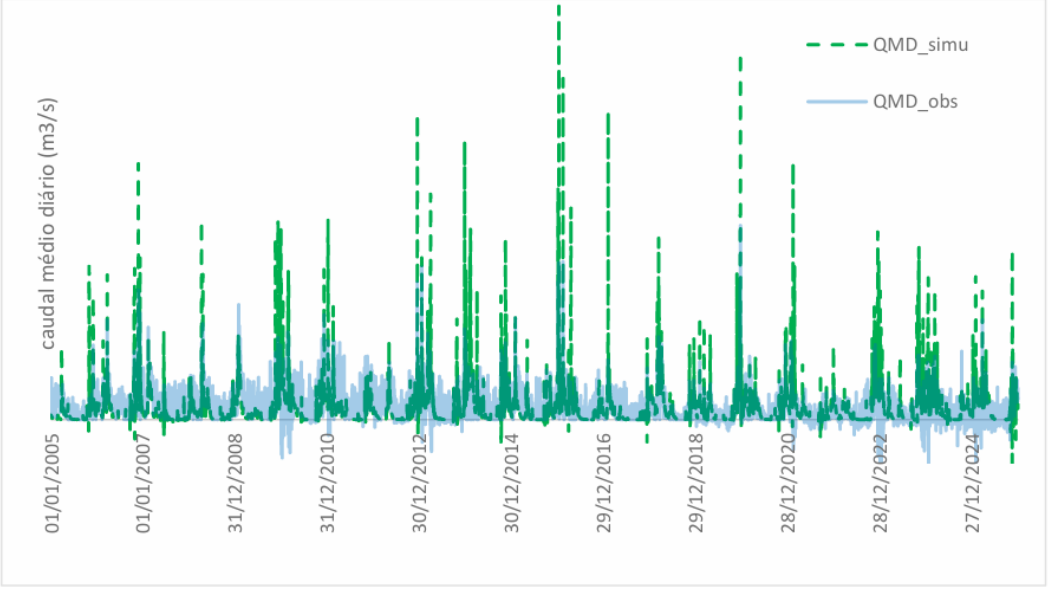


Figura 73. Análise gráfica entre caudais médios diários observados e simulados em Crestuma-Lever (2005-2025) (Excel)

As duas séries apresentam comportamentos distintos, verificando-se que a série observada

evidencia oscilações frequentes associadas à natureza residual da variável analisada, enquanto a série simulada apresenta uma resposta mais consistente com a dinâmica hidrológica da bacia.

Como se observa na Figura 74, as discrepâncias entre as séries observada e simulada tornam-se particularmente evidentes em alguns períodos do registo. Estas diferenças manifestam-se não apenas na sobrestimação da magnitude de determinados eventos de caudal mais elevado, mas também no comportamento durante períodos de estiagem. Nestes intervalos, a série simulada apresenta frequentemente valores próximos de zero durante períodos prolongados, enquanto a série observada evidencia pequenas oscilações persistentes, associadas às características operacionais dos dados de exploração.

Importa recordar que os valores observados utilizados nesta análise correspondem a dados de exploração, mas também aos efeitos associados à operação dos aproveitamentos e à gestão da cascata, evidenciando os aproveitamentos do Torrão e Carrapatelo, que se encontram mais a montante e próximos do caso de estudo e que são imprescindíveis para a estimação.

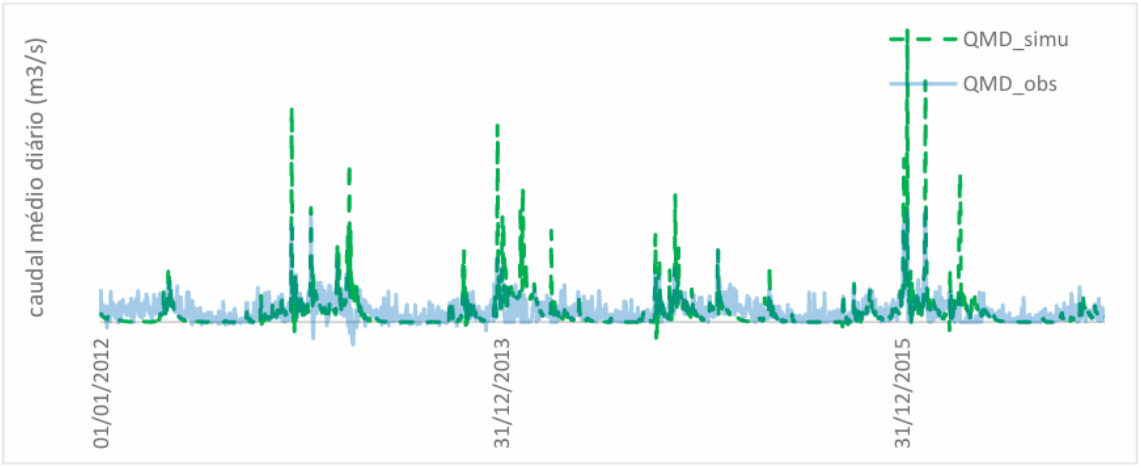


Figura 74. Extrato de análise gráfica entre caudais médios diários observados e simulados em Crestuma-Lever (2012-2016) (Excel)

Deste modo, a comparação efetuada não avalia exclusivamente a capacidade do modelo para representar os processos hidrológicos naturais, mas também a sua aptidão para reproduzir uma série que incorpora inevitavelmente a componente operacional do sistema. Esta componente, associada à gestão dos aproveitamentos de montante e aos volumes bombados, não é representada no modelo hidrológico, o que contribui para justificar parte das diferenças observadas entre as duas séries. A interpretação dos resultados obtidos deve ser realizada com alguma cautela, sobretudo tendo em conta a estrutura da bacia representada na Figura 75.

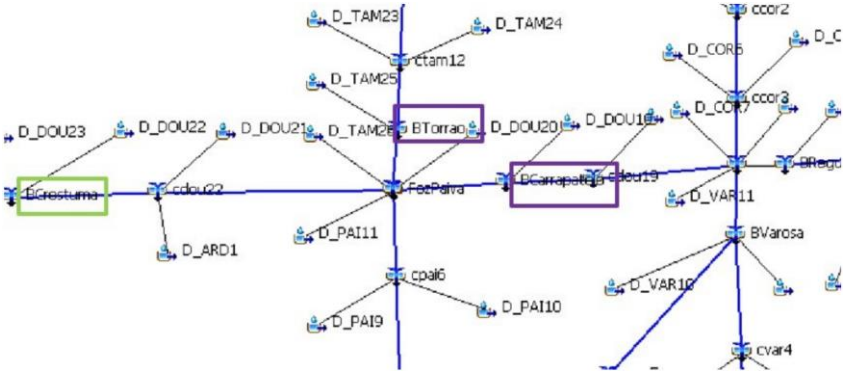


Figura 75. Esquema topológico do modelo, evidenciando a periferia da bacia de Crestuma-Lever (HEC-HMS)

Os indicadores estatísticos obtidos encontram-se classificados como "Muito bom", demonstrando uma elevada capacidade de reprodução da variabilidade temporal e da magnitude global da série observada, conforme ilustrado na Figura 76.

Testes de qualidade do ajuste			
R2	**NSE**	**RMSE*STDEV**	**PBIAS**
0,94	0,94	0,25	2,9%
Muito bom	**Muito bom**	**Muito bom**	**Muito bom**

Figura 76. Testes de qualidade do ajuste entre caudais observados e simulados – Crestuma (Excel)

Embora os indicadores estatísticos apresentem classificações favoráveis, a análise gráfica evidencia algumas discrepâncias. Verifica-se que a série simulada tende a apresentar uma variabilidade superior à observada, originando diversos picos sem correspondência direta nos dados de exploração e sobrestimando a magnitude de alguns eventos mais intensos. Os bons indicadores obtidos demonstram que o modelo consegue representar de forma satisfatória o comportamento médio da série e a sua evolução temporal global. Assim, o desempenho do modelo em Crestuma-Lever deve ser interpretado sobretudo como uma boa representação da dinâmica global do sistema e da ordem de grandeza dos caudais observados, mais do que como uma reprodução exata de cada episódio registado nos dados de exploração.

Esta conclusão é coerente com a natureza dos dados observados utilizados como referência. Ao contrário da série simulada, os valores observados resultam de um balanço operacional influenciado pelos caudais provenientes dos aproveitamentos de montante, pelos volumes bombados associados ao sistema do Torrão e por outras condicionantes de exploração. Deste modo, parte das discrepâncias observadas pode refletir não apenas limitações da modelação hidrológica, mas também diferenças conceptuais entre uma série baseada em processos físicos simulados e uma série construída a partir de dados de exploração e balanços hidráulicos.

5.3.3.2 Comparação entre caudal calculado e simulado

A presente análise incide sobre uma variável mais específica e exigente: a afluência própria de Crestuma-Lever, obtida após a remoção das principais contribuições provenientes de montante, Torrão e Carrapatelo. Ao longo do período de estudo, observa-se uma proximidade assinalável entre as séries calculada e simulada, sobretudo quando comparada com a análise entre observado e simulado. Ambas as séries identificam de forma coerente os principais episódios em que se verificam valores de caudal médio diário de valor significativos, acompanhando a sucessão dos eventos mais relevantes e mantendo uma evolução temporal globalmente semelhante.

Ainda assim, verificam-se diferenças pontuais na magnitude de alguns picos, com episódios em que a simulação apresenta respostas mais intensas ou ligeiramente desfasadas relativamente à série calculada. Estas divergências são, contudo, compatíveis com a natureza distinta das metodologias comparadas e com a elevada sensibilidade da afluência própria.

A bacia intermédia efetivamente considerada corresponde à área total drenada até ao aproveitamento, de 90 800 km², subtraída das contribuições previamente individualizadas da Valeira, Foz Tua e Vilar-Tabuaço, resultando numa área remanescente de aproximadamente 1 237 km². Em Crestuma-Lever, a bacia própria/intermédia resulta da diferença entre a área total acumulada no aproveitamento, de 96 520 km², e as áreas drenadas por Carrapatelo e Torrão, de 92 040 km² e 3 252 km², respetivamente, conduzindo a uma área residual de cerca de 1 228 km². Apesar de ambas as áreas apresentarem uma ordem de grandeza semelhante, a sua representatividade hidrológica é distinta.

Em Crestuma-Lever, a resposta da bacia própria é fortemente marcada pelo rio Paiva, cuja bacia constitui uma parcela expressiva da área residual considerada. Esta influência é reforçada pela utilização dos dados da estação hidrométrica de Fragas da Torre como principal referência no cálculo das afluências, o que confere à série calculada uma base hidrológica observada e fisicamente bem definida.

Esta presença de um contributo hidrológico dominante e fisicamente bem definido contribui para uma maior coerência entre os caudais calculados e simulados, ilustrado na Figura 77, ao contrário do que sucede na Régua, onde a afluência intermédia é mais residual, dispersa e sensível aos descontos efetuados às contribuições de montante.

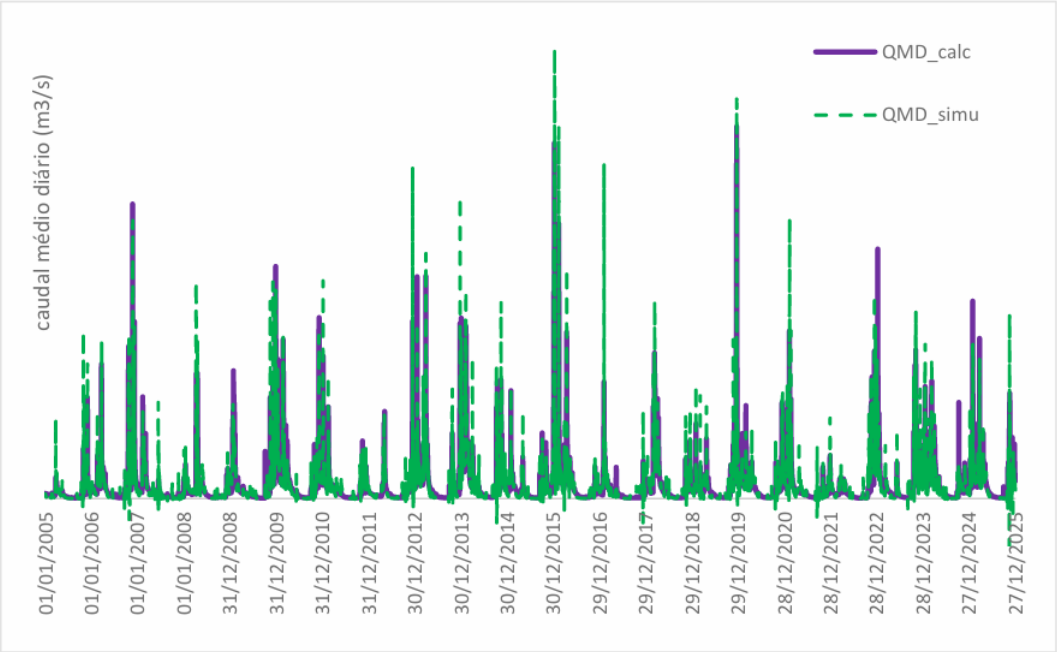


Figura 77. Análise gráfica entre caudais médios diários calculados e simulados em Crestuma-Lever (2005-2025) (Excel)

Os resultados apresentados na Figura 78 mostram um desempenho globalmente favorável. Os indicadores estatísticos apresentam classificações entre "Bom", "Satisfatório" e "Muito bom", evidenciando que, apesar das diferenças conceptuais entre metodologias, existe uma coerência significativa entre os caudais calculados e simulados.

Testes de qualidade do ajuste			
R2	**NSE**	**RMSE*STDEV**	**PBIAS**
0,63	0,52	0,67	2,9%
Bom	Satisfatório	Bom	**Muito bom**

Figura 78. Testes de qualidade do ajuste entre caudais calculados e simulados – Crestuma (Excel)

O coeficiente de correlação, classificado como "Bom", indica que as duas séries apresentam uma estrutura temporal semelhante, sendo os principais períodos de maior e menor atividade hidrológica identificados de forma consistente por ambas as abordagens.

O valor de NSE, classificado como "Satisfatório", introduz uma leitura mais exigente. Este indicador revela que, embora a simulação acompanhe a dinâmica geral da série calculada, subsistem diferenças na reprodução quantitativa de determinados eventos, sobretudo nos episódios de maior intensidade. Esta interpretação é coerente com a natureza do NSE, particularmente sensível à magnitude dos picos de caudal. Assim, a classificação apenas satisfatória deste indicador sugere que a principal limitação da simulação não se encontra na identificação dos eventos ou na representação da tendência geral, mas antes na reprodução exata da intensidade de alguns picos.

Por outro lado, o indicador RMSE*STDEV, classificado como “Bom”, demonstra que o erro da simulação se mantém aceitável quando comparado com a variabilidade da série calculada. Este resultado confirma que as diferenças entre ambas as metodologias não comprometem a representação global da ordem de grandeza da afluência própria de Crestuma-Lever. Em termos práticos, o modelo consegue reproduzir de forma consistente os principais padrões da série calculada, mesmo que não represente com o mesmo rigor todos os eventos extremos.

Particularmente expressivo é o resultado obtido para o PBIAS, classificado como “Muito bom”. Este indicador demonstra que não existe um enviesamento médio significativo entre os caudais simulados e calculados, sugerindo uma boa reprodução dos volumes globais associados à afluência própria.

Esta conclusão é especialmente relevante, uma vez que mostra que, apesar das diferenças pontuais na magnitude de alguns picos, o modelo consegue representar de forma muito satisfatória o balanço médio da série.

Assim, a principal divergência entre metodologias não está associada a uma tendência sistemática de sobrestimação ou subestimação, mas sim à forma como determinados eventos individuais são reproduzidos.

A interpretação conjunta dos indicadores e da análise gráfica permite, portanto, concluir que o ajuste entre calculado e simulado é globalmente consistente. O modelo reproduz adequadamente a estrutura temporal da série, apresenta erro normalizado aceitável e, sobretudo, não revela enviesamento médio significativo.

As principais limitações concentram-se na representação da magnitude de alguns eventos mais intensos, o que explica a classificação menos favorável do NSE. Esta leitura é tecnicamente mais robusta do que uma avaliação baseada apenas na classificação global dos indicadores, uma vez que permite distinguir entre a capacidade do modelo para representar volumes, dinâmica temporal e picos de caudal.

O resultado torna-se ainda mais relevante quando enquadrado na natureza da variável analisada. A afluência própria de Crestuma-Lever corresponde a uma fração reduzida do comportamento hidrológico global observado no aproveitamento, sendo obtida após o desconto das contribuições de Carrapatelo e Torrão. Além disso, a metodologia tradicional incorpora explicitamente os caudais bombados do Torrão, componente que não é considerada no modelo HEC-HMS.

Neste enquadramento, a obtenção de indicadores globalmente favoráveis e de uma proximidade gráfica consistente constitui uma evidência relevante da robustez da modelação hidrológica. Assim, mais do que demonstrar uma reprodução perfeita da série calculada, esta comparação evidencia a capacidade do modelo para representar de forma coerente uma variável hidrológica particularmente sensível. O facto de a simulação se aproximar da série tradicional, mesmo sem incorporar explicitamente todos os termos operacionais presentes no balanço hídrico, reforça a confiança na estrutura de modelação adotada. Este resultado evidencia que o HEC-HMS reproduz o escoamento natural com coerência física a resposta da bacia própria de Crestuma-Lever.

Em seguimento, procedeu-se à análise da afluência própria de Crestuma-Lever através dos caudais simulados extraídos diretamente dos elementos *sink* definidos no modelo HEC-HMS. Esta abordagem permite quantificar diretamente a resposta hidrológica gerada na área intermédia associada ao aproveitamento, possibilitando a comparação com os resultados anteriormente obtidos. Os testes de qualidade do ajuste obtidos com esta abordagem apresentam-se na Figura 79.

Testes de qualidade do ajuste			
R2	**NSE**	**RMSE*STDEV**	**PBIAS**
0,73	0,66	0,59	20,2%
Muito bom	**Muito bom**	**Muito bom**	Satisfatório

Figura 79. Testes de qualidade do ajuste entre caudais calculados e simulados (*Sinks*) – Crestuma (Excel)

Ao contrário do que acontece na metodologia baseada na subtração das contribuições de Carrapatelo e Torrão, a utilização de *sinks* permite quantificar diretamente o escoamento gerado na área intermédia associada a Crestuma-Lever, reduzindo a dependência dos erros propagados ao longo da cascata e a sensibilidade associada aos balanços realizados entre diferentes aproveitamentos.

Na Figura 80 é evidenciada uma elevada proximidade entre as curvas de duração obtidas para os caudais calculados e simulados. Esta concordância verifica-se ao longo da generalidade das frequências de ocorrência, abrangendo tanto os caudais mais elevados, associados a eventos de cheia, como os caudais de estiagem, de ocorrência mais frequente. Este resultado indica que o modelo reproduz adequadamente a distribuição estatística dos caudais na bacia intermédia de Crestuma-Lever, ainda que possam subsistir diferenças pontuais na sequência temporal de determinados eventos. Assim, a análise das curvas de duração complementa os indicadores de desempenho apresentados, sugerindo uma representação consistente do regime hidrológico.

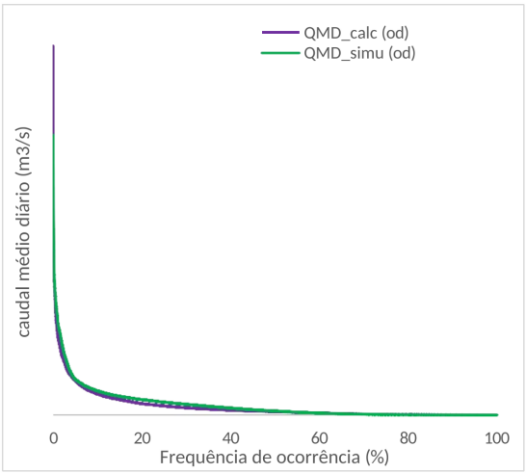


Figura 80. Caudais classificados em Crestuma-Lever, 2005-2025 (*Sinks*) (Excel)

Contudo, os resultados obtidos mostram que, neste caso, ambas as abordagens conduzem a conclusões globalmente consistentes.

A concordância favorável observada na metodologia baseada no desconto de afluências mantém-se quando a contribuição própria é definida através de *sinks*, sugerindo que a boa correspondência entre os valores simulados e calculados não resulta apenas da formulação adotada para a estimativa da afluência própria, mas reflete efetivamente a capacidade do modelo para representar a resposta hidrológica da bacia intermédia de Crestuma-Lever.

Desta forma, os resultados sugerem que a influência da conceptualização da bacia própria no desempenho da simulação é significativamente menor em Crestuma-Lever do que na Régua, reforçando a confiança na robustez física da modelação desenvolvida e na representatividade hidrológica da bacia intermédia considerada.

A análise estatística e gráfica mostra que o modelo reproduz adequadamente a dinâmica geral, os caudais médios e a ordem de grandeza da série calculada, embora apresente limitações na reprodução de alguns picos de maior intensidade. Esta conclusão constitui um resultado metodologicamente relevante, demonstrando que a modelação hidrológica desenvolvida apresenta capacidade para representar não apenas o comportamento global da cascata, mas também a componente própria e residual de um aproveitamento particularmente complexo como Crestuma-Lever.

6
CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

A modelação hidrológica baseada no HEC-HMS foi capaz de reproduzir, de forma globalmente consistente, para os aproveitamentos hidroelétricos de Vilar-Tabuaço, Régua e Crestuma-Lever, as afluências estimadas quer a partir dos dados de exploração, quer através das metodologias tradicionalmente utilizadas. Os resultados obtidos demonstram que a modelação hidrológica constitui uma ferramenta complementar particularmente relevante para a estimativa de afluências, permitindo apoiar a validação dos métodos operacionais atualmente utilizados através de uma representação física independente da resposta hidrológica das bacias.

A utilização conjunta de metodologias conceptualmente distintas revelou-se particularmente valiosa, permitindo não apenas aumentar a robustez das estimativas produzidas, mas também promover uma melhor compreensão das fontes de incerteza associadas aos resultados. Quando ambas as abordagens produzem resultados convergentes, aumenta a confiança nas afluências estimadas. Quando surgem diferenças significativas, estas constituem uma oportunidade para reavaliar pressupostos, dados de entrada e procedimentos de cálculo, contribuindo para uma caracterização hidrológica mais rigorosa dos aproveitamentos hidroelétricos.

Uma das conclusões mais relevantes do trabalho prende-se precisamente com a identificação das limitações e incertezas associadas às séries de referência utilizadas. Os resultados obtidos evidenciaram que as discrepâncias observadas entre metodologias não devem ser atribuídas exclusivamente à modelação hidrológica.

As afluências utilizadas como referência resultam frequentemente da aplicação de balanços hídricos que incorporam múltiplas variáveis hidrológicas e operacionais, estando sujeitas a incertezas associadas à determinação dos volumes armazenados, aos caudais turbinados, às curvas cota-volume e aos restantes termos considerados no balanço.

Consequentemente, parte das diferenças observadas poderá refletir limitações inerentes aos próprios dados utilizados como referência.

Embora não tenha sido objeto de análise específica no presente trabalho, poderá ser relevante avaliar, em estudos futuros, a influência dos tempos de propagação entre aproveitamentos na determinação das afluências, particularmente em análises realizadas com resoluções temporais mais elevadas.

Por último, confirmou-se a importância da qualidade dos dados hidrometeorológicos utilizados. Tanto as metodologias tradicionais como a modelação hidrológica dependem fortemente da disponibilidade de informação fiável e representativa, sendo a qualidade da monitorização um fator determinante para a obtenção de estimativas robustas e tecnicamente consistentes. Assim, futuros trabalhos deverão continuar a valorizar a componente de monitorização de campo, assegurando a existência de estações hidrométricas representativas, devidamente instrumentadas e suportadas por campanhas periódicas de medição destinadas à atualização e validação das curvas de vazão existentes.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros sugere-se a continuação da valorização da componente de monitorização de campo, assegurando a existência de estações hidrométricas representativas, devidamente instrumentadas e suportadas por campanhas periódicas de medição destinadas à atualização e validação das curvas de vazão existentes.

Assim, a obtenção de uma boa concordância entre as curvas de caudais classificados das séries observadas e simuladas constitui um aspeto relevante na validação dos resultados produzidos pelo modelo.

Recomenda-se ainda que, em trabalhos futuros, se aprofunde a análise estatística das séries hidrológicas, nomeadamente através da avaliação da sazonalidade dos resultados obtidos. A análise segmentada por períodos húmidos e secos, bem como por diferentes épocas do ano hidrológico, poderá permitir identificar padrões de desempenho não evidenciados pelos indicadores globais de ajuste, contribuindo para uma calibração mais robusta e para uma melhor compreensão das incertezas associadas às estimativas de afluência.

Finalmente, considera-se existir potencial para o desenvolvimento de ferramentas informáticas de apoio ao tratamento, integração e validação dos dados hidrológicos e operacionais utilizados na estimativa das afluências.

Estas ferramentas poderão aumentar a eficiência dos processos de análise e facilitar a identificação de incoerências entre diferentes fontes de informação, funcionando como apoio à decisão e não como substituto da interpretação técnica especializada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] T. Davie, *Fundamentals of Hydrology*, 3rd ed. em Routledge Fundamentals of Physical Geography Ser. Florence: Routledge, 2019.

[2] P. C. D. Milly *et al.*, «Stationarity Is Dead: Whither Water Management?», *Science*, vol. 319, n.º 5863, pp. 573–574, fev. 2008, doi: 10.1126/science.1151915.

[3] Neil D. Bennett, Barry F.W. Croke, Giorgio Guariso, Joseph H.A. Guillaume, Serena H. Hamilton, Anthony J. Jakeman*, Stefano Marsili-Libelli, Lachlan T.H. Newham, John P. Norton, Charles Perrin, Suzanne A. Pierce, Barbara Robson, Ralf Seppelt, Alexey A. Voinov, Brian D. Fath, Vazken Andreassian, «Characterising performance of environmental models», Australian National University.

https://researchportalplus.anu.edu.au/en/publications/characterising-performance-of-environmental-models/

[4] Agência Portuguesa do Ambiente, «A monitorização e avaliação da água permitem controlar o estado dos sistemas hídricos e a eficácia e eficiência das medidas implementadas.», https://apambiente.pt/agua/sistema-nacional-de-informacao-de-recursos-hidricos-snirh.

[5] F. S. Costa e H. S. Lopes, «The Portuguese dams of the international Douro, climate change and adaptation strategies: perspectives within the framework of the Albufeira Convention and the Water Framework Directive», *Water International*, vol. 49, n.º 3–4, pp. 417–428, mai. 2024, doi: 10.1080/02508060.2024.2321820.

[6] D. P. Loucks e E. Van Beek, *Water Resource Systems Planning and Management*. Cham: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-44234-1.

[7] Larry W. Mays, *Water Resources Engineering*, 2.ª ed. Tempe, Arizon: John Wiley & Sons, Inc., 2010

[8] Agência Portuguesa do Ambiente, «Redes de monitorização», https://apambiente.pt/agua/redes-de-monitorizacao.

[9] J. Dias da Silva e A. C. Ferreira, «TOP - Estudos de Caso - Rede Hidrometeorológica da EDP», EDP Produção, 2014.

[10] W. Boiten, *Hydrometry: a comprehensive indroduction to the measurement of flow in open channels*, 3. ed. em Unesco-IHE Delft lecture note series. Rotterdam: CRC Press, Balkema, 2008.

[11] «Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels - Velocity area methods using point velocity measurements», 2021.

[12] W. Boiten, *Hydrometry:* Measurement of flow in open channels, 3. ed. em Unesco-IHE Delft lecture note series. Rotterdam: CRC Press, Balkema, 2008.

[13] R. W. Herschy, «Streamflow Measurement».

[14] World Meteorological Organization, *Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information*, WMO-N.º 168, 6.ª ed. Genebra: WMO, 2008.

[15] A. C. Ferreira, «Rede Hidrometeorológica da EDP». EDP Produção, 2021.

[16] Robert R. Mason, Jr., «Rating curve uncertainty: A comparison of estimation methods». https://www.researchgate.net/publication/311506665_Rating_curve_uncertainty_A_comparison_of_estimation_methods

[17] *ISO 2537:2007 – Hydrometry – Rotating-element current-meters*. Genebra: International Organization for Standardization, 2007.

[18] P. Cunha, «MEDIÇÃO DE CAUDAIS EM RIOS», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 2010.

[19] Organização Meteorológica Mundial (OMM), *Manual on Stream Gauging, Volume I: Fieldwork*, WMO-No. 1044, Genebra, Suíça, 2010.

[20] M. Muste, T. Vermeyen, R. Hotchkiss, e K. Oberg, «Acoustic Velocimetry for Riverine Environments», *J. Hydraul. Eng.*, vol. 133, n.º 12, pp. 1297–1298, dez. 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:12(1297).

[21] «Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation A Practical Primer». TELEDYNE, U.S., 2011.

[22] Juarez Autonomous University of Tabasco, Academic Division of Engineering and Architecture, G. Priego-Hernández, H. Rubio-Arias, Juarez Autonomous University of Tabasco, Academic Division of Engineering and Architecture, F. Rivera-Trejo, e Juarez Autonomous University of Tabasco, Academic Division of Engineering and Architecture, «ADCP, MULTI-FREQUENCY ANALYSIS FOR FLOW MEASUREMENTS IN RIVERS», *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus*, vol. 18, n.º 1, pp. 101–112, mar. 2019, doi: 10.15576/ASP.FC/2019.18.1.101.

[23] Robert R. Mason, Jr., «Rating curve uncertainty: A comparison of estimation methods». https://www.researchgate.net/publication/311506665_Rating_curve_uncertainty_A_comparison_of_estimation_methods

[24] B. Mujtaba, P. Diogo, P. Beça, e S. Simões, «APPLICATION OF SEASONAL FORECAST CLIMATE DATA FOR RESERVOIR OUTFLOWS IN THE DOURO BASIN, IN PORTUGAL».

[25] Ana Catarina Pinheiro Monteiro, «Análise de Séries Temporais de Dados Meteorológicos da Cidade do Porto», *Dissertação de Mestrado*, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP), 2017.

[26] D. G. Miralles, T. R. H. Holmes, R. A. M. De Jeu, J. H. Gash, A. G. C. A. Meesters, e A. J. Dolman, «Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations», *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 15, n.º 2, pp. 453–469, fev. 2011, doi: 10.5194/hess-15-453-2011.

[27] Q. Li, Y. Peng, G. Wang, H. Wang, B. Xue, e X. Hu, «A Combined Method for Estimating Continuous Runoff by Parameter Transfer and Drainage Area Ratio Method in Ungauged Catchments», *Water*, vol. 11, n.º 5, p. 1104, mai. 2019, doi: 10.3390/w11051104.

[28] J. Le Coz, B. Renard, L. Bonnifait, F. Branger, e R. Le Boursicaud, «Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach», *Journal of Hydrology*, vol. 509, pp. 573–587, fev. 2014, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.016.

[29] Mabvuto Phiri, «AN ANALYSIS OF THE CAHORA BASSA DAM WATER BALANCE AND RESERVOIR OPERATIONS AND THEIR FLOODING IMPACT ON UPSTREAM SETTLEMENTS», Harare, 2011.

[30] J. Hun Song, Y. Her, e M.-S. Kang, «Estimating Reservoir Inflow and Outflow From Water Level Observations Using Expert Knowledge: Dealing With an Ill-Posed Water Balance Equation in Reservoir Managemen», Water Resources Research (AGU), vol. 58, n.º 4, abril 2022.

[31] R. João Guale, «Conjunctive Operations for Cahora Bassa Dam and Mphanda Nkuwa Dam Project, Zambezi River Basin, Mozambique, Southern Africa», Delft, The Netherlands, 2015.

[32] M. Sugai, M. Almeida, e Paulek, «ATUALIZAÇÃO DAS CURVAS COTA X ÁREA X VOLUME UTILIZANDO O MÉTODO EMPÍRICO DE BORLAND & MILLER – Aplicação ao Reservatório de Foz do Areia.», apresentado em XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

RECURSOS HIDRÍCOS,

[33] M. Kummu e O. Varis, «Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the Lower Mekong River», *Geomorphology*, vol. 85, n.º 3–4, pp. 275–293, mar. 2007, doi: 10.1016/j.geomorph.2006.03.024.

[34] International Atomic Energy Agency (IAEA), «VALORAGUA: A Model for the Optimal Operating Strategy of Mixed Hydrothermal Generation Systems». International Atomic Energy Agency (IAEA), 1999.

[35] Electricidade de Portugal (EDP), *Aproveitamento Hidráulico do Douro*. Lisboa: Electricidade de Portugal (EDP), 1986.

[36] *Guia dos Rios e Barragens - Douro*. Visão, 2011.

[37] «Vilar». Disponível em: https://cnpgb.apambiente.pt/content/vilar

[38] «Régua».. Disponível em: https://cnpgb.apambiente.pt/content/r%C3%A9gua

[39] «Crestuma-Lever». Disponível em: https://cnpgb.apambiente.pt/content/crestuma-lever

[40] Noordiah Helda, «Water Balance Study and Analysis for the Pahang River Basin, Malaysia», Delft, 2008.

[41] «HEC-HMS User's Manual». [Em linha]. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest

[42] El Tayara-Zobaida, «Hydrologic drought characteristics of selected basins in various climate zones of Lebanon», 2023.

[43] U.S. Army Corps of Engineers e Hydrologic Engineering Center, «Calculate Performance Metrics for Daily Flows», HEC-HMS Applications Guide. https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsguides/model-calibration-and-validation/calibrating-a-continuous-simulation-model/calculate-performance-metrics-for-daily-flows

[44] U.S. Army Corps of Engineers e Hydrologic Engineering Center, «HEC-HMS User's Manual», Hydrologic Engineering Center (HEC), 2026. https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest

[45] A. D. Feldman, *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual*, CPD-74B. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center, 2000.

[46] Q. Li, Y. Peng, G. Wang, H. Wang, B. Xue, e X. Hu, «A Combined Method for Estimating Continuous Runoff by Parameter Transfer and Drainage Area Ratio Method in Ungauged Catchments», *Water*, vol. 11, n.º 5, p. 1104, mai. 2019, doi: 10.3390/w11051104.

[47] V. T. Chow, D. R. Maidment, e L. W. Mays, *Applied hydrology*. em McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. New York St. Louis Paris [etc.]: McGraw-Hill, 1988.

[48] Marinoé Gonzaga da Silva*, Antenor de Oliveira de Aguiar Netto, Ramiro Joaquim de Jesus Neves, Anderson Nascimento do Vasco, Carina Almeida, Gregório Guirado Faccioli, «Sensitivity Analysis and Calibration of Hydrological Modeling of the Watershed Northeast Brazil». https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=58940

[49] «Scientific Investigations Report», Scientific Investigations Report, 2006.

[50] H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, e G. F. Martinez, «Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling», *Journal of Hydrology*, vol. 377, n.º 1–2, pp. 80–91, out. 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

ANEXOS

A.1 ORIGEM E EVOLUÇÃO DA REDE HIDROMETEOROLÓGICA DA EDP PRODUÇÃO

A origem da rede de monitorização hidrometeorológica da EDP Produção S.A remonta a meados do século passado, impulsionada pela Hidroelétrica do Douro, com objetivo predominante de criar um setor especializado interno que garantisse a exploração e manutenção de um conjunto de estações hidrometeorológica, bem como o fornecimento à autoridade dos respetivos registos de observação, atividade que, por exigência dos cadernos de encargos das concessões dos aproveitamentos hidroelétricos, era obrigada a assumir.

Tendo consciência da extraordinária importância da existência de dados de observação hidrometeorológica com qualidade e em quantidade, por constituírem um elemento base fundamental quer para a realização de estudos e projetos de novos aproveitamentos, quer para apoio à exploração das existentes, a rede da EDP foi evoluindo, chegando a ser constituída por cerca de uma centena de estações, todas elas dotadas de equipamentos de medição convencionais.

No início da década de noventa, a atividade de exploração e manutenção dessa rede, bem como a de análise e edição dos respetivos dados de observação estiveram adstritos a uma equipa própria constituída por dezena e meia de técnicos da empresa.

Para além dos recursos humanos próprios da empresa, desde sempre foram contratados serviços a entidades/pessoas externas. Até 2008, os responsáveis pela prestação destes serviços, genericamente designados por Observadores, tinham como função a recolha e envio de dados de certas estações e também o envio de alertas em situações excecionais.

O desenvolvimento tecnológico permitiu o registo e transmissão eletrónica das observações hidrometeorológica de forma contínua, facilitando a respetiva análise e tratamento. Foi então decidido, em 1995, iniciar a automatização da referida rede, tendo sido instalados os primeiros sistemas de telemetria em duas estações hidrométricas.

No final da década de noventa, existiam cerca de dez estações automatizadas. Desde o final da década de 1990 até 2008, esse processo de automatização sofreu várias vicissitudes, que foram dificultando o seu desenvolvimento e consolidação. No entanto, as visitas de manutenção mantiveram-se dada a necessária manutenção dos equipamentos, sendo estes dotados de registo automático ou não, uma vez que se mantiveram os convencionais nelas existentes, sendo estes dotados de registo em papel, de funcionamento conhecido e fiável.

No final de 2008, a rede hidrometeorológica da EDP Produção S.A incluía já 41 estações com registo automático de dados, algumas delas com teletransmissão.

A partir desse mesmo ano, a área da Hidrometeorologia foi alvo de um processo de reorganização, tendo-se verificado a instalação de 21 novas estações automáticas, sendo 17 hidrométricas e 4 udométricas, processo esse que se estendeu em 2011 a mais 10 estações.

A automatização das estações da rede hidrometeorológica levou a que se repensasse a organização e política dos recursos humanos internos e externos da empresa afetos à atividade da área responsável. Assim, decidiu-se, por um lado, adjudicar externamente uma parte significativa das manutenções preventivas e corretivas às estações da rede, atividade que, até então, era da exclusiva responsabilidade de colaboradores afetos da área de estudo, e, por outro, reduzir o número de observadores de quinze para três.

O recurso às novas tecnologias e a adjudicação, a entidades externas, de um número significativo de manutenções às estações levaram à diminuição da necessidade de intervenção de meios humanos internos, pelo que a equipa adstrita foi consideravelmente reduzida. De facto, a EDP Produção mantém atualmente uma equipa interna constituída por apenas seis técnicos. Em 2014, das 77 estações constituintes da rede da EDP Produção, 67 estariam automatizadas. Com exceção de duas dessas estações, localizadas na bacia do Guadiana, as restantes distribuem-se pelas bacias hidrográficas dos principais rios do norte e centro do nosso país, estando tal distribuição geográfica naturalmente associada aos interesses e necessidades da Empresa enquanto promotora, projetista e gestora de um significativo conjunto de grandes aproveitamentos hidroelétricos em exploração.

Em março de 2026, a rede hidrometeorológica da empresa é composta por 78 estações ativas, após ajustes realizados ao longo do tempo. Destacam-se as estações hidrométricas na bacia do Douro, sendo esta a mais monitorizada, seguida pelas bacias do Cávado e do Tejo, o que reflete o peso das estimativas e dos resultados energéticos dos aproveitamentos em questão.

O acompanhamento operacional e a supervisão integrada desta rede são atualmente suportados pela plataforma interna *Watt Now*, apresentada na Figura 81. O salto qualitativo entre 2014 e 2026 não se verificou apenas no número de estações, mas na omnipresença da telemetria e na digitalização. Nos dias de hoje, todas as estações possuem sistemas de transmissão automática, utilizando protocolos GPRS/4G e comunicações via satélite, garantindo assim a continuidade da série de dados mesmo em condições meteorológicas adversas.

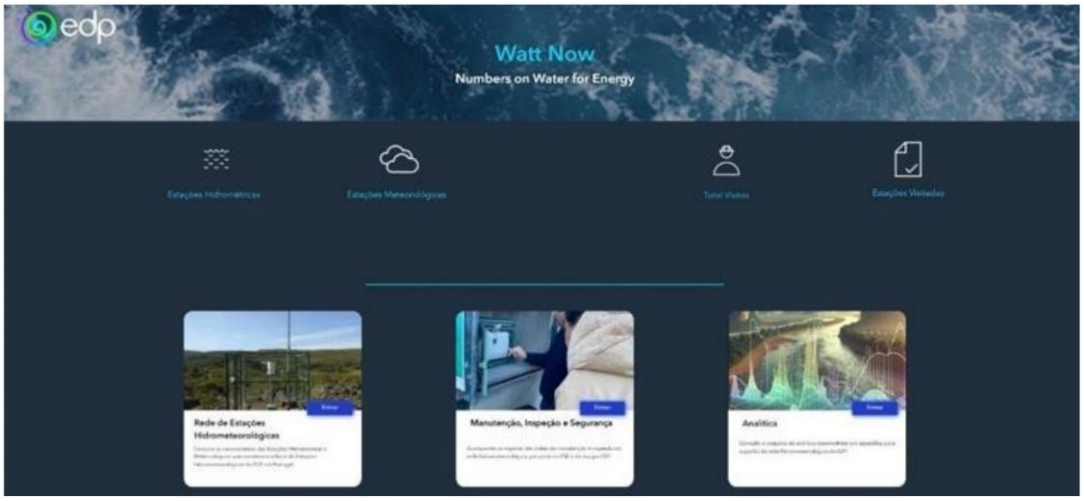


Figura 81. Interface do *Watt Now* - Plataforma interna (EDP, 2025)