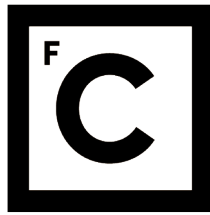


UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Ciências**  
**ULisboa**

**Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa  
pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)**

Inês Filipa Machado Costa

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:  
Prof<sup>a</sup>. Doutora Maria Manuela Portela Correia dos Santos Ramos da Silva

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Efeito da variabilidade na receita esperada numa pequena  
central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Inês Filipa Machado Costa

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Versão Provisória

Dissertação orientada por:  
Prof.ª Dr.ª Maria Manuela Portela Correia dos Santos Ramos da Silva

2017



## Resumo

A presente dissertação tem como objetivo averiguar se a variabilidade que caracteriza o regime fluvial em Portugal Continental tem efeitos na receita esperada numa pequena central hidroelétrica (PCH) de modo a informar eventuais promotores acerca das consequências inerentes à decisão de implementação daquele tipo de central.

Neste contexto, adotou-se como caso de estudo a central hidroelétrica do Sordo, tendo-se procedido à sua caracterização hidrológica e energética. Para tanto, estimou-se a série de caudais médios diários afluentes à central hidroelétrica, por recurso a uma metodologia de transposição de informação hidrométrica, neste caso, a partir da série de caudais disponível na estação hidrométrica de Santa Marta do Alvão. A seleção desta estação atendeu à sua proximidade relativamente à central hidroelétrica do Sordo, o que, de algum modo, assegura que as alturas do escoamento anual nas bacias hidrográficas da estação e desta central são relativamente próximas, único constrangimento inerente ao procedimento de transposição aplicado. Importa mencionar que, para estimar a altura do escoamento anual médio na bacia hidrográfica da PCH, houve que recorrer a registos de precipitação para o que foram selecionados dez postos udométricos, tendo as séries aí disponíveis sido analisadas em termos de eventuais quebras de homogeneidade, designadamente, relacionadas com a ocorrência de tendências.

Para caracterizar do ponto de vista energético a PCH do Sordo, procedeu-se à simulação da sua exploração diária, baseada num algoritmo de simulação, para o que se consideraram diferentes hipóteses de caudal de dimensionamento (variável entre 1,6 e 2,4 vezes o caudal modular – caudal médio) e do período de concessão (15 e 25 anos). A partir dos resultados referentes a cada um dos cenários considerados, estimaram-se as receitas dia a dia e, por acumulação destas receitas, as correspondentes receitas anuais, bem como a respetiva receita acumulada atualizada, obtida de acordo com critérios de análise económica, para diferentes valores da taxa de atualização (4 e 10%). De modo a permitir comparar entre si resultados referentes a diferentes cenários, procedeu-se à dimensionalização das receitas por divisão pelo que se designou por receita de referência,  $R^*$ , determinada no pressuposto de uma produção anual constante e igual à produção anual média.

Para caracterizar, do ponto de vista estatístico, as receitas acumuladas atualizadas adimensionais relativas a um dado período de concessão e, assim, atribuir-lhes probabilidades de não-excedência, estimaram-se tais receitas tendo por base todas as sequências com duração igual ao período de concessão que era possível obter a partir do período global de registos. Sendo a duração deste período de 56 anos, foram assim, constituídas 42 sequências de 15 anos e 32, de 25 anos, correspondendo a igual número de receitas acumuladas atualizadas adimensionais. Procedeu-se ainda à consideração da primeira metade destas receitas e da segunda metade, em qualquer dos casos, em número de 21 e de 16 para aqueles períodos de concessão, respetivamente.

Conclui-se existir uma variabilidade acentuada da receita acumulada atualizada esperada em resultado dos anos iniciais do período com registos terem sido mais favoráveis do que os anos finais, obviamente do ponto de vista hidrológico. Por outro lado, concluiu-se que a receita de referência pode ser um bom estimador da mediana das receitas esperadas, por apresentar uma probabilidade de não-excedência próxima dos 50%.

Como conclusão geral, importa reter que, na apreciação da viabilidade económica de uma PCH, é fundamental analisar diferentes períodos de tempo, como forma de incorporar a variabilidade hidrológica, designadamente quando poderão estar em causa decréscimos nas aflúncias

disponíveis. Verificou-se ainda que, em igualdade das demais circunstâncias, a suscetibilidade da PCH ao regime hidrológico (traduzida por uma maior variabilidade nas receitas esperadas) é tanto maior quanto menor for o período da concessão, maior o caudal de dimensionamento e mais frágil a economia, circunstância esta última traduzida por uma maior taxa de atualização.

**Palavras-chave:** PCH, quebras de homogeneidade, caudal médio diário, receita de referência, receita acumulada atualizada adimensional

## Abstract

This dissertation aims to investigate if the variability that characterizes the flow regime in Portugal has effects on expected revenue of a small hydroelectric power plant (SHP) to inform potential promoters about the consequences inherent to the decision to implement that type of power plant.

In this context, the Sordo hydroelectric power plant was adopted as a case study, and its hydrological and energy characterization were carried out. In order to do so, the daily average flow affluent to the hydroelectric power station series was estimated, using a methodology of transposition of hydrometric information, in this case, from the available flows series in the Santa Marta do Alvão hydrometric station. The selection of this station took into account its proximity to the Sordo hydroelectric power station, which, in a certain way, ensures that annual discharge heights in the basins of the hydrometric station and the hydroelectric power station are relatively close, being this the only constraint inherent in the applied transposition procedure. It is important to mention that, to estimate the average annual runoff height in the SHP hydrographic basin, precipitation records were used, for which ten hydrometric stations were selected, and the series available were analysed in terms of possible breaks in homogeneity, namely, related to the occurrence of trends.

In order to characterize Sordo's SHP from an energy point of view, its daily exploration, based on a simulation algorithm, was simulated, for which different design flow assumptions were considered (varying between 1,6 and 2,4 times the modular flow) and the concession period (15 and 25 years). Based on the results for each of the scenarios considered, daily revenues were estimated and, by accumulation of these revenues, the corresponding annual revenues, as well as the respective updated accumulated revenue, obtained according to economic analysis criteria, for different values of the discount rate (4 and 10%). In order to allow comparisons between the results of different scenarios, it was necessary to proceed to the non-dimensional of revenue by division, which was designated as reference revenue,  $R^*$ , determined on the assumption of constant annual production and equal to the average annual production.

To characterize, from a statistical point of view, the cumulated updated dimensionless revenues, related to a given concession period and, therefore, to assign them probabilities of non-exceedance, these revenues were estimated based on all sequences with a duration equal to the period.

In order to characterize, from the statistical point of view, the cumulative up-to-date accumulated revenues related to a given concession period and, therefore, to assign them probabilities of non-exceedance, these revenues were estimated, based on all sequences with a duration equal to the concession period which could be obtained from the overall period of registrations. Being the duration of this period 56 years, 42 sequences of 15 years and 32 of 25 years were constituted, corresponding to an equal number of cumulative updated non-dimensional revenues. The first half of this revenue and the second half, in any case, in number of 21 and 16 for those concession periods, respectively.

It is concluded that there is an accentuated variability in the expected accumulative updated revenue, because of the initial years of the recorded period having been more favourable than the final years, obviously from a hydrological point of view. On the other hand, it is concluded that

the reference revenue can be a good estimator of the median of the expected revenue, since it presents a non-exceedance probability close to 50%.

As a general conclusion, it is important to note that, in assessing the economic viability of a SHP, it is fundamental to analyse different periods of time, as a way of incorporating hydrological variability, particular when there may be decreases in the available inflows. It was also verified that, similarly to other circumstances, the susceptibility of the SHP to the hydrological regime (translated by a greater variability in expected revenues) is greater as the concession period is shorter, the bigger the design flow rate and the more fragile the economy, the latter circumstance translated by a higher rate of the updated rate.

**Keywords:** SHP, Non-homogeneity, average daily flow, reference revenue, updated cumulative non-dimensional revenue

## Índice

Resumo.....	iii
Abstract .....	v
Índice de Figuras .....	ix
Índice de Software.....	xiv
Agradecimentos.....	xv
Simbologia e Notações.....	xvi
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Considerações Gerais .....	1
1.2. Objetivos da dissertação.....	2
1.3. Organização do documento.....	3
Capítulo 2 – Enquadramento. Conceitos teóricos .....	5
2.1. Introdução .....	5
2.2. A hidroeletricidade em Portugal Continental.....	5
2.2.1. O passado .....	5
2.2.2. Panorama atual do setor energético em Portugal Continental.....	8
2.2.3. Desenvolvimento futuro para a hidroeletricidade .....	11
2.3. Variabilidade hidrológica e riscos associados.....	13
2.4. Estudos hidrológicos .....	14
2.4.1. Introdução.....	14
2.4.2. Análise da qualidade das séries de precipitação.....	16
2.4.2.1. Teste de valores simplesmente acumulados .....	16
2.4.2.2. Médias móveis. Teste de Student .....	17
2.4.3. Avaliação da precipitação em área.....	19
2.4.4. Equação de regressão entre o escoamento anual e a precipitação anual .....	20
2.4.5. Outros modelos de avaliação do escoamento anual médio .....	21
2.4.6. Modelo de regionalização de escoamentos .....	23
2.4.7. Algoritmo de simulação .....	24
2.5. Análise económica .....	25
2.5.1. Introdução.....	25
2.5.2. Energia anual produzida.....	26
2.5.3. Receita anual atualizada. Receita de referência .....	27
2.6. Análise estatística.....	28
2.6.1. Introdução.....	28
2.6.2. Análise de frequência. Probabilidade empírica de não-excedência .....	29
2.6.3. Distribuição Normal.....	31
2.6.4. Distribuição Log-Normal (Galton).....	32
2.6.5. Distribuição de Pearson Tipo III .....	32
2.6.6. Análise de frequências pelo método de fator de probabilidade.....	33

2.6.6.1. Distribuição Normal.....	34
2.6.6.2. Distribuição Log-Normal .....	34
2.6.6.3. Distribuição Pearson Tipo III.....	34
Capítulo 3 – Caso de estudo.....	37
3.1. Caracterização do caso de estudo.....	37
3.2. Dados de base.....	38
3.2.1. Postos udométricos.....	39
3.2.1.1. Qualidade das séries de precipitações anuais .....	41
3.2.1.2. Precipitações ponderadas em área.....	43
3.3. Regressão linear do escoamento anual sobre a precipitação média anual.....	45
Capítulo 4 – Apresentação dos resultados.....	48
4.1. Análise dos resultados.....	49
4.1.1. Ajustamento visual das leis estatísticas.....	52
4.1.2. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para diferentes probabilidades de não-excedência.....	59
Capítulo 5 – Conclusões. Desenvolvimentos futuros.....	65
Referências Bibliográficas .....	69
ANEXOS.....	71

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Potência instalada em Portugal Continental para um período compreendido de 1930 a 1990. Fonte: [7].....	7
Figura 2.2. Produção de energia elétrica em Portugal Continental. Na década de 80 denota-se um aumento da produção de energia através de centrais termoelétricas. Fonte: [7] .....	7
Figura 2.3. Repartição das fontes de energia em Portugal Continental no 1º semestre de 2017. Fonte: [8] .....	8
Figura 2.4. Aumento da produção de origem FER face a 2015. Fonte: [10] .....	9
Figura 2.5. Diagrama referente à potência instalada ao longo dos últimos 16 anos. Fonte: [10].....	10
Figura 2.6. Repartição das fontes energéticas na produção de energia em Portugal Continental no ano de 2016. Fonte: [11].....	10
Figura 2.7. Balanço de produção de eletricidade e trocas internacionais de Portugal Continental. Fonte: [11].....	11
Figura 2.8. Contribuição das FER no sistema electroprodutor nacional e as metas a serem alcançadas para 2020 e 2030. Fonte:[13] .....	12
Figura 2.9. Perspetiva do setor elétrico para Portugal Continental em 2040. Fonte: [13] .....	13
Figura 2. 10. Exemplo do método dos polígonos de Thiessen.....	19
Figura 2.11. Carta de isolinhas do escoamento anual médio em Portugal Continental Fonte: [22].	21
Figura 2.12. Relações médias em Portugal entre o escoamento anual e a precipitação anual Fonte: [22].....	22
Figura 2.13. Transferência do fluxo de uma unidade monetária relacionado com a taxa de atualização. Fonte:[23].....	26
Figura 2.14. Papel de probabilidade para a Lei Normal. Fonte: [25].....	30
Figura 3.1. Barragem do Sordo (vista de montante). Fonte: [26].....	38
Figura 3.2. Aplicação do teste de valores simplesmente acumulados às séries de precipitações anuais dos postos udométricos com influência nas respetivas bacias hidrográficas. ....	41
Figura 3.3. Aplicação da técnica clássica das médias móveis às séries de precipitações anuais dos postos udométricos com influência nas respetivas bacias hidrográficas.....	42
Figura 3.4. Aplicação do teste de Student. Os dois gráficos representados mostram as séries que foram excluídas do estudo por apresentarem quebras de homogeneidade.....	43
Figura 3. 5. Precipitações anuais nos postos udométricos com influência na bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Sta. Marta do Alvão.....	44
Figura 3. 6. Precipitações anuais nos postos com influência na bacia hidrográfica da central hidroelétrica do Sordo. ....	44
Figura 3.7. Estação hidrométrica de Sta. Marta do Alvão. Representação da equação de regressão linear entre o escoamento anual e a precipitação anual.....	45
Figura 3.8. Estação hidrométrica de Sta. Marta do Alvão. Escoamentos anuais obtidos através do somatório dos caudais médios diários para cada ano. ....	46
Figura 4. 1. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 15 anos, para diferentes caudais de dimensionamento e taxa de atualização de 4%.....	50
Figura 4.2. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 15 anos, para diferentes caudais de dimensionamento e taxa de atualização de 10% .....	50
Figura 4. 3. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 25 anos, para diferentes caudais de dimensionamento e taxas de atualização de 4%. ....	51
Figura 4.4. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 25 anos, para diferentes caudais de dimensionamento e taxa de atualização de 10% .....	51
Figura 4.5. Amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	52
Figura 4.6. 21 valores iniciais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	53

Figura 4.7. 21 valores finais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	53
Figura 4.8. Amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	54
Figura 4.9. 21 valores iniciais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	54
Figura 4.10. 21 valores finais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	55
Figura 4.11. Amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	55
Figura 4.12. 16 valores iniciais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	56
Figura 4.13. 16 valores finais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	56
Figura 4.14. Amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	57
Figura 4.15. 16 valores iniciais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	57
Figura 4.16. 16 valores finais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	58
Figura 4.17. Amostras de 42 e de 21 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Receitas em função do caudal de dimensionamento, $Q_{max}/Q_{mod}$ para diferentes probabilidades de não-excedência. ....	60
Figura 4.18. Amostras de 42 e de 21 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Receitas em função da probabilidade de não-excedência para: a) para os cinco valores da relação $Q_{max}Q_{mod}$ indicados na legenda e b) detalhe, para os valores da relação de $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	60
Figura 4.19. Amostras de 42 e de 21 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Receitas em função do caudal de dimensionamento, $Q_{max}/Q_{mod}$ para diferentes probabilidades de não-excedência. ....	61
Figura 4.20. Amostras de 42 e de 21 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Receitas em função da probabilidade de não-excedência para: a) para os cinco valores da relação $Q_{max}Q_{mod}$ indicados na legenda e b) detalhe, para os valores da relação de $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	61
Figura 4.21. Amostras de 32 e de 16 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Receitas em função do caudal de dimensionamento, $Q_{max}/Q_{mod}$ para diferentes probabilidades de não-excedência. ....	62
Figura 4.22. Amostras de 32 e de 16 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Receitas em função da probabilidade de não-excedência para: a) para os cinco valores da relação $Q_{max}Q_{mod}$ indicados na legenda e b) detalhe, para os valores da relação de $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4. ....	62
Figura 4.23. Amostras de 32 e de 16 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Receitas em função do caudal de dimensionamento, $Q_{max}/Q_{mod}$ para diferentes probabilidades de não-excedência. ....	63

Figura 4.24. Amostras de 32 e de 16 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Receitas em função da probabilidade de não-excedência para: a) para os cinco valores da relação $Q_{max}Q_{mod}$ indicados na legenda e b) detalhe, para os valores da relação de $Q_{max}Q_{mod}$ de 1,6, 2,0 e 2,4.....	63
Figura A.1. Aplicação do teste de valores simplesmente acumulados às restantes séries de precipitações anuais dos postos udométricos com influência nas bacias hidrográficas do PCH e da EH. ....	73
Figura A.2. Aplicação da técnica clássica das médias móveis às restantes séries de precipitações anuais dos postos udométricos com influência nas bacias hidrográficas do PCH e da EH. ....	74
Figura A.3. Exemplificação dos quadros de análise estatística para os 21 valores iniciais. O primeiro quadro representa as receitas acumuladas atualizadas adimensionais, e o correspondente logaritmo. O segundo quadro apresenta as receitas acumuladas atualizadas adimensionais ordenadas por ordem crescente, a probabilidade empírica de não-excedência, F e a normal reduzida, z. Por fim, o último quadro apresenta o ajuste das leis estatísticas. Lei Normal, lei de Galton e lei Pearson III. ....	75
Figura A.4. Código da simulação de produção da energia e da respetiva variabilidade que advém da série histórica global. ....	93

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1. Caso de estudo: central hidroelétrica do Sordo. Características principais. ....	37
Tabela 3.2. Caso de estudo: central hidroelétrica do Sordo. Características da estação hidrométrica de Santa Marta do Alvão (05K/01H). ....	38
Tabela 3.3. Postos udométricos com influência nas bacias hidrográficas da central hidroelétrica e da estação hidrométrica. ....	40
Tabela 3.4. Características estatísticas das séries de precipitação médias anuais. ....	40
Tabela 3. 5. Valores do escoamento anual através de diferentes métodos. Comparação do valor de escoamento anual obtido pela média aritmética dos três modelos com o valor do escoamento anual obtido pelo método da regressão linear. Dados dos elementos climáticos necessário na aplicação dos três modelos descritos no subcapítulo 2.4.5. ....	46
Tabela 4. 1. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 1,6$ ....	59
Tabela A. 1. Precipitações anuais nos postos com influência na bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Sta. Marta do Alvão e respetiva precipitação ponderada. ....	77
Tabela A. 2. Precipitações anuais nos postos com influência na bacia hidrográfica da central hidroelétrica do Sordo e respetiva precipitação ponderada. ....	78
Tabela A. 3. Estação hidrométrica de Sta. Marta de Alvão. Escoamentos anuais obtidos através do somatório dos caudais médios diários para cada ano. ....	79
Tabela A. 4. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 15 anos, em função do caudal de dimensionamento e da taxa de atualização. Características estatísticas das amostras. ....	80
Tabela A. 5. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 25 anos, em função do caudal de dimensionamento e da taxa de atualização. Características estatísticas das amostras. ....	81
Tabela A. 6. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod}$ .....	82
Tabela A. 7. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 1,6$ ....	82
Tabela A. 8. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 1,8$ ....	83
Tabela A. 9. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 1,8$ ....	83
Tabela A. 10. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,0$ ....	84
Tabela A. 11. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,0$ ....	84
Tabela A. 12. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,2$ ....	85
Tabela A. 13. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,2$ ....	85
Tabela A. 14. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,4$ ....	86

Tabela A. 15. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,4$ .....	86
Tabela A. 16. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 1,6$ .....	87
Tabela A. 17. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 1,6$ .....	87
Tabela A. 18. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 1,8$ .....	88
Tabela A. 19. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 1,8$ .....	88
Tabela A. 20. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,0$ .....	89
Tabela A. 21. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,0$ .....	89
Tabela A. 22. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,2$ .....	90
Tabela A. 23. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,2$ .....	90
Tabela A. 24. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,4$ .....	91
Tabela A. 25. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional. $Q_{max}/Q_{mod} = 2,4$ .....	91

## **Índice de Software**

AutoCAD

Excel

Matlab

## Agradecimentos

Tanto a realização desta dissertação como o meu percurso académico ao longos destes últimos anos só foram possíveis graças ao contributo de diversas pessoas, quer de forma direta, quer de forma indireta, e me ajudaram a completar esta fase importante da minha vida, e às quais quero expressar o meu agradecimento.

Primeiramente, quero destacar a professora Maria Manuela Portela por todo o apoio que me proporcionou ao longo deste último ano, bem como o tempo que disponibilizou para me ajudar nesta etapa da minha vida académica. A sua ajuda e a transmissão dos seus conhecimentos ajudaram-me a concluir esta fase tão importante.

Ao longo desta minha etapa académica foram muitas as pessoas que passaram pela minha vida, desde colegas de curso a professores, e todos eles tiveram, de alguma forma, impacto neste meu percurso, por isso, não posso deixar também de agradecer a todos eles.

Ao meu colega Luís Martins, que se disponibilizou diversas vezes para me auxiliar sempre que necessário no decorrer do trabalho.

Aos meus amigos, que acompanharam este percurso e acreditaram sempre em mim.

Ao meu namorado, João Gavela, que acompanhou de perto, mais do que ninguém, o meu percurso académico, e que neste último ano me incentivou a nunca desistir e que sempre me apoiou em todas as decisões que tomei.

Por fim, mas não menos importante, aos meus pais, porque sem eles não teria sido possível concluir esta etapa tão marcante da minha vida. Deram-me sempre força para continuar a seguir os meus sonhos, e devo a eles a pessoa que hoje sou, tanto a nível pessoal como académico.

## Simbologia e Notações

EH	Estação hidrométrica
FER	Fontes de energias renováveis
pAHE	Pequeno aproveitamento hidroelétrico
PCH	Pequena central hidroelétrica
PNAER	Plano nacional de acção para as energias
N	Dimensão do período de registos (dimensão da amostra)
$\alpha$	Nível de significância
$\eta$	Nível de confiança
$\alpha$	Declive da reta
$\beta$	Ordenada na origem
t	Taxa de atualização
g	Gravidade (m <sup>2</sup> /s)
$\eta$	Eficiência global
$\Delta h$	Queda bruta (m)
R*	Receita de referência
f	Fator de atualização
R/R*	Receita acumulada atualizada adimensional
DL	Decreto-lei
F(x)	Probabilidade de não-excedência de x
Z	Normal reduzida
$\sigma$	Desvio-padrão da amostra
$\mu$	Média da amostra
$\delta$	Coefficiente de assimetria
fdp	Função distribuição de probabilidade
X	Variável aleatória
$\alpha$	Parâmetro de escala
$\beta$	Parâmetro de forma
$k^F_{dist}$	Fator de probabilidade
$k^F_{Normal}$	Fator de probabilidade da distribuição Normal
$k^F_{Pearson}$	Fator de probabilidade da distribuição Pearson III
$g_x$	Coefficiente de assimetria
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação

$\bar{P}$	Média da precipitação anual
s	Desvio-padrão da amostra
c.a	Coefficiente de assimetria
APREN	Associação portuguesa das energias renováveis
MIBEL	Mercado ibérico de eletricidade
SNIRH	Sistema nacional de informação de recursos hídricos

Página deixada em branco intencionalmente

## Capítulo 1 – Introdução

### 1.1. Considerações Gerais

Vários estudos colocam Portugal como um país abundante do ponto de vista dos recursos hídricos superficiais, visto apresentar valores de escoamento médio anual global ou *per capita* superiores, quando comparados com vários países europeus, sobretudo os localizados na bacia mediterrânica, como França, Espanha, Itália e Grécia. Não obstante de ser um país relativamente abundante, as acentuadas assimetrias espaciais e temporais são características que colocam sempre desafios e que levam a que o país enfrente diversas dificuldades na gestão do planeamento e dos seus recursos [1].

Existe uma variação espacial significativa da disponibilidade hídrica no território nacional, isto porque a precipitação anual média é cerca de cinco vezes maior na região Norte-Atlântica do que no interior Sul.

Acresce que ainda é necessário atender a que grande parte do território nacional (cerca de 65%) é abrangido pelas grandes bacias hidrográficas luso-espanholas que têm as suas regiões a montante, em Espanha. Significa que cerca de 60% escoamento anual tem origem em Espanha, fazendo com que Portugal necessite de outras garantias para salvaguardar os seus interesses na área dos recursos hídricos superficiais [2].

Juntamente com a variação espacial da disponibilidade hídrica, e sendo o clima em Portugal Continental mediterrânico, há também variabilidade natural temporal, a nível tanto intra-anual, significando que existem períodos húmidos, normalmente entre os meses de novembro a abril e períodos secos, por regra entre maio e outubro, como inter-anual, ou seja, ocorrendo sequências de anos húmidos e sequências de anos secos.

Associado a tudo o que foi dito anteriormente, vem ainda juntar-se um dos maiores desafios que a humanidade terá de travar no presente século: o aquecimento global, proveniente do efeito de estufa, com prováveis efeitos hidrológicos muito significativos. De acordo com o Decreto-Lei nº 112/2002 de 17 de Abril, prevê-se que os efeitos das alterações climáticas, nomeadamente no nosso país, possam vir a contribuir para um agravamento da situação dos recursos hídricos, aumentando o risco e as intensidades das secas e das cheias, eventualmente diminuindo as disponibilidades hídricas superficiais.

Uma das soluções a curto e médio prazos para atenuar a variabilidade temporal do recurso hídrico passa pela construção de aproveitamentos hidroelétricos (de grandes ou de pequenas dimensões), que são estruturas que armazenam e promovem a regularização, embora em diferentes graus, do recurso hídrico para abastecer populações, para o uso da água em zonas rurais, para o combate a incêndios ou, numa das suas mais habituais utilizações, para a geração da hidroeletricidade.

Com efeito, atualmente e num ano médio, aproximadamente 30% da eletricidade consumida em Portugal tem origem hídrica, com base em empreendimentos de diferentes características.

Contudo, Portugal é um país que possui ainda uma elevada potencialidade hidroenergética por explorar, tanto a nível de grandes centrais hidroelétricas, como a nível de pequenos aproveitamentos hidroelétricos (pAHE) [3]. De acordo com Sá da Costa, avalia-se que se encontrem ainda por explorar cerca de 900 a 1000 MW de potência instalada, isto respeitando os requisitos ambientais. Todavia, com a inserção cada vez mais notória das tecnologias eólica e solar (pelo facto do respetivo licenciamento exigir um período relativamente mais curto e ser mais ágil quando comparado com o das centrais

hidroelétricas), juntamente com a crise económica dos últimos 8 anos fizeram com que o desenvolvimento e a construção de centrais hidroelétricas tenda a diminuir significativamente [4].

A tais fatores conjunturais, acresce a imprevisibilidade das receitas esperadas com a venda da energia devida à variabilidade intrínseca do recurso de água o que, aos olhos de promotores privados, constitui mais um obstáculo à construção de aproveitamentos hidroelétricos, nomeadamente daqueles para os quais estão mais vocacionados, ou seja, com potência até 10 MW. No caso de existir uma sequência de anos secos no início da exploração de uma central, as consequências económicas em termos do investimento podem ser muito mais prejudiciais do que se esta mesma sequência ocorrer numa altura em que o projeto já esteja em grande parte amortizado.

No âmbito brevemente referido, entendeu-se ser de interesse efetuar um estudo sobre o efeito que a variabilidade hidrológica pode ter na receita esperada com a venda da energia produzida numa pequena central hidroelétrica, contribuindo-se, de certa forma, para o melhor entendimento científico sobre o assunto.

## **1.2. Objetivos da dissertação**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o risco hidrológico e económico associado à variabilidade natural do recurso hídrico nas pequenas centrais hidroelétricas com exploração a fio-de-água, sendo que se aplicou a um caso de estudo específico, nomeadamente à pequena central hidroelétrica (PCH) do Sordo.

A abordagem para o efeito adotada foi estruturada de acordo com as seguintes linhas gerais:

1. Identificação e caracterização geral do caso de estudo localizado em Portugal Continental a adotar.
2. Seleção de uma estação hidrométrica (EH) relativamente próxima do aproveitamento hidroelétrico de forma a assegurar que os escoamentos anuais são próximos.
3. Seleção dos postos udométricos próximos da central hidroelétrica e da estação hidrométrica e análise da qualidade das séries de precipitação média anual, de forma a garantir que não existem quebras de homogeneidade
4. Determinação da série de caudais médios diários afluentes à central hidroelétrica através de um método de transposição da informação hidrométrica.
5. Com base na série de caudais médios diários antes estabelecida e por aplicação de um programa computacional especificamente desenvolvido para o efeito (MATLAB), simulação da exploração diária da central hidroelétrica de forma a se obterem as energias produzidas (diárias, mensais e anuais) e as correspondentes receitas anuais.
6. Aplicação de critérios de análise económica às anteriores receitas com obtenção dos correspondentes valores acumulados atualizados. Anota-se que para as tornar comparáveis as receitas referentes a diferentes cenários, estas tiveram que tornar-se adimensionais.
7. Aplicação de análise estatística às receitas anuais atualizadas de forma a verificar qual efeito da variabilidade natural nestas receitas.

### 1.3. Organização do documento

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

O presente capítulo, **Capítulo 1 – Introdução**, corresponde a uma breve introdução relativamente à dissertação em si e aos seus principais objetivos, explicitando, ainda, a estruturação do próprio documento.

O **Capítulo 2 – Enquadramento. Conceitos teóricos** sintetiza o enquadramento teórico sobre o setor dos aproveitamentos hidroelétricos em Portugal Continental, o panorama atual do setor electroprodutor, o futuro da hidroeletricidade no mesmo e quais os efeitos e causas da variabilidade hidrológica. São apresentadas as condições necessárias inerentes à realização de um estudo hidrológico e a metodologia para a transposição de informação hidrométrica de uma seção da rede hidrográfica onde tal informação exista para outra seção onde não se encontre disponível. Esta transposição servirá para se estimar os caudais médios diários afluentes à central hidroelétrica, que depois serão utilizados no estudo da sua exploração. Apresenta-se, igualmente, os modelos estatísticos aplicados aos resultados.

No **Capítulo 3 – Caso de estudo** procede-se à caracterização da pequena central hidroelétrica adotada como caso de estudo e à sistematização dos dados de base utilizados na sua análise, incluindo dados de natureza hidrológica.

O **Capítulo 4 – Apresentação dos resultados** apresenta e analisa os resultados obtidos através do algoritmo computacional de simulação da exploração diária da pequena central hidroelétrica e procede ao respetivo tratamento estatístico.

Finalmente no **Capítulo 5 – Conclusões. Desenvolvimentos futuros**, são apresentadas as conclusões e identificadas as limitações do trabalho desenvolvido, apresentando-se sugestões para o seu seguimento.

Página deixada em branco intencionalmente

## **Capítulo 2 – Enquadramento. Conceitos teóricos**

### **2.1. Introdução**

Neste capítulo procede-se a uma breve sistematização sobre procedimentos e modelos aplicados no âmbito da investigação. Contudo, antecedendo tal sistematização, reflete-se sobre a história da exploração energética em Portugal nos últimos 100 anos, nomeadamente recorrendo a centrais hidroelétricas, e o crescimento destas, particularmente a fio-de-água a partir dos finais da década dos anos 80 do século XX. Reflete-se igualmente sobre o panorama atual do sistema electroprodutor nacional e o desenvolvimento futuro para a hidroeletricidade.

No que respeita a procedimentos e modelos aplicados, importa mencionar que o estudo desenvolvido teve por base um caso de estudo, constituído por uma pequena central hidroelétrica com exploração a fio-de-água com o objetivo de analisar o efeito da variabilidade hidrológica nas receitas esperadas no mesmo e, logo, na sua viabilidade económica. O caso de estudo é detalhadamente apresentado no

### **2.2. A hidroeletricidade em Portugal Continental**

#### **2.2.1. O passado**

A variabilidade espacial do escoamento anual pode ser refletida pela orografia do território de Portugal Continental, onde nas terras altas do Noroeste o escoamento chega a ultrapassar em média 2200 mm, e nas zonas planas a Sul do rio Tejo são assinalados valores inferiores a 50 mm anuais. Esta variabilidade, juntamente com a orografia do território (que permitia desníveis topográficos consideráveis) suscitou o interesse na produção de energia elétrica através de aproveitamentos hidroelétricos, quer com exploração de fio-de-água, quer através de albufeiras de regularização, de forma a mitigar a variabilidade espacial e temporal do escoamento [5].

Nos finais do século XIX apareceram mundialmente as primeiras centrais hidroelétricas para a produção de eletricidade. Em Portugal, a utilização da água como força motriz, aconteceu no último decénio do mesmo século, no rio Corgo, afluente do rio Douro, onde foi construída a primeira central hidroelétrica de Portugal, com pouco mais de 120 kW de potência instalada, tendo em vista a produção de energia elétrica, para alimentar pequenas instalações de iluminação pública e industriais.

Todavia, os critérios utilizados para o dimensionamento de uma central hidroelétrica passavam pela capacidade de geração em função do uso, significando que as centrais a serem instaladas eram dimensionadas para um consumo anual previsto, definindo-se qual o caudal a turbinar para a queda útil topográfica disponível.

Na década de 1930, com um crescimento da eletrificação no País, surge a ideia de se aproveitar a energia da água dos rios para a produção de eletricidade, tendo como objetivo a industrialização. Nessa mesma década foram publicados pelo Ministério das Obras Publicas e Comunicações, decretos-leis que permitiam a realização de grandes aproveitamentos hidroelétricos.

Todavia, o crescimento exponencial a nível industrial por parte do País durante o século XX fez com que a resposta das centrais hidroelétricas fosse insuficiente face a esse crescimento. Surgem assim as primeiras centrais térmicas a carvão. Apesar do progressivo aparecimento destas centrais, nunca se deixou de se apostar hidroeletricidade.

Contudo, devido à crise económica que se fez sentir nessa mesma década e à II Guerra Mundial, só a partir de meados da década de 1940 é que o planeamento da implementação das centrais hidroelétricas se começou a concretizar, ainda que em papel.

Em 1947, o Governo constituiu a Companhia Nacional de Eletricidade, à qual é atribuída a “concessão para estabelecimento e exploração de linha de transporte e subestações destinadas à interligação dos sistemas Zêzere e Cávado, entre si e com os sistemas existentes, e ao abastecimento de energia elétrica aos grandes centros de consumo”.

A década de 1950 fica marcada pelo ponto de viragem na evolução do panorama hidroelétrico em Portugal Continental, com a construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos dotados de albufeiras com elevadas capacidades de regularização. Foi durante esta década que se desenvolveu o aproveitamento hidroelétrico das bacias do rio Cávado e Zêzere. Dada a grande dimensão dos novos centros electroprodutores de origem hídrica, a potência instalada aumenta cerca de 610%, apesar de apenas passarem a existir 117 centrais, das 113 já existentes.

Durante este período, Portugal dependeu quase exclusivamente da hidroeletricidade, sendo a energia térmica utilizada apenas em situações pontuais. Em 1960, 80% da potência instalada e 95% da energia elétrica consumida em Portugal tinha origem hidroelétrica. Com efeito, nessa década ou perto dela teve lugar a construção dos grandes aproveitamentos hidroelétricos do Douro internacional (tanto na próxima sistematização, como nas demais sobre o assunto, indicam-se entre parêntesis os anos de início de exploração, quando tal exploração já teve início): Picote (1958), Miranda (1961) e Bemposta (1964).

Aproveitando o rápido crescimento que se verificou nos últimos vinte anos com a construção de aproveitamentos hidroelétricos, e coligando o crescimento do consumo e o choque de preços do petróleo nos anos de 1970, construíram-se os cinco aproveitamentos do troço nacional do Douro: Carrapateiro (1972), Régua (1973), Valeira (1975), Pocinho (1962) e Crestuma (1985).

Outras obras de grande envergadura, designadamente, em termos de reforço de potência, incluindo grupos reversíveis, se sucederam ou ainda se encontram em curso: Picote II (2011), Bemposta II (2011), Alqueva II (2012; grupos reversíveis), Salomonde II (2015, grupo reversível); Venda Nova II (2 grupos reversíveis), Paradela (grupo reversível)[6].

A Figura 2.1 e Figura 2.2 representam a potência instalada e a produção de energia no período compreendido entre 1930 e 1990, respetivamente. Em ambas as figuras é possível identificar um crescimento acentuado, na década de 1980, do uso das centrais térmicas para a produção de energia elétrica [7].

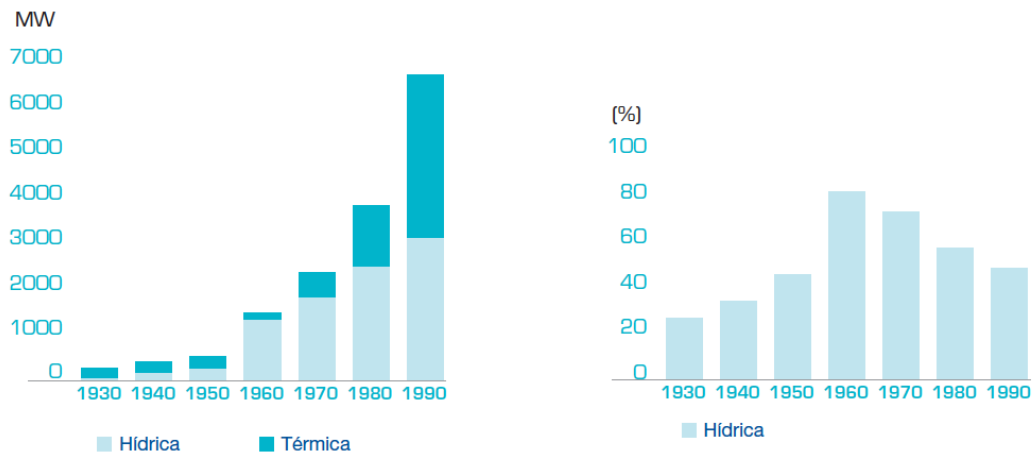


Figura 2.1. Potência instalada em Portugal Continental para um período compreendido de 1930 a 1990. Fonte: [7]

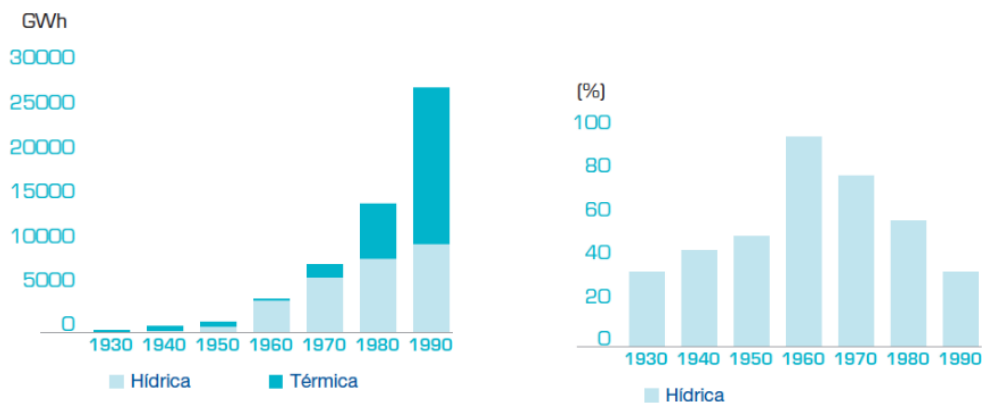


Figura 2.2. Produção de energia elétrica em Portugal Continental. Na década de 80 denota-se um aumento da produção de energia através de centrais termoelétricas. Fonte: [7]

Este aumento das centrais térmicas preocupou a União Europeia, por esta estar dependente energeticamente do exterior, mas também devido às emissões de gases com efeito de estufa que eram emitidas por aquelas centrais. Portugal não ficou para trás e seguiu a linha de pensamento da Europa.

No final da década dos anos 80 do século XX, as pequenas centrais hidroelétricas (PCH) começaram a ter um crescimento em Portugal Continental com a criação legal da possibilidade de produção por parte de promotores privados, que passaram a poder candidatar-se à construção e exploração destes pequenos aproveitamentos hidroelétricos, com potência até 10 MW, nos termos do Decreto Lei 189/88 de 27 de maio.

Até finais do século XX e início do século XXI houve, assim, um crescimento destas centrais. Todavia, as preocupações de natureza ambiental estão bastante presentes na legislação nacional no que toca à construção de aproveitamentos hidroelétricos, sendo que estes são sujeitos a rigorosos processos e estudos de impactos ambientais, muito demorados, acontecendo que muitas das vezes são praticamente incompatíveis com os prazos de construção destes projetos e as necessidades de evolução do parque electroprodutor. Igualmente, a preocupação por parte dos promotores no que toca à variabilidade

interanual e intra-anual do recurso hidrológico tem levado a um consequentemente abrandamento na construção destas centrais hidroelétricas, juntamente com o tempo excessivo do licenciamento das PCH, nos últimos 10 anos deste presente século [4]. A potência atualmente instalada nessa gama de empreendimentos é da ordem dos 420 MW [5].

### 2.2.2. Panorama atual do setor energético em Portugal Continental

O primeiro semestre de 2017 terminou com uma contribuição da produção de eletricidade através de fontes de energias renováveis, FER, de 46,9 % em termos acumulados, o que correspondeu a 12 992 GWh [8]. Em 2016, o *mix* energético renovável representou 71% do total da produção de Portugal Continental no período homólogo, sendo justificado em parte pelo aumento da potência eólica e hídrica instalada a nível nacional, mas também pela disponibilidade destes recursos renováveis acima da média. Isto mostra que até ao final do primeiro semestre de 2016 tinham sido gerados 29 482 GWh em Portugal Continental, sendo que 21 009 GWh tiveram a contribuição das fontes de energias renováveis [9].

Esta redução percentual de renováveis no sistema electroprodutor português fez com que o preço da eletricidade no mercado spot diário do MIBEL subisse para 51,4 €/MWh no primeiro semestre do ano, quando comparado com o período homólogo do ano anterior, em que o preço foi mais baixo (29,69 €/MWh) em resultado da maior contribuição da renovável no sistema, estudo efetuado pela Associação Portuguesa de Energias Renováveis, APREN [8].

No período de análise, e de acordo com a Figura 2.3, a produção de eletricidade através da energia hídrica representou cerca de 17%.

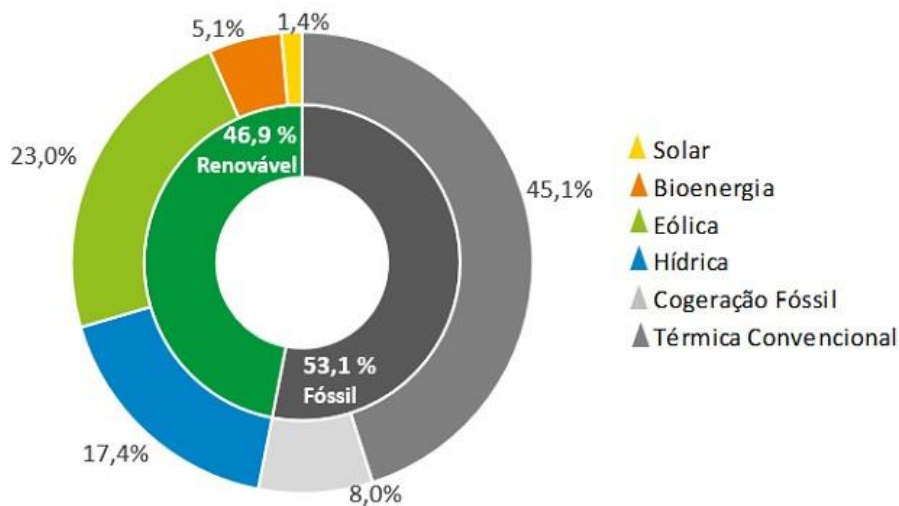


Figura 2.3. Repartição das fontes de energia em Portugal Continental no 1º semestre de 2017. Fonte: [8]

Porém, a produção de eletricidade através da energia hídrica diminuiu este ano, face ao período homólogo do ano anterior. Esta redução deve-se à baixa pluviosidade que se tem verificado desde o início do ano (ano hidrológico seco).

O ano de 2016 fica marcado pela enorme contribuição e pela relevância cada vez maior das fontes de energias renováveis no sistema electroprodutor nacional.

Em 2016 a produção de eletricidade a partir de fontes de energias renováveis, FER, em Portugal continental, representou cerca de 64% do consumo de eletricidade. De acordo com um estudo realizado pela Direção Geral da Energia e Geologia, a produção anual de eletricidade por fontes renováveis foi de 33 347 GWh, dos quais 16 867 GWh tinham origem hidroelétrica (representando cerca de 51% da produção total anual por FER). Face a 2015, a produção anual de eletricidade através de FER teve um crescimento de aproximadamente 24% [10].

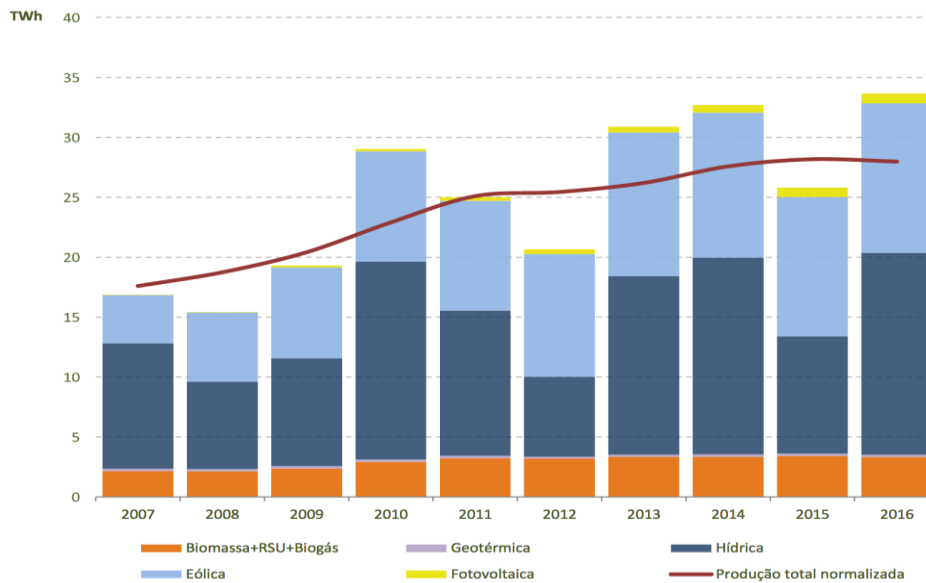


Figura 2.4. Aumento da produção de origem FER face a 2015. Fonte: [10]

No final de 2016, a potência instalada a partir de fontes de energias renováveis no sistema elétrico nacional atingiu os 13 334 MW, dos quais 6 835 MW tiveram origem hidroelétrica (isto é 51% da potência instalada por FER são centrais hidroelétricas). Este aumento da potência instalada resultou, entre outros, da entrada em regime experimental da central hidroelétrica de Frades II, equipada com dois grupos reversíveis de velocidade variável ( $2 \times 390,6$  MW). Nesse mesmo ano, a bacia hidrográfica do rio Douro foi responsável por 55,2% da produção hídrica, sendo que a produção hídrica por albufeiras de regularização foi de 7 226 GWh e através de fio-de-água, de 9 641 GWh [10].

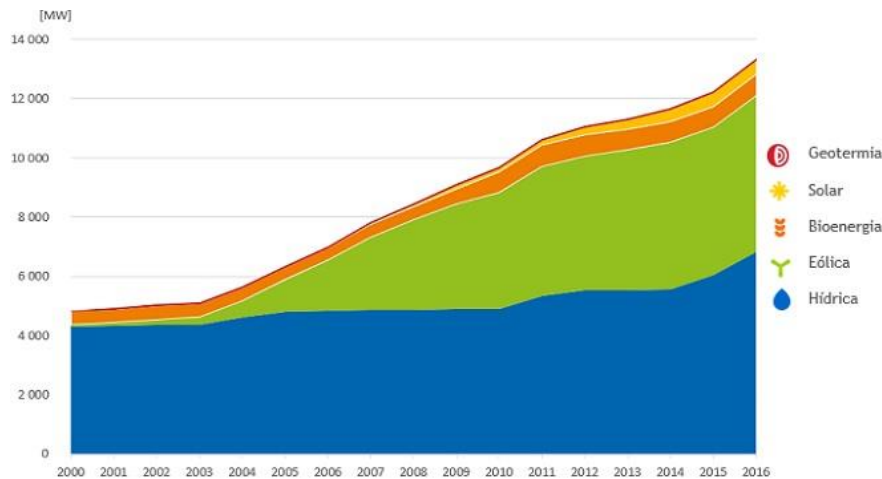


Figura 2.5. Diagrama referente à potência instalada ao longo dos últimos 16 anos. Fonte: [10]

Ainda em 2016, as energias convencionais representaram 42%, sendo os restantes 58% representados pelas fontes de energias renováveis. A energia hídrica foi a que mais se destacou. 30% da eletricidade gerada no ano passado derivou das centrais hidroelétricas, em consequência de o ano hidrológico ter sido bastante húmido, o que originou uma produtividade hídrica de 33 % acima da média, e de um aumento da potência instalada a nível nacional [11].

A repartição das fontes de energias para produção de eletricidade em Portugal Continental encontra-se representadas na Figura 2.6.

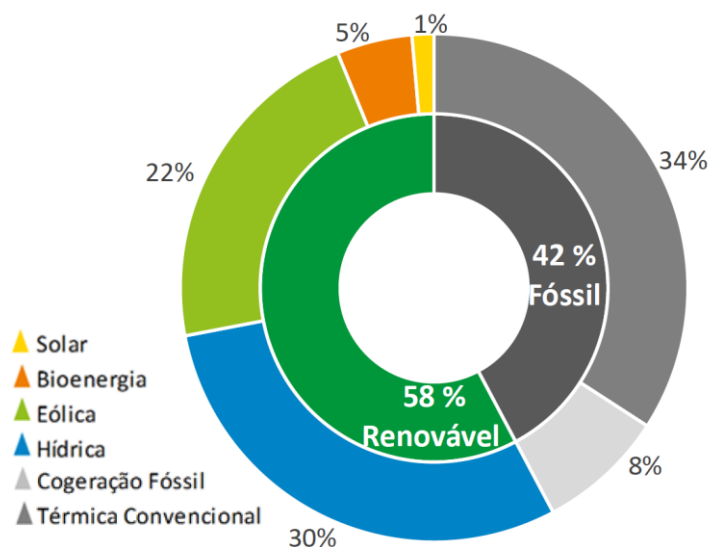


Figura 2.6. Repartição das fontes energéticas na produção de energia em Portugal Continental no ano de 2016. Fonte: [11]

Salienta-se ainda, as 1130 horas (o equivalente a mais de 1,5 meses) em que apenas a eletricidade renovável satisfaria para abastecer o consumo elétrico nacional.

A exportação elétrica teve igualmente um papel fundamental no setor elétrico, pois foi alcançado pela primeira vez um máximo de 7055 GWh, excedendo amplamente as importações, que ficaram pelos 1973 GWh, o que finalizou num balanço exportador de 5082 GWh [11]. A Figura 2.7 ilustra o balanço da produção de eletricidade e das trocas internacionais para Portugal Continental.

Segundo noticiado pelo Diário de Notícias [12], a subida da exportação de eletricidade e a queda das importações foi possível graças ao aumento da produção das barragens e das centrais termoelétricas, mas também da energia eólica - é a terceira maior fonte de energia do país - e fotovoltaica, num ano em que o consumo interno de eletricidade se manteve praticamente inalterado. O excedente não pode ser armazenado, pelo que é vendido ao país vizinho sempre que há carência. Para se conseguir diminuir ainda mais a importação, as centrais hidroelétricas reversíveis devem ser uma aposta no futuro.

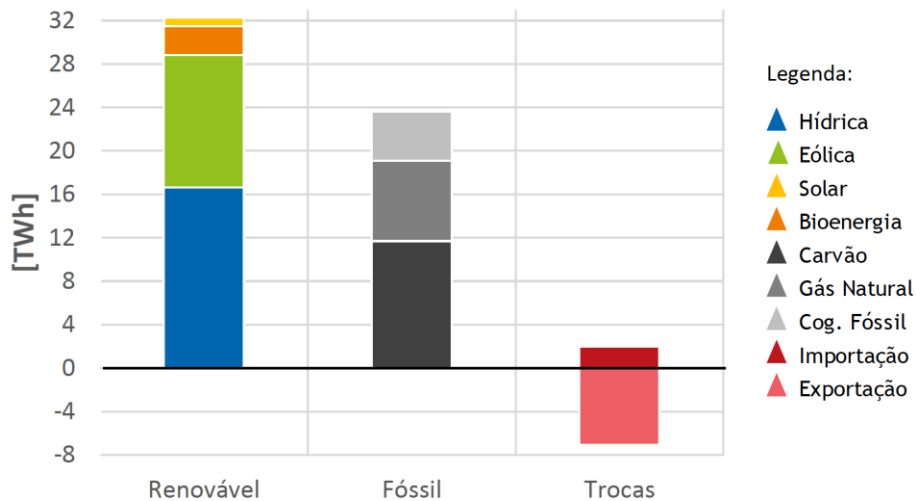


Figura 2.7. Balanço de produção de eletricidade e trocas internacionais de Portugal Continental no ano de 2016.. Fonte: [11]

### 2.2.3. Desenvolvimento futuro para a hidroeletricidade

Tal como foi evidenciado no subcapítulo anterior, a produção de eletricidade através da energia hídrica tem-se manifestado cada vez mais no sistema electroprodutor nacional. De acordo com o PNAER, plano nacional para as energias renováveis, para 2020 Portugal comprometeu-se atingir 31%<sup>a</sup> de fontes de energias renováveis no consumo total de energia, o que significa que a componente renovável terá de representar cerca de 60% na eletricidade.

Atualmente a componente renovável representa cerca de 52%, o que é um ganho significativo relativamente aos 31% de 2000, ou aos 21% de 1999. Significa isto que possivelmente a meta para 2020 será facilmente alcançável. Já para 2030, as metas a serem alcançadas serão de 40% de fontes renováveis no consumo total de energia representando 80% na eletricidade. A Figura 2.8 apresenta a contribuição, por setor, das FER, e as metas a serem alcançadas [4].

Contudo, a principal questão no cumprimento destes objetivos é o de ajustar o diagrama de produção ao de consumo. António Sá da Costa explica que “a principal maneira de fazer este ajuste vai ser através dos aproveitamentos hidroelétricos, sendo que este ajuste pode ser equacionado a duas escalas de tempo, a diária e a anual”. Para se melhor entender, explica-se como será feito o ajuste diário.

<sup>a</sup> De referir que as percentagens são normalizadas de acordo com critérios definidos na Diretiva das Renováveis, em que se usa uma média móvel da produção hídrica dos últimos 15 anos e da produção eólica nos últimos 4 anos.

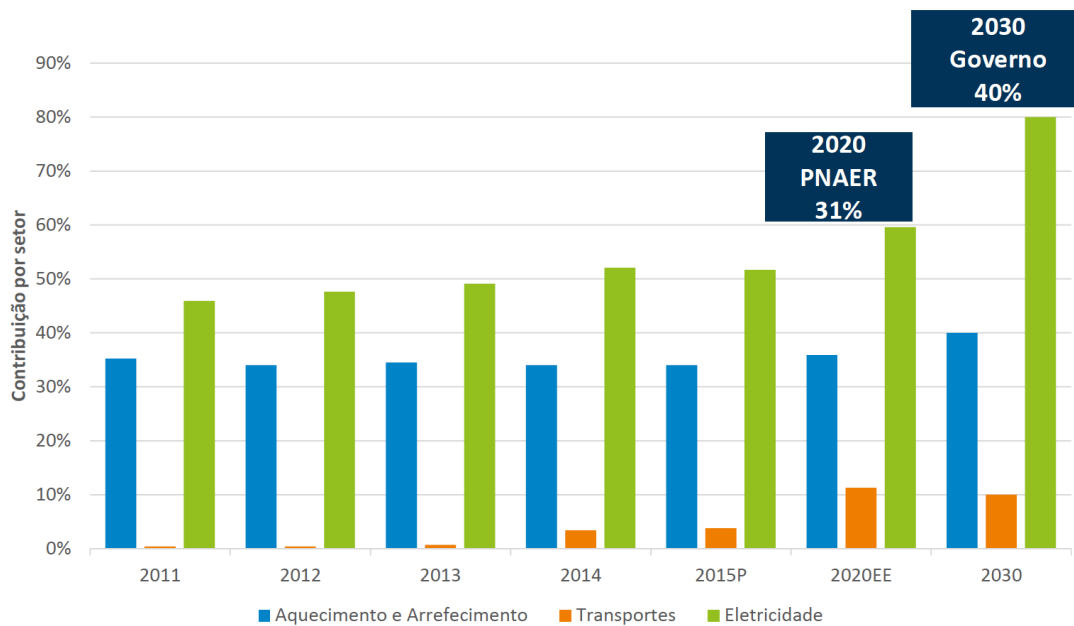


Figura 2.8. Contribuição das FER no sistema electroprodutor nacional e as metas a serem alcançadas para 2020 e 2030. Fonte:[13]

Num dia em que a produção de eletricidade através da energia eólica e hídrica a fio-de-água exceder o consumo à noite, poderá utilizar-se esse excesso de produção para bombear água em centrais reversíveis e paralelamente reter a água que se escoar naturalmente nas albufeiras até as encherem. Depois, durante as horas diurnas, naturalmente o consumo de eletricidade aumenta e se outras FER não conseguirem satisfazer este consumo, como por exemplo, as eólicas, porque o vento abrandou, ou as solares, porque não há radiação solar suficiente, pode-se usar a energia acumulada nessas albufeiras para produzir a eletricidade que falta para satisfazer o consumo. Nesta situação, estima-se que a quantidade de energia a armazenar ronde os 100 a 200 GWh [13].

No caso de se estar perante um ajuste ao longo do ano, ou seja, entre o semestre seco e o semestre húmido o procedimento é idêntico, sendo que o armazenamento será de alguns meses e não horas, como no caso do ajuste diário. Igualmente, as quantidades de energia a armazenar são maiores, sendo que, de acordo com Sá da Costa, num ano médio podem rondar 1,7 TWh [13].

Visto que o cumprimento das metas para 2020 será alcançado, é importante começar-se a olhar para as metas a atingir em 2030, ainda que sejam muito redutoras. Contudo, para o cumprimento destas metas é necessário haver um reforço na potência instalada quer para a produção eólica quer para a produção hidroelétrica. Se tal acontecer, e visto que as FER representarem 80% da eletricidade consumida, poderá criar-se o cenário de que em 2040 será possível estas representarem 100% da eletricidade consumida em Portugal Continental, sendo que isso não significa que em todos os segundos do ano apenas as FER abastecerão o País. Significa apenas que a eletricidade proveniente destas fontes excederá o consumo, podendo haver alturas em que este excesso é exportado e noutras a falta é importada [13].

A Figura 2.9 ilustra o cenário que se espera alcançar com a otimização do setor elétrico. Neste cenário encontra-se a otimização do diagrama de consumo e produção através das centrais hidroelétricas, referido acima, mas também a utilização de baterias para o armazenamento de eletricidade, onde se espera que a sua utilização sirva para cobrir os ajustes diários e anuais. Os gráficos à esquerda em cada

mês representam um cenário normal, ou seja, sem otimização. A simbologia ‘A’ representa armazenamento.

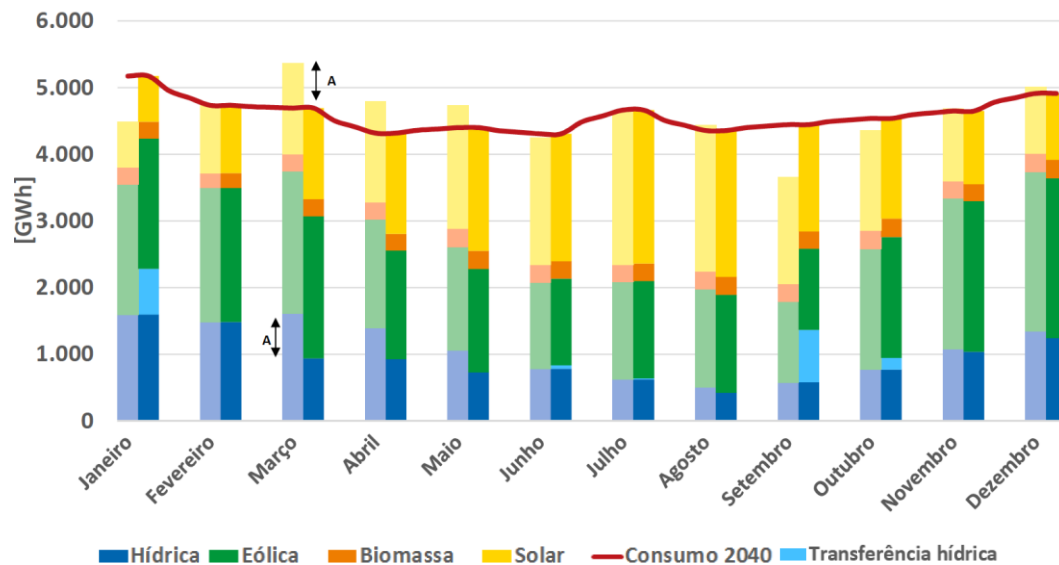


Figura 2.9. Perspetiva do setor elétrico para Portugal Continental em 2040. Fonte: [13]

Sendo que as centrais hidroelétricas terão um papel relevante no setor electroprodutor nacional nos decénios seguintes, é necessário ter em conta as grandes e pequenas centrais hidroelétricas que podem ainda ser construídas, pois ainda existe um potencial de largas centenas de MW, ou na reconversão de algumas das PCH's já existentes, e dotá-las de capacidade de armazenamento e de reversibilidade [4].

### 2.3. Variabilidade hidrológica e riscos associados

Com o aumento da população mundial, a oferta de água tem sido cada vez mais escassa, mesmo sem as tão esperadas alterações climáticas. Em muitas zonas do planeta, estas alterações climáticas irão criar um panorama mais assustador, produzindo cada vez mais cenários de seca e cheias extremas [14].

As investigações sobre as alterações climáticas realizadas por diversos cientistas comprovam cada vez mais o chamado “aquecimento global”. O aquecimento global é descrito como um aquecimento contínuo do planeta em cerca de 2°C, sendo que em algumas áreas do planeta esse valor pode ser superior ou inferior. Já as alterações do fluxo de água entre o planeta e a atmosfera não se esperam que sejam uniformes no tempo, mas sim muito parecidas com o atual (precipitação e evaporação) [15]. Isto é, as áreas que são húmidas vão ficar cada vez mais húmidas, e as áreas que são secas vão ficar cada vez mais secas, enquanto algumas regiões intermediárias em latitudes um pouco maiores do que as zonas secas subtropicais atuais tornar-se-ão cada vez mais secas. Este problema conduzirá a outro problema ainda maior. As zonas que têm hoje em dia problemas de abastecimento de água continuarão a piorar, e as zonas mais húmidas vão ter cada vez mais cheias. Também em períodos longos, as mudanças entre condições húmidas e condições secas podem ocorrer dentro de um ano e podem persistir por vários anos [14].

Em Portugal Continental, o regime hidrológico é caracterizado por uma elevada variabilidade temporal. Essa variabilidade manifesta-se maioritariamente na acentuada irregularidade exibida pelas afluências naturais nos cursos de água, tanto ao longo do ano – com significativa maior disponibilidade hídrica no semestre húmido, de Outubro a Março –, como entre anos [16].

Contudo, não é só a variabilidade temporal que está patente em Portugal Continental. A variabilidade espacial também tem sido um dos maiores desafios da atualidade. As regiões mais secas, como o Alentejo e o Sul de Portugal, onde o escoamento médio anual muitas vezes não chega a ultrapassar os 50 mm, continuarão a ser cada vez mais secas. Estas regiões são motivo de grande preocupação por parte da comunidade científica nacional, isto porque os recursos hídricos nestas áreas são cada vez mais escassos. O significativo aumento do turismo em Portugal, especialmente nestas zonas, na altura do verão, onde a população triplica, torna-as cada vez mais vulneráveis do ponto de vista hidrológico.

Ao contrário do Sul, o norte de Portugal é uma região bastante mais húmida. Tal como foi dito anteriormente, esta situação poderá vir a intensificar-se, criando situações de mais e maiores cheias e podendo até levar a uma migração das populações perto de zonas costeiras.

Uma vez que a utilização de água não apresenta uma variabilidade temporal, é necessário intervir no sentido da regularização das afluências naturais, de modo a garantir a satisfação da utilização ao longo do tempo [16].

Num cenário mais extremo, e sendo que Portugal tem um clima mediterrâneo, o aumento do risco de inundação, a destruição de culturas na agricultura e a diminuição da qualidade da água, juntamente com o aumento do nível do mar, têm o potencial de forçar a migração em massa e causar instabilidade social, econômica e política.

As centrais hidroelétricas, designadamente quando baseadas em albufeiras de regularização, têm assumido nos últimos decénios um papel importante quanto à regularização da variabilidade espacial e temporal, garantindo o armazenamento de água nos anos mais húmidos ou na estação mais húmida de modo a disponibilizar este recurso para os anos mais secos ou para a estação mais seca.

Contudo, e indo ao encontro ao tema da presente dissertação esta variabilidade pode trazer impactos negativos às centrais hidroelétricas. Estas centrais são dimensionadas para turbinar um caudal máximo, sendo que ao atingir esse nível máximo existirão descargas. Estas descargas poderão originar cheias em zonas próximas das centrais, levando a que muitas vezes exista, por exemplo, a perda na produção, na agricultura, por parte dos produtores. Importa, contudo, atender a que por regra as cheias assim criadas são próximas das que naturalmente existiriam, a menos que seja necessário proceder ao esvaziamento forçado das albufeiras de modo a criar capacidade de encaixe adicional face, por exemplo, a uma previsão de agravamento das cheias naturais.

Por outro lado, se persistir um período de seca poderá ter um impacto negativo na vida aquática que subsiste nas albufeiras destas centrais devido fundamentalmente à degradação da sua qualidade.

## **2.4. Estudos hidrológicos**

### **2.4.1. Introdução**

Com o objetivo de caracterizar o regime hidrológico e posteriormente simular a exploração diária da pequena central hidroelétrica adotada como caso de estudo e, assim, avaliar a suscetibilidade da

respetiva produção de energia à variabilidade hidrológica, é necessário dispor de uma série de caudais aí disponíveis em regime natural. Esta série pode ter diferentes escalas temporais (diária, mensal ou anual), sendo que a simulação da exploração do caso de estudo objeto da presente tese foi efetuada a nível diário.

Por norma as intervenções na rede fluvial são feitas em secções que não dispõem de registos. Para a obtenção de uma série de caudais numa secção não monitorizada daquela rede é necessário recorrer à informação hidrométrica disponível, designadamente, referente a uma ou mais estações hidrométricas e proceder à sua transposição para a secção objeto de intervenção. No caso da aplicação efetuada, tal secção refere-se à origem de água (açude) da pequena central hidroelétrica que constitui o caso de estudo.

Sistematizam-se, seguidamente e em linhas muito gerais, as etapas do estudo inerentes à obtenção de uma série de caudais médios diários afluentes ao caso de estudo e ao seu subsequente tratamento.

- a) Identificação de uma estação hidrométrica dispondo de uma série longa de registos de caudais médios diários que, mediante aplicação de um modelo de regionalização adequado, possam ser transpostos para o aproveitamento.
- b) Para essa mesma estação hidrométrica e uma vez identificados os postos udométricos nas suas vizinhanças, estabelecimento, por análise de regressão linear simples, de uma relação entre a precipitação e o escoamento anuais, posteriormente aplicável à bacia hidrográfica do caso de estudo.
- c) Relativamente a esta última bacia, tendo por base registos em postos udométricos localizados na sua vizinhança, estimativa da precipitação anual média, com conseqüente obtenção da altura do escoamento anual médio, por utilização da equação de regressão antes estabelecida.
- d) Comparação do resultado assim obtido com o decorrente de outros métodos visando também a estimativa da altura do escoamento anual médio em bacias hidrográficas não monitorizadas.
- e) Com base nos resultados precedentes, estimativa, por transposição, de uma série de caudais médios diários afluentes ao caso de estudo e sua utilização na simulação da exploração diária da central, com conseqüente avaliação da energia produzida dia-a-dia e, por acumulação, anualmente.
- f) Por fim, aplicação de critérios de análise estatística às receitas anuais decorrentes das anteriores energias anuais tendo em vista concluir sobre o efeito da variabilidade hidrológica sobre a mais-valia económica do caso de estudo.

Importa anotar que previamente à utilização de registos de precipitação num dado posto udométrico se procedeu sempre a uma análise sumária da sua qualidade, em termos de homogeneidade, por recurso a diferentes modelos.

Nos subcapítulos que se seguem apresentam-se os procedimentos e modelos fundamentais utilizados na abordagem antes sistematizada, designadamente no que respeita a estudos de índole hidrológica. Os critérios relativos à análise económica e ao tratamento estatístico de receitas são apresentados em capítulo próprio.

## 2.4.2. Análise da qualidade das séries de precipitação

Como antes mencionado, antecedendo a utilização dos registos de precipitações, analisou-se a sua qualidade tendo por base os modelos objeto dos itens que se seguem.

Importa anotar que a anterior análise da qualidade foi desenvolvida apenas a nível anual o que corresponde a admitir que uma vez que uma série exiba boa qualidade a esse nível, tal qualidade está também assegurada a outros níveis temporais (por exemplo, mensal).

Em Portugal Continental as precipitações anuais referem-se ao ano hidrológico, com início no dia 1 de outubro de cada ano e fim no dia 31 de setembro do ano seguinte.

Os registos de precipitação disponibilizados pela rede nacional de postos udométricos possibilitam, geralmente, uma descrição detalhada da variabilidade espacial da precipitação, visto que tais postos são em número muito elevado.

### 2.4.2.1. Teste de valores simplesmente acumulados

O teste de valores simplesmente acumulados serve para determinar se uma certa série é homogénea e consistente. Uma série é homogénea se, ao longo do período de observação, não existirem alterações que condicionem o fenómeno em causa. No pressuposto de que, à escala do tempo abrangido pela amostra, não ocorreram mudanças climáticas, as quebras de homogeneidade, a registarem-se, devem-se a alterações em fatores físicos, tais como os associados à deflorestação ou ainda os decorrentes da construção de barragens (Quintela, 1996)<sup>b</sup>. Uma série é consistente quando, ao longo do período de observação, não existir alteração do erro sistemático de medição do fenómeno. Constituem exemplos de quebra de consistência a mudança de local do aparelho de medição da precipitação (udómetro) ou a criação de obstáculos junto ao mesmo ou o incorreto nivelamento na mudança de sistema de registos de alturas ou níveis hidrométricos (Quintela, 1996)<sup>b</sup>.

O teste de valores simplesmente acumulados avalia a qualidade dos registos através da sua representação gráfica. Concretamente, o eixo das abcissas desse gráfico refere-se a anos e o eixo das ordenadas a precipitações anuais acumuladas. Para a aplicação do teste é necessário, portanto, dispor de registos contínuos de precipitação, sendo que foi considerado que as séries teriam de se referir a um período mínimo de 30 anos para que pudessem caracterizar o regime da precipitação anual [17].

Considera-se que se está perante uma série homogénea e consistente se os valores acumulados de precipitação se alinharem em torno do segmento de reta obtido unindo o primeiro e último pontos representativos dos valores acumulados de precipitação.

Todavia, existem outros procedimentos, na maioria de natureza estatística, que avaliam a qualidade dos registos das séries, bem como a consistência dos dados dos mesmos. Dois desses procedimentos de índole estatística estão relacionados com as médias dos dados de precipitação.

---

<sup>b</sup> Bibliografia consultada indiretamente. Fonte: [23]

### 2.4.2.2. Médias móveis. Teste de Student

O presente subcapítulo refere-se à deteção, por aplicações de procedimentos de índole estatística e não por mera observação visual, como no caso do teste de valores simplesmente acumulados, de alterações no comportamento das séries temporais de precipitação. Menciona-se, assim, a técnica por médias móveis e a aplicação do teste paramétrico de Student, tendo sido ambos adaptados de Portela e Quintela, 2001 [20] e Portela et al., 2011[19].

A variabilidade que muitas séries temporais de precipitação apresentam costuma ocultar tendências e padrões periódicos. Entende-se, por tendência, a existência de uma variação monótona na série, num determinado sentido, que se verifica de forma genérica e persistente no tempo [21].

Esta situação tem frequentemente levado a que se utilize a técnica clássica das médias móveis aritméticas, inicialmente descrita por Kenney e Keeping em 1962, tanto para atenuar as flutuações espúrias de curto período numa dada série, como para evidenciar as tendências ou os ciclos longos existentes em tal série. Todos os valores das séries são ponderados igualmente [19].

A técnica das médias móveis aritméticas tem sido bastante aplicada no seio da comunidade científica no estudo das séries temporais de precipitação. Esta técnica é citada por Portela e Quintela, 2001 e Portela et al., 2011, que referem que “o estudo da média móvel se baseia na determinação das médias dos correspondentes registos de precipitação em grupos de  $n$  anos consecutivos, com início em cada um dos anos hidrológicos do período de registos”.

Assim, seja  $n$  o número de anos de cada um dos sucessivos grupos adotados na análise por médias móveis para uma série de precipitação anual com dimensão  $N$ . A média móvel é formada pelas médias dos sucessivos  $N - n + 1$  subconjuntos nos quais a série original é repartida ( $N > n$ ).

O primeiro grupo analisado decorre entre o ano 1 e o ano  $1 + (n - 1) = n$  e o grupo de ordem  $i$  inicia-se no ano  $i$  e termina no ano  $i + (n - 1)$ .

Na aplicação da análise da média móvel nas séries temporais de precipitação, a precipitação média do grupo de ordem  $i$ , é calculada por:

$$\bar{P}_i = \frac{\sum_{k=1}^{i+(n-1)} P_k}{n} \quad (2.1)$$

É necessário que a dimensão  $n$  seja suficientemente grande para assegurar que os sucessivos grupos de  $n$  anos apresentem condições hidrológicas aproximadamente médias. Por outro lado, se a dimensão  $n$  for demasiado grande, o número de grupos em que é feito o cálculo das médias móveis reduz-se.

Para garantir que não há quebras de homogeneidade, as médias móveis dos registos de precipitação anual num dado posto udométrico devem apresentar uma flutuação em torno da média relativa ao período global. Se tal não se verificar, e houver a tendência de diminuição ou aumento gradual das médias móveis, significará existe uma quebra de homogeneidade, eventualmente atribuível aos efeitos da mudança climática.

Para determinar se as quebras de homogeneidade eventualmente detetadas são estatisticamente significativas utiliza-se a comparação de médias considerando-se existir quebras de homogeneidade se tais médias são significativamente diferentes entre si. Esta comparação é conseguida através do teste T-

Student, descrito pela primeira vez por W.S Gosset (1908) e publicado sob o pseudónimo de “Student”. Este tipo de teste baseia-se em conceitos teóricos que necessitam de condições específicas acerca da população a ser testada, ou acerca de parâmetros através dos quais é extraída informação da amostra.

Como foi referido anteriormente, a metodologia do teste paramétrico de Student é adaptada de Portela e Quintela, 2001 e Portela et al., 2011.

Seja  $N$  a dimensão da série de precipitação referente ao ano,  $p_i$  o seu elemento genérico e  $\bar{P}$  a média da série.

Considere-se a anterior série dividida em duas subséries consecutivas, a primeira com dimensão  $N_1$ , e a segunda, com dimensão  $N_2$  (sendo  $N_2 = N - N_1$ ) e correspondente aos anos  $N_1 + 1$  a  $N$ . Às anteriores subséries atribuíram-se as designações de primeira subsérie e de última subsérie, respetivamente.

Sejam  $\bar{X}_1$  e  $\bar{X}_2$  as médias de duas amostras de uma mesma variável aleatória, uma com dimensão  $N_1$  e outra com dimensão  $N_2$ :

$$\bar{X}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} x_i}{N_1} \quad (2.2)$$

$$\bar{X}_2 = \frac{\sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} x_i}{N_2} \quad (2.3)$$

A pesquisa de quebras de homogeneidade nas médias utiliza a comparação, em termos estatísticos, das médias  $\bar{X}_1$  e  $\bar{X}_2$ , considerando-se ocorrer quebra sempre que estas médias sejam significativamente diferentes entre si. Para testar a significância da diferença entre as duas médias utilizou-se o teste paramétrico de Student. A estatística do teste de Student é dada por:

$$t_s = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{s \sqrt{1/N_1 + 1/N_2}} \quad (2.4)$$

em que  $s$  é a estimativa do desvio-padrão da população, calculada a partir do desvio-padrão das amostras com dimensão  $N_1$  e  $N_2$ , respetivamente,  $s_1$  e  $s_2$ , por meio de:

$$s = \sqrt{\frac{(N_1-1)s_1^2 + (N_2-1)s_2^2}{N_1 + N_2 - 2}} \quad (2.5)$$

em que:

$$s_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{X}_1)^2}{N_1 - 1} \quad (2.6)$$

$$s_2 = \frac{\sum (x_i - \bar{X}_2)^2}{N_2 - 1} \quad (2.7)$$

O número de graus de liberdade a considerar para a distribuição de Student é  $N_1 + N_2 - 2$ . O formato da distribuição t de Student depende do número de graus de liberdade. Quanto maior o número de graus de liberdade, mais "concentrada" é a distribuição. Para valores muito grandes de graus de liberdade, a distribuição t de Student aproxima-se da distribuição normal. Para o nível de confiança de  $\eta = 1 - \alpha$ , em que  $\alpha$  é o nível de significância, a hipótese de as médias  $\bar{X}_1$  e  $\bar{X}_2$  não serem significativamente diferentes é rejeitada desde que se verifique a condição:

$$|t_s| > t_{(1-\alpha/2)} \quad (2.8)$$

em que  $t_{(1-\alpha/2)}$  é o quantil da distribuição de Student. A hipótese alternativa é  $|t_s| \leq t_{(1-\alpha/2)}$ .

Como é demonstrado pela equação 2.8, considerou-se que a região de rejeição era bilateral. O nível de significância adotado na aplicação do teste de Student foi de  $\alpha = 5\%$ , correspondendo-lhe uma probabilidade de não excedência de  $1 - \alpha/2 = 0,975$  no pressuposto de testes bilaterais.

### 2.4.3. Avaliação da precipitação em área

Tendo por base os registos anuais em postos inseridos nas proximidades das bacias hidrográficas do caso de estudo e da estação hidrométrica, a partir da qual se procedeu à transposição de caudais médios diários, foi necessário avaliar as precipitações ponderadas naquelas bacias. Para isso aplica-se o método dos polígonos de Thiessen.

Neste método os postos udométricos são unidos por segmentos de reta, de modo a formarem triângulos os mais equiláteros possíveis, contínuos e não sobrepostos. As bissetrizes perpendiculares aos triângulos são seguidamente desenhadas e utilizadas para identificar o lugar geométrico do ponto do espaço mais perto de cada posto do que de outro posto qualquer. Obtêm-se, assim, os designados polígonos de Thiessen. Em cada polígono a precipitação é considerada uniforme e igual à medida no posto a que esse polígono respeita. A área desse polígono pertencente à bacia hidrográfica objeto da determinação da precipitação representa a área de influência do posto,  $A_i$ . Quando expressa em fração da área total da bacia hidrográfica,  $A_{TOTAL}$ , designa-se por peso do posto –  $A_i/A_{TOTAL}$ . A figura seguinte explicita o método dos polígonos de Thiessen.

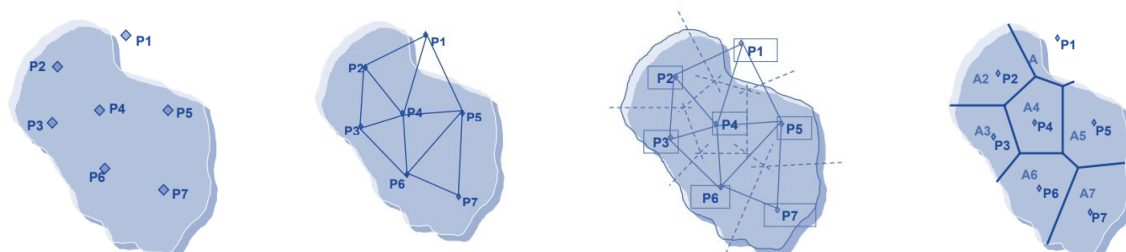


Figura 2. 10. Exemplo do método dos polígonos de Thiessen.

A precipitação (mm) ponderada para a área daquela bacia pode ser calculada por aplicação da seguinte equação:

$$P_m = \frac{1}{A_{TOTAL}} \times (\sum_{i=1}^N P_i \times A_i) \quad (2.9)$$

onde  $P_i$  representa a precipitação em cada posto udométrico,  $A_i$  a área de influência desse posto e  $A_{TOTAL}$  é a área total da bacia hidrográfica.

#### 2.4.4. Equação de regressão entre o escoamento anual e a precipitação anual

Para estimar o escoamento anual médio na bacia hidrográfica do caso de estudo aplicou-se à precipitação anual média na mesma a equação de regressão entre a precipitação anual e o escoamento anual estabelecida para a bacia hidrográfica da estação hidrométrica a partir da qual posteriormente se procedeu à transposição de caudais médios diários.

Tendo por base os registos de caudais médios diários em cada ano hidrológico na estação hidrométrica o valor do correspondente escoamento anual (mm) é dado por:

$$H_{EH} = \frac{\sum_{i=1}^{365} Q_{EH}^i \times 24 \times 3,6}{A_{EH}} \quad (2.10)$$

sendo que  $Q_{EH}^i$  ( $m^3/s$ ) representa os caudais médios diários durante o ano  $i$  e  $A_{EH}$  ( $km^2$ ) a área da bacia hidrográfica da estação hidrométrica.

O anterior procedimento é repetido para um conjunto de  $N$  anos dispondo simultaneamente de precipitações anuais e de escoamento anuais. Com base nesses valores é estabelecida a equação de regressão linear simples que exprime a dependência entre as duas variáveis anuais em presença, ou seja, entre o escoamento anual,  $H$ , e a precipitação anual,  $P$ :

$$H = \alpha P - \beta \quad (2.11)$$

$\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros de regressão, onde  $\alpha$  é o declive da reta e  $\beta$  a ordenada na origem.

Calculados os parâmetros da equação de regressão, para estimar o escoamento anual médio na bacia hidrográfica do pequeno aproveitamento hidroelétrico basta aplicar tal equação à precipitação anual média antes estimada para a mesma bacia, mediante aplicação do método dos polígonos de Thiessen a postos udométricos inseridos nas suas proximidades.

O recurso a equações de regressão linear do escoamento anual sobre a precipitação anual é visto como

um método eficiente e rigoroso sendo recorrentemente aplicado para determinar o escoamento em bacias hidrográficas expetavelmente com regimes hidrológicos próximos dos ocorrentes nas bacias hidrográficas das estações hidrométricas utilizadas para estimar os parâmetros da regressão.

Estimado o escoamento anual médio na bacia hidrográfica do caso de estudo é possível proceder-se à transposição dos caudais médios diários referentes à estação hidrométrica para aquela bacia hidrográfica, por aplicação do procedimento objeto do item que se segue.

## 2.4.5. Outros modelos de avaliação do escoamento anual médio

Não obstante o recurso a equações de regressão da precipitação anual sobre o escoamento anual ser considerado o modelo mais correto para avaliar o escoamento anual médio em bacias hidrográficas não monitorizadas, existem outros modelos para o efeito aplicáveis. Tais modelos são referidos seguidamente uma vez que foram utilizados para averiguar a plausibilidade da estimativa decorrente da equação de regressão para a bacia hidrográfica do caso de estudo.

O procedimento passa por calcular o escoamento anual médio em bacias não monitorizadas através da média aritmética de três diferentes modelos:

1. Mapa de isolinhas do escoamento anual médio em Portugal Continental
2. Fórmula de Turc
3. Método de Quintela

O método do mapa de isolinhas é o mais direto dos três métodos mencionados, visto ser apenas necessário dispor da carta de isolinhas do escoamento anual médio de Portugal Continental e consiste na aproximação da localização da central hidroelétrica no mapa de isolinhas.

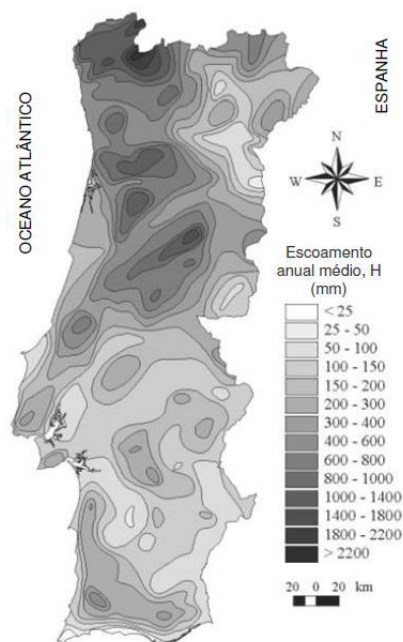


Figura 2.11. Carta de isolinhas do escoamento anual médio em Portugal Continental Fonte: [22]

Quando não existe qualquer informação relativa ao escoamento, é possível recorrer-se a fórmulas, necessariamente aproximadas, contudo incapazes de serem verificadas, como a fórmula de Turc (1954). Turc relaciona a média anual real de evapotranspiração (mm) a partir da seguinte expressão:

$$\left(\frac{\bar{P}}{L}\right)^2 \geq 0.1 \Rightarrow \bar{E} = \frac{\bar{P}}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{\bar{P}}{L}\right)^2}} \quad (2.12)$$

Para calcular L, poder evaporante da atmosfera, em mm a expressão é:

$$L = 300 + 25\bar{T} + 0.05\bar{T}^3 \quad (2.13)$$

Através da seguinte fórmula é possível calcular o escoamento anual médio.

$$\bar{P} = \bar{H} + \bar{E} \quad (2.14)$$

Sendo que  $\bar{P}$  diz respeito à média da precipitação média anual (mm) na bacia hidrográfica,  $\bar{E}$  é a evapotranspiração real média anual (mm),  $\bar{H}$  é o escoamento anual médio (mm) e por fim  $\bar{T}$  refere-se à temperatura média anual do ar (°C).

O valor da temperatura média anual do ar é retirado através de uma cuidada observação do mapa de ‘Temperatura Atlas Digital do Ambiente’, que foi disponibilizado pelo site SNIRH. É feita uma aproximação da localização da central hidroelétrica no mapa da temperatura.

Por último, o método de Quintela baseia-se em equações lineares válidas em Portugal Continental entre o escoamento anual e a precipitação anual e que têm como parâmetros a precipitação anual, a temperatura anual média do ar e o grupo de solos.

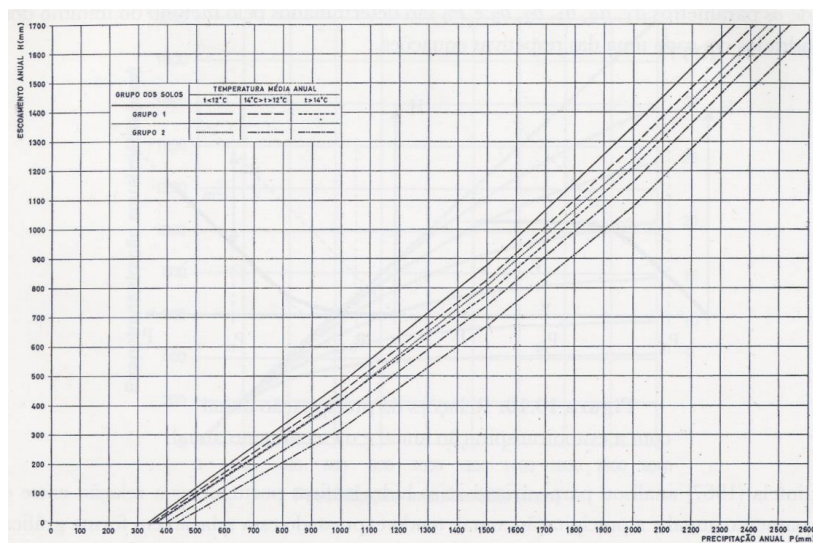


Figura 2.12. Relações médias em Portugal entre o escoamento anual e a precipitação anual Fonte: [22]

## 2.4.6. Modelo de regionalização de escoamentos

A altura do escoamento anual médio numa bacia hidrográfica em regime natural de Portugal Continental pode fornecer indicação sobre a variabilidade temporal do escoamento. Significa que, quanto menor a altura do escoamento, maior será a variabilidade relativa ao escoamento, quer inter-anual, quer intra-anual. Isto faz com que o escoamento possa ser utilizado como parâmetro fundamental no modelo de regionalização de escoamentos anuais, mensais ou diários em regime natural.

Entende-se por regionalização de escoamentos, a transposição de séries adimensionais de escoamentos num determinado período de tempo numa secção de um curso de água ( $H_1$ ) para uma outra secção de um curso de água não monitorizada ou com escassa informação hidrométrica para a qual tenha sido obtida uma estimativa através de diversos métodos do escoamento anual médio ( $H_2$ ) implicando assim  $H_1 \approx H_2$ .

As equações que são utilizadas no pressuposto de bacias hidrográficas em regime natural, são:

$$H^2_{i,j} = H^1_{i,j} \frac{H_2}{H_1} \quad (2.15)$$

$$Q^2_{i,j} = Q^1_{i,j} \frac{V_2}{V_1} \quad (2.16)$$

$$Q^2_{i,j} = Q^1_{i,j} \frac{Q_{mod_2}}{Q_{mod_1}} \quad (2.17)$$

$$V^2_{i,j} = V^1_{i,j} \frac{V_2}{V_1} \quad (2.18)$$

$$V^2_{i,j} = V^1_{i,j} \frac{Q_{mod_2}}{Q_{mod_1}} \quad (2.19)$$

Os índices 1 e 2 identificam, respetivamente, a bacia hidrográfica com registos hidrométricos e, consequentemente, a altura do escoamento anual médio  $H_1$ , e a bacia hidrográfica sem registos hidrométricos, onde se obtém a altura do escoamento anual médio  $H_2$ , através de estimativas. As restantes variáveis têm os seguintes significados com k igual 1 ou 2:

$H^k_{i,j}$  = altura do escoamento no mês j do ano i na secção k (mm)

$Q^k_{i,j}$  = caudal médio no mês j do ano i na secção k ( $m^3/s$ )

$V^k_{i,j}$  = volume afluente no mês j do ano i na secção k ( $m^3$ )

$V_k$  = volume anual médio afluente à secção ( $m^3$ )

$Q_{mod_k}$  = caudal modular da secção k ( $m^3/s$ )

As equações (2.15) a (2.19) caracterizam o modelo de regionalização de escoamentos para Portugal Continental, tendo como parâmetro fundamental a altura do escoamento anual médio, o volume afluente ou o caudal médio diário afluente.

De forma a garantir que a informação hidrométrica objeto de transposição é representativa do regime de escoamento na seção para a qual foi transposta é condição fundamental assegurar que as alturas do escoamento anual médio nas bacias hidrográficas da estação hidrométrica e da secção não monitorizada são próximas. Dado que na seção não monitorizada não dispõe de registos, uma maneira eficaz de assegurar a proximidade daquelas alturas é selecionar uma estação hidrométrica dominando uma bacia hidrográfica localizada tão próxima quanto possível da bacia hidrográfica da secção sem dados hidrométricos.

Considerando a área da bacia hidrográfica da PCH ( $\text{km}^2$ ) o volume ( $\text{hm}^3$ ) da bacia hidrográfica da central hidroelétrica é dado por:

$$\bar{V}_{\text{PCH}} = \frac{H_{\text{PCH}} \times A_{\text{PCH}}}{1000} \quad (2.20)$$

A transposição do escoamento anual médio (mm) para a central hidroelétrica da série de caudais médios diários (mm) pode ser obtida através da seguinte relação:

$$Q_{\text{PCH}}^i = Q_{\text{EH}}^i \times \frac{Q_{\text{modPCH}}}{Q_{\text{modEH}}} \quad (2.21)$$

Esta equação, aplicada à série de caudais médios diários medidos pela estação dá-nos uma estimativa do caudal médio diário na central hidroelétrica, onde  $Q_{\text{PCH}}^i$  é o caudal médio diário no ano  $i$ .

Para se obter o caudal modular ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), sendo que representa a média dos caudais médios diários, utiliza-se a seguinte equação:

$$Q_{\text{modPCH}} = \frac{\bar{H}_{\text{PCH}} \times A_{\text{PCH}}}{365 \times 24 \times 3600} = \frac{\bar{V}_{\text{PCH}}}{365 \times 24 \times 3600} \quad (2.22)$$

sendo que  $\bar{V}_{\text{PCH}}$  ( $\text{hm}^3$ ) é obtido pela equação 2.20.

O caudal modular da estação hidrométrica é obtido através da média de todos os caudais médios diários.

### 2.4.7. Algoritmo de simulação

Depois de estimados os caudais médios diários afluentes ao aproveitamento hidroelétrico adotado como caso de estudo, determinou-se a produção de energia e a respetiva receita que advém da variabilidade hidrológica presente na série histórica global, com recurso a um algoritmo de simulação da exploração do aproveitamento à escala diária, especificamente desenvolvido para o efeito. O subcapítulo que se segue explicita o funcionamento do algoritmo desenvolvido, sendo que o algoritmo sse encontra nos Anexos.

O algoritmo de simulação desenvolvido requer como dados de entrada, para além da série de caudais médios diários afluentes, o caudal ecológico ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e o caudal máximo turbinável ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Uma vez que

se considerou que a albufeira do caso de estudo não teria capacidade de regularização, são lançados para jusante do aproveitamento hidroelétrico os caudais remanescentes do caudal máximo derivável.

O algoritmo assenta num conjunto de condições aplicadas dia-a-dia, a saber:

- a) É dada prioridade ao lançamento do caudal ecológico – caso o caudal afluente seja inferior ou igual ao caudal ecológico, lança-se todo aquele caudal para jusante, não ocorrendo, portanto, produção de energia.
- b) Se o caudal afluente exceder o caudal ecológico, o caudal turbinado é dado pela diferença entre aqueles dois caudais.
- c) Quando a diferença entre o caudal afluente e o caudal ecológico é superior ao caudal máximo turbinável turbinam-se apenas este máximo; a diferença entre aqueles caudais é lançada para jusante através dos órgãos de descarga da obra de retenção que integra o circuito hidráulico do aproveitamento hidroelétrico não sendo, portanto, contabilizada em termos de produção de energia
- d) O volume turbinado em cada ano é dado pela soma dos caudais turbinados em cada dia desse ano.

O anterior algoritmo permite obter a energia produzida em cada ano, bem como a respetiva receita. Por acumulação e atualização das receitas anuais para um período alargado de anos obtém-se a correspondente receita acumulada atualizada que contém em si a informação que advém da variabilidade hidrológica.

A aplicação do algoritmo brevemente descrito considerou diferentes caudais máximos turbináveis,  $Q_{\max}$ , definidos em termos da relação  $Q_{\max}/Q_{\text{mod}}$  e pressupôs a adoção de taxas de atualização.  $Q_{\text{mod}}$  designa o caudal modular relativo ao caso de estudo, dado pela média de todos os caudais médios diários afluentes ao mesmo no período de N anos a que se refere a simulação.

Desenvolvido o algoritmo anteriormente estudado, e obtidos os dados da produção de energia e as receitas acumuladas atualizadas esperadas com a venda da energia, foi necessário estudar o efeito da variabilidade hidrológica nestas receitas. Para tal, recorreu-se a um tratamento estatístico que estudasse as receitas acumuladas atualizadas para diferentes probabilidades de não excedência,  $F(x)$ .

## **2.5. Análise económica**

### **2.5.1. Introdução**

A análise económica tem um papel fundamental do ponto de vista de um promotor independente, visto o único benefício que este poderá ter com a implementação destas centrais será o lucro anual com a venda da produção de energia. Este lucro está muitas vezes dependente da energia que é produzida durante o período de concessão da central, da política das tarifas impostas por cada país, mas também da variabilidade hidrológica ao longo do período da concessão, e a qual não é possível ser controlada. Esta análise tem por base essa variabilidade e qual o impacto da mesma no lucro que um promotor poderá obter [23].

A análise económica de centrais hidroelétricas é normalmente feita com base nos preços de mercado referentes a um determinado ano, designadamente aquele em que teve lugar o respetivo projeto. Designe-se por instante zero o início de exploração da central. Todas as receitas anuais obtidas ao longo do período de concessão, têm de ser atualizadas para aquele instante. A atualização da receita é feita com base na taxa de atualização,  $t$ , que permite calcular o valor que se atribui num dado instante a um fluxo monetário ocorrente num instante diferente [24].

Assim, num *sistema de preços de mercado constantes*, uma dada unidade monetária (por exemplo, um euro) tem mais valor no presente do que no futuro; ou seja, designando  $t$  a taxa de atualização, uma unidade monetária no presente valerá daqui a  $n$  anos  $(1 + t)^n$ . Ao mesmo tempo, o valor  $n$  presente de um futuro fluxo monetário unitário será menor que um, concretamente, será de  $1/(1 + t)^n$ . A Figura 2.13 exemplifica a transferência do fluxo de uma unidade monetária relacionado com a taxa de atualização,  $t$ .

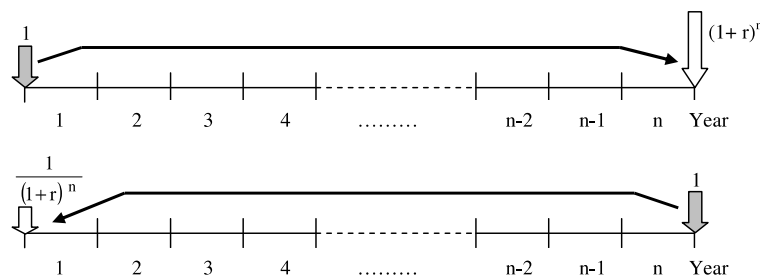


Figura 2.13. Transferência do fluxo de uma unidade monetária relacionado com a taxa de atualização. Fonte:[23]

De notar que a taxa de atualização se refere a uma taxa que permite calcular o valor que se atribui a fluxos monetários que irão ocorrer em períodos diferentes. A fixação desta taxa permite que se possa escolher entre consumir hoje ou no futuro [24].

Nos últimos anos, a taxa de atualização utilizada no estudo da análise económica de pequenas centrais hidroelétricas tem variado entre 4% e 10%, sendo que as mesmas foram adotadas neste estudo.

## 2.5.2. Energia anual produzida

Para a avaliação da energia anual produzida na central hidroelétrica e a correspondente receita foi necessário recorrer a um programa de cálculo que simula a exploração diária da central hidroelétrica, com base nas estimativas dos caudais médios diários afluentes à central hidroelétrica, apresentado no item 2.4.7. Esta simulação tem o propósito de analisar a variabilidade na produção da energia devido à variabilidade dos caudais. Foram considerados diversos *inputs* que avaliam a energia anual e a respetiva receita anual.

Tendo por base os volumes turbinados em cada dia de um período alargado de anos é possível determinar a energia anual produzida, (GWh), dada por:

$$E = \frac{Q_{PCH} \times 24 \times 3600 \times \Delta h}{\frac{3600}{g \times \eta}} = \frac{V_{turb} \times \Delta h}{\frac{3600}{g \times \eta}} \quad (2.23)$$

onde  $g$  representa a gravidade e  $V_{\text{turb}}$ , o volume anual médio turbinado correspondente a um dado caudal máximo turbinável,  $Q_{\text{máx}}$ . Para o efeito, expressou-se este caudal em função do caudal modular,  $Q_{\text{mod}}$ , ou seja, em função da relação  $Q_{\text{máx}}/Q_{\text{mod}}$  a qual se fez variar entre 1,6 e 2,4, com um incremento de 0,2:  $1,6 \leq Q_{\text{máx}}/Q_{\text{mod}} \leq 2,4$ . Analisaram-se, assim, cinco hipóteses de valor do caudal máximo derivável.

De modo a tornar o estudo o quanto genérico possível foi considerando que a eficiência média global da central,  $\eta$ , e a queda bruta,  $\Delta h$  (m), seriam unitárias. A expressão 2.23 é finalmente dada por:

$$\bar{E} = \frac{V_{\text{turb}} \times g}{3600} \quad (2.24)$$

É preciso ter em consideração e identificar qual o regime de caudal ecológico necessário para preservar as características naturais da bacia. As centrais hidroelétricas e a artificialização do curso normal da água alteram o regime normal do recurso de água a jusante [1], sendo que isso tem impactos imediatos ao nível dos ecossistemas aquáticos naturais e nas paisagens. Para se conseguir manter as características normais dos ecossistemas e das paisagens em redor é necessário adotar caudais ecológicos de forma a mitigar todas as ações que as centrais e a artificialização do curso da água têm. Não obstante estar em causa, por regra, não um caudal ecológico, mas antes um regime de caudais ecológicos, por simplificação e à semelhança do procedimento adotado durante bastante tempo, fixou-se o caudal ecológico em 5% do caudal modular afluente ao caso de estudo.

### 2.5.3. Receita anual atualizada. Receita de referência

A receita anual acumulada atualizada para o início de um período  $n$  anos é dada por:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{(1+t)^i} \quad (2.25)$$

onde  $t$  representa a taxa de atualização.

De modo a permitir a comparação, numa mesma base, entre receitas referentes a diferentes valores do caudal máximo derivável e mesmo a diferentes períodos de análise, procedeu-se à adimensionalização do resultado da equação (2.25) através da sua divisão pelo que se designou por receita de referência.

Para cada caudal máximo derivável, a receita de referência é a que resulta da consideração de uma receita anual em cada um dos  $n$  anos do período de análise e é igual à receita anual média, ou seja, igual à receita no pressuposto de volume turbinado constante e igual ao seu valor anual médio.

Se a receita anual for constante e igual a  $R_{\text{anual,cte}}$ , o correspondente valor acumulado atualizado para o instante 0 - ou seja, a receita de referência,  $R^*$ , é dado por:

$$R^* = \frac{R_{\text{anual,cte}}}{(1+t)} + \frac{R_{\text{anual,cte}}}{(1+t)^2} + \dots + \frac{R_{\text{anual,cte}}}{(1+t)^n} \quad (2.26)$$

ou seja:

$$R^* = R_{\text{anual,cte}} \times \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+t)^i} \quad (2.27)$$

onde o somatório da equação 2.25 é denominado por fator de atualização:

$$f = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+t)^i} = \frac{(1+t)^n - 1}{(1+t)^n t} \quad (2.28)$$

donde resulta para o início do ano 0:

$$R^* = R_{\text{anual,cte}} \times \frac{(1+t)^n - 1}{(1+t)^n t} \quad (2.29)$$

Para cada relação  $Q_{\text{máx}}/Q_{\text{mod}}$  analisada obtém-se, assim, a receita anual atualizada adimensional consoante o período de análise.

Importa, aqui, tecer algumas considerações sobre o período de análise, o qual, em princípio pretende simular o período de concessão da exploração de uma pequena central hidroelétrica.

Para se definir tal período, teve-se em consideração os decretos-leis 33-A/2005 e 225/2007. No DL 33-A de 2005, lê-se que "... Para as centrais hídricas, aos primeiros 42,5GWh entregues à rede, por megawatt de potência de injeção na rede atribuído, até ao limite máximo dos primeiros 15 anos a contar desde o início do fornecimento de eletricidade à rede que poderá, em casos excecionais devidamente fundamentados, ser prorrogado até mais 10 anos...", enquanto no DL 225 de 2007 lê-se que "...Para as centrais hídricas, aos primeiros 52 GWh entregues à rede, por megawatt de injeção na rede atribuído, até ao limite máximo dos primeiros 20 anos a contar desde o início do fornecimento de eletricidade à rede que poderá, em casos excecionais devidamente fundamentados, ser prorrogado por mais cinco anos ...". Isto significa que considerando 2800 a 2850 horas de utilização da potência à plena carga numa pequena central hidroelétrica, a produção por cada MW instalado varia entre 2,8 a 2,85 GWh/MW, obtendo-se, assim, períodos de concessão de aproximadamente 15 e 25 anos, respetivamente, que foram os adotados no estudo.

## 2.6. Análise estatística

### 2.6.1. Introdução

Como antes mencionado, uma vez fixado o período de análise (15 ou 25 anos), o valor do caudal máximo turbinável (de entre os definidos por  $1,6 \leq Q_{\text{máx}}/Q_{\text{mod}} \leq 2,4$ ) e a taxa de actualização aplicável (4 ou 10%), obtiveram-se diferentes receitas adimensionais que foram caracterizadas mediante aplicação de critérios de análise estatística. De acordo com as características intrínsecas mais vulgarmente patentes nas amostras das variáveis, especificam-se, seguidamente, alguns dos modelos probabilísticos que se

pensa melhor se adequarem a essas variáveis.

Para o efeito postularam-se diferentes funções de distribuição de probabilidade, designadamente as distribuições Normal, de Galton e de Pearson Tipo III. Após a seleção da distribuição recorreu-se ao ajustamento visual. Identificada essa distribuição procedeu-se à estimativa de receitas para diferentes probabilidades.

A adequação da distribuição Normal à descrição de algumas variáveis hidrológicas resulta do chamado *teorema do limite central*, segundo o qual a soma (ou a média) de um grande número de variáveis aleatórias independentes tende a ser normalmente distribuída.

### **2.6.2. Análise de frequência. Probabilidade empírica de não-excedência**

Uma variável aleatória contínua pode assumir qualquer valor real num dado intervalo, correspondendo a espaços amostrais finitos ou infinitos, porém não numeráveis. Admite-se que os valores referentes à receita anual atualizada constituem uma variável aleatória contínua  $X$ , pois, teoricamente, pode assumir qualquer valor real entre 0 e  $\infty$ , embora com diferentes probabilidades [25].

A cada valor de  $x$  de uma variável aleatória  $X$ , isto é  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ , pode associar-se a probabilidade  $F(x)$  de a variável assumir valores inferiores ou iguais a  $x$  (probabilidade de não excedência), em que  $F(x)$  é a função distribuição de probabilidade, ou seja [21]:

$$F(x) = \text{Probabilidade de } X \leq x = P(X \leq x)$$

Para se proceder à análise de frequência de uma amostra, isto é, para identificar as distribuições estatísticas suscetíveis de serem aplicadas a essa amostra é frequente recorrer-se ao ajustamento visual, tendo por base a representação gráfica dos pontos da amostra e das leis teóricas postuladas para representar essa amostra. Para isso, terá de se atribuir a cada ponto da amostra uma probabilidade empírica de não-excedência,  $F(x)$ . Regra geral, a representação gráfica utiliza o chamado *papel de probabilidade*, sendo que os eixos ordenados estão graduados nas unidades dos elementos das amostras e os eixos das abcissas, em *escalas transformadas de probabilidades*, tais que, para a lei a que se refere cada um desses papéis, a relação entre os valores da variável aleatória e as respetivas probabilidades teóricas de não-excedência é linear [25]. A Figura 2.14 ilustra a representação do papel de probabilidade, onde os eixos das abcissas são constituídos por dois eixos – um linear em valores da normal reduzida,  $Z$  – e outro, com os valores correspondentes da probabilidade de não-excedência,  $F(x)$ .

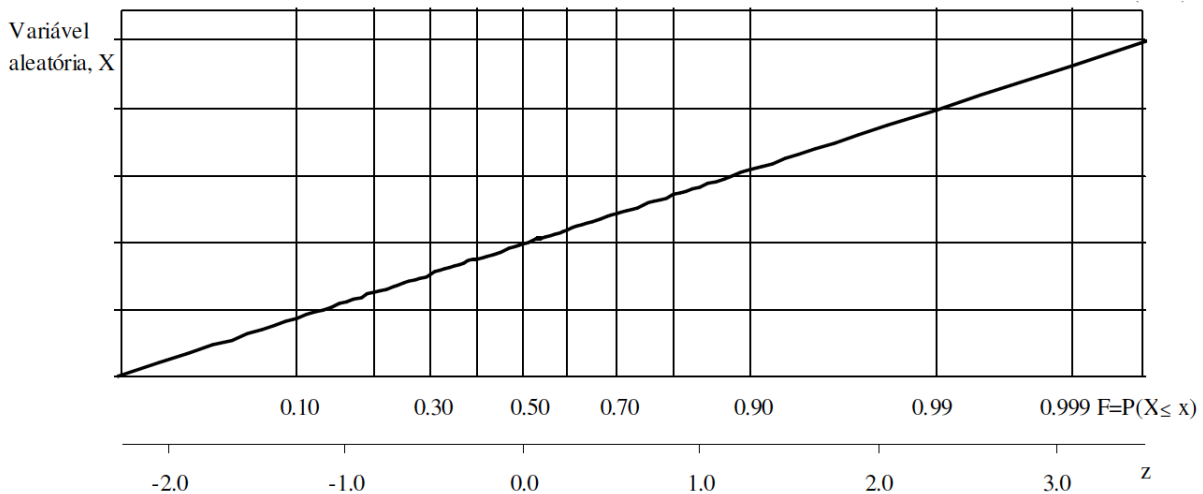


Figura 2.14. Papel de probabilidade para a Lei Normal. Fonte: [25]

Contudo, em vez de se representar as leis postuladas e a amostra em função da probabilidade de não-excedência,  $F$ , (isto é,  $X$  em função de  $F$ ), representa-se em função do valor do fator de probabilidade da lei Normal ( $k_{Normal}$ ) que compreende aqueles  $F$ 's.

Se, numa amostra sem valores repetidos,  $i$  representasse o número de ordem de um dado elemento após a ordenação dos elementos da amostra por ordem crescente, então a probabilidade de não-excedência associada a cada elemento seria dada pelo quociente entre o número de elementos da amostra  $i$ , e pela dimensão da amostra  $N$ , ou seja  $\frac{i}{N}$ . Isto significaria então, que a probabilidade de ocorrerem elementos com valor inferior ao menor valor ou superior ao maior valor seria nula. Assim, foram criadas fórmulas que pudessem corrigir esse pressuposto, pois, como facilmente se reconhece, podem ocorrer valores para além do intervalo representado por uma amostra. Estas fórmulas utilizam o número de ordem  $i$ , fazendo-o variar entre 1 (para o menor valor da amostra) e  $N$  (maior valor da amostra). É também utilizada uma constante  $\omega$  compreendida entre 0 e 1, que determina a qualidade de ajustamento entre probabilidades empíricas e teóricas de acordo com as leis postuladas:

$$F = P(X \leq x) = \frac{i - \omega}{N + 1 - 2\omega} \quad (2.30)$$

Como estamos perante probabilidades de excedência não enviesadas para todas as distribuições, então  $\omega = 0.000$  e a fórmula para a estimação das probabilidades empíricas de não-excedência é dada pela fórmula de Weibull, que foi a aplicado no estudo efetuado:

$$F = P(X \leq x) = \frac{i}{N + 1} \quad (2.31)$$

Em termos gerais, o ajustamento de leis estatísticas a uma dada amostra pode processar-se de acordo com as seguintes etapas:

1. Retira-se da amostra toda a informação possível (média, desvio padrão, coeficiente de assimetria, máximo e mínimo);
2. Ordena-se os valores da amostra por valores crescentes;
3. Atribui-se a cada valor da amostra já ordenada, uma probabilidade empírica de não-excedência,  $F(x)$ , por aplicação da fórmula (2.31);
4. Postulam-se (arbitram-se) as leis que se admitem ajustar-se à amostra;
5. Seleciona-se a lei com melhor ajuste mediante a representação visual da amostra e das diferentes leis postuladas;
6. De acordo com a lei selecionada estuda-se a amostra.

As representações gráficas são feitas de acordo com o que foi explicado acima, sendo que se incluíram nos gráficos, as curvas resultantes do ajustamento das distribuições Normal, de Galton e Pearson III.

### 2.6.3. Distribuição Normal

A distribuição Normal, também conhecida como de Gauss, é utilizada para descrever variáveis aleatórias com comportamento simétrico em torno de um valor central – função densidade de probabilidade simétrica em relação à média.

A distribuição Normal é um modelo de dois parâmetros, cujas funções densidade,  $f_X(x)$  e de distribuição,  $F_X(x)$  são expressas, respetivamente, por:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right] \quad (2.32)$$

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \right)^2 \right] dx \quad (2.33)$$

em que  $\sigma$  e  $\mu$  representam, respetivamente, o desvio-padrão e a média da amostra da distribuição Normal.

Nesta distribuição, o coeficiente de assimetria,  $\delta$ , é nulo, uma vez que a distribuição é simétrica. Assim, a distribuição Normal muitas vezes não se adequa ao estudo de variáveis hidrológicas, que, regra geral, têm coeficientes de assimetria positivos.

A função distribuição de probabilidade (fdp) da distribuição Normal, dada pela equação 2.34, não tem solução analítica. Esse inconveniente pode ser superado a partir da transformação linear  $z = \frac{x - \mu}{\sigma}$  da variável Normal  $X$ , de parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ . As funções densidade e de probabilidades acumuladas de  $Z$  são dadas, respetivamente, por:

$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{z^2}{2} \right), \quad -\infty < z < \infty \quad (2.34)$$

$$F_Z(z) = \Phi(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad (2.35)$$

A função de probabilidades acumuladas da distribuição normal padrão,  $\Phi(z)$ , pode ser obtida mediante integração numérica. A função  $F_Z(z)$  consta também das funções implementadas no software Microsoft Excel (DIST.NORMP e NORMSDIST nas versões, respetivamente, em Português e em Inglês).

#### 2.6.4. Distribuição Log-Normal (Galton)

Se a variável  $\ln(X)$ , ou  $\log(X)$ , é distribuída segundo uma Normal, a distribuição da variável  $X$  é uma Log-Normal (Galton). A função densidade correspondente é dada por

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sigma_Y \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)^2\right] \quad (2.36)$$

em que  $\sigma_Y$  e  $\mu_Y$  representam, respetivamente, o desvio-padrão e a média da amostra dos logaritmos de  $X$  e  $Y = \ln(X)$ .

A função de probabilidades acumuladas da distribuição log-Normal é expressa por:

$$F_Y(Y) = \int_{-\infty}^Y f_Y(y) dy \quad (2.37)$$

O valor esperado, a variância e o coeficiente de assimetria de uma variável Log-Normal são, respetivamente:

$$E[X] = \mu_X = \exp\left[\mu_Y + \frac{\sigma_Y^2}{2}\right] \quad (2.38)$$

$$\text{Var}[X] = \sigma_X^2 = \mu_X^2 [\exp(\sigma_Y^2) - 1] \quad (2.39)$$

$$\delta = 0 \quad (2.40)$$

#### 2.6.5. Distribuição de Pearson Tipo III

Uma variável aleatória  $X$  possui uma distribuição de Pearson Tipo III se a variável  $(X - \delta)$  é distribuída conforme uma Gama com parâmetro de escala  $\alpha$  e parâmetro de forma  $\beta$ ; de facto, se o parâmetro de posição  $\alpha$ , da distribuição Pearson do Tipo III, for nulo, essa distribuição reduz-se a uma Gama [26]. A função densidade de probabilidade de uma distribuição Pearson Tipo III é dada por:

$$f_X(x) = \frac{1}{|\alpha| \Gamma(\beta)} \left(\frac{x - \delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x - \delta}{\alpha}\right) \quad (2.41)$$

A variável  $X$  é definida no intervalo  $\delta < x < \infty$  e  $\alpha > 0$ .

A função de probabilidades acumuladas da distribuição Pearson Tipo III é expressa por:

$$F_X(x) = \int_{\delta}^x f_X(x) dx \quad (2.42)$$

A média, a variância e o coeficiente de assimetria de uma variável aleatória Pearson Tipo III são, respetivamente:

$$E[X] = \alpha\beta + \delta \quad (2.43)$$

$$\text{Var}[X] = \alpha^2\beta \quad (2.44)$$

$$\delta = \frac{2}{\sqrt{\beta}} \quad (2.44)$$

### 2.6.6. Análise de frequências pelo método de fator de probabilidade

Para a estimação de parâmetros de distribuição existem diversos métodos, sendo que o mais estudado e utilizado neste estudo é o método dos momentos. Este método consiste em igualar os momentos amostrais aos momentos populacionais. Assim, o valor da variável aleatória pode expressar-se por:

$$x = \mu_x + K_{\text{DIST}}^F \sigma_x \quad (2.46)$$

em que  $K_{\text{DIST}}^F$  denota o *fator de probabilidade*, dependente de  $F$  e da distribuição estatística para a qual se pretende estimar quantis. Se  $\mu_x$  e  $\sigma_x$  forem substituídos pelas respetivas estimativas amostrais,  $\bar{X}$  e  $s_x$ , a equação 2.46 toma a forma:

$$x = \bar{X} + K_{\text{DIST}}^F s_x \quad (2.7)$$

a qual exprime o facto de os produtos dos fatores de probabilidade pelo desvio-padrão,  $s_x$ , representarem desvios crescentes, em relação à média amostral,  $\bar{X}$ , à medida que as probabilidades de não-excedência aumentam.

Os subcapítulos que se seguem apresentam as equações mais vulgares para o cálculo das estimativas e dos fatores de probabilidade para as distribuições Normal, Log-Normal (Galton) e de Pearson Tipo III. De notar que, o valor do fator de probabilidade para a distribuição Normal e Log-Normal, para um dado valor de probabilidade não-excedência,  $F(x)$ , é igual ao valor da normal reduzida para esse valor de  $F$ .

### 2.6.6.1. Distribuição Normal

Quando uma variável é normalmente distribuída, o quantil é calculado pela relação:

$$x_F = \bar{X} + Z s_x \quad (2.48)$$

onde  $\bar{X}$  e  $s_x$  são, respetivamente, a média e o desvio-padrão da variável e  $Z$  é a variável normal reduzida. Por analogia, conclui-se que o fator de probabilidade da distribuição normal,  $k_{Normal}^F$  é igual à variável normal reduzida  $Z$  [26]. Neste caso, e recorrendo às funções do *Excel*, o fator de probabilidade  $K_{Normal}^F$  é dado pela função `DIST.NORMP`.

$$K_{Normal}^F = z(F) \quad (2.49)$$

### 2.6.6.2. Distribuição Log-Normal

Como para a distribuição Log-Normal, os logaritmos neperianos dos elementos da amostra devem ser ajustados a uma distribuição normal, tem-se que o fator de probabilidade  $k_{Normal}^F$ , também deve ser igual à variável normal reduzida  $Z$  [26]:

$$x_F = \exp(\bar{Y} + K_{Normal}^F s_Y) \quad (2.50)$$

onde  $Y = \ln(X)$ .  $\bar{Y}$  é a média dos logaritmos de  $X$  e  $s_Y$  é o desvio-padrão dos logaritmos de  $X$ .

Neste caso, e recorrendo às funções do *Excel*, o fator de probabilidade  $K_{Normal}^F$  é dado pela função `DIST.NORMP`.

$$K_{Normal}^F = z(F) \quad (2.51)$$

### 2.6.6.3. Distribuição Pearson Tipo III

A estimativa do valor da variável  $X$ , com distribuição de probabilidades de Pearson Tipo III, obtida pelo método dos momentos é dada por:

$$x_F = \bar{X} + K_{Pearson}^F s_x \quad (2.52)$$

O fator de probabilidade da distribuição de Pearson tipo III pode ser obtido por transformação de Wilson-Hilferty, dada por:

$$K^F_{\text{Pearson}} = \frac{2}{g_x} \left\{ \left[ \left( K^F_{\text{Normal}} - \frac{g_x}{6} \right) \frac{g_x}{6} + 1 \right]^3 - 1 \right\} \quad (2.53)$$

onde  $g_x$  representa o coeficiente de assimetria, calculado através da equação 2.54:

$$g_x = \frac{\mu_3}{(\sigma_x)^3} = \frac{E[(X-\mu_x)^3]}{(\sigma_x)^3} \quad (2.54)$$

X corresponde à variável aleatória,  $\mu_x$  a média da variável aleatória e  $\sigma_x$  o desvio-padrão.

Na distribuição de Pearson III o fator de probabilidade depende da probabilidade para a qual se pretende calcular e do coeficiente de assimetria da distribuição. Quando o coeficiente de assimetria é igual a zero, a distribuição Pearson Tipo III é idêntica à distribuição Normal. Se  $g_x$  é igual a zero, então  $K^F_{\text{Pearson}}$  é igual à variável normal reduzida Z, ou seja  $K^F_{\text{Pearson}} = K^F_{\text{Normal}} = z(F)$  [27].

Página deixada em branco intencionalmente

## Capítulo 3 – Caso de estudo

Para a aplicação dos modelos e procedimentos objeto de estudo no **Capítulo 2 – Enquadramento. Conceitos teóricos**, sistematizaram-se no presente capítulo os dados de base necessários ao estudo. Contudo, antecedendo tal sistematização, neste capítulo procede-se à caracterização do caso de estudo, constituído por um pequeno aproveitamento hidroelétrico com exploração a fio-de-água – a PCH do Sordo – e à descrição do respetivo circuito hidráulico.

### 3.1. Caracterização do caso de estudo

A central hidroelétrica do Sordo localiza-se no concelho de Vila Real, no rio Sordo, afluente do Rio Corgo. O rio Sordo afluí ao rio Corgo a jusante da central do Terragido, pelo que os dois aproveitamentos não têm qualquer influência sobre o funcionamento um do outro. O aproveitamento é constituído pela barragem do Sordo, um túnel com 2395 m e uma conduta forçada de 1,2 m de diâmetro e 920 m de comprimento<sup>c</sup>.

A exploração do aproveitamento iniciou-se em 1995. O aproveitamento domina uma bacia hidrográfica de 48 km<sup>2</sup> e dispõe de uma albufeira com uma reduzida capacidade útil, nomeadamente de 280 dam<sup>3</sup>. A sua central encontra-se equipada com dois grupos turbina-geradores – duas turbinas Pelton – dimensionados para o caudal máximo derivável de 3.6 m<sup>3</sup>/s, sob a queda bruta de 321 m, valores conducentes à potência de 10 MW e à produtividade anual média de 21.3 GWh<sup>2</sup>. O caudal ecológico do aproveitamento é de 100 L/mês [28].

A Tabela 3.1 apresenta de forma sintetizada as principais características da central hidroelétrica do Sordo, tais como as referentes ao circuito hidráulico (canal, túnel, conduta) e à produtividade anual média.

Tabela 3.1. Caso de estudo: central hidroelétrica do Sordo. Características principais.

Central hidroelétrica do Sordo									
Coordenadas de localização M e P (m; m)		Área da bacia hidrográfica (km <sup>2</sup> )	Comprimento do circuito hidráulico (m)		Q <sub>max</sub> derivável (m <sup>3</sup> /s)	Queda bruta (m)	Potência (MW)	Produtibilidade anual média (GWh)	Capacidade útil da Albufeira (dam <sup>3</sup> )
Açude	Central	48	Túnel	Conduta forçada	3,60	321	10	21,3	280
477919;	477985;		2395	920					
228852	231155								

<sup>c</sup> EDP, 2011. Consultado indiretamente, através de [28].

A Figura 3.1 contém uma vista da barragem e de parte da albufeira do Sordo.



Figura 3.1. Barragem do Sordo (vista de montante). Fonte: [26]

### 3.2. Dados de base

Como mencionado no **Capítulo 2 – Enquadramento. Conceitos teóricos**, para a obtenção de uma série de caudais numa secção não monitorizada é necessário recorrer à informação hidrométrica disponível. Para tal, é fundamental garantir que as alturas dos escoamentos anuais médios na bacia hidrográfica em que se pretende estimar o escoamento e na bacia hidrográfica a partir da qual é efetuada a transposição são relativamente próximas, para que a transposição seja suficientemente precisa. Tal pode ser assegurado se for selecionada uma estação hidrométrica dominando uma bacia hidrográfica localizada tão próxima quanto possível da bacia hidrográfica da secção sem informação hidrométrica. Está nesta situação a estação hidrométrica de Santa Marta do Alvão (05K/01H) a qual dispõe de uma série longa de registos de caudais médios diários que, mediante aplicação de um modelo de regionalização adequado, podem ser transpostos para o aproveitamento.

A Tabela 3.2 resume algumas das características da anterior estação hidrométrica.

Tabela 3.2. Caso de estudo: central hidroelétrica do Sordo. Características da estação hidrométrica de Santa Marta do Alvão (05K/01H).

Estação hidrométrica				
Designação	Coordenadas de localização M e P (m; m)	Bacia hidrográfica	Área da bacia hidrográfica (km <sup>2</sup> )	Período com registos
Santa Marta do Alvão (05K/01H)	231630; 503307	Douro/Rio Louredo	49,3	1955 - 2011

Para a aplicação do modelo de regionalização apresentado no **Capítulo 2 – Enquadramento. Conceitos teóricos** foi necessário garantir que se dispunha de uma série de escoamentos anuais (obtida através do somatório dos caudais médios diários de cada ano) e de uma série de precipitações anuais (obtida através da ponderação das precipitações anuais em postos udométricos inseridos ou localizados na vizinhança da bacia hidrográfica da estação hidrométrica). Estas duas séries são utilizadas para a aplicação da equação de regressão linear com vista a calcular o escoamento anual médio na secção não monitorizada – a da bacia hidrográfica do caso de estudo. É necessário também dispor-se de séries de precipitações anuais em postos udométricos localizados no interior ou na vizinhança da bacia hidrográfica do aproveitamento Sordo de modo a estimar a precipitação anual média aí ocorrente e a obter a altura do escoamento anual médio, por utilização da equação de regressão apresentada no **Capítulo 2 – Enquadramento. Conceitos teóricos**.

De modo a garantir uma análise mais precisa, é essencial assegurar que as séries de escoamentos anuais e de precipitações médias anuais sejam tão longas quanto possível, e que, para a estação hidrométrica, seja igualmente longo o período comum com registos daquelas duas variáveis.

Os dados analisados foram disponibilizados pelo SNIRH, Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (<http://snirh.apambiente.pt/>).

### 3.2.1. Postos udométricos

As séries de precipitações anuais são obtidas através de postos udométricos inseridos no interior ou nas proximidades das bacias hidrográficas da estação hidrométrica e da central hidroelétrica. Tais postos são identificados na Tabela 3.3, que contém ainda alguma informação geral. As características estatísticas das correspondentes séries de precipitação anual constam da Tabela 3.4.

Tais características referem-se à média da precipitação anual,  $\bar{P}$ , ao correspondente desvio-padrão,  $s$ , e coeficiente de assimetria, c.a., obtidos através das equações que se seguem, onde  $p_i$  se refere à precipitação anual (mm) no ano  $i$ , os índices PCH e EH designam a central hidroelétrica e a estação hidrométrica, respetivamente, e  $N$  se refere à dimensão das amostras:

$$\bar{P}_{PCH} = \frac{\sum_{i=1}^N p_{iPCH}}{N_{PCH}} \quad \bar{P}_{EH} = \frac{\sum_{i=1}^N p_{iEH}}{N_{EH}} \quad (3.1)$$

$$s = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(p_{iPCH} - \bar{P}_{PCH})^2}}{N_{PCH} - 1} \quad s = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(p_{iEH} - \bar{P}_{EH})^2}}{N_{EH} - 1} \quad (3.2)$$

$$c. a. = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{p_i - \bar{P}}{s} \right]^3 \quad (3.3)$$

A média aritmética da precipitação média anual é o valor central da amostra numa distribuição estatística. É calculada de acordo com a equação 3.1, ou seja, é o somatório dos registos da precipitação anual, dividido pela dimensão da amostra.

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela 3.3. Postos udométricos com influência nas bacias hidrográficas da central hidroelétrica e da estação hidrométrica.

Postos udométricos com influência na bacia hidrográfica da PCH				
Designação	Bacia Hidrográfica	Coordenadas de localização M e P (m; m)	Período de registos (anos)	Número de anos do período de registos, N
Amarante (06L/01G)	Douro	205334; 477207	1932 – 2002	70
Arjuiz (05I/03G)		219973; 486642	1961 – 1995	31
Campeã (06J/01UG)		221855; 480257	1959 – 1995	36
Candemil (06J/02UG)		214067; 475214	1932 – 1995	63
Lamas de Olo (05K/03UG)		228217; 488829	1943 – 2002	44
Postos udométricos com influência na bacia hidrográfica da estação hidrométrica				
Designação	Bacia Hidrográfica	Coordenadas de localização M e P (m; m)	Período de registos (anos)	Número de anos do período de registos, N
Gouvães Da Serra (05K/01U)	Douro	233738; 501040	1946 – 1985	39
Lamas de Alvalá (05K/02UG)		231469; 498125	1933 – 1993	64
Lixa do Alvão (04K/03UG)		236974; 503524	1915– 2008	54
Santa Marta da Montanha (04K/02G)		232325; 503564	1915 – 2010	66
Vila Pouca de Aguiar (05L/01UG)		241511; 503312	1915 – 2008	59

Tabela 3.4. Características estatísticas das séries de precipitação médias anuais.

Postos udométricos com influência na bacia hidrográfica da PCH				
Designação	Bacia Hidrográfica	Média (mm)	Desvio padrão (mm)	Coefficiente de assimetria
Amarante (06L/01G))	Douro	1212,57	368,97	0,80
Arjuiz (05I/03G)		1365,74	408,84	0,31
Campeã (06J/01UG)		2229,08	619,55	0,54
Candemil (06J/02UG)		1347,22	501,68	0,56
Lamas de Olo (05K/03UG)		1725,82	862,96	0,88
Postos udométricos com influência na bacia hidrográfica da estação hidrométrica				
Designação	Bacia Hidrográfica	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coefficiente de assimetria
Gouvães Da Serra (05K/01U)	Douro	2093,98	706,53	0,35
Lamas de Alvalá (05K/02UG)		1971,47	640,58	0,78
Lixa do Alvão (04K/03UG)		1385,04	469,17	0,40
Santa Marta da Montanha (04K/02G)		1752,41	529,07	0,80
Vila Pouca de Aguiar (05L/01UG)		1311,14	455,99	0,75

O desvio-padrão é uma medida de dispersão em torno da média. Mede a variabilidade dos valores em relação à média. O valor mínimo do desvio-padrão é 0 indicando que não há variabilidade, ou seja, que todos os valores são iguais à média. O valor do desvio-padrão é tanto maior quanto maior for a variabilidade dos dados.

O coeficiente de assimetria relaciona-se diretamente com a forma gráfica da função densidade de probabilidade. A assimetria é o grau de desvio, ou de afastamento daquela forma relativamente a uma “campânula” perfeitamente simétrica. Se a curva representativa da função densidade de probabilidade tem um ramo maior para a direita da ordenada máxima diz-se que é desviada para a direita ou que tem assimetria positiva, resultando num coeficiente de assimetria positivo. Se o ramo foi maior para a esquerda da referida ordenada, diz-se que a curva é desviada para a esquerda, ou que tem assimetria negativa, sendo aquele coeficiente negativo. Caso a distribuição seja simétrica o coeficiente de assimetria é nulo, coincidindo os valores dos três parâmetros de tendência central (média, mediana e moda) [21].

### 3.2.1.1. Qualidade das séries de precipitações anuais

Como apresentado em 2.4.2.1, estudou-se a qualidade dos registos de precipitação anual nos postos udométricos inseridos ou localizados na vizinhança das bacias hidrográficas da estação hidrométrica e do aproveitamento hidroelétrico, de forma a se verificar se existem quebras de homogeneidade, para o que se aplicaram diferentes modelos.

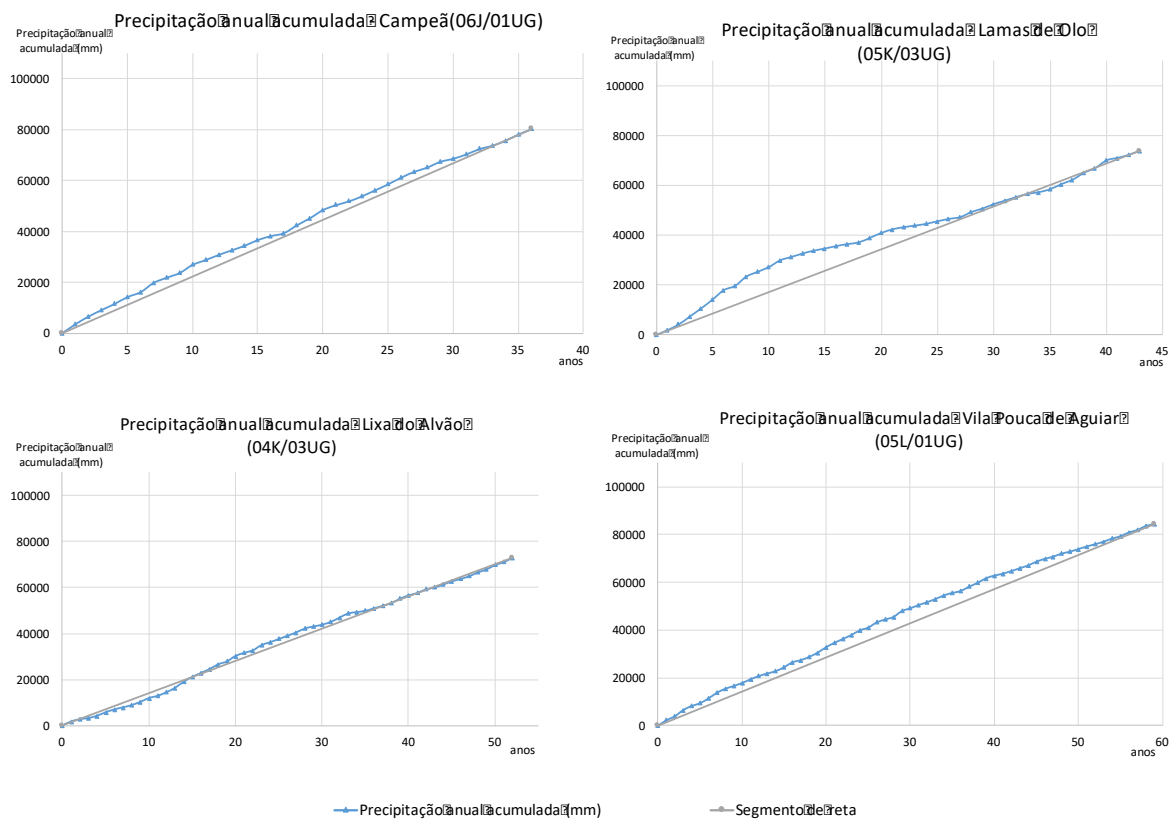


Figura 3.2. Aplicação do teste de valores simplesmente acumulados às séries de precipitações anuais dos postos udométricos com influência nas respetivas bacias hidrográficas.

Relativamente ao teste de valores simplesmente acumulados (subcapítulo 2.4.2.1), conclui-se que, na generalidade dos postos udométricos, as precipitações anuais acumuladas se dispunham em torno de segmentos de reta obtidos unindo os valores das precipitações anuais nos primeiros anos às acumuladas no final dos períodos de registos. Verificou-se, assim, que alguns postos exibiam comportamentos irregulares, embora nunca totalmente incompatíveis com o pressuposto de homogeneidade. Não obstante esta ressalva, optou-se por não excluir com base neste teste nenhum dos postos, tanto mais que se aplicaram outros testes. As restantes Figuras encontram-se nos Anexos.

A Figura 3.3 exemplifica a aplicação da técnica de médias móveis (subcapítulo 2.4.2.2), às séries anuais de precipitação nos postos udométricos objeto da Figura 3.2. A dimensão adotada para as médias móveis foi de  $n = 20$ , tendo-se atribuído o valor de cada média móvel ao primeiro ano do período de 20 anos a que respeita.

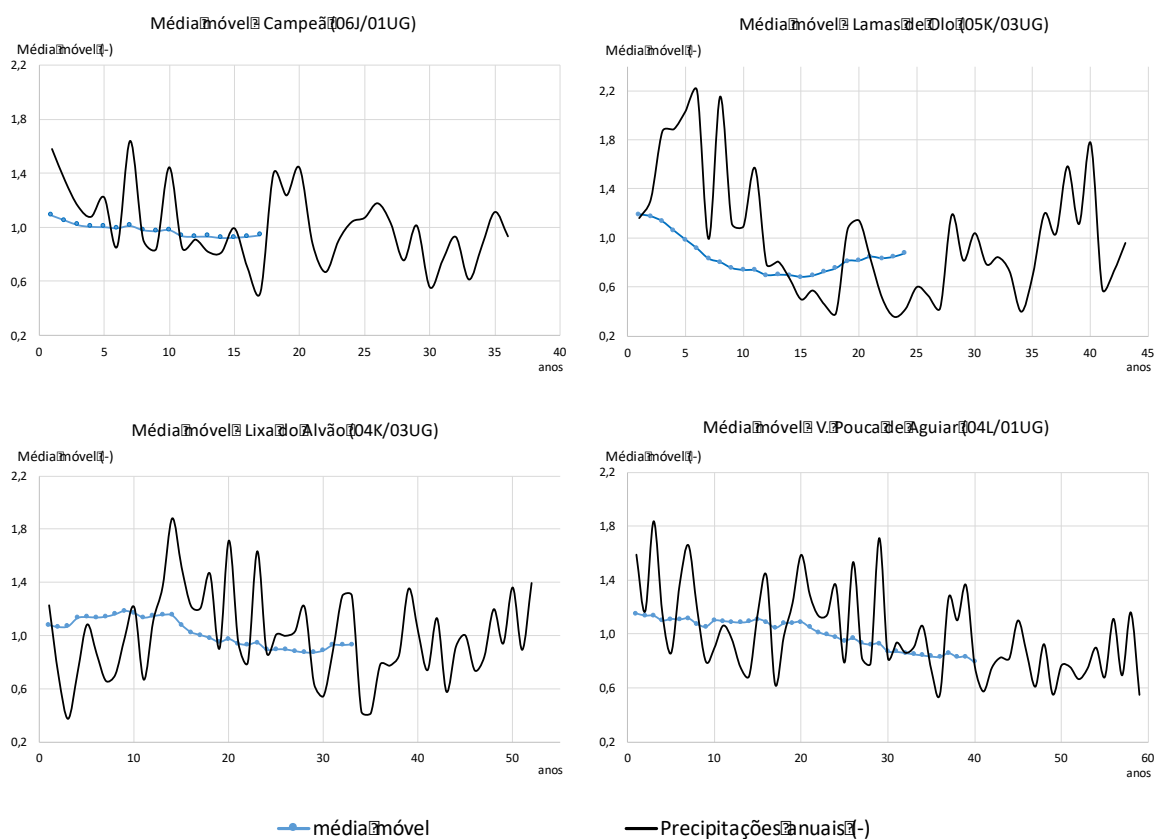


Figura 3.3. Aplicação da técnica clássica das médias móveis às séries de precipitações anuais dos postos udométricos com influência nas respetivas bacias hidrográficas.

Também as representações gráficas das médias móveis nos diferentes postos udométricos não exibem um comportamento comum. Nota-se, contudo, que, com exceção dos postos de Vila Pouca de Aguiar e Lamas de Olo, os demais apresentam médias móveis que sugerem que “recuperam” a flutuação em torno da precipitação anual média. Para os restantes postos udométricos, os gráficos estão representados nos Anexos.

Denota-se, contudo e em grande parte dos postos udométricos, uma tendência, embora pouco acentuada, da diminuição da precipitação anual. Para determinar se tal diminuição é estatisticamente significativa

utilizou-se o teste paramétrico de Student (2.4.2.2), o qual permite a comparação, em termos estatísticos, das médias de duas subséries.

Tal teste não foi aplicado a todas as séries de precipitação média anual, pois os testes precedentes indicavam não ocorrer quebras de homogeneidade. Contudo, os dois postos que suscitaram dúvidas foram alvo do teste paramétrico de Student. Em cada um destes postos, concluiu-se que as médias da precipitação anual nos primeiros e nos últimos 20 do período de registos eram estatisticamente diferentes para a nível de significância de 95%. Tais médias estão representadas na Figura 3.4.

Tendo-se concluído pela não qualidade das séries de precipitação anual nos postos de Lamas de Olo (04K/03UG) e de Vila Pouca de Aguiar (05L/01UG), eliminaram-se tais postos do prosseguimento do estudo.

As séries de precipitação anual nos demais postos são apresentadas na **Error! Reference source not found.** e na **Error! Reference source not found.**, referentes à bacia hidrográfica da PCH e à da estação hidrométrica, respetivamente. Tais tabelas incluem ainda o resultado da aplicação do método de Thiessen, objeto do item que se segue.

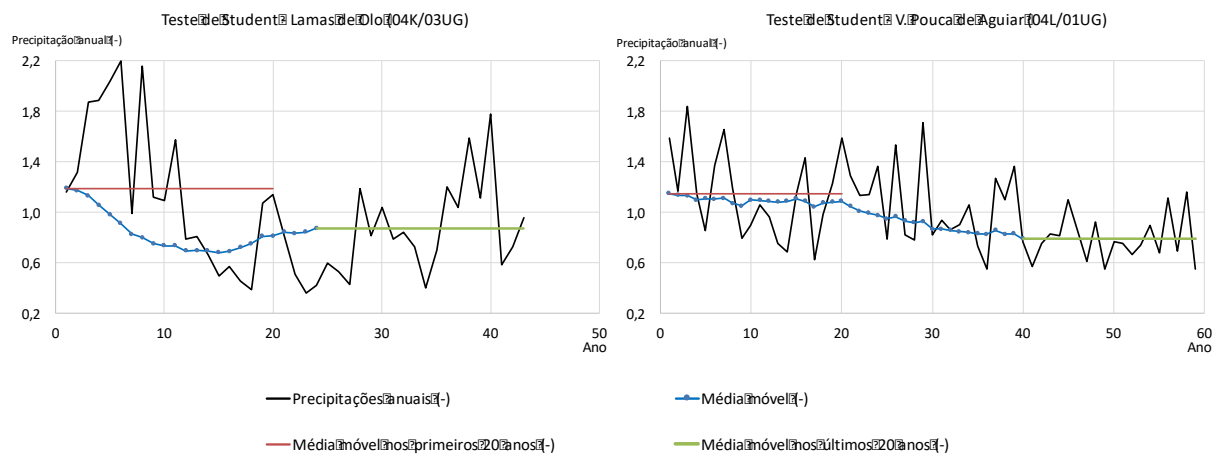


Figura 3.4. Aplicação do teste de Student. Os dois gráficos representados mostram as séries que foram excluídas do estudo por apresentarem quebras de homogeneidade.

### 3.2.1.2. Precipitações ponderadas em área

Como descrito no **Capítulo 2 – Enquadramento. Conceitos teóricos**, o cálculo das áreas de influências dos postos inseridos ou as proximidades das bacias hidrográficas do caso de estudo e da estação hidrométrica serve para avaliar as precipitações ponderadas naquelas bacias. O método utilizado para identificar as áreas de influência foi o dos polígonos de Thiessen, seguido da aplicação da equação 2.9 para calcular a precipitação ponderada.

O peso dos diferentes postos bem como as precipitações ponderadas a que conduzem foram incluídos na Tabela A.1 e Tabela A.2, em Anexos, sendo que as Figuras 3.5 e 3.6 apresentam graficamente precipitações em cada posto udométrico na estação hidrométrica e na PCH.

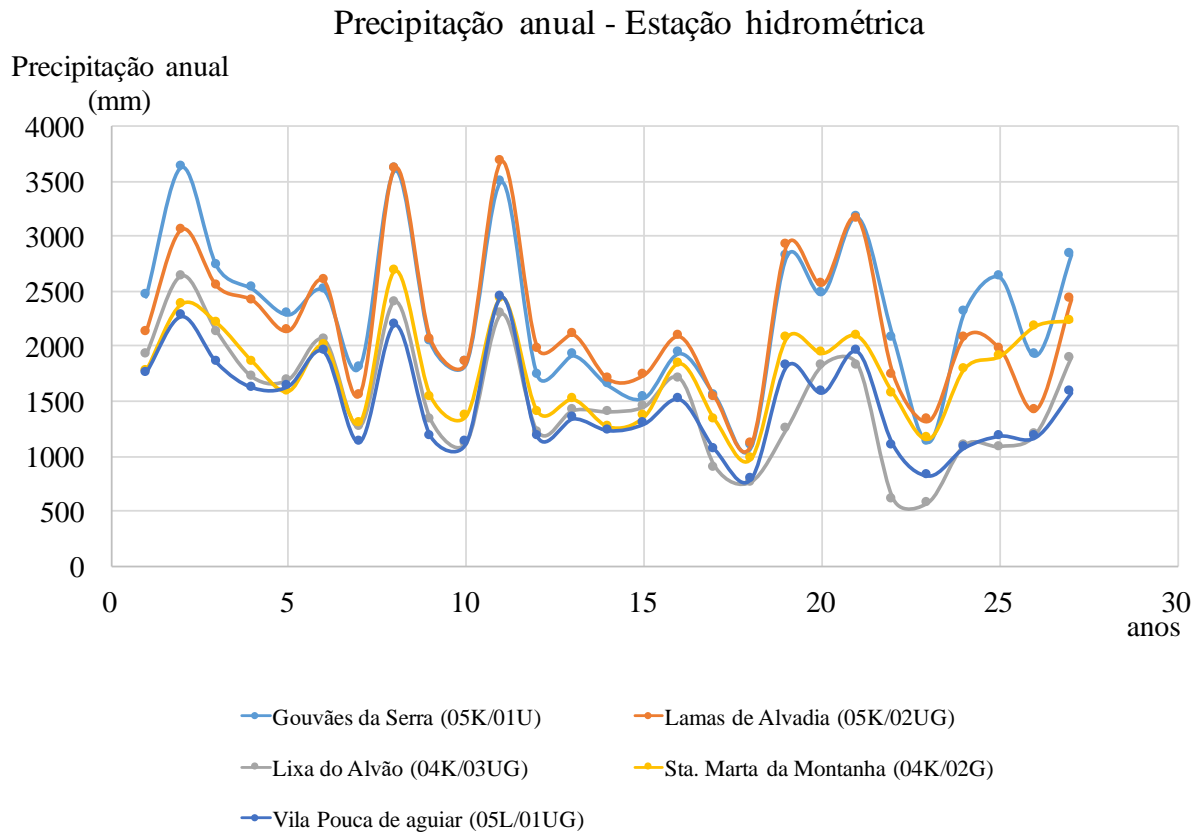


Figura 3. 5. Precipitações anuais nos postos udométricos com influência na bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Sta. Marta do Alvão.

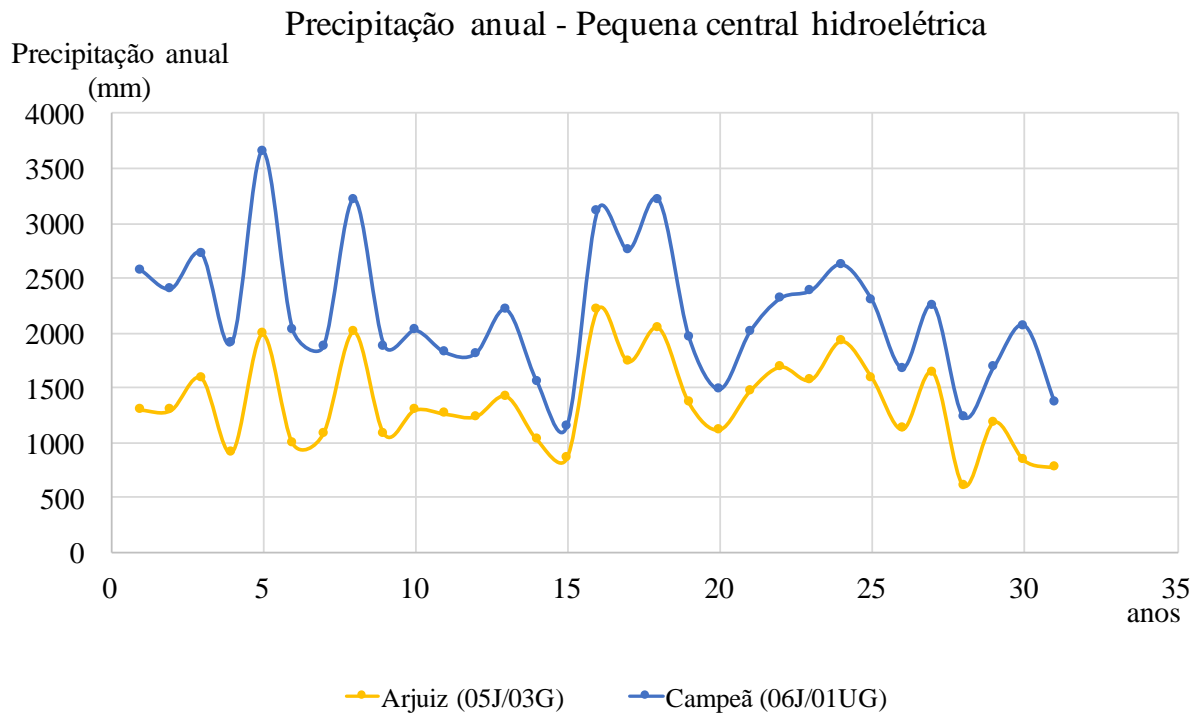


Figura 3. 6. Precipitações anuais nos postos com influência na bacia hidrográfica da central hidroelétrica do Sordo.

### 3.3. Regressão linear do escoamento anual sobre a precipitação média anual

A aplicação da equação da regressão do escoamento anual sobre a precipitação anual, descrita no **Capítulo 2 – Enquadramento. Conceitos teóricos**, a qualquer bacia hidrográfica em Portugal Continental é, por ventura, a forma mais rigorosa para o cálculo da altura do escoamento anual médio em bacias hidrográficas não monitorizadas, uma vez que exprime a dependência que se sabe existir entre o escoamento anual e a precipitação anual.

A equação de regressão calculada para uma dada bacia hidrográfica e um determinado período de tempo poderá ser utilizada para avaliar o escoamento anual nessa mesma bacia num período em que se conheça somente a precipitação. Todavia, e como é o caso, pode também ser utilizada para avaliar o escoamento anual, a partir da precipitação anual, numa outra bacia hidrográfica cujas características, à exceção da precipitação, sejam análogas à primeira [28].

Assim, pretende-se determinar a equação de regressão do escoamento anual sobre a precipitação anual para a bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Santa Marta do Alvão com vista a aplicar tal equação à precipitação anual média na bacia hidrográfica da PCH e, assim, avaliar o escoamento anual médio aí ocorrente.

Na Tabela A.3. apresentam-se os escoamentos anuais requeridos pelo estabelecimento da equação de regressão em vista. Tais escoamentos foram obtidos a partir dos registos dos caudais médios diários. Anota-se que não é apresentada a série de caudais médio diários dada a grande quantidade de informação que comporta e o espaço que para o efeito requereria. Por uma questão de sistematização de informação, incluiu-se na tabela os valores do escoamento anual médio e do caudal modular. As precipitações anuais ponderadas na bacia hidrográfica da estação hidrométrica necessárias ao estabelecimento da equação de regressão já foram antes incluídas na Tabela A.1.

Na Figura 3.7. representam-se os pares de valores precipitação anual, escoamento anual, conjuntamente com a equação de regressão linear a que conduzem e com o valor do correspondente coeficiente de determinação,  $R^2$ .

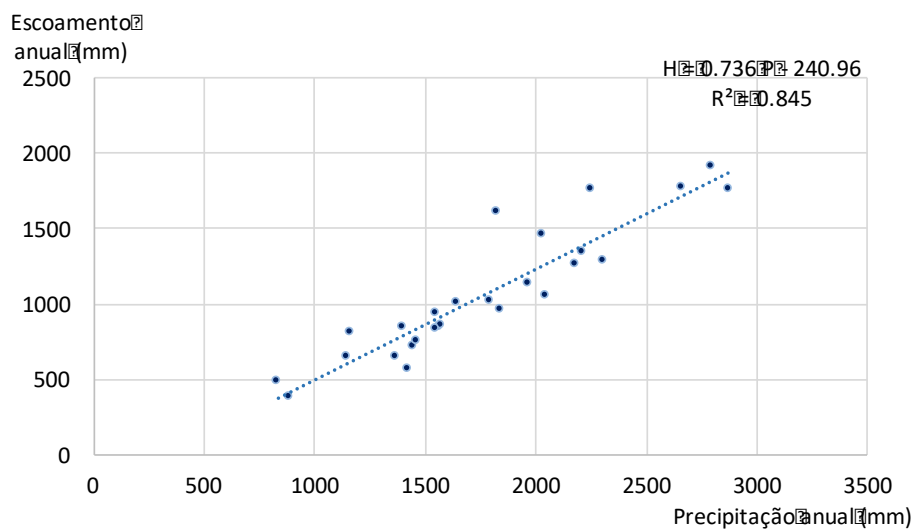


Figura 3.7. Estação hidrométrica de Sta. Marta do Alvão. Representação da equação de regressão linear entre o escoamento anual e a precipitação anual.

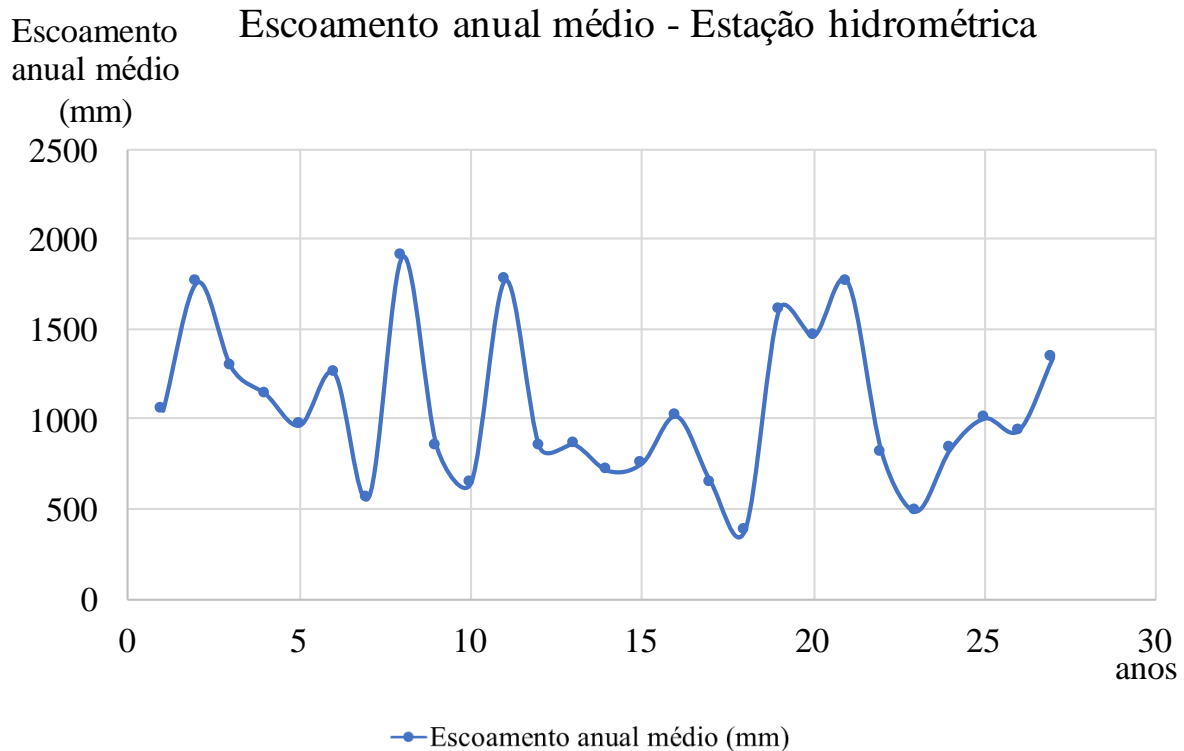


Figura 3.8. Estação hidrométrica de Sta. Marta do Alvão. Escoamentos anuais obtidos através do somatório dos caudais médios diários para cada ano.

A comparação da equação especificada na Figura 3.7. com a equação geral dada por 2.11 (subcapítulo 2.4.6) conduz ao valor de 0,736 para  $\alpha$  e de aproximadamente -241, para  $\beta$ . Por aplicação dessa equação à precipitação média anual na bacia hidrográfica da PCH, antes estimada em 1361 mm, obtém-se o escoamento anual médio nessa bacia de cerca de 761 mm. Para a área da bacia hidrográfica de 48 km<sup>2</sup> (Tabela 3.1) o correspondente caudal modular é de 1,11 m<sup>3</sup>/s.

Complementarmente, aplicaram-se os três modelos referenciados no subcapítulo 2.4.5, com obtenção dos resultados sistematizados na Tabela 3.5, que inclui a especificação da temperatura anual média estimada para a bacia hidrográfica, retirada de mapas apresentados no SNIRH. No caso do método de Quintela são indicados os dois valores extremos que decorrem dos tipos de solos considerados por esse autor. Concluiu-se, assim, que não obstante o seu carácter simplificado destes métodos, a média dos respetivos resultados aproxima razoavelmente a escoamento anual médio decorrente da equação de regressão, o que reforça a validade da adoção deste último escoamento.

Tabela 3. 5. Valores do escoamento anual através de diferentes métodos. Comparação do valor de escoamento anual obtido pela média aritmética dos três modelos com o valor do escoamento anual obtido pelo método da regressão linear. Dados dos elementos climáticos necessário na aplicação dos três modelos descritos no subcapítulo 2.4.5.

Aproveitamento Hidroelétrico do Sordo						
Elementos climáticos		Escoamento anual (mm)				
Precipitação média anual (mm)	Temperatura média anual (°C)	Mapa das isolinhas [1]	Fórmula de Turc [2]	Método de Quintela [3]	Média de [1] a [3]	Regressão linear H/P
1361	13,75	500	937	850-950	779	761

### 3.4. Transposição dos caudais médios diários

A transposição dos escoamentos anuais da bacia hidrográfica da estação hidrométrica para a bacia hidrográfica do caso de estudo é tanto mais rigorosa quanto mais próximas forem as alturas do escoamento anual médio naquelas bacias. Embora tal tenha sido de certa forma garantido quando da seleção da estação hidrométrica (por critério de proximidade geográfica), os registos e resultados antes apresentados conduzem à altura do escoamento anual médio de cerca de 1061,7 mm na estação hidrométrica (média dos valores apresentados na Tabela A.3.) e de 761 mm, no caso de estudo. Uma vez que estão em causa valores consideravelmente elevados, de acordo com M. M. Portela “espera-se que os regimes hidrológicos subjacentes quando devidamente adimensionalizados sejam próximos, não obstante a aparente diferença entre valores daquela altura” [29].

Calculado o escoamento anual na bacia hidrográfica do caso de estudo e aplicando modelo de regressão linear entre escoamento anual e a precipitação anual (item 2.4.6), a transposição dos caudais médios diários obtidos através da estação hidrométrica para a central hidroelétrica é possível. A equação 2.21 é utilizada na transposição de tais caudais, tendo em consideração os caudais modulares para ambas as bacias hidrográficas, sendo que o caudal modular da central hidroelétrica é de 1,11 m<sup>3</sup>/s e o caudal modular da secção monitorizada é obtido através da média de todos os caudais médios diários dessa mesma secção.

Como referido anteriormente, os caudais médios diários de ambas as secções não são apresentados no corpo principal da dissertação dada a elevada quantidade de informação e o espaço ocupada que requereria.

Os caudais médios diários estimados para o caso de estudo servem de base para determinar a produção de energia e a respetiva receita acumulada que advém da variabilidade hidrológica presente na série histórica global. Este estudo é realizado com recurso a um algoritmo de simulação da exploração do aproveitamento à escala diária, que foi desenvolvido especificamente para o efeito.

### 3.5. Simulação computacional

Com base nos resultados precedentes, e com recurso a um algoritmo de simulação computacional, desenvolvido através do programa MATLAB, estimou-se a energia produzida dia-a-dia e, por acumulação, anualmente, através da utilização dos caudais médios diários. O cálculo da produção de energia e a respetiva receita anual foi realizado considerando diversos pressupostos, mencionados no subcapítulo 2.4.7. Por acumulação dessa mesma energia e atualização das receitas anuais para um período alargado de anos obtém-se a correspondente receita acumulada atualizada que contém em si a informação que advém da variabilidade hidrológica. Os resultados obtidos são apresentados no **Capítulo 4 – Apresentação dos resultados**.

Página deixada em branco intencionalmente

## Capítulo 4 – Apresentação dos resultados

Dando seguimento aos capítulos anteriores, referentes aos procedimentos e modelos implementados e respetivas metodologias para a obtenção da energia produzida e conseqüentemente da receita acumulada atualizada, bem como identificado o caso de estudo a que os mesmos foram aplicados, apresentam-se, de seguida, os resultados obtidos para o mesmo e a correspondente análise.

### 4.1. Análise dos resultados

As receitas acumuladas atualizadas adimensionais, obtidas por aplicação das equações incluídas no subcapítulo 2.5.3, são apresentadas nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. e nas Tabelas A.4 e A.5, referentes aos períodos de concessão de 15 e 25 anos, respetivamente. Como já antes mencionando, admitiram-se caudais de dimensionamento variáveis entre  $1,6 \leq Q_{\max}/Q_{\text{mod}} \leq 2,4$ , para taxas de atualização de 4% e 10%. Cada valor de uma das tabelas representa a receita acumulada atualizada adimensional no período de 15 ou de 25 anos, consoante o caso, com início nos sucessivos anos do período global. Assim, tendo em conta que a dimensão da amostra disponível é de 56 anos, é possível obter 42 e 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais, respetivamente. Tais receitas foram posteriormente caracterizadas mediante aplicação de critérios de análise estatística, objeto do subcapítulo 2.6.

Quando, na posse de uma amostra de uma dada variável, não se conseguem prever as suas realizações futuras dada a multiplicidade de fatores que as condicionam, está-se perante uma variável aleatória independente. Estão nestas circunstâncias as receitas acumuladas atualizadas adimensionais, uma vez que a receita num dado ano não depende da receita no ano anterior e em nada condiciona a receita do ano seguinte.

Estando-se perante uma variável aleatória, pode-se recorrer à sua análise por aplicação de procedimentos de análise estatística. Para tal é necessário postular previamente leis de distribuição previsivelmente apropriadas e identificar a lei mais adequada. De acordo com essa lei, é possível estimar seguidamente as receitas acumuladas atualizadas adimensionais para diferentes probabilidades de não-excedência.

As variáveis hidrológicas apresentam normalmente uma assimetria positiva, que parece ser tanto maior quanto menor for o intervalo de tempo a que se referem, e que leva a considerar a aplicação de leis estatísticas assimétricas. Foi este também o caso das receitas acumuladas atualizadas adimensionais [30]. Por tal motivo, consideraram-se como candidatos a modelos de distribuição as leis Normal, log-Normal e de Pearson III.

Apesar do ajustamento visual ser um procedimento subjetivo, permite aceitar ou rejeitar com bastante confiança a hipótese de um certo modelo de distribuição de probabilidades [30]. Para o efeito procedeu-se à representação gráfica dos valores da amostra e das estimativas de quantis pelas diferentes leis estatísticas, em função das respetivas normais reduzidas,  $Z$ .

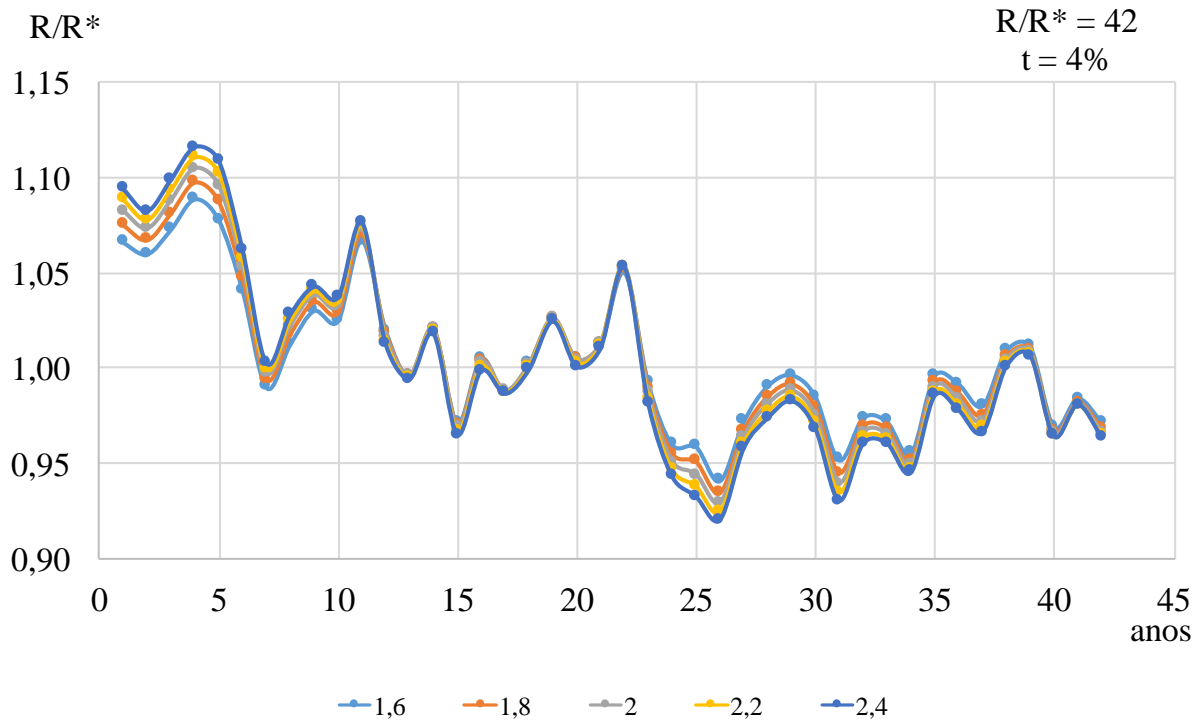


Figura 4. 1. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 15 anos, para diferentes caudais de dimensionamento e taxa de atualização de 4%.

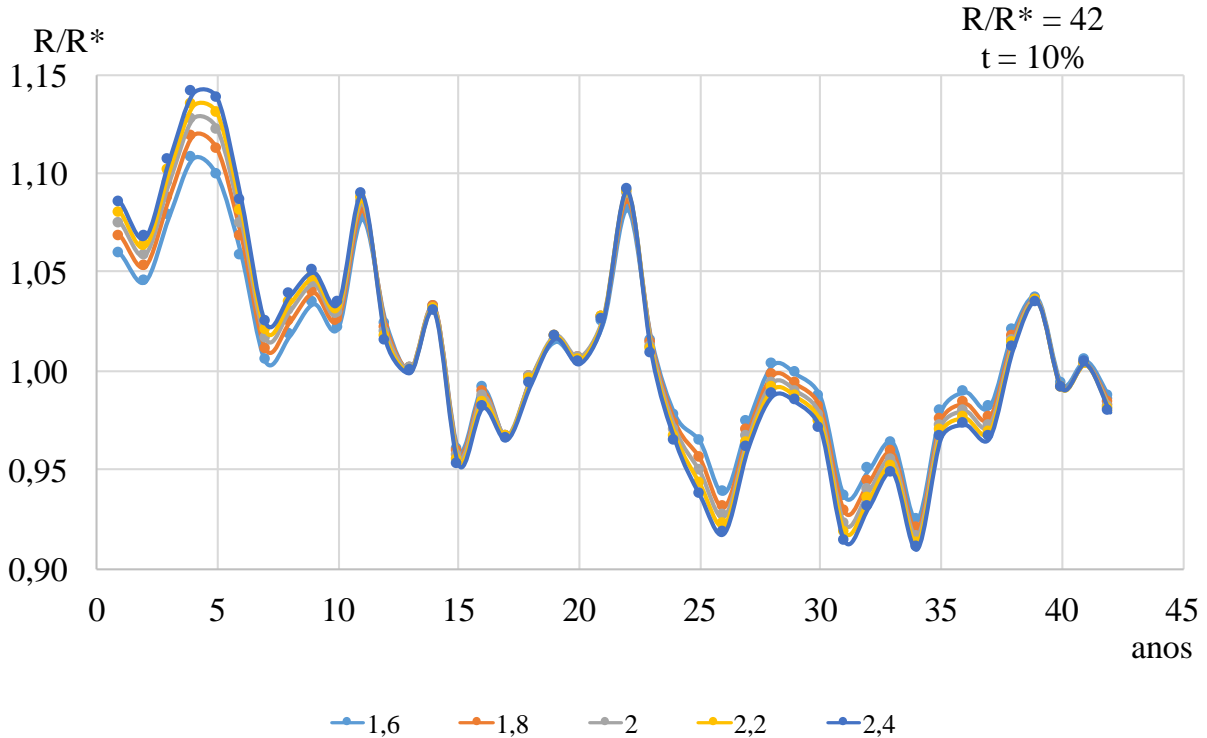


Figura 4.2. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 15 anos, para diferentes caudais de dimensionamento e taxa de atualização de 10%.

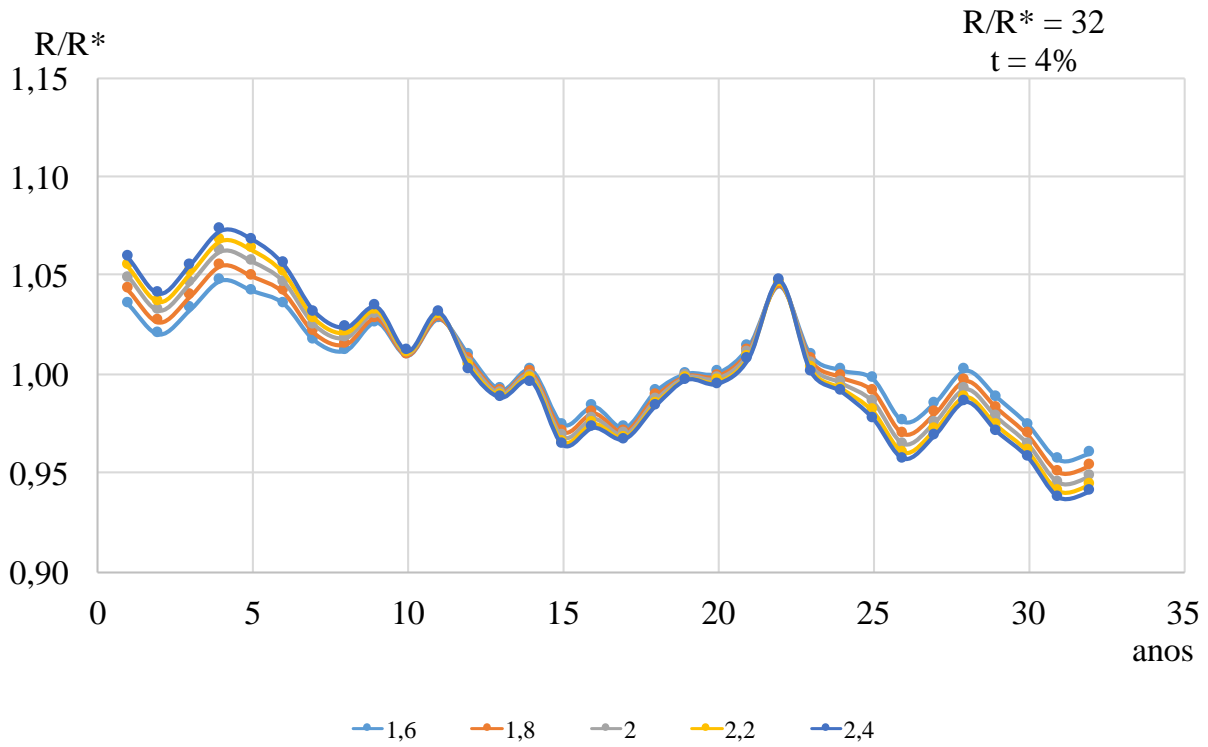


Figura 4. 3. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 25 anos, para diferentes caudais de dimensionamento e taxas de atualização de 4%.

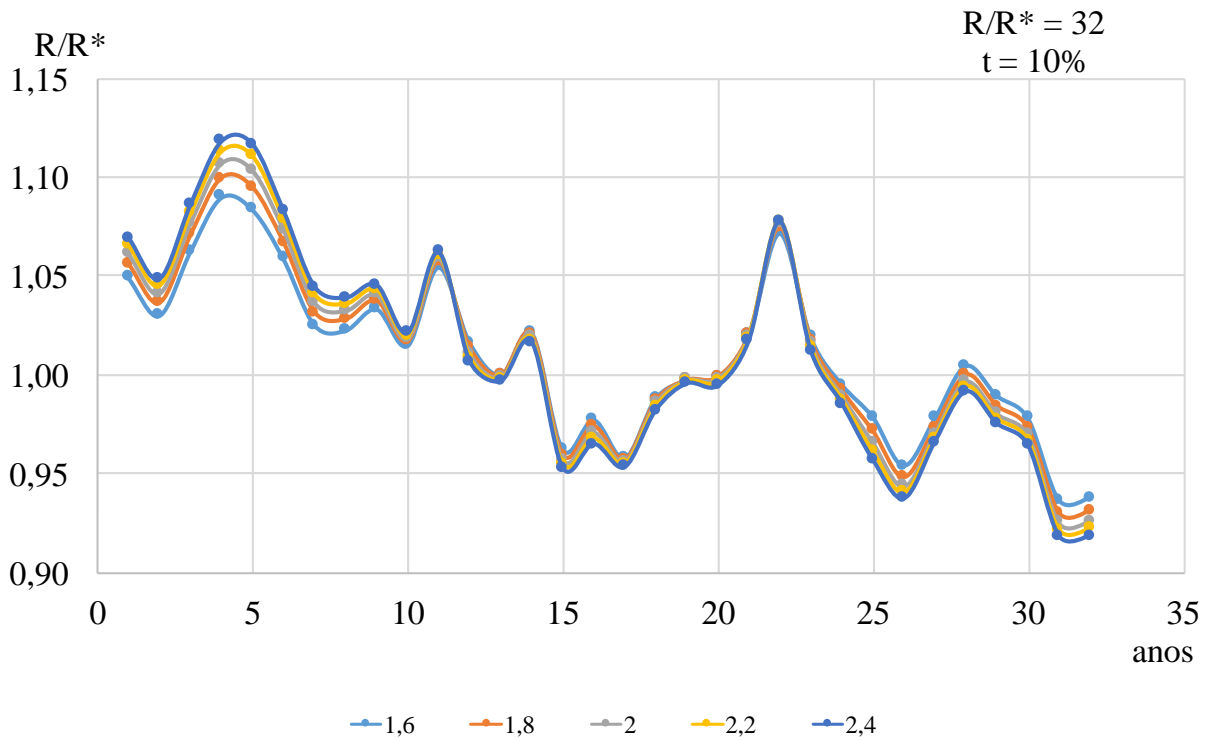


Figura 4. 4. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 25 anos, para diferentes caudais de dimensionamento e taxa de atualização de 10%.

Para a representação dos valores da amostra é necessário determinar as probabilidades empíricas de não-excedência que lhes correspondem. Para o efeito, os valores da amostra são ordenados por ordem crescente, atribuindo a cada valor um número de ordem sequencial,  $i$ , que varia entre 1 e  $N$  inclusivamente, sendo que  $N$  designa a dimensão da amostra ( $N = 56$  no caso da aplicação efetuada). A Figura A.3 ilustra um exemplo dos quadros utilizados para a análise estatística.

#### 4.1.1. Ajustamento visual das leis estatísticas

A análise estatística das receitas acumuladas atualizadas adimensionais em períodos de 15 e de 25 anos foi realizada tendo por base os respetivos valores constituídos para três períodos diferentes: o global de  $N=56$  anos (amostra constituída pelas receitas da Tabela A.4 e Tabela A.5), a metade inicial desse período (primeira metade destas tabelas) e a metade final do mesmo (segunda metade das mesmas tabelas). A divisão por períodos possibilita uma análise mais aprofundada à variabilidade existente nas séries.

As Figuras que se seguem representam quer as anteriores amostras, quer as leis estatísticas que lhes foram ajustadas para os caudais de dimensionamento de  $Q_{\max}/Q_{\text{mod}}$  de 1,6, 2,0 e 2,4 e para a taxa de atualização de 4%. Para o período de concessão de 15 anos, a Figura 4.5 refere-se aos 42 valores das receitas acumuladas atualizadas adimensionais que é possível constituir com base nos 56 anos de registos, a Figura 4.6, aos 21 valores iniciais dessas receitas e, por fim, a Figura 4.7 aos 21 valores finais das mesmas receitas.

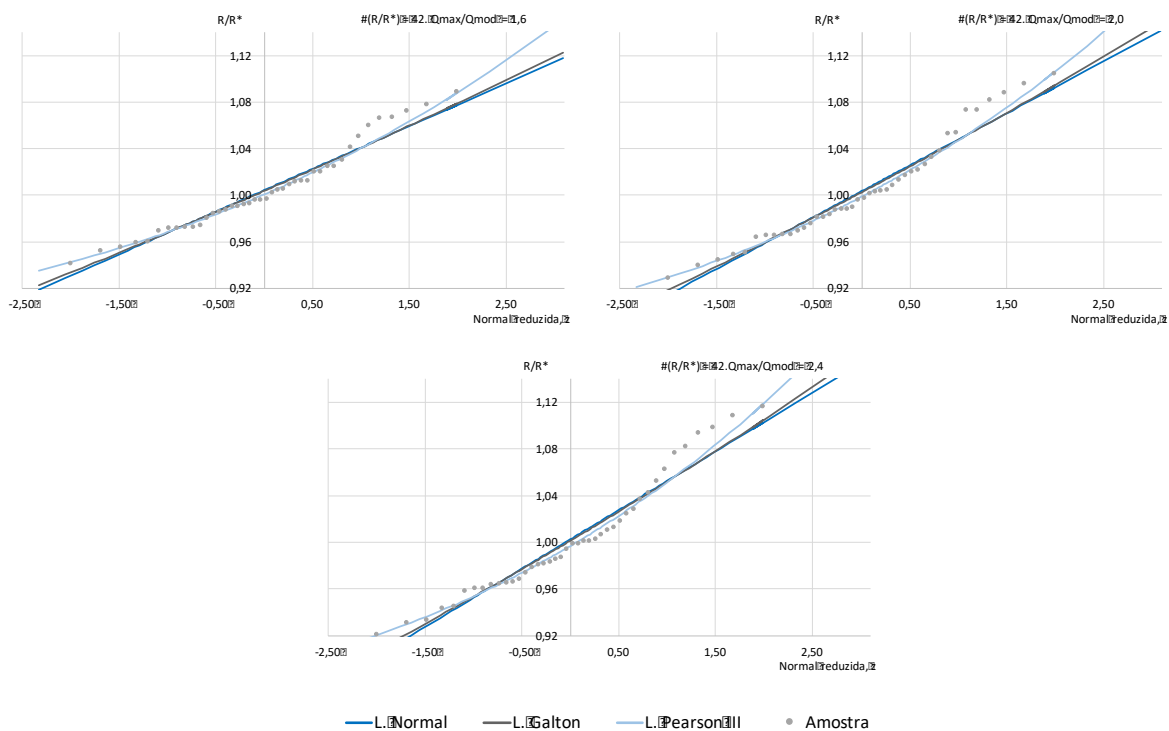


Figura 4.5. Amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{\max}/Q_{\text{mod}}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

## Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

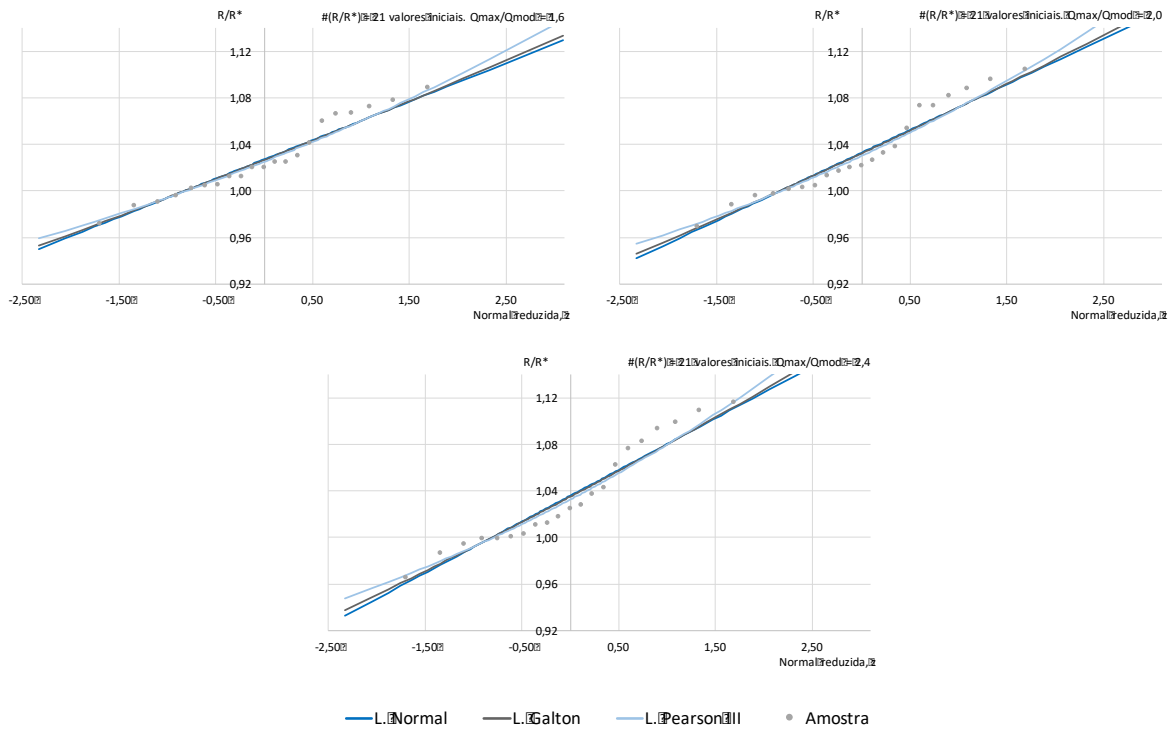


Figura 4.6. 21 valores iniciais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{max}/Q_{mod}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

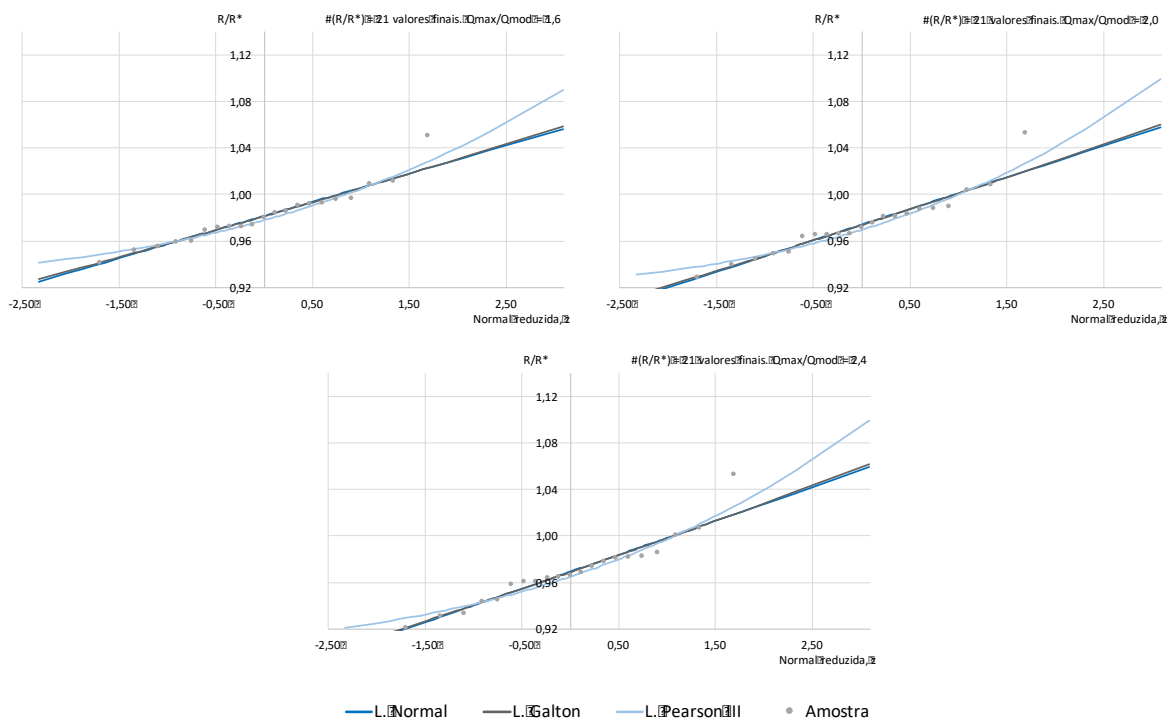


Figura 4.7. 21 valores finais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{max}/Q_{mod}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

As Figuras anteriores indicam que a distribuição de Pearson III é a que apresenta melhor ajustamento visual, sendo que tal particularmente evidente na Figura 4.7.

As Figuras que se seguem contêm resultados em tudo equivalentes aos das três Figuras precedentes, mas para a taxa de atualização de 10%.

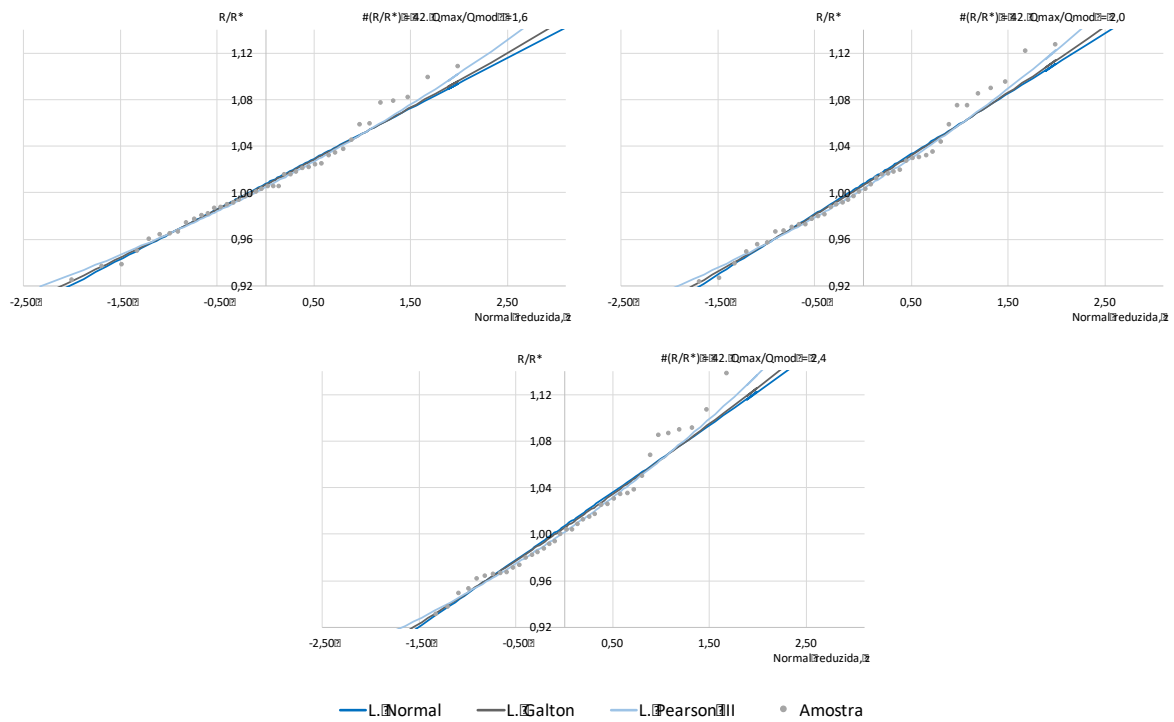


Figura 4.8. Amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{\max}/Q_{\text{mod}}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

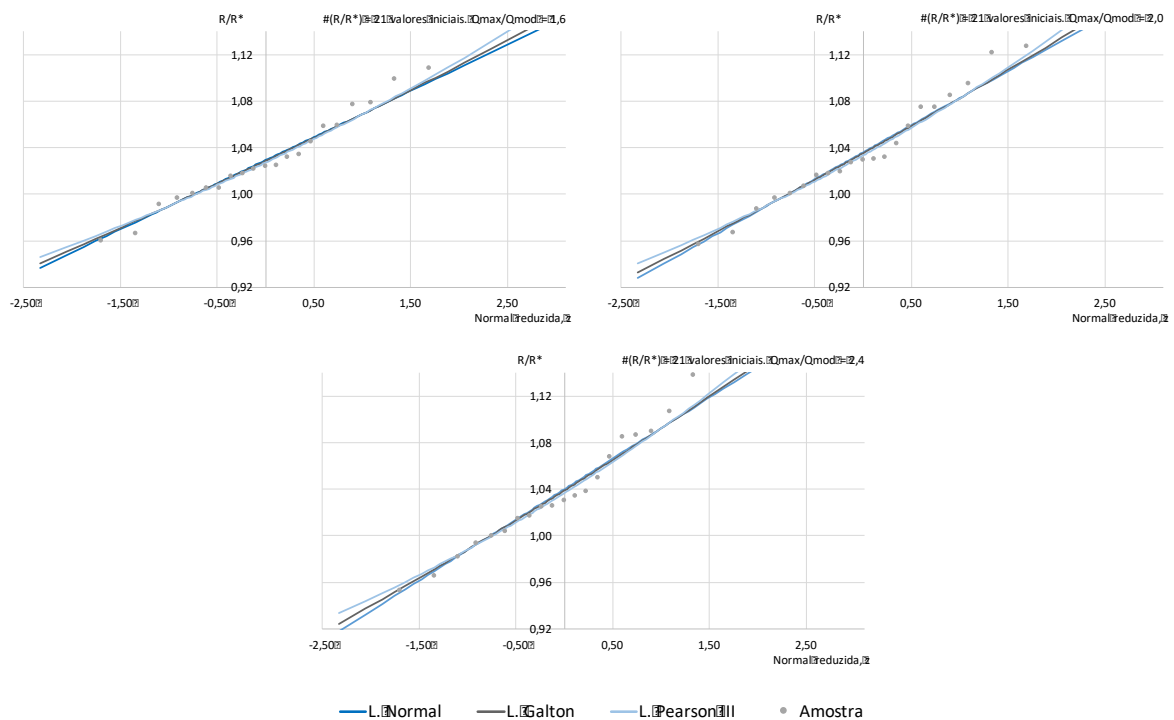


Figura 4.9. 21 valores iniciais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{\max}/Q_{\text{mod}}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

## Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

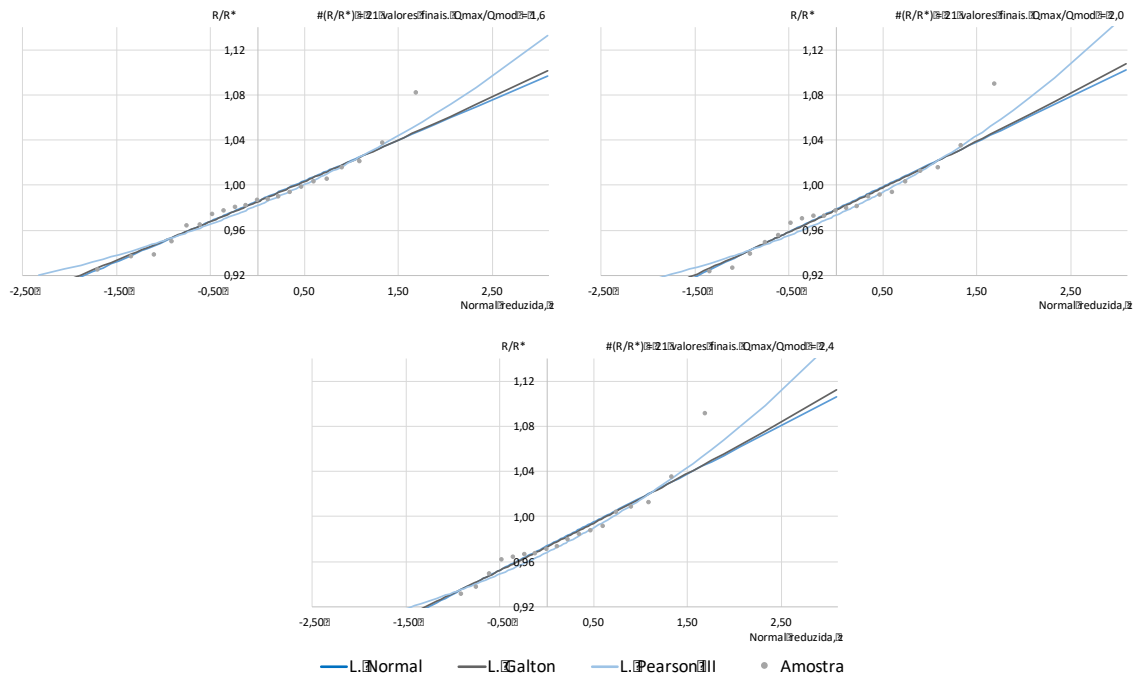


Figura 4.10. 21 valores finais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{\max}/Q_{\text{mod}}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

Apesar de na Figura 4.8 e Figura 4.9 não ser perceptível à primeira vista qual a lei a ser aplicada, a Figura 4.1010 destaca que a lei Pearson III se ajusta a esta amostra, pelo que foi adotada nas restantes duas situações.

O ajustamento das leis estatísticas foi também realizado para o período de concessão de 25 anos e para as taxas de atualização de 4% (Figura 4.11 a Figura 4.13) e de 10% (Figura 4.14 a Figura 4.16). Anota-se que para aquele período de concessão, o número de receitas acumuladas atualizadas adimensionais é de 32, quando constituídas a partir da amostra em  $N = 56$  anos, e de metade desse valor, nas subamostras inicial e final.

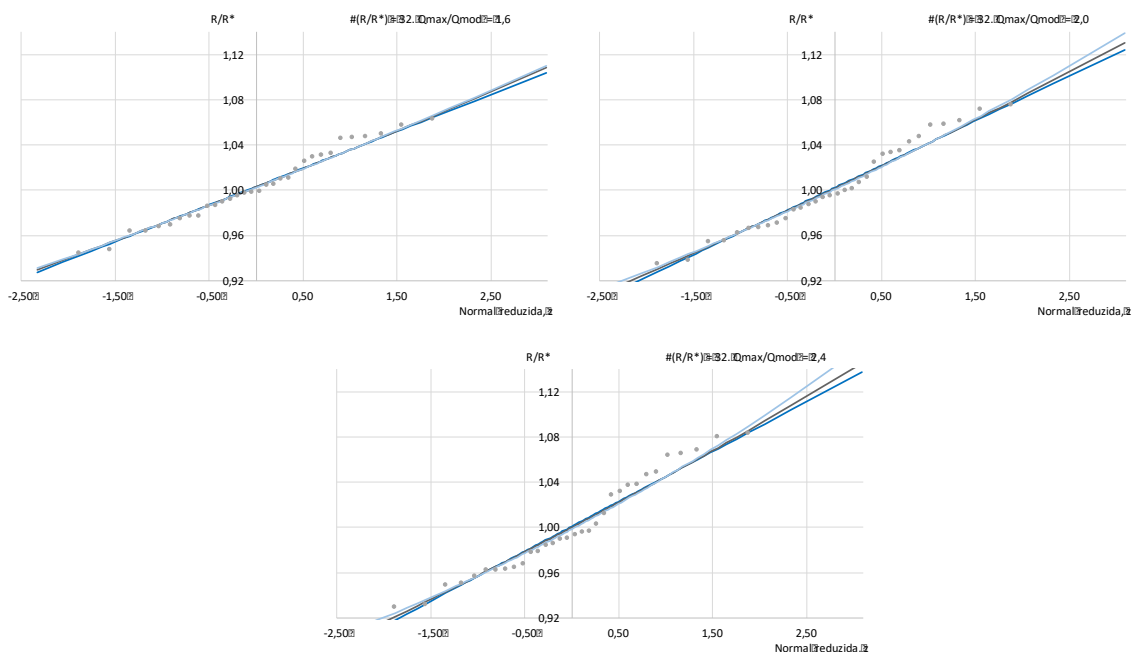


Figura 4.11. Amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{\max}/Q_{\text{mod}}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

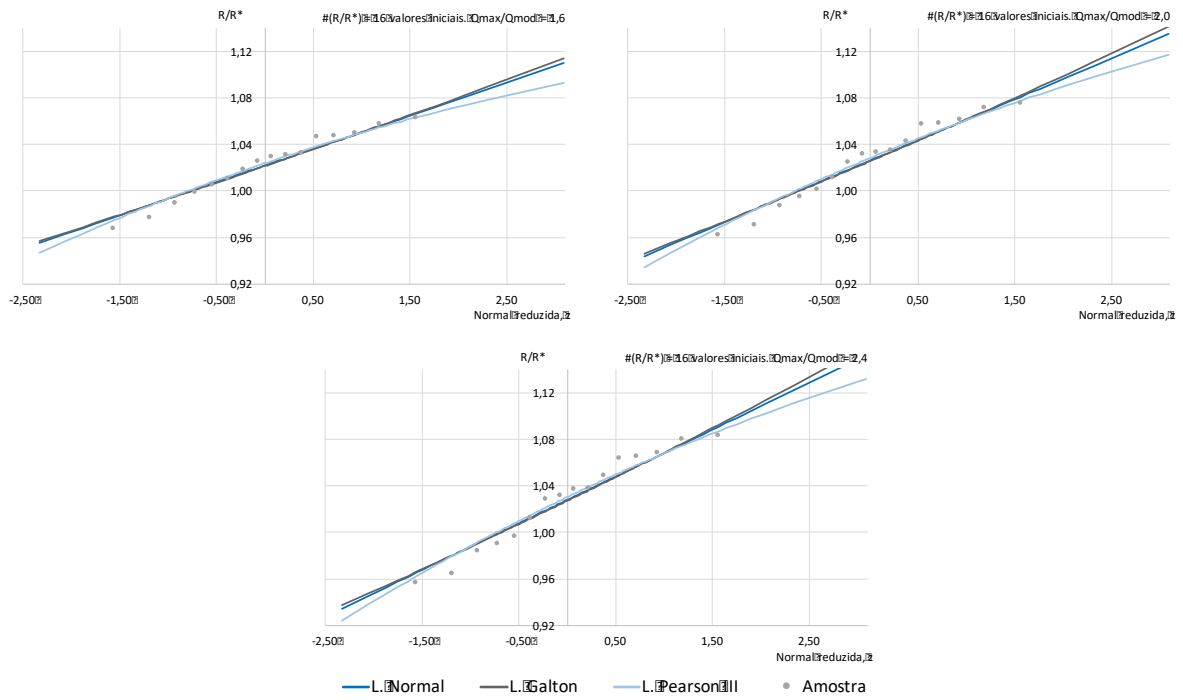


Figura 4.12. 16 valores iniciais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{max}/Q_{mod}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

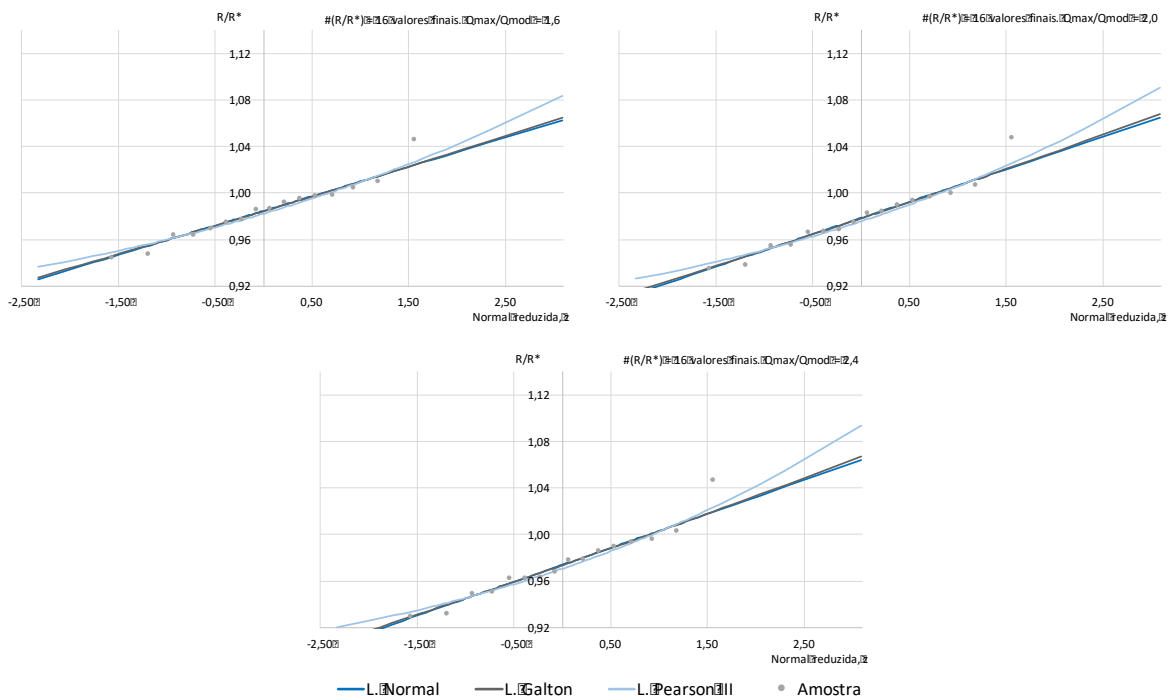


Figura 4.13. 16 valores finais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{max}/Q_{mod}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

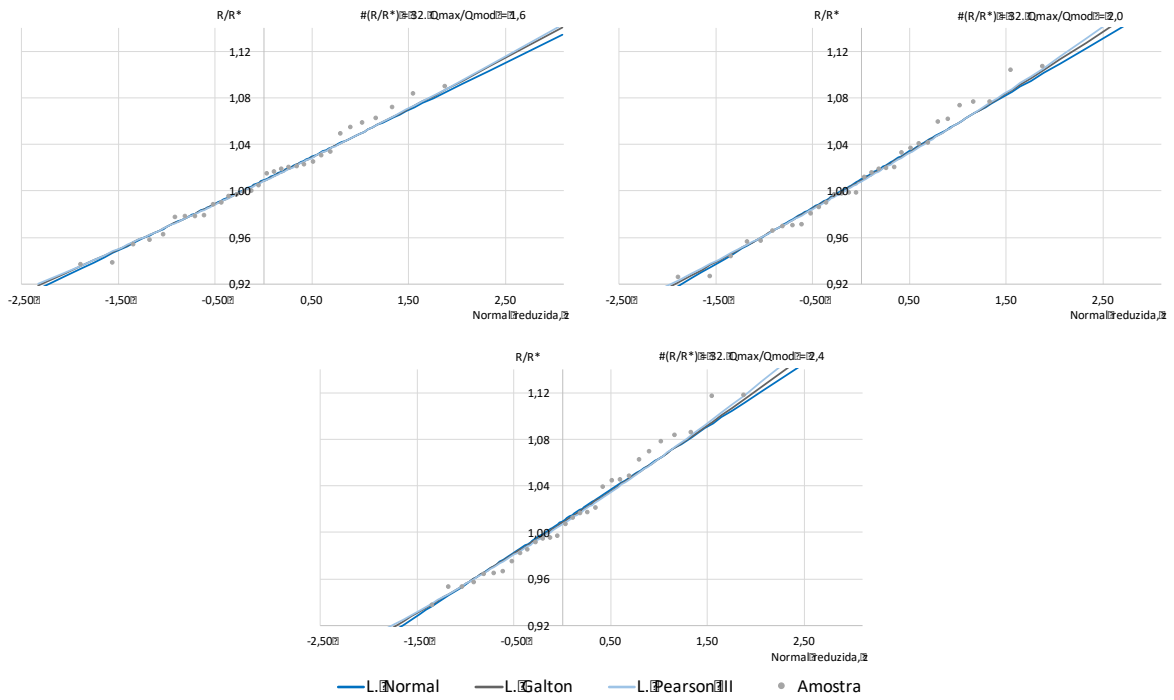


Figura 4.14. Amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{\max}/Q_{\text{mod}}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

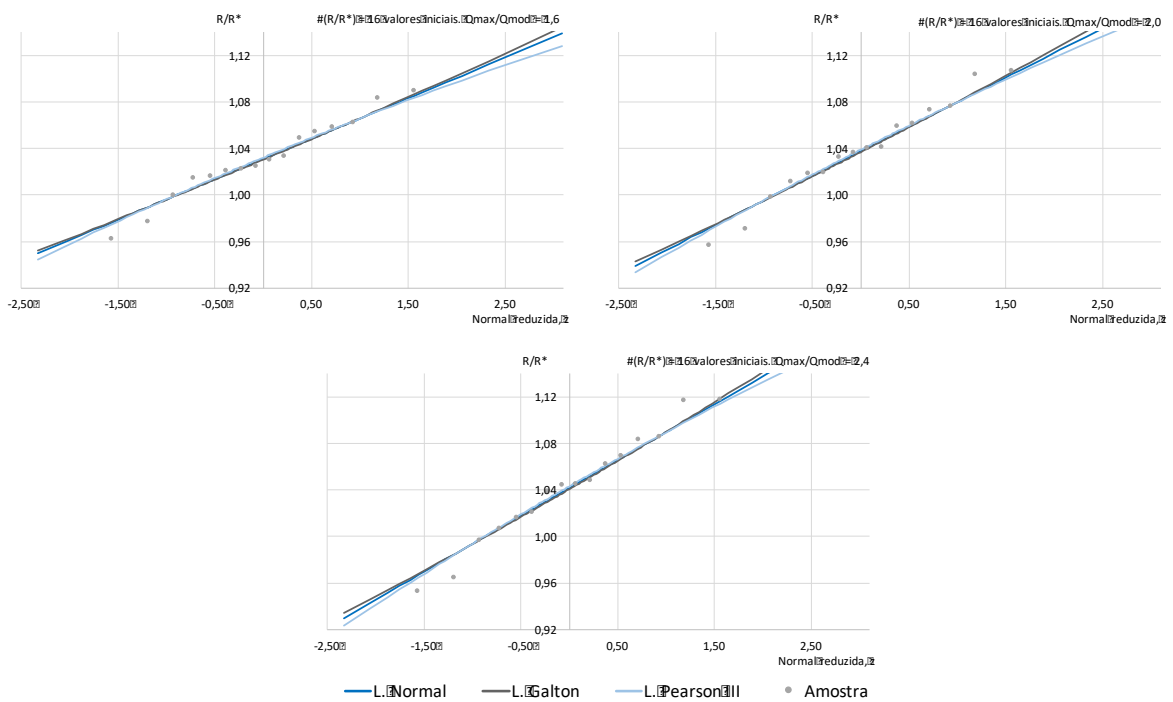


Figura 4.15. 16 valores iniciais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{\max}/Q_{\text{mod}}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

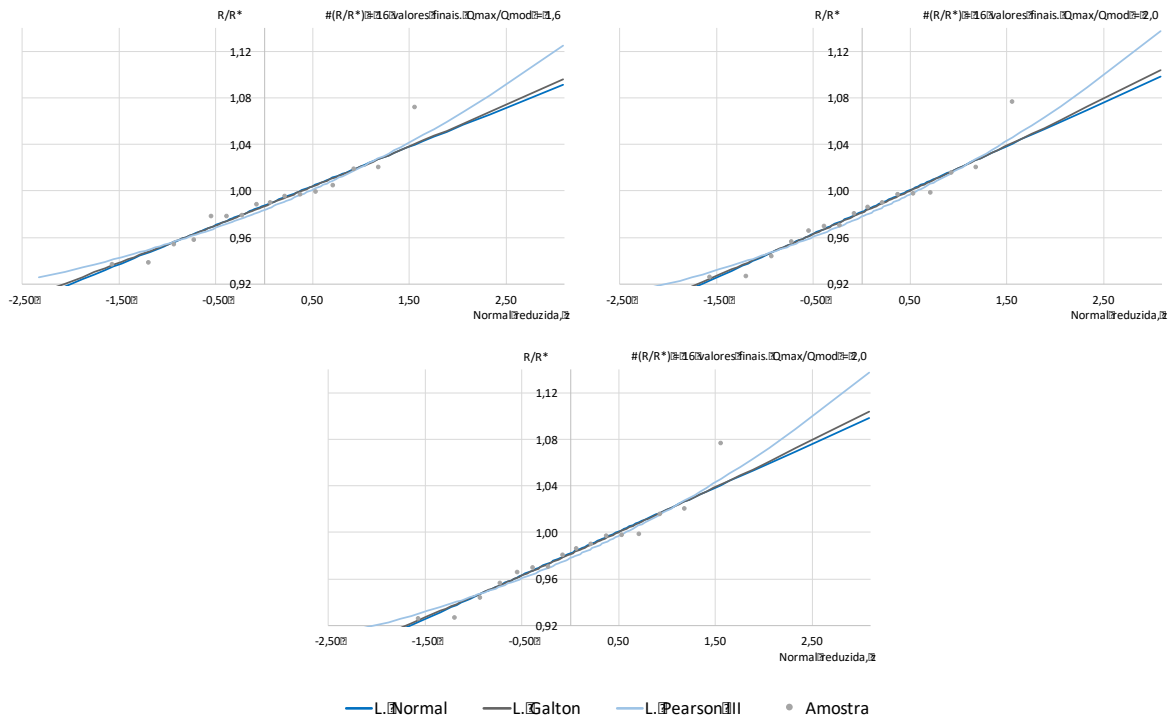


Figura 4.16. 16 valores finais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Ajustamento das leis estatísticas para os valores de relação  $Q_{max}/Q_{mod}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

A Figura 4.12 e Figura 4.15 apresentam uma assimetria negativa. Isto significa que, de acordo com a equação 2.54, se os valores da amostra inferiores à média da mesma estiverem relativamente muito mais afastados do que os superiores, os cubos dos desvios negativos irão prevalecer sobre os positivos e o coeficiente de assimetria será negativo.

A Figura 4.12 e a Figura 4.13 indicam que a lei Pearson III se ajusta às amostras. É também este o caso da Figura 4.1111, apesar de tal não ser tão perceptível para o caudal de dimensionamento de 1,6.

Na Figura 4.14 e Figura 4.15 não é tão facilmente identificada a lei que melhor se ajusta aos valores das amostras. Não obstante, é também aplicável a lei Pearson III, por ser, ainda assim, a que tem um melhor ajustamento face às restantes. Na Figura 4.16 identifica-se, mais uma vez, a lei Pearson III como a adotar.

Desta forma, foi possível reconhecer que, globalmente, a distribuição estatística que melhor se ajustou aos valores das receitas acumuladas atualizadas adimensionais em período de 15 e de 25 anos foi a lei de Pearson III, sendo tal opção mais evidente nos gráficos que representam as últimas sequências daquelas receitas. Sendo assim, prosseguiu-se a análise tendo por base tal lei.

### 4.1.2. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para diferentes probabilidades de não-excedência

Tendo-se optado pela lei de Pearson III, avançou-se com a estimação de receitas acumuladas atualizadas adimensionais para diferentes probabilidades de não-excedência,  $F(x)$ . Os resultados assim obtidos estão sintetizados do seguinte modo:

- Figura 4.17 e Figura 4.18 – taxa de atualização de 4% e período de concessão de 15 anos.
- Figura 4.199 e Figura 4.20 – taxa de atualização de 10% e período de concessão de 15 anos.
- Figura 4.21 e Figura 4.22 – taxa de atualização de 4% e período de concessão de 25 anos.
- Figura 4.23 e Figura 4.24 – taxa de atualização de 10% e período de concessão de 25 anos.

Na primeira Figura de cada um dos anteriores conjuntos de duas Figuras (ou seja, na Figura 4.17, Figura 4.19, Figura 4.21 e Figura 4.23) representam-se as receitas acumuladas atualizadas adimensionais,  $R/R^*$ , em função do caudal de dimensionamento, também expresso adimensionalmente,  $Q_{max}/Q_{mod}$ , para probabilidades de não-excedência,  $F(x)$ , variáveis entre 1,0% e 99,9%. Analogamente ao procedimento antes adotado, tal figura contém três diagramas obtidos tendo por base as receitas decorrentes da consideração do período de registos de 56 anos (em número de 42 e de 32 para os períodos de concessão de 15 e de 25 anos) e a primeira metade e a última metade dessas receitas (em número de 21 e 16 para os mesmos períodos de concessão).

Nas restantes Figura 4.18, Figura 4.20, Figura 4.22 e Figura 4.24 as receitas acumuladas atualizadas adimensionais,  $R/R^*$ , foram representadas em função das probabilidades de não-excedência,  $F(x)$ , para caudais de dimensionamento,  $Q_{max}/Q_{mod}$ , variáveis entre 1,6 e 2,4. De igual modo, foram obtidos resultados tendo por base 42 (e 32) receitas acumuladas atualizadas adimensionais, e as subséries inicial e final dessas receitas, constituídas por 21 (e 16) valores.

As tabelas que correspondem aos gráficos das anteriores Figuras, para os cinco caudais de dimensionamento são apresentadas nos Anexos e sistematizam os resultados obtidos através da lei de Pearson III para as diferentes probabilidades de não-excedência. A tabela 4.1 exemplifica esses resultados para o caudal de dimensionamento de 1,6  $Q_{mod}$ , a taxa de atualização de 4% e o período de concessão de 15 anos.

Tabela 4. 1. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 1,6$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	#(R/R*) = 42	#(R/R*) = 21 valores iniciais	#(R/R*) = 21 valores finais
1,6	1,0044	0,0368	0,6037	1,0884	0,9411	0,100	0,9603	0,9862	0,9540
						0,200	0,9729	0,9989	0,9610
						0,300	0,9828	1,0085	0,9668
						0,400	0,9918	1,0170	0,9723
						0,500	1,0007	1,0252	0,9779
						0,600	1,0101	1,0336	0,9840
						0,700	1,0207	1,0430	0,9911
						0,800	1,0337	1,0543	1,0001
						0,900	1,0532	1,0707	1,0140
						0,990	1,1060	1,1130	1,0540
						0,999	1,1508	1,1470	1,0901

Na tabela anterior, as simbologias Máx e Min referem-se ao máximo e ao mínimo das 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais em períodos de 15 anos, calculadas tendo por base a amostra de  $N = 56$  anos.

A tabela contém ainda algumas das características estatísticas dessas 42 receitas. Para diferentes probabilidades de não-excedência, são ainda apresentadas as estimativas fornecidas pela lei de Pearson III aplicada às anteriores 42 receitas, bem como à metade inicial e à metade final dos seus valores.

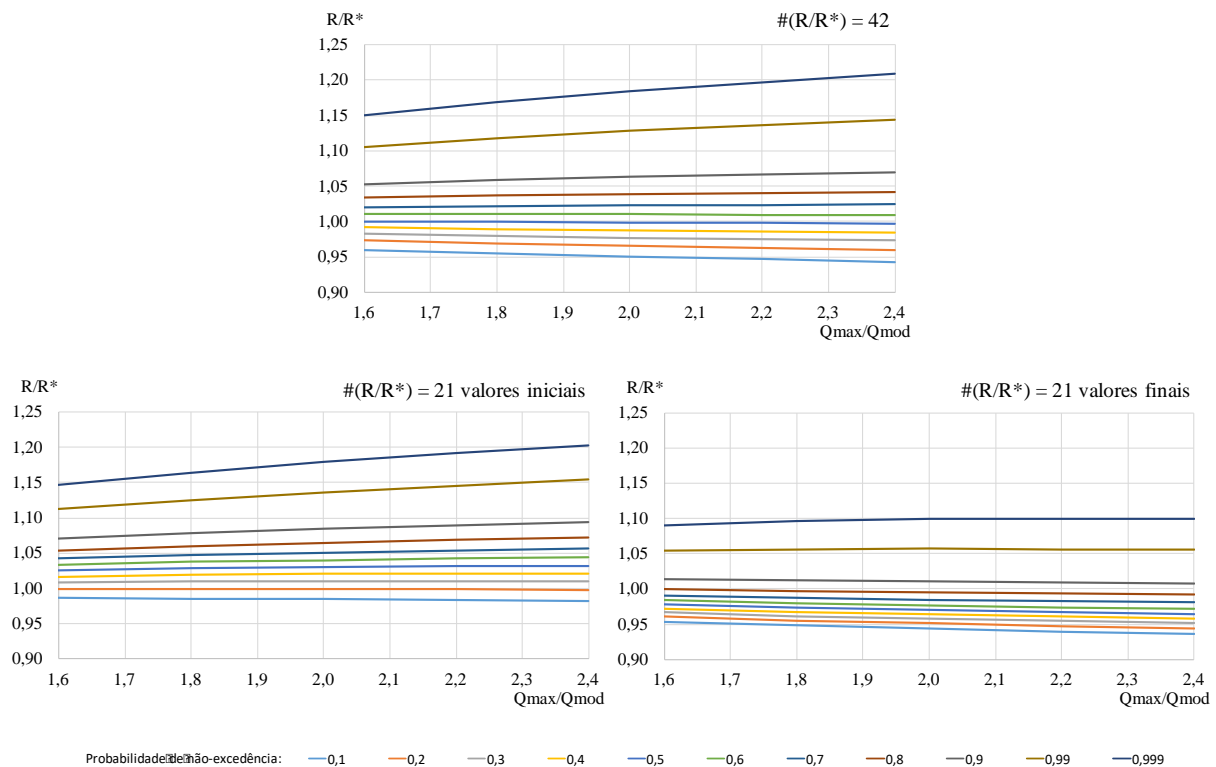


Figura 4.17. Amostras de 42 e de 21 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Receitas em função do caudal de dimensionamento,  $Q_{max}/Q_{mod}$  para diferentes probabilidades de não-excedência.

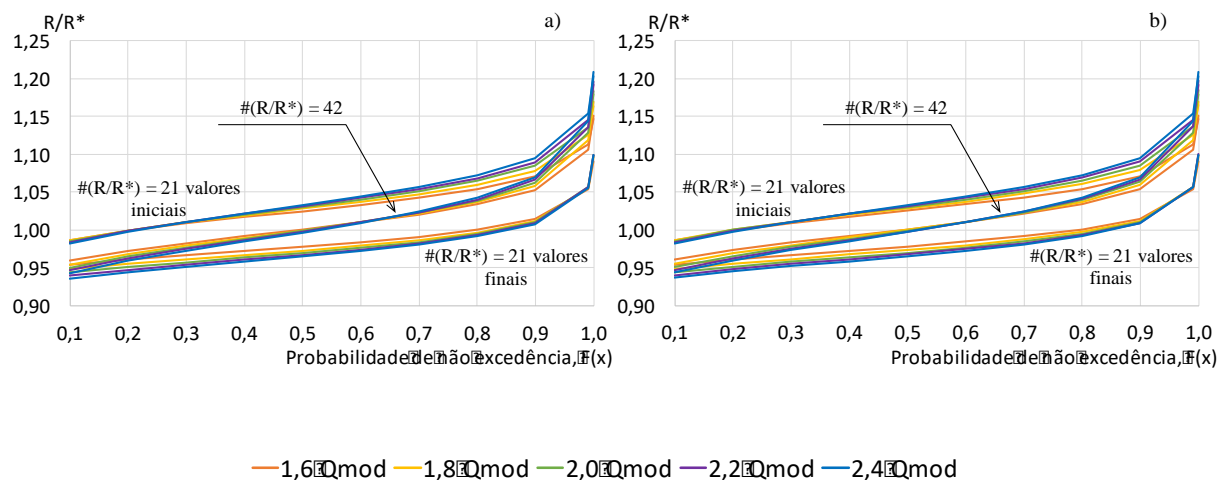


Figura 4.18. Amostras de 42 e de 21 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Receitas em função da probabilidade de não-excedência para: a) para os cinco valores da relação  $Q_{max}/Q_{mod}$  indicados na legenda e b) detalhe, para os valores da relação de  $Q_{max}/Q_{mod}$  de 1.6, 2.0 e 2.4.

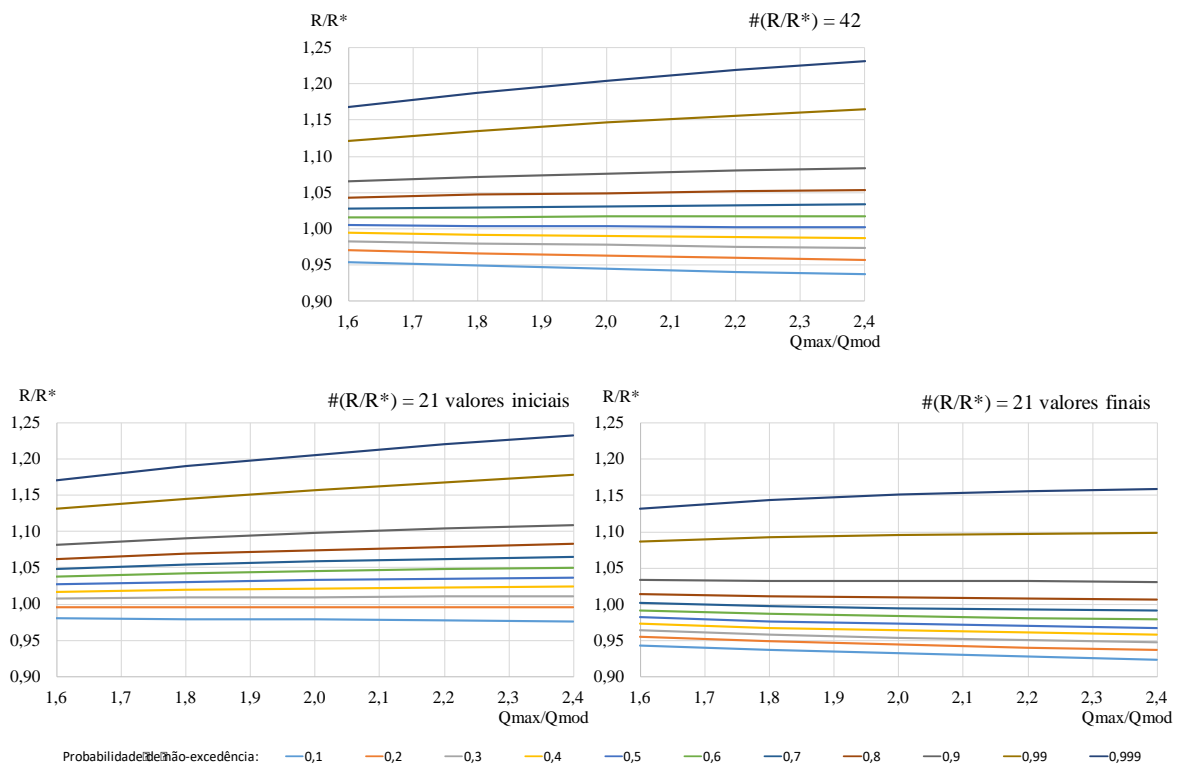


Figura 4.19. Amostras de 42 e de 21 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Receitas em função do caudal de dimensionamento,  $Q_{max}/Q_{mod}$  para diferentes probabilidades de não-excedência.

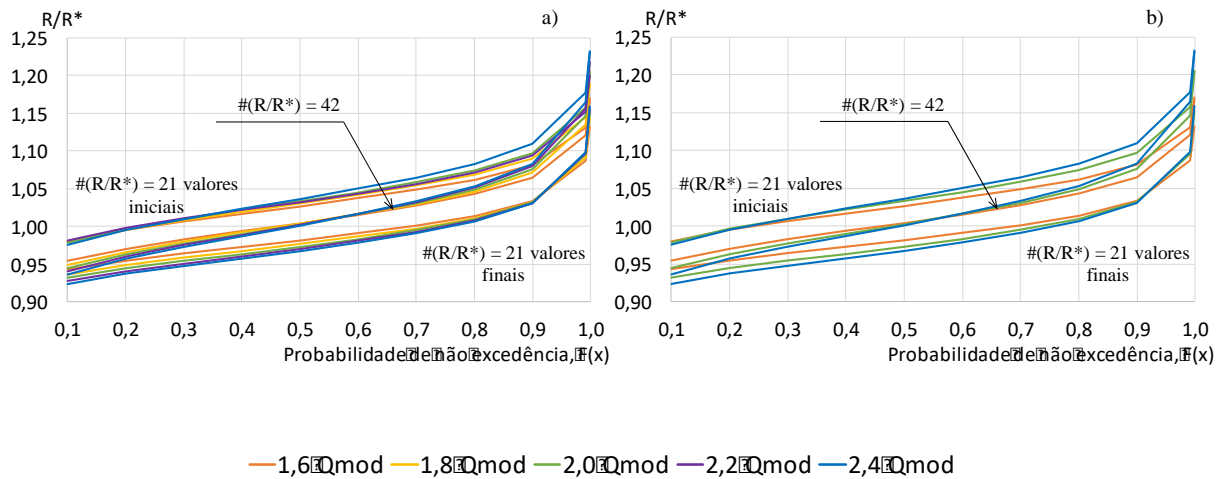


Figura 4.20. Amostras de 42 e de 21 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Receitas em função da probabilidade de não-excedência para: a) para os cinco valores da relação  $Q_{max}/Q_{mod}$  indicados na legenda e b) detalhe, para os valores da relação de  $Q_{max}/Q_{mod}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

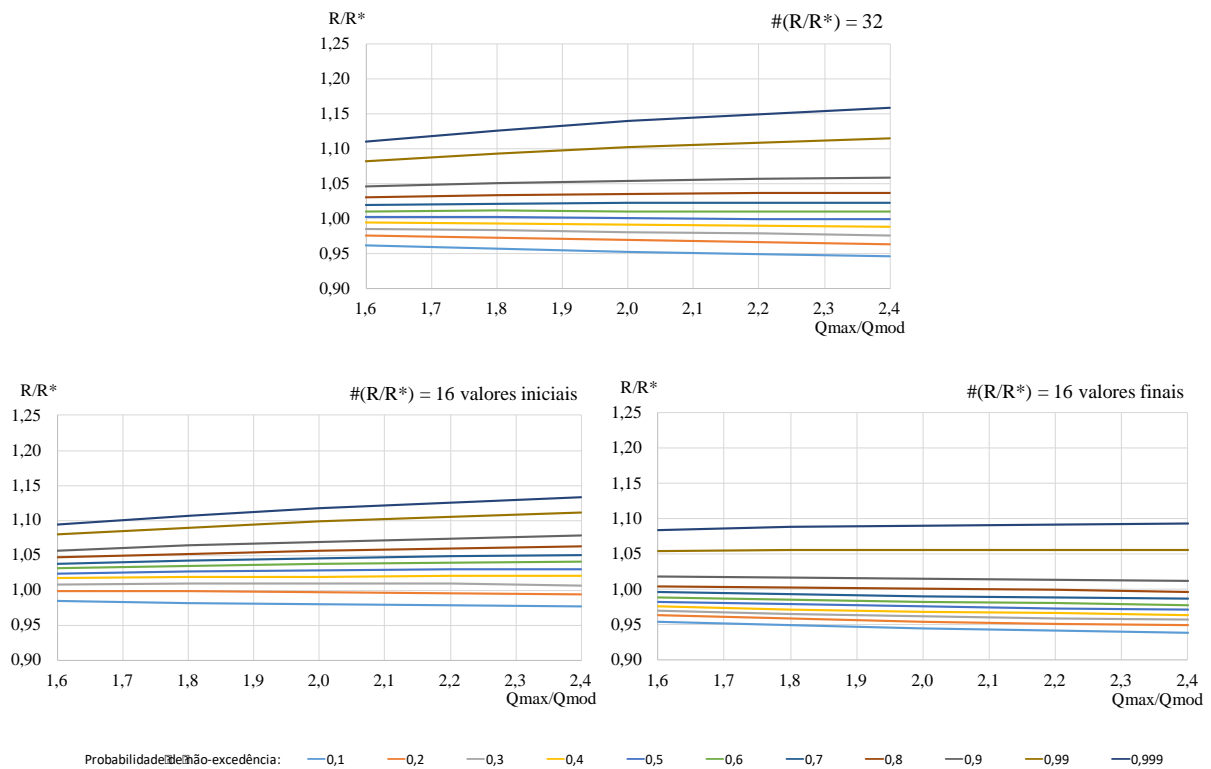


Figura 4.21. Amostras de 32 e de 16 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Receitas em função do caudal de dimensionamento,  $Q_{max}/Q_{mod}$  para diferentes probabilidades de não-excedência.

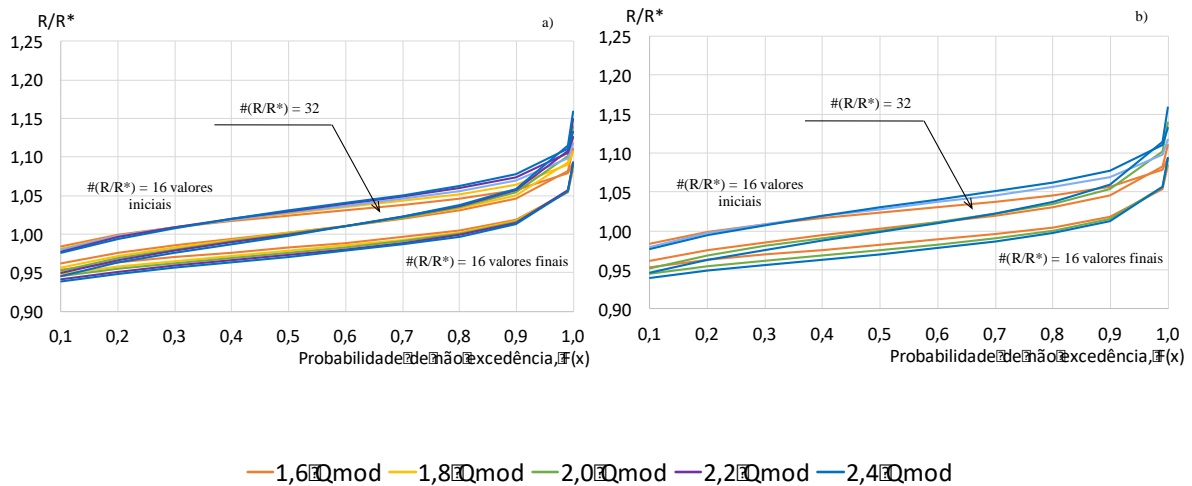


Figura 4.22. Amostras de 32 e de 16 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 4%. Receitas em função da probabilidade de não-excedência para: a) para os cinco valores da relação  $Q_{max}/Q_{mod}$  indicados na legenda e b) detalhe, para os valores da relação de  $Q_{max}/Q_{mod}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

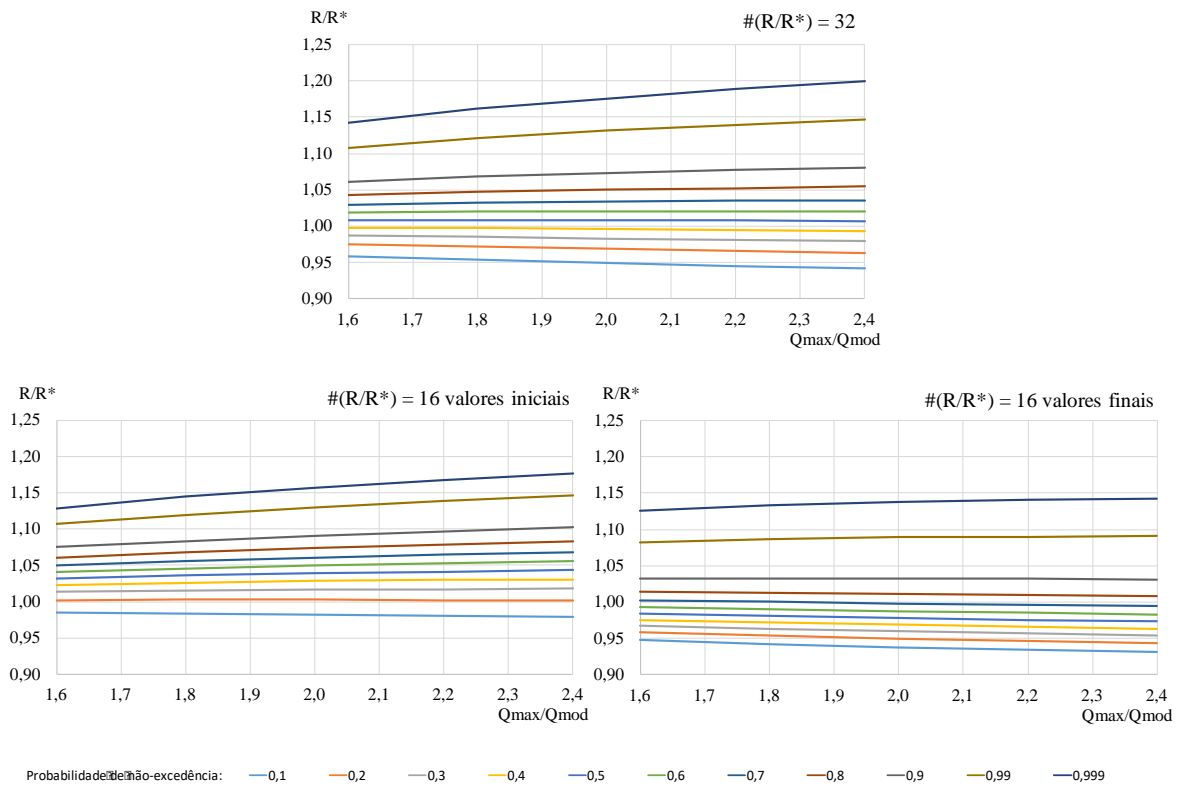


Figura 4.23. Amostras de 32 e de 16 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Receitas em função do caudal de dimensionamento,  $Q_{max}/Q_{mod}$  para diferentes probabilidades de não-excedência.

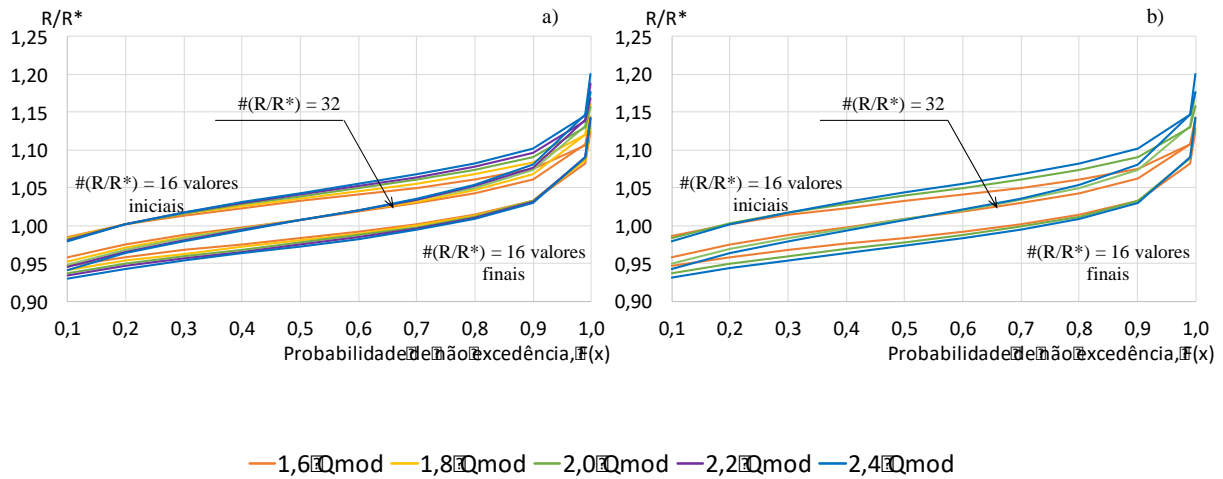


Figura 4.24. Amostras de 32 e de 16 receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão). Taxa de atualização de 10%. Receitas em função da probabilidade de não-excedência para: a) para os cinco valores da relação  $Q_{max}/Q_{mod}$  indicados na legenda e b) detalhe, para os valores da relação de  $Q_{max}/Q_{mod}$  de 1,6, 2,0 e 2,4.

A Figura 4.18 mostra para o tratamento estatístico dos 21 valores iniciais das receitas acumuladas atualizadas adimensionais que a probabilidade de se terem receitas superiores à receita de referência é da ordem de 80%. Já as últimas 21 receitas indicam para tal probabilidade apenas 20%. Para os 42 valores de receitas adimensionalizadas, essa probabilidade corresponde a cerca de 50%.

As probabilidades equivalentes no caso das restantes Figuras são: um pouco menos de 80%, cerca de 25% e sensivelmente 50%, para a Figura 4.2020 e a Figura 4.22, e sensivelmente 80%, à volta de 30% e cerca de 45%, para a Figura 4.244.

Embora com uma leitura diferente, a Figura 4.17, Figura 4.19, Figura 4.21 e Figura 4.23 corroboram as anteriores constatações.

Não obstante as ligeiras diferenças, importa realçar as seguintes conclusões, comuns aos dois períodos de concessão:

- O tratamento estatístico do maior número possível de receitas acumuladas atualizadas adimensionais que é possível constituir tendo por base o período de  $N = 56$  anos de registos (42 e 32 receitas para períodos de concessão de 15 e de 25 anos) atribui à receita de referência, definida por  $R/R^* = 1$ , uma probabilidade de não-excedência muito próxima de 50%. Deste modo, considera-se que a receita de referência é um bom estimador da mediana das receitas esperadas.
- Admite-se que, para ambos os períodos de concessão, a manter-se a variabilidade hidrológica exibida na série de caudais médios diários, se esperam mais frequentemente receitas acumuladas atualizadas superiores à receita acumulada atualizada calculada na base de uma produção anual constante (probabilidade de não-excedência na ordem dos 50%).
- Contudo, o facto de o dimensionamento da PCH utilizar registos mais antigos ou registos mais recentes altera substancialmente as expectativas quanto às receitas esperadas, sendo que, do ponto de vista hidrológico, os anos iniciais foram muito mais favoráveis do que os anos finais: a probabilidade de se obterem receitas superiores à receita de referência decresce de cerca de 80% para 20 a 30%. Para diferentes taxas de atualização, é possível observar que quanto maior for a taxa, maior é a probabilidade de se obterem receitas superiores à receita de referência.

## Capítulo 5 – Conclusões. Desenvolvimentos futuros

A investigação efetuada e que se apresenta teve como objetivo principal estudar o efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH, e as consequências na decisão tomada por um promotor independente quanto à implementação daquele tipo de centrais.

Para o efeito, adotou-se um caso de estudo específico – a PCH do Sordo, descrita no **Capítulo 3 – Caso de estudo** – e selecionou-se uma estação hidrométrica com alturas de escoamentos anuais próximos à ocorrente na bacia hidrográfica daquela central, com vista ao estabelecimento de uma série de caudais médios diários afluentes à mesma. A análise prosseguiu com a simulação, a nível diário, da respetiva exploração atendendo a diversos critérios, tais como o caudal de dimensionamento, a taxa de atualização e o período de concessão da PCH, de acordo com os decretos-lei DL 225, de 2007 e DL 33-A de 2005, com o objetivo de avaliar a receita acumulada atualizada em diferentes cenários.

A elaboração deste trabalho exigiu, durante várias fases, uma extensa sistematização de dados de base de diferentes tipos, bem como a aplicação de modelos e procedimentos descritos no **Capítulo 2 – Enquadramento. Conceitos teóricos**. Os dados sistematizados incluíram as características gerais do caso de estudo, registos de escoamentos médios diários e de precipitações anuais. Os extensos dados referentes aos caudais médios diários, às séries de precipitações anuais e às características dos postos udométricos e da estação hidrométricas foram disponibilizados pelo SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos.

Antecedendo a aplicação de modelos, procedeu-se a uma análise de qualidade das séries de precipitações anuais, fundamentais para a posterior avaliação de disponibilidades, em termos de deteção de eventuais tendências e não-estacionaridade.

Paralelamente, aplicaram-se modelos relacionados com a transposição de informação hidrométrica para secções não monitorizadas da rede fluvial de Portugal Continental, de modo a estabelecer a série de caudais médios diários afluentes à tomada de água da PCH.

Desenvolveu-se um algoritmo computacional que foi aplicado à anterior série de caudais médios diários, em subperíodos com diferentes durações, para assim caracterizar a produção de energia e a respetiva receita que advém da variabilidade hidrológica presente em tal série. Obtiveram-se resultados desse algoritmo para cinco caudais de dimensionamento combinados com duas taxas de atualização e dois períodos de concessão.

As receitas anuais obtidas foram estimadas por acumulação da energia produzida dia a dia, sendo que o correspondente valor acumulado atualizado para diferentes períodos de análise foi calculado em conformidade com critérios de análise económica.

As combinações dos cinco caudais de dimensionamento considerados com as duas taxas de atualização conduziram a 10 séries de receitas acumuladas atualizadas caracterizadas por diferentes parâmetros. Para o período de 56 anos de caudais médios diários, a dimensão de cada uma daquelas séries é de 42 receitas acumuladas atualizadas, para o período de concessão de 15 anos, e de 32 receitas acumuladas atualizadas, para o de 25 anos. A obtenção de cada uma destas receitas pressupôs a simulação da exploração diária da central, o que requereu a aplicação do algoritmo de simulação 750 vezes mais, contando com a obtenção das receitas de referência.

Com efeito, de modo a permitir a comparação, numa mesma base, de receitas referentes a diferentes valores do caudal de dimensionamento, taxas de atualização e períodos de concessão, procedeu-se à

adimensionalização destas receitas através da divisão pelo que se designou por receitas de referência,  $R^*$ , determinadas no pressuposto de produções anuais constantes e iguais às produções anuais médias.

A caracterização de cada série de receitas acumuladas atualizadas adimensionais utilizou ferramentas de índole estatística. De forma a melhor compreender a variabilidade induzida pelo regime fluvial, a par com a análise estatística das 42 (período de concessão de 15 anos) ou 32 (período de concessão de 25 anos) receitas acumuladas atualizadas que constituem aquela série, consideraram-se a metade inicial e a metade final dos seus valores, num total de 21 ou 16 receitas, respetivamente. A análise estatística de cada sequência de receitas acumuladas atualizadas assim obtida requereu a identificação da lei estatística que melhor se ajustava para o que se postularam diferentes leis e se apreciou visualmente o respetivo ajustamento. A opção recaiu sobre a lei de Pearson III que foi seguidamente aplicada para calcular as receitas acumuladas atualizadas adimensionais para probabilidades de não-excedência variáveis entre 1% e 99,9%.

Os resultados obtidos foram posteriormente comparados entre si e com as receitas de referência, tendo-se, desde logo, concluído que, para os diferentes cenários, estas receitas constituem bons estimadores das condições médias esperadas na PCH, visto corresponderem-lhe probabilidades de não-excedência muito próximas de 50 %.

Globalmente, verificou-se que a combinação da variabilidade hidrológica intrínseca da série de caudais utilizada na análise da PCH com critérios de análise económica relativamente realistas conduz a receitas acumuladas atualizadas distintas consoante o período utilizado na sua obtenção.

Com efeito, a probabilidade de se obterem receitas acumuladas atualizadas superiores às de referência é de sensivelmente 80%, quando se consideram períodos de concessão com início em anos mais remotos, e de apenas 20 a 30%, para períodos de concessão iniciando-se em anos mais recentes. Anota-se ainda que, para períodos de concessão com início em anos mais remotos, se podem atingir receitas acumuladas atualizadas entre 15 a 25% superiores às de referência. Para os períodos de concessão com início em anos mais recentes, tais percentagens descem para 5 a 15%. Para estes resultados admite-se que possa contribuir, pelo menos em parte (uma vez que estão também em causa critérios de análise económica) a diminuição das disponibilidades hídricas.

Como conclusão geral, importa reter que, na apreciação da viabilidade económica de uma PCH, é fundamental analisar diferentes períodos de tempo, como forma de incorporar a variabilidade hidrológica, designadamente quando poderão estar em causa decréscimos nas afluências disponíveis. Verificou-se ainda que, em igualdade das demais circunstâncias, a suscetibilidade da PCH ao regime hidrológico (traduzida por uma maior variabilidade nas receitas esperadas) é tanto maior quanto menor for o período da concessão, maior o caudal de dimensionamento e mais frágil a economia, circunstância esta última traduzida por uma maior taxa de atualização.

Relativamente a presumíveis desenvolvimentos futuros, julga-se que importaria tornar mais abrangente o estudo da variabilidade hidrológica. Com efeito, a constituição das possíveis sequências de caudais médios diários utilizadas para calcular as receitas cumuladas atualizadas em diferentes períodos de exploração limitou-se combinar de modo distinto os caudais que constituíam a amostra de 56 anos disponível. Quer isto dizer que a informação de base utilizada foi sempre a mesma, embora organizada em sequências distintas. Seria, assim, interessante utilizar sequências alternativas de caudais médios diários obtidas mediante modelação matemática, embora tal exija conhecimentos específicos para além do âmbito do curso de mestrado em que se insere a presente dissertação.

Outra contribuição adicional consistiria muito simplesmente na comparação dos resultados da exploração real de PCHs, em períodos de tempo tão alargados quanto possível, com os estimados a nível dos respetivos projetos e com os decorrentes dos critérios desenvolvidos na presente dissertação.

Tradicionalmente, o dimensionamento de uma PCH com exploração a fio-de-água ou disposta de uma pequena albufeira de regularização é feito utilizando toda a informação hidrométrica disponível com base no pressuposto de ocorrerem condições constantes e iguais às condições anuais médias, nomeadamente no que respeita a energias produzidas. Contudo, o estudo que agora se apresenta revela que as condições de exploração variam consoante o período de tempo utilizado no seu cálculo uma vez que a série de caudais médios diários pode exibir períodos com anos menos chuvosos, especialmente em anos mais recentes, o que pressupõe que, se tal continuar a ocorrer no futuro, a produção de energia tenderá a diminuir. Estudos paralelos indicam que essa tal diminuição será tanto mais acentuada quanto mais reduzida for a altura do escoamento anual médio na bacia hidrográfica da PCH.

Quando no dimensionamento de uma PCH se utiliza como um todo a informação hidrométrica disponível, não se tem a perceção da variabilidade que ela comporta. A dissertação que se apresenta chama a atenção para os efeitos dessa variabilidade, permitindo concluir de uma forma mais objetiva se o atual método de dimensionamento de uma PCH é efetivamente uma boa ferramenta ou se a análise complementar objeto da presente dissertação poderá acrescentar algo a tal dimensionamento.

Um outro desenvolvimento futuro passaria por melhorar a análise económica. Com efeito, de modo a tornar os seus resultados generalizáveis, o estudo efetuado considerou um custo da energia constante e unitário. Esta não é de todo a situação real, em que tal custo poderá rondar valores entre 0,040 a mais 0,080 €/kWh, ademais sujeitos à concorrência do mercado.

Por fim, atendendo a que os resultados obtidos indicam que a PCH é tanto mais suscetível à variabilidade hidrológica quanto maior o seu caudal de dimensionamento, admite-se que a aplicação da metodologia apresentada a vários casos de estudo inseridos numa região hidrologicamente homogénea, caracterizada por alturas de escoamento anual médio relativamente próximas (e logo, com variabilidades temporais relativas igualmente próximas) poderia ajudar na identificação da gama de caudais de dimensionamento conducentes a produções de energia menos suscetíveis à variabilidade hidrológica.

Página deixada em branco intencionalmente

## Referências Bibliográficas

- [1] MAOT, “Ministério Do Ambiente E Do Ordenamento Do Território - Decreto-Lei n 112/2002,” 2002.
- [2] F. D. Santos e P. M. de Miranda, Alterações climáticas em Portugal : cenários, impactos e medidas de adaptação : Projecto SIAM II. Gradiva, 2006.
- [3] A. Leitão, M. M. Portela, e F. Godinho, “Potencialidades e constrangimentos ao seu desenvolvimento,” vol. 31, pp. 39–56, 2010.
- [4] A. S. da Costa, “Hidroeletricidade: o seu papel no desenvolvimento do sistema electroprodutor de Portugal,” Rev. Recur. Hídricos, vol. 37, no. 2, pp. 9–20, 2016.
- [5] A. E. Leitão, “A energia hidroeléctrica em Portugal,” pp. 123–127, 2011.
- [6] N/a, “Hidroeletricidade em Portugal Continental,” pp. 0–4.
- [7] C. Madureira e V. Baptista, “Hidroelectricidade em Portugal - memória e desafio,” p. 76, 2002.
- [8] APREN, “Boletim Energias Renováveis - Junho 2017,” p. 6, 2017.
- [9] APREN, “Boletim Energias Renováveis - Junho 2016,” p. 6, 2016.
- [10] DGEG, “estatísticas rápidas - no 146 - Dezembro de 2016,” 2016.
- [11] APREN, “Boletim Energias Renováveis - APREN: Associação Portuguesa de energias renováveis.,” p. 6, 2016.
- [12] E. Nunes, “Energia - Histórico. Já estamos a exportar mais eletricidade do que importamos,” 2017. [Online]. Available: <https://www.dn.pt/dinheiro/interior/historico-ja-estamos-a-exportar-mais-eletricidade-do-que-importamo-8570139.html>. [Accessed: 10-Dec-2017].
- [13] A. S. da Costa, “Desafios Futuros Na Evolução Da Energia Renovável Em Portugal,” 2016.
- [14] E. Cook, “Hydrological Variability and Change,” pp. 1–64, 2007.
- [15] IPCC, Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel. 2007.
- [16] J. S. Cardoso, M. M. Portela, M. J. Martins, M. D. Bejarano, e F. C. Aguiar, “Utilização de indicadores de alteração hidrológica para caracterizar os regimes fluviais a jusante de barragens portuguesas,” no. c, 2002.
- [17] M. Correia, “Análise da precipitação máxima com média duração em Portugal Continental,” pp. 24–26, 2008.
- [18] M. M. Portela e A. Quintela, “A diminuição da precipitação em épocas do ano como indício de mudanças climáticas: casos estudados em Portugal Continental.pdf.” 2001.
- [19] M. M. Portela, A. C. Quintela, J. F. Santos, C. Vaz, and C. Martins, “Tendências Em Séries Temporais De Variáveis Hidrológicas,” Assoc. Port. dos Recur. Hídricos, vol. 32, no. 1, pp. 43–60, 2011.
- [20] M. M. Portela e A. de C. Quintela, “A DIMINUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EM ÉPOCAS DO ANO COMO INDÍCIO DE MUDANÇA CLIMÁTICA : Resumo ;,” pp. 79–92, 2001.
- [21] C. Vaz, “Análise de tendências em séries de precipitação diária máxima anual Cristiana Maciel Vaz Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil Júri ;,” 2008.
- [22] M. M. Portela, “Aulas teóricas, Energia Hídrica,” 2016.

- [23] H. Ramos, A. B. De Almeida, M. M. Portela, e H. P. Almeida, “Small hydropower plants,” 2000.
- [24] M. M. Portela, “Análise da Rentabilidade Económica de PCH, Relatório do CEHIDRO para o Projecto PCH (Pequenas Centrais Hidroeléctricas).” pp. 1–22, 1988.
- [25] M. Naghettini e M. M. Portela, “Probabilidade e estatística aplicadas à hidrologia,” 2004.
- [26] M. Naghettini e É. J. D. A. Pinto, Hidrologia Estatística. 2007.
- [27] E. Ribeiro, “Estudo das precipitações intensas na ilha de Santiago, em Cabo Verde.” 2007.
- [28] M. S. Ribeiro, “Alteração do regime fluvial a jusante de pequenos aproveitamentos hidroeléctricos . Análise exploratória dos efeitos na vegetação do corredor fluvial Miguel Saavedra Ribeiro de Mendonça Engenharia Civil Júri,” 2015.
- [29] M. M. Portela, “Da regionalização de informação hidrométrica ao dimensionamento de albufeiras de regularização e à análise de incertezas,” 2014.
- [30] F. L. Rosa, “Modelação estatística de caudais e de volumes de cheia em Portugal Continental : análises convencional e bivariada Engenharia Civil,” 2011.

## **Legislação**

Decreto-Lei n.º 189/88 de 27 de maio

Decreto-Lei nº 33A/2005 de 16 de fevereiro

Decreto-Lei nº 225/2007 de 31 de maio

## **ANEXOS**

Página deixada em branco intencionalmente

# Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

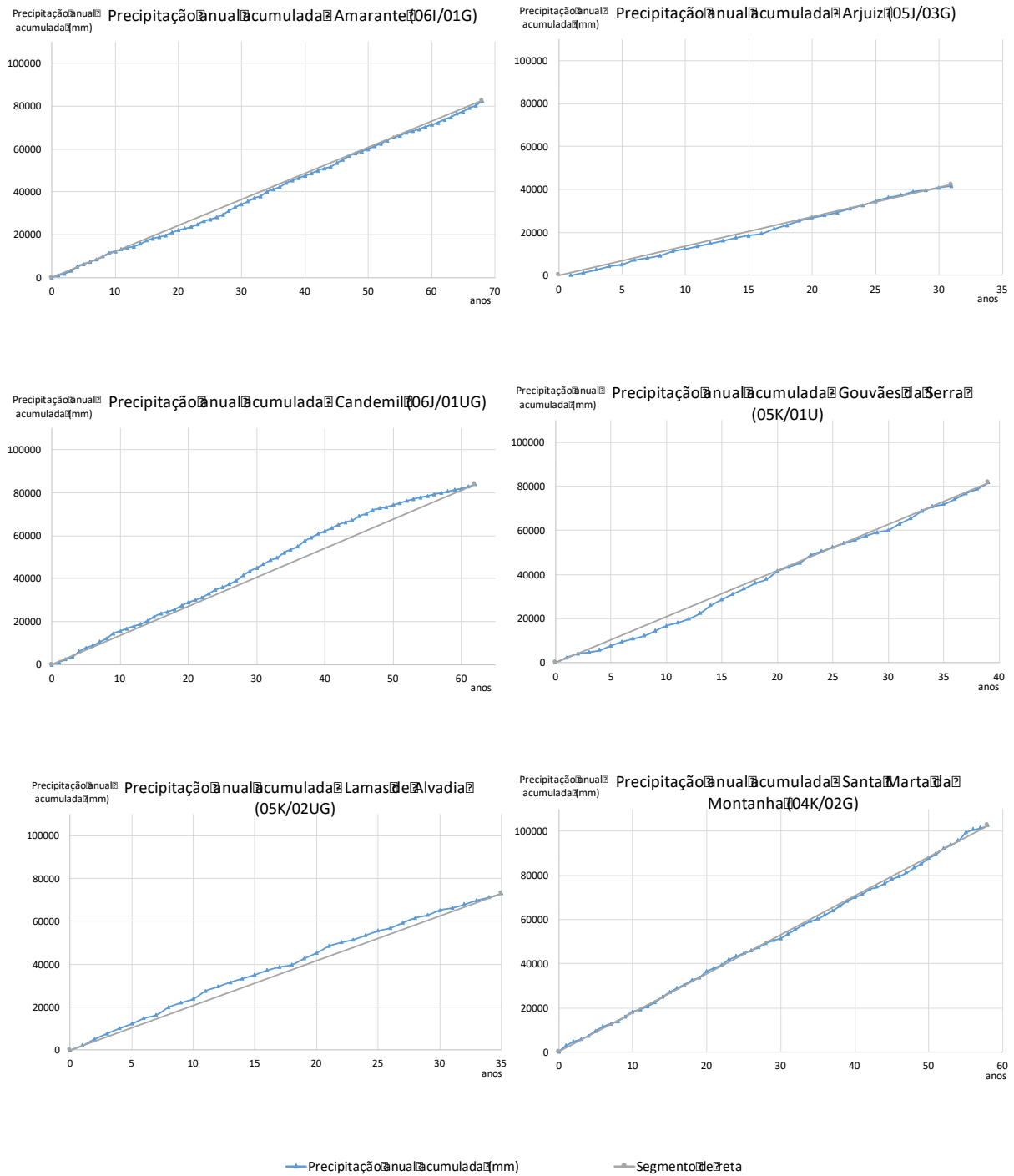


Figura A.1. Aplicação do teste de valores simplesmente acumulados às restantes séries de precipitações anuais dos postos udométricos com influência nas bacias hidrográficas do PCH e da EH.

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

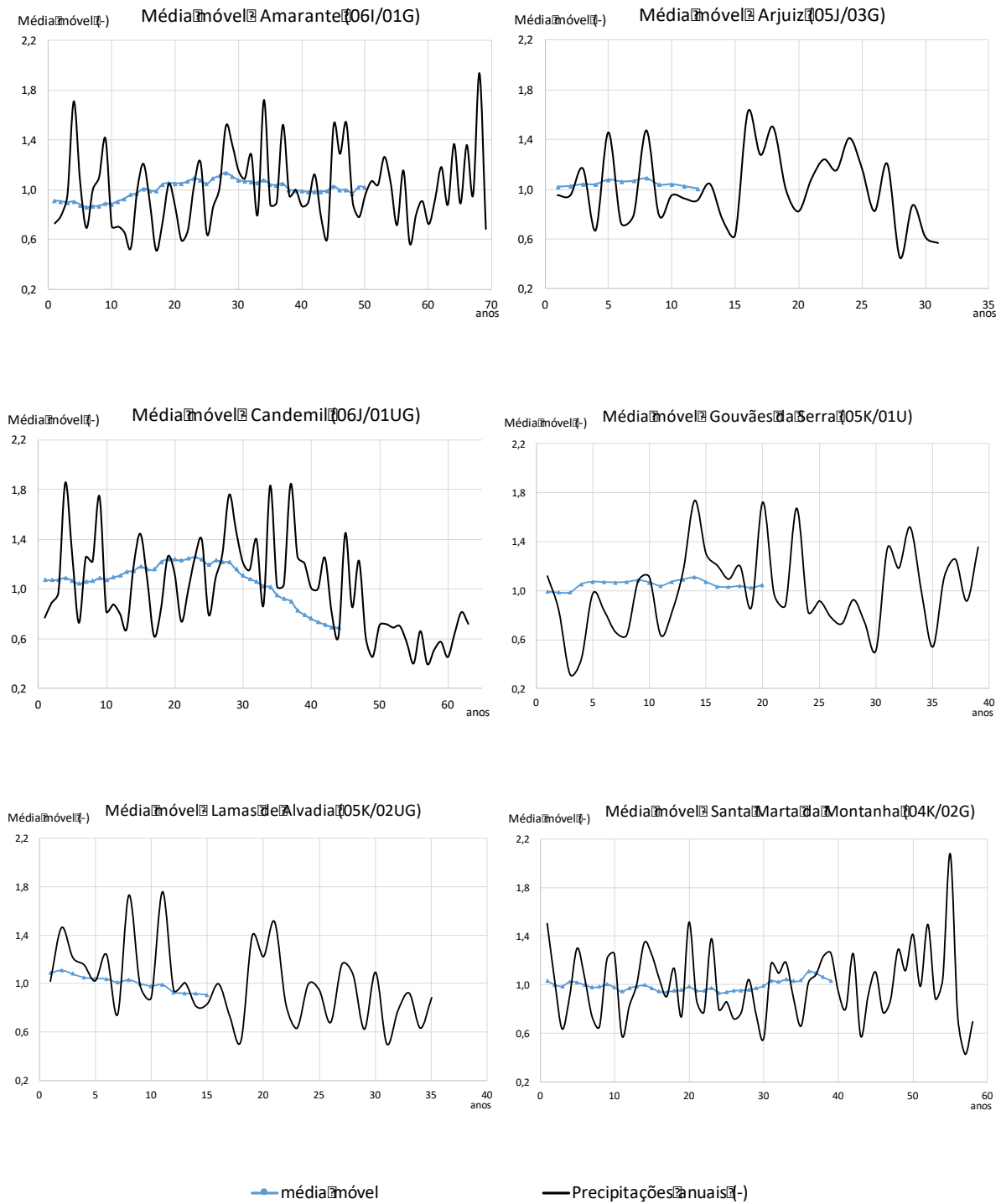


Figura A.2. Aplicação da técnica clássica das médias móveis às restantes séries de precipitações anuais dos postos udométricos com influência nas bacias hidrográficas do PCH e da EH.

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Quadro 1 - Valores da variável hidrológica

Ano hidrológico	Radi (m <sup>3</sup> /s)	In Radi
1	1,0657	0,0636
2	1,0596	0,0579
3	1,0724	0,0699
4	1,0884	0,0847
5	1,0776	0,0747
6	1,0408	0,0400
7	0,9899	-0,0102
8	1,0123	0,0122
9	1,0301	0,0297
10	1,0247	0,0244
11	1,0667	0,0646
12	1,0198	0,0196
13	0,9956	-0,0044
14	1,0200	0,0198
15	0,9715	-0,0290
16	1,0051	0,0051
17	0,9868	-0,0132
18	1,0021	0,0021
19	1,0248	0,0245
20	1,0045	0,0045
21	1,0123	0,0122
Média	1,0272	0,0263
Desvio	0,0331	0,0321
Assim	0,3623	0,3147
Max	1,0884	0,0847
Min	0,9715	-0,0290

Quadro 2 - Probabilidades empíricas de não-excedência e valores da normal reduzida

N. ordem i	Radi (-)	Probabilidade empírica de não-excedência, F	z
1	0,9715	0,0455	-1,6906
2	0,9868	0,0909	-1,3352
3	0,9899	0,1364	-1,0968
4	0,9956	0,1818	-0,9085
5	1,0021	0,2273	-0,7479
6	1,0045	0,2727	-0,6046
7	1,0051	0,3182	-0,4728
8	1,0123	0,3636	-0,3488
9	1,0123	0,4091	-0,2299
10	1,0198	0,4545	-0,1142
11	1,0200	0,5000	0,0000
12	1,0247	0,5455	0,1142
13	1,0248	0,5909	0,2299
14	1,0301	0,6364	0,3488
15	1,0408	0,6818	0,4728
16	1,0596	0,7273	0,6046
17	1,0657	0,7727	0,7479
18	1,0667	0,8182	0,9085
19	1,0724	0,8636	1,0968
20	1,0776	0,9091	1,3352
21	1,0884	0,9545	1,6906

Quadro 3 - Ajuste de leis estatísticas. Leis Normal, de Gumbel e de Pearson III

F	Lei Normal		Lei log-Normal ou de Galton		Lei Pearson III	
	KN=z	Radi Normal	In Radi	Radi Galton	KP	Radi Pearson
0,0100	-2,3263	0,9501	-0,0484	0,9528	-2,0593	0,9590
0,0200	-2,0537	0,9591	-0,0396	0,9612	-1,8557	0,9657
0,0300	-1,8808	0,9649	-0,0341	0,9665	-1,7225	0,9701
0,0400	-1,7507	0,9692	-0,0299	0,9706	-1,6202	0,9735
0,0500	-1,6449	0,9727	-0,0265	0,9739	-1,5357	0,9763
0,0600	-1,5548	0,9757	-0,0236	0,9767	-1,4627	0,9787
0,0700	-1,4758	0,9783	-0,0211	0,9792	-1,3981	0,9809
0,0800	-1,4051	0,9806	-0,0188	0,9814	-1,3396	0,9828
0,0900	-1,3408	0,9828	-0,0167	0,9834	-1,2859	0,9846
0,1000	-1,2816	0,9847	-0,0148	0,9853	-1,2361	0,9862
0,1100	-1,2265	0,9865	-0,0131	0,9870	-1,1895	0,9878
0,1200	-1,1750	0,9883	-0,0114	0,9887	-1,1455	0,9892
0,1300	-1,1264	0,9899	-0,0098	0,9902	-1,1038	0,9906
0,1400	-1,0803	0,9914	-0,0084	0,9917	-1,0639	0,9919
0,1500	-1,0364	0,9928	-0,0070	0,9931	-1,0258	0,9932
....	....	....	....	....	....	....
....	....	....	....	....	....	....
0,9000	1,2816	1,0696	0,0675	1,0698	1,3134	1,0707
0,9100	1,3408	1,0716	0,0694	1,0718	1,3819	1,0729
0,9200	1,4051	1,0737	0,0714	1,0740	1,4568	1,0754
0,9300	1,4758	1,0761	0,0737	1,0765	1,5398	1,0782
0,9400	1,5548	1,0787	0,0762	1,0792	1,6333	1,0813
0,9500	1,6449	1,0817	0,0791	1,0823	1,7409	1,0848
0,9600	1,7507	1,0852	0,0825	1,0860	1,8687	1,0891
0,9700	1,8808	1,0895	0,0867	1,0906	2,0279	1,0943
0,9800	2,0537	1,0952	0,0922	1,0966	2,2429	1,1015
0,9900	3,0902	1,1295	0,1255	1,1337	3,6180	1,1470

Figura A.3. Exemplificação dos quadros de análise estatística para os 21 valores iniciais. O primeiro quadro representa as receitas acumuladas atualizadas adimensionais, e o correspondente logaritmo. O segundo quadro apresenta as receitas acumuladas atualizadas adimensionais ordenadas por ordem crescente, a probabilidade empírica de não-excedência, F e a normal reduzida, z. Por fim, o último quadro apresenta o ajuste das leis estatísticas. Lei Normal, lei de Galton e lei Pearson III.

Página deixada em branco intencionalmente

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A. 1. Precipitações anuais nos postos com influência na bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Sta. Marta do Alvão e respetiva precipitação ponderada.

Ano hidrológico	Precipitação anual (mm)				
	Gouvães da Serra (05K/01U)	Lamas de Alvadia (05K/02UG)	Lixa do Alvão (04K/03UG)	Sta. Marta da Montanha (04K/02G)	Média ponderada
1958/59	2456,6	2131,7	1917,8	1772,5	2043,2
1959/60	3635,8	3060,2	2638,4	2376,6	2872,1
1960/61	2727,4	2542,9	2123,0	2203,6	2305,1
1961/62	2525,0	2417,0	1711,8	1854,7	1964,7
1962/63	2292,6	2140,4	1690,4	1591,3	1844,3
1963/64	2515,1	2596,1	2054,1	2004,5	2179,6
1964/65	1812,9	1559,4	1260,0	1303,9	1420,4
1965/66	3606,5	3620,0	2404,3	2678,3	2791,2
1966/67	2035,5	2062,4	1323,8	1542,5	1562,0
1967/68	1848,1	1855,3	1115,8	1368,8	1364,9
1968/69	3502,8	3680,9	2290,7	2436,4	2663,3
1969/70	1737,2	1981,5	1216,7	1406,7	1399,7
1970/71	1921,0	2108,2	1409,6	1516,9	1576,0
1971/72	1645,1	1699,4	1396,4	1267,6	1448,3
1972/73	1534,7	1742,0	1444,0	1361,1	1460,7
1973/74	1940,1	2087,7	1700,3	1840,8	1793,5
1974/75	1547,2	1529,2	890,4	1323,9	1145,8
1975/76	1086,8	1103,6	758,4	980,6	887,4
1976/77	2822,7	2915,9	1242,7	2070,1	1825,8
1977/78	2481,8	2557,7	1820,9	1932,8	2028,8
1978/79	3179,5	3159,5	1820,7	2086,9	2250,5
1979/80	2078,0	1737,0	596,6	1566,1	1165,9
1980/81	1135,3	1324,0	576,4	1160,7	831,2
1981/82	2320,0	2082,9	1093,6	1794,6	1549,8
1982/83	2630,0	1973,7	1080,6	1908,3	1641,4
1983/84	1919,3	1423,3	1195,8	2179,5	1547,9
1984/85	2839,4	2427,0	1895,3	2226,1	2209,6
<b>Média (mm)</b>	2093,9	1971,5	1385,0	1752,4	1769,4
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	27,5	0,9	7,7	13,2	49,3
<b>Peso</b>	0,56	0,02	0,16	0,27	1,00

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.2. Precipitações anuais nos postos com influência na bacia hidrográfica da central hidroelétrica do Sordo e respetiva precipitação ponderada.

Ano hidrológico	Precipitação anual (mm)	
	Arjuiz (05J/03G)	Campeã (06J/01UG)
1959/60		3519,3
1960/61		2994,1
1961/62	1300,3	2572,1
1962/63	1297,3	2400,3
1963/64	1591,7	2721,1
1964/65	915,5	1907,7
1965/66	1988,2	3652,5
1966/67	996,1	2025,3
1967/68	1084,6	1871,9
1968/69	2010,4	3216,5
1969/70	1080,5	1881,2
1970/71	1299,0	2023,9
1971/72	1264,7	1819,9
1972/73	1240,2	1810,5
1973/74	1425,9	2210,4
1974/75	1036,0	1561,8
1975/76	867,1	1153,2
1976/77	2212,6	3113,9
1977/78	1742,2	2752,0
1978/79	2046,9	3208,9
1979/80	1364,0	1958,1
1980/81	1122,6	1486,9
1981/82	1473,2	2009,2
1982/83	1692,5	2313,3
1983/84	1574,5	2383,7
1984/85	1925,6	2622,2
1985/86	1593,3	2295,9
1986/87	1125,9	1679,7
1987/88	1643,3	2253,4
1988/89	614,7	1237,1
1989/90	1191,2	1687,9
1990/91	842,0	2066,8
1991/92	776,0	1365,4
1993/94		1917,2
1994/95		2477,9
1996/97		2075,8
Média (mm)	1365,7	2229,1
Área (km <sup>2</sup> )	0,73	45,3
Peso	0,02	0,98

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.3. Estação hidrométrica de Sta. Marta de Alvão. Escoamentos anuais obtidos através do somatório dos caudais médios diários para cada ano.

Ano hidrológico	Escoamento anual	
	(hm <sup>3</sup> )	(mm)
1957/58	51,6	1048,0
1958/59	86,8	1761,2
1959/60	63,4	1288,0
1960/61	56,1	1138,8
1961/62	47,6	966,1
1962/63	61,9	1257,0
1963/64	27,8	563,7
1964/65	93,9	1906,1
1965/66	41,6	843,5
1966/67	31,9	646,8
1967/68	87,4	1773,7
1968/69	41,6	844,2
1969/70	42,4	859,7
1970/71	35,1	712,8
1971/72	37,3	756,2
1972/73	50,1	1016,9
1973/74	32,0	649,9
1974/75	18,9	383,0
1975/76	79,4	1610,9
1976/77	72,0	1461,3
1977/78	86,9	1764,8
1978/79	40,0	811,4
1979/80	24,0	486,9
1980/81	41,0	832,1
1981/82	49,5	1003,9
1982/83	46,2	937,4
1983/84	66,1	1342,3
<b>Média</b>	52,3	1061,7
<b>Caudal modular (m<sup>3</sup>/s)</b>	–	1,66

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A. 4. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 15 anos, em função do caudal de dimensionamento e da taxa de atualização. Características estatísticas das amostras.

Receita anual (-)	Qmax/Qmod									
	t = 4 %					t = 10 %				
	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
R <sub>1</sub> /R*	1,0657	1,0749	1,0820	1,0881	1,0937	1,0591	1,0677	1,0743	1,0799	1,0851
R <sub>2</sub> /R*	1,0596	1,0671	1,0728	1,0776	1,0822	1,0452	1,0526	1,0583	1,0630	1,0675
R <sub>3</sub> /R*	1,0724	1,0810	1,0876	1,0933	1,0985	1,0782	1,087	1,0947	1,1008	1,1064
R <sub>4</sub> /R*	1,0884	1,0974	1,1045	1,1103	1,1157	1,1078	1,1187	1,1272	1,1343	1,1406
R <sub>5</sub> /R*	1,0776	1,0875	1,0955	1,1023	1,1086	1,0988	1,1115	1,1217	1,1303	1,1380
R <sub>6</sub> /R*	1,0408	1,0477	1,0532	1,0577	1,0620	1,0583	1,0673	1,0746	1,0806	1,0860
R <sub>7</sub> /R*	0,9899	0,9939	0,9971	0,9998	1,0025	1,0047	1,0109	1,0160	1,0203	1,0244
R <sub>8</sub> /R*	1,0123	1,0176	1,0217	1,0249	1,0278	1,0177	1,0245	1,0298	1,034	1,038
R <sub>9</sub> /R*	1,0301	1,0345	1,0378	1,0402	1,0425	1,0340	1,0393	1,0434	1,0467	1,0499
R <sub>10</sub> /R*	1,0247	1,0289	1,0322	1,0346	1,0369	1,0217	1,0257	1,0289	1,0316	1,0342
R <sub>11</sub> /R*	1,0667	1,0704	1,0731	1,0747	1,0763	1,0770	1,0812	1,0844	1,0868	1,0892
R <sub>12</sub> /R*	1,0198	1,0185	1,0165	1,0143	1,0124	1,0239	1,0217	1,0191	1,0167	1,0146
R <sub>13</sub> /R*	0,9956	0,9961	0,9958	0,9949	0,9942	1,0004	1,0008	1,0005	0,9998	0,9993
R <sub>14</sub> /R*	1,0200	1,0205	1,0200	1,0190	1,0179	1,0316	1,0320	1,0314	1,0305	1,0297
R <sub>15</sub> /R*	0,9715	0,9701	0,9688	0,9670	0,9651	0,9601	0,9583	0,9566	0,9546	0,9527
R <sub>16</sub> /R*	1,0051	1,004	1,0026	1,0006	0,9985	0,9910	0,9890	0,9868	0,9841	0,9815
R <sub>17</sub> /R*	0,9868	0,9874	0,9878	0,9873	0,9866	0,9659	0,9664	0,9668	0,9662	0,9654
R <sub>18</sub> /R*	1,0021	1,0019	1,0015	1,0003	0,9989	0,9963	0,9963	0,9961	0,9950	0,9935
R <sub>19</sub> /R*	1,0248	1,0256	1,0259	1,0254	1,0244	1,0149	1,0165	1,0175	1,0173	1,0166
R <sub>20</sub> /R*	1,0045	1,0046	1,0040	1,0026	1,0007	1,0052	1,0063	1,0065	1,0053	1,0037
R <sub>21</sub> /R*	1,0123	1,0127	1,0125	1,0116	1,0102	1,0246	1,0264	1,0272	1,0267	1,0256
R <sub>22</sub> /R*	1,0501	1,0521	1,0530	1,053	1,0526	1,0820	1,0864	1,0892	1,0905	1,0911
R <sub>23</sub> /R*	0,9924	0,9895	0,9867	0,9841	0,9814	1,0152	1,0137	1,0120	1,0100	1,0080
R <sub>24</sub> /R*	0,9601	0,9550	0,9506	0,9468	0,9432	0,97702	0,9733	0,9698	0,9668	0,9639
R <sub>25</sub> /R*	0,9591	0,9508	0,9440	0,9383	0,9328	0,9643	0,9558	0,9488	0,9428	0,9373
R <sub>26</sub> /R*	0,9411	0,9343	0,9289	0,9246	0,9205	0,9381	0,9313	0,9260	0,9218	0,9179
R <sub>27</sub> /R*	0,9720	0,9669	0,9634	0,9607	0,9580	0,9739	0,9691	0,9659	0,9636	0,9611
R <sub>28</sub> /R*	0,9906	0,9848	0,9806	0,9772	0,9737	1,0029	0,9976	0,9937	0,9906	0,9874
R <sub>29</sub> /R*	0,9964	0,9914	0,9878	0,9853	0,9828	0,9983	0,9932	0,9894	0,9868	0,9842
R <sub>30</sub> /R*	0,9853	0,9794	0,9751	0,9717	0,9684	0,9867	0,9813	0,9771	0,9739	0,9707
R <sub>31</sub> /R*	0,9520	0,9448	0,9394	0,9351	0,9305	0,9363	0,9288	0,9223	0,9184	0,9140
R <sub>32</sub> /R*	0,9740	0,9693	0,9659	0,9631	0,9604	0,9499	0,9438	0,9389	0,9350	0,9312
R <sub>33</sub> /R*	0,9721	0,9680	0,9650	0,9627	0,9605	0,9635	0,9585	0,9547	0,9515	0,9485
R <sub>34</sub> /R*	0,9552	0,9513	0,9490	0,9470	0,94516	0,9245	0,9195	0,9159	0,9129	0,9100
R <sub>35</sub> /R*	0,996	0,9922	0,9896	0,9875	0,9854	0,9797	0,9752	0,9719	0,9691	0,9664
R <sub>36</sub> /R*	0,9917	0,9866	0,9831	0,9804	0,9779	0,9893	0,9834	0,9793	0,9760	0,9729
R <sub>37</sub> /R*	0,9803	0,9751	0,9715	0,9688	0,9662	0,9817	0,9760	0,9721	0,9690	0,9661
R <sub>38</sub> /R*	1,0091	1,0056	1,0035	1,0021	1,0007	1,0207	1,0171	1,0149	1,0134	1,0118
R <sub>39</sub> /R*	1,0113	1,0089	1,0078	1,0071	1,0065	1,0367	1,0351	1,0348	1,0349	1,0347
R <sub>40</sub> /R*	0,9694	0,9667	0,9653	0,9646	0,9642	0,9934	0,9916	0,9910	0,9910	0,9913
R <sub>41</sub> /R*	0,9842	0,9818	0,9808	0,9807	0,9808	1,0052	1,0033	1,0029	1,0032	1,0036
R <sub>42</sub> /R*	0,9718	0,9684	0,9660	0,9646	0,9637	0,9863	0,9833	0,9811	0,9799	0,9793
Média	1,0044	1,0039	1,0036	1,0031	1,0026	1,0077	1,0076	1,0075	1,0073	1,0070
Desvio-padrão	0,0368	0,0412	0,0447	0,0475	0,0501	0,0434	0,0481	0,0519	0,0550	0,0579
Coef. assimetria	0,6037	0,6276	0,6453	0,6694	0,6916	0,4041	0,4510	0,4817	0,5099	0,5324
Máximo	1,0884	1,0974	1,1045	1,1103	1,1157	1,1078	1,1187	1,1272	1,1343	1,1406
Mínimo	0,9411	0,9343	0,9289	0,9246	0,9205	0,9245	0,9195	0,9159	0,9129	0,9100

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A. 5. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais para um período de concessão de 25 anos, em função do caudal de dimensionamento e da taxa de atualização. Características estatísticas das amostras.

R/R*	Qmax/Qmod									
	t = 4 %					t = 10 %				
	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
R <sub>1</sub> /R*	1,0497	1,0562	1,0611	1,0649	1,0683	1,0488	1,0557	1,0610	1,0652	1,0691
R <sub>2</sub> /R*	1,0327	1,0384	1,0426	1,0458	1,0486	1,0298	1,0361	1,0410	1,0448	1,0483
R <sub>3</sub> /R*	1,0466	1,0530	1,0579	1,0616	1,0649	1,0623	1,0703	1,0764	1,0813	1,0858
R <sub>4</sub> /R*	1,0629	1,0700	1,0755	1,0796	1,0832	1,0897	1,0993	1,1068	1,1126	1,1179
R <sub>5</sub> /R*	1,0576	1,0652	1,0711	1,0757	1,0797	1,0835	1,0945	1,1032	1,1103	1,1165
R <sub>6</sub> /R*	1,0475	1,0532	1,0577	1,0611	1,0640	1,0585	1,0667	1,0732	1,0783	1,0828
R <sub>7</sub> /R*	1,0253	1,0297	1,0331	1,0357	1,0380	1,0249	1,0313	1,0364	1,0405	1,0443
R <sub>8</sub> /R*	1,0186	1,0221	1,0247	1,0265	1,0281	1,0222	1,0278	1,0322	1,0355	1,0386
R <sub>9</sub> /R*	1,0305	1,0329	1,0346	1,0357	1,0368	1,0331	1,0372	1,0404	1,0428	1,0452
R <sub>10</sub> /R*	1,0104	1,0112	1,0116	1,0119	1,0121	1,0145	1,0166	1,0182	1,0195	1,0208
R <sub>11</sub> /R*	1,0296	1,0307	1,0313	1,0315	1,0317	1,0543	1,0569	1,0588	1,0603	1,0617
R <sub>12</sub> /R*	1,0053	1,0032	1,0010	0,9987	0,9967	1,0161	1,0136	1,0110	1,0087	1,0066
R <sub>13</sub> /R*	0,9897	0,9885	0,9870	0,9854	0,9839	0,9997	0,9993	0,9984	0,9973	0,9964
R <sub>14</sub> /R*	0,9986	0,9968	0,9947	0,9926	0,9905	1,0210	1,0203	1,0189	1,0175	1,0162
R <sub>15</sub> /R*	0,9678	0,9649	0,9623	0,9596	0,9570	0,9617	0,9592	0,9570	0,9546	0,9524
R <sub>16</sub> /R*	0,9769	0,9737	0,9708	0,9677	0,9647	0,9768	0,9737	0,9708	0,9676	0,9646
R <sub>17</sub> /R*	0,9691	0,9673	0,9659	0,9641	0,9621	0,9575	0,9567	0,9559	0,9545	0,9529
R <sub>18</sub> /R*	0,9866	0,9844	0,9825	0,9804	0,978	0,9877	0,9866	0,9855	0,9837	0,9817
R <sub>19</sub> /R*	0,9981	0,9971	0,9962	0,9949	0,9933	0,9968	0,9971	0,9972	0,9964	0,9952
R <sub>20</sub> /R*	0,9973	0,9954	0,9937	0,9915	0,9891	0,9986	0,9985	0,9979	0,9962	0,9941
R <sub>21</sub> /R*	1,0101	1,0083	1,0067	1,0048	1,0026	1,0197	1,0199	1,0196	1,0185	1,0169
R <sub>22</sub> /R*	1,0460	1,0466	1,0469	1,0468	1,0462	1,0715	1,0745	1,0765	1,0773	1,0774
R <sub>23</sub> /R*	1,0043	1,0018	0,9998	0,9979	0,9956	1,0187	1,0171	1,0155	1,0137	1,0118
R <sub>24</sub> /R*	0,9948	0,9917	0,9893	0,9873	0,9854	0,9948	0,9919	0,9894	0,9873	0,9851
R <sub>25</sub> /R*	0,9851	0,9793	0,9747	0,9710	0,9676	0,9783	0,9713	0,9656	0,9609	0,9565
R <sub>26</sub> /R*	0,9638	0,9585	0,9545	0,9515	0,9487	0,9537	0,9479	0,9434	0,9400	0,9369
R <sub>27</sub> /R*	0,9747	0,9701	0,9667	0,9643	0,9612	0,9777	0,9732	0,9701	0,9679	0,9657
R <sub>28</sub> /R*	0,9915	0,9870	0,9837	0,9812	0,9787	1,0043	0,9997	0,9964	0,9938	0,9912
R <sub>29</sub> /R*	0,9773	0,9722	0,9685	0,9657	0,9631	0,9891	0,9840	0,9802	0,9776	0,9750
R <sub>30</sub> /R*	0,9639	0,9590	0,9553	0,9526	0,9500	0,9777	0,9729	0,9693	0,9666	0,9639
R <sub>31</sub> /R*	0,9444	0,9389	0,9348	0,9318	0,9291	0,9362	0,9299	0,9250	0,9213	0,9179
R <sub>32</sub> /R*	0,9476	0,9420	0,9378	0,9345	0,9315	0,9375	0,9310	0,9259	0,9218	0,9180
<b>Média</b>	1,0033	1,0028	1,0023	1,0017	1,0010	1,0093	1,0097	1,0099	1,0098	1,0096
<b>Desvio-padrão</b>	0,0325	0,0365	0,0395	0,0419	0,0441	0,0404	0,0449	0,0485	0,0515	0,0542
<b>Coef. assimetria</b>	0,1389	0,2047	0,2553	0,3001	0,3388	0,1533	0,1964	0,2308	0,2637	0,2914
<b>Máximo</b>	1,0629	1,0700	1,0755	1,0796	1,0832	1,0897	1,0993	1,1068	1,1126	1,1179
<b>Mínimo</b>	0,9444	0,9389	0,9348	0,9318	0,9291	0,9362	0,9299	0,9250	0,9213	0,9179

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.6. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod}$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 42$	$\#(R/R^*) = 21$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 21$ valores finais
1,6	1,0044	0,0368	0,6037	1,0884	0,9411	0,100	0,9603	0,9862	0,9540
						0,200	0,9729	0,9989	0,9610
						0,300	0,9828	1,0085	0,9668
						0,400	0,9918	1,0170	0,9723
						0,500	1,0007	1,0252	0,9779
						0,600	1,0101	1,0336	0,9840
						0,700	1,0207	1,0430	0,9911
						0,800	1,0337	1,0543	1,0001
						0,900	1,0532	1,0707	1,0140
						0,990	1,1060	1,1130	1,0540
					0,999	1,1508	1,1470	1,0901	

Tabela A.7. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 1,6$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 25 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 32$	$\#(R/R^*) = 16$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 16$ valores finais
1,6	1,0033	0,0325	0,1389	1,0629	0,9444	0,100	0,9621	0,9843	0,9543
						0,200	0,9757	0,9987	0,9631
						0,300	0,9857	1,0085	0,9699
						0,400	0,9943	1,0166	0,9761
						0,500	1,0025	1,0239	0,9823
						0,600	1,0108	1,0309	0,9887
						0,700	1,0198	1,0381	0,9959
						0,800	1,0304	1,0462	1,0049
						0,900	1,0454	1,0568	1,0181
						0,990	1,0823	1,0793	1,0538
					0,999	1,1103	1,0933	1,0839	

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.8. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 1,8$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 42$	$\#(R/R^*) = 21$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 21$ valores finais
1,8	1,0039	0,0412	0,6276	1,0974	0,9343	0,100	0,9547	0,9859	0,9482
						0,200	0,9687	0,9995	0,9554
						0,300	0,9797	1,0099	0,9614
						0,400	0,9897	1,0192	0,9671
						0,500	0,9997	1,0281	0,9730
						0,600	1,0102	1,0374	0,9795
						0,700	1,0220	1,0477	0,9870
						0,800	1,0367	1,0602	0,9967
						0,900	1,0587	1,0785	1,0118
						0,990	1,1184	1,1259	1,0559
					0,999	1,1694	1,1645	1,0962	

Tabela A.9. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 1,8$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 25 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 32$	$\#(R/R^*) = 16$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 16$ valores finais
1,8	1,0028	0,0365	0,2047	1,0700	0,9389	0,100	0,9569	0,9820	0,9491
						0,200	0,9718	0,9981	0,9583
						0,300	0,9828	1,0091	0,9655
						0,400	0,9924	1,0182	0,9721
						0,500	1,0015	1,0265	0,9785
						0,600	1,0108	1,0344	0,9854
						0,700	1,0210	1,0426	0,9931
						0,800	1,0330	1,0518	1,0026
						0,900	1,0502	1,0640	1,0168
						0,990	1,0931	1,0899	1,0552
					0,999	1,1262	1,1063	1,0879	

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.10. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,0$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 42$	$\#(R/R^*) = 21$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 21$ valores finais
2,0	1,0036	0,0447	0,6453	1,1045	0,9289	0,100	0,9503	0,9850	0,9436
						0,200	0,9654	0,9995	0,9511
						0,300	0,9772	1,0106	0,9574
						0,400	0,9881	1,0205	0,9635
						0,500	0,9988	1,0302	0,9697
						0,600	1,0102	1,0402	0,9764
						0,700	1,0230	1,0513	0,9844
						0,800	1,0390	1,0648	0,9945
						0,900	1,0629	1,0846	1,0104
						0,990	1,1282	1,1364	1,0567
						0,999	1,1841	1,1788	1,0992

Tabela A.11. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,0$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 25 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 32$	$\#(R/R^*) = 16$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 16$ valores finais
2,0	1,0023	0,0395	0,2553	1,0755	0,9348	0,100	0,9529	0,9797	0,9451
						0,200	0,9687	0,9972	0,9546
						0,300	0,9804	1,0093	0,9621
						0,400	0,9908	1,0192	0,9689
						0,500	1,0006	1,0282	0,9757
						0,600	1,0107	1,0369	0,9828
						0,700	1,0217	1,0460	0,9908
						0,800	1,0350	1,0561	1,0008
						0,900	1,0539	1,0696	1,0157
						0,990	1,1016	1,0984	1,0561
						0,999	1,1390	1,1169	1,0906

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.12. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,2$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média	Desvio-padrão	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 42$	$\#(R/R^*) = 21$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 21$ valores finais
2,2	1,0031	0,0475	0,6694	1,1103	0,9246	0,100	0,9468	0,9835	0,9398
						0,200	0,9625	0,9988	0,9478
						0,300	0,9750	1,0106	0,9544
						0,400	0,9865	1,0212	0,9607
						0,500	0,9979	1,0315	0,9672
						0,600	1,0100	1,0421	0,9743
						0,700	1,0236	1,0540	0,9825
						0,800	1,0407	1,0685	0,9930
						0,900	1,0662	1,0897	1,0093
						0,990	1,1364	1,1456	1,0566
					0,999	1,1967	1,1915	1,0997	

Tabela A.13. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,2$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 25 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 32$	$\#(R/R^*) = 16$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 16$ valores finais
2,2	1,0017	0,0419	0,3001	1,0796	0,9318	0,100	0,9495	0,9774	0,9421
						0,200	0,9660	0,9962	0,9517
						0,300	0,9783	1,0091	0,9593
						0,400	0,9892	1,0197	0,9663
						0,500	0,9996	1,0294	0,9732
						0,600	1,0103	1,0388	0,9805
						0,700	1,0221	1,0485	0,9887
						0,800	1,0362	1,0594	0,9990
						0,900	1,0566	1,0739	1,0143
						0,990	1,1084	1,1050	1,0564
					0,999	1,1495	1,1251	1,0925	

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.14. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,4$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 42$	$\#(R/R^*) = 21$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 21$ valores finais
2,4	1,0026	0,0501	0,6916	1,1157	0,9205	0,100	0,9433	0,9817	0,9361
						0,200	0,9598	0,9980	0,9446
						0,300	0,9729	1,0105	0,9516
						0,400	0,9849	1,0217	0,9582
						0,500	0,9969	1,0326	0,9649
						0,600	1,0097	1,0439	0,9722
						0,700	1,0241	1,0565	0,9807
						0,800	1,0422	1,0720	0,9915
						0,900	1,0693	1,0946	1,0082
						0,990	1,1441	1,1543	1,0561
					0,999	1,2088	1,2034	1,0994	

Tabela A.15. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 4%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,4$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 25 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 32$	$\#(R/R^*) = 16$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 16$ valores finais
2,4	1,0010	0,0441	0,3384	1,0832	0,9291	0,100	0,9463	0,9765	0,9394
						0,200	0,9633	0,9942	0,9490
						0,300	0,9762	1,0069	0,9566
						0,400	0,9875	1,0201	0,9637
						0,500	0,9985	1,0304	0,9707
						0,600	1,0098	1,0404	0,9781
						0,700	1,0222	1,0507	0,9865
						0,800	1,0372	1,0623	0,9970
						0,900	1,0589	1,0777	1,0127
						0,990	1,1146	1,1109	1,0561
					0,999	1,1591	1,1323	1,0935	

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.16. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 1,6$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 42$	$\#(R/R^*) = 21$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 21$ valores finais
1,6	1,0077	0,0434	0,4041	1,1078	0,9245	0,100	0,9543	0,9800	0,9433
						0,200	0,9706	0,9955	0,9552
						0,300	0,9830	1,0071	0,9647
						0,400	0,9941	1,0174	0,9734
						0,500	1,0048	1,0273	0,9820
						0,600	1,0158	1,0374	0,9912
						0,700	1,0281	1,0485	1,0015
						0,800	1,0430	1,0620	1,0144
						0,900	1,0647	1,0814	1,0338
						0,990	1,1213	1,1308	1,0868
					0,999	1,1673	1,1703	1,1324	

Tabela A.17. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 1,6$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 25 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	$\#(R/R^*) = 32$	$\#(R/R^*) = 16$ valores iniciais	$\#(R/R^*) = 16$ valores finais
1,6	1,0093	0,0404	0,1533	1,087	0,9362	0,100	0,9583	0,9857	0,9474
						0,200	0,9751	1,0021	0,9586
						0,300	0,9874	1,0137	0,9675
						0,400	0,9981	1,0234	0,9757
						0,500	1,0082	1,0323	0,9838
						0,600	1,0185	1,0410	0,9924
						0,700	1,0297	1,0502	1,0021
						0,800	1,0429	1,0607	1,0142
						0,900	1,0616	1,0749	1,0323
						0,990	1,1077	1,1067	1,0821
					0,999	1,1429	1,1284	1,1249	

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.18. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 1,8$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	#(R/R*) = 42	#(R/R*) = 21 valores iniciais	#(R/R*) = 21 valores finais
1,8	1,0076	0,0481	0,4510	1,1187	0,9195	0,100	0,9487	0,9796	0,9371
						0,200	0,9664	0,9963	0,9491
						0,300	0,9800	1,0089	0,9588
						0,400	0,9921	1,0201	0,9679
						0,500	1,0040	1,0308	0,9769
						0,600	1,0162	1,0419	0,9866
						0,700	1,0299	1,0541	0,9976
						0,800	1,0466	1,0689	1,0116
						0,900	1,0710	1,0903	1,0327
						0,990	1,1352	1,1454	1,0918
					0,999	1,1879	1,1896	1,1438	

Tabela A.19. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 1,8$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 25 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média	Desvio-padrão	Coef. de assi.	Máx	Min	F	#(R/R*) = 32	#(R/R*) = 16 valores iniciais	#(R/R*) = 16 valores finais
1,8	1,0097	0,0449	0,1964	1,0993	0,9299	0,100	0,9532	0,9843	0,9419
						0,200	0,9716	1,0026	0,9537
						0,300	0,9852	1,0155	0,9631
						0,400	0,9970	1,0263	0,9718
						0,500	1,0082	1,0362	0,9804
						0,600	1,0197	1,0459	0,9896
						0,700	1,0321	1,0562	0,9999
						0,800	1,0470	1,0680	1,0129
						0,900	1,0681	1,0839	1,0324
						0,990	1,1206	1,1197	1,0862
					0,999	1,1612	1,1443	1,1326	

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.20. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,0$

Q <sub>max</sub> / Q <sub>mod</sub>	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	#(R/R*) = 42	#(R/R*) = 21 valores iniciais	#(R/R*) = 21 valores finais
2,0	1,0075	0,0519	0,4817	1,1272	0,9159	0,100	0,9443	0,9788	0,9322
						0,200	0,9631	0,9965	0,9445
						0,300	0,9776	1,0099	0,9545
						0,400	0,9906	1,0218	0,9639
						0,500	1,0033	1,0334	0,9733
						0,600	1,0166	1,0453	0,9834
						0,700	1,0313	1,0584	0,9950
						0,800	1,0494	1,0744	1,0097
						0,900	1,0760	1,0975	1,0321
						0,990	1,1463	1,1574	1,0954
					0,999	1,2044	1,2058	1,1514	

Tabela A.21. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,0$

Q <sub>max</sub> / Q <sub>mod</sub>	Caraterísticas da amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 25 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	#(R/R*) = 32	#(R/R*) = 16 valores iniciais	#(R/R*) = 16 valores finais
2,0	1,0099	0,0485	0,2308	1,1068	0,9250	0,100	0,9491	0,9827	0,9375
						0,200	0,9686	1,0026	0,9498
						0,300	0,9832	1,0165	0,9596
						0,400	0,9959	1,0283	0,9687
						0,500	1,0080	1,0390	0,9777
						0,600	1,0204	1,0497	0,9873
						0,700	1,0339	1,0608	0,9982
						0,800	1,0501	1,0737	1,0118
						0,900	1,0732	1,0910	1,0323
						0,990	1,1310	1,1303	1,0889
					0,999	1,1761	1,1573	1,1378	

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A.22. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,2$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	#(R/R*) = 42	#(R/R*) = 21 valores iniciais	#(R/R*) = 21 valores finais
2,2	1,0073	0,0550	0,5099	1,1343	0,9129	0,100	0,9405	0,9772	0,9282
						0,200	0,9602	0,9959	0,9409
						0,300	0,9755	1,0102	0,9512
						0,400	0,9892	1,0228	0,9609
						0,500	1,0026	1,0351	0,9706
						0,600	1,0167	1,0478	0,9811
						0,700	1,0324	1,0618	0,9931
						0,800	1,0516	1,0788	1,0083
						0,900	1,0800	1,1036	1,0316
						0,990	1,1556	1,1678	1,0973
					0,999	1,2184	1,2198	1,1556	

Tabela A.23. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,2$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 25 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média	Desvio-padrão	Coef. de assi.	Máx	Min	F	#(R/R*) = 32	#(R/R*) = 16 valores iniciais	#(R/R*) = 16 valores finais
2,2	1,0098	0,0515	0,2637	1,1126	0,9213	0,100	0,9455	0,9810	0,9340
						0,200	0,9660	1,0022	0,9466
						0,300	0,9813	1,0171	0,9567
						0,400	0,9947	1,0297	0,9660
						0,500	1,0076	1,0412	0,9753
						0,600	1,0207	1,0526	0,9852
						0,700	1,0351	1,0645	0,9964
						0,800	1,0523	1,0783	1,0104
						0,900	1,0771	1,0968	1,0315
						0,990	1,1395	1,1388	1,0901
					0,999	1,1886	1,1677	1,1408	

Efeito da variabilidade hidrológica na receita esperada numa pequena central hidroelétrica, PCH (risco hidrológico)

Tabela A. 24. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (15 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,4$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 42 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 15 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	#(R/R*) = 42	#(R/R*) = 21 valores iniciais	#(R/R*) = 21 valores finais
2,4	1,0070	0,0579	0,5324	1,1406	0,9100	0,100	0,9368	0,9754	0,9243
						0,200	0,9574	0,9952	0,9374
						0,300	0,9733	1,0103	0,9481
						0,400	0,9878	1,0237	0,9580
						0,500	1,0019	1,0367	0,9681
						0,600	1,0167	1,0501	0,9789
						0,700	1,0332	1,0649	0,9913
						0,800	1,0536	1,0829	1,0070
						0,900	1,0837	1,1091	1,0309
						0,990	1,1641	1,1773	1,0985
					0,999	1,2313	1,2325	1,1584	

Tabela A. 25. Receitas acumuladas atualizadas adimensionais (25 anos de concessão) para diferentes probabilidades de não-excedência para um período global, inicial e final. Taxa de atualização de 10%. Características estatísticas da receita adimensional.  $Q_{max}/Q_{mod} = 2,4$

$Q_{max}/Q_{mod}$	Caraterísticas da amostra de 32 receitas acumuladas atualizadas adimensionais num período de 25 anos					Probabilidade de não-excedência (lei Pearson III)			
	Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de assi.	Máx	Min	F	#(R/R*) = 32	#(R/R*) = 16 valores iniciais	#(R/R*) = 16 valores finais
2,4	1,0096	0,0542	0,2914	1,1179	0,9179	0,100	0,9420	0,9793	0,9307
						0,200	0,9634	1,0018	0,9435
						0,300	0,9794	1,0177	0,9538
						0,400	0,9935	1,0310	0,9633
						0,500	1,0070	1,0433	0,9728
						0,600	1,0208	1,0553	0,9829
						0,700	1,0360	1,0680	0,9944
						0,800	1,0543	1,0825	1,0087
						0,900	1,0806	1,1021	1,0304
						0,990	1,1473	1,1463	1,0904
					0,999	1,2002	1,1767	1,1426	

## MATLAB

```
tesel.m* x +
1 function TESE
2
3 clc; close all
4
5 Qmd = xlsread('CaudalAHE.xlsx');
6 Qeco = Qmd;
7 Qdesc = Qmd;
8
9 Area = 46.04; %km2
10 Escoamento = 761; %(mm)
11 Volume = (Area*Escoamento)/1000;
12 Qmod = Volume/(365*24*3600)/10.^-6;
13 QQmod = input('Define Q/Qmod:');
14 QecoQmod = 0.05;
15 Qecologico = QecoQmod*Qmod; %m3/s
16 Qmax = QQmod*Qmod; %m3/s
17
18 Taxa_atual = input('Define a taxa de atualização:');
19
20 for i=1:length(Qmd)
21     if Qeco(i) > Qecologico
22         Qeco(i) = Qecologico;
23     end
24     Qafl(i) = Qmd(i) - Qeco(i);
25
26
27
28
29
30 Qturb = Qafl;
31
32 if Qafl(i) <= Qmax
33
34     Qafl(i) = Qturb(i);
35 else
36     Qafl(i) = Qmax;
37
38 end
39
40 end
41 %%%Volume anual turbinado%%
42 S = 0;
43 for i=0:1:55
44     total=0;
45     for j=1:1:365
46         S=Qturb((i*365)+j);
47         total=S+total;
48     end
49     Vol_anual_turb(i+1)=total*0.024*3.6;
50 end
51 %%%Volume anual turbinado%%
52
53 %%%Energia anual%%
54 Energia_anual=(Vol_anual_turb*9.8/3600);
55 %%%Energia anual%%
56
57 %%%media dos valores medios da energia anual%%
58 medEnergia_anual = mean(Energia_anual)
59 %%%media dos valores medios da energia anual%%
```

```
60 -
61 - custo_uni = 1; %custo unitário
62 - N = input('Define o período de concessão:'); %período da concessão de exploração
63 - Fator_atualizado = ((1+Taxa_atual).^N-1)/((1+Taxa_atual).^N)/Taxa_atual; %fator atualizado
64 - Receita_referencia = medEnergia_anual*10.^6*custo_uni;%*Fator_atualizado %receita de referencia
65 -
66 - Receita_anual=0;
67 -
68 - for j = 1:1:56-N+1
69 -     x=j-1;
70 -     soma = 0;
71 -     for i = 1:1:N
72 -         %Receita_anual(i,j) = Energia_anual(x+i)*10.^6/((1+Taxa_atual).^i);
73 -         soma = soma + Energia_anual(x+i)*10.^6/((1+Taxa_atual).^i);
74 -     end
75 -     Receita_anual(j) = soma / Receita_referencia;
76 - end
77 -
78 -
79 - media == mean(Receita_anual)
80 - desvio_padrao == std(Receita_anual)
81 - %coef_assimetria = skewness(Receita_anual)
82 - maximo == max(Receita_anual)
83 - minimo == min(Receita_anual)
84 -
85 - M(:,1)=Qmd;
86 - M(:,2)=Qeco;
87 - M(:,3)=Qturb;
88 - N=Vol_anual_turb;
89 - N=N';
90 - L(:,1)=Energia_anual;
91 - P=Receita_anual;
92 - P=P';
93 -
94 - csvwrite('Caudalsimula.csv',M,0,0);
95 - csvwrite('Volume anual turbinado.csv',N,0,0);
96 - csvwrite('Energia Anual.csv',L,0,0);
97 - csvwrite('Receita_anual25anos.csv',P);
98 - end
```

Figura A.4. Código da simulação de produção da energia e da respetiva variabilidade que advém da série histórica global.