



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Aplicação e Adaptação de Modelos Computacionais à Análise da Viabilidade Técnico- Económica de Pequenos Aproveitamentos Hidroeléctricos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

Autor

André Filipe Fraga Henriques

Orientador

José Paulo Pereira de Gouveia Lopes de Almeida

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada.

Coimbra, Março, 2014

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer aos meus pais e irmã por me acompanharem neste trajecto, obrigado pelo apoio incondicional e motivação no decurso do realizar deste objectivo. Um agradecimento também especial a toda a minha família e amigos por estarem sempre presentes nesta etapa da minha vida.

Agradeço ao Professor Doutor José Paulo Pereira de Gouveia Lopes de Almeida, a oportunidade de usufruir dos seus conhecimentos na orientação desta dissertação, assim como toda a disponibilidade e apoio prestados.

Agradeço ao Professor Doutor José Simão Antunes do Carmo a disponibilização de informação batimétrica usada nesta dissertação.

Um obrigado ao Engenheiro Pedro Soares Ribeiro Marques pela sua disponibilidade, ajuda, transmissão de conhecimentos e amizade.

RESUMO

O presente estudo consiste na aplicação e adaptação de duas ferramentas de cálculo distintas com vista a apoiar estudos de viabilidade técnico-económica de pequenos aproveitamentos hidroeléctricos nomeadamente da adição da componente hidroeléctrica ao açude ponte de Coimbra.

A introdução de informação relativamente às descargas na barragem da Raiva e às entradas de caudais na foz do rio Ceira permitirão, através da utilização do programa HEC-RAS (HEC-RAS@ 2010), determinar as afluências ao açude ponte em Coimbra nos anos em que existam registos. Os resultados obtidos serão depois introduzidos no modelo de simulação do aproveitamento, o MACGT (Modelo Açude-Ponte de Coimbra Equipado com Grupos Turbo-Generadores), descrito inicialmente em (Marques, 2010), de modo a obter resultados que apoiem a decisão do investimento.

O objectivo deste estudo passa também por testar a resposta perante séries históricas de afluências, características de situações normais e excepcionais (secas e cheias), de modo a auxiliar a investigação sobre a parametrização das regras de exploração e a análise crítica das condições hidráulico-operacionais.

ABSTRACT

The present study is based on the application and adaptation of two different calculation tools which aim to support the technical-economic feasibility study of small hydropower stations namely the implementation of a hydroelectric component in dam-bridge in Coimbra.

The introduction of information related to the discharges in Raiva dam and the incoming flows from the mouth of river Ceira by using software HEC-RAS will allow to determine the inflows in Coimbra dam-bridge for the years that there are records of. Afterwards the results will be introduced into the simulation model MACGT in order to obtain helpful conclusions to support in the investment decision process.

The purpose of this study is also to test the answer to historical series of the affluence flows in normal and extreme situations (floods and droughts) to help the investigation of a parameterization about operating rules and a critical analysis of hydraulic operation conditions.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento e objetivos	1
1.2	Organização do texto	2
2	CONTRIBUTOS MAIS SIGNIFICATIVOS EXTRAÍDOS DA BIBLIOGRAFIA	1
2.1	Sumário	1
2.2	Programa RIVERWARE.....	1
2.2.1	Modelo de operações diárias numa central hidroeléctrica	3
2.2.2	Estudo de viabilidade para o abastecimento de água de uma região	3
2.3	Programa ILM-River	3
2.3.1	Modelo de simulação para o reservatório Ybbs no rio Danúbio	5
2.3.2	Controlo Coordenado de Quatro Reservatórios no Rio Danúbio	6
2.4	Programa SIMAHPP 4.8	6
2.5	Programa POWERSIM	7
2.5.1	Modelação do sistema de uma central hidroeléctrica para melhorar o funcionamento da albufeira	8
2.6	Programa HEC-ResSim.....	9
2.6.1	Modelação do aproveitamento de fins múltiplos em Kajakai, no valo do rio Helmand, Afeganistão	10
2.7	Programa HEC-RAS	10
2.7.1	Quantificação hidrológica dos impactos provocados pela construção de uma barragem no rio Tana, Quénia	12
2.8	Programa MACGT	12
2.8.1	Generalidades.....	12
3	FERRAMENTAS DE CÁLCULO UTILIZADAS	14
3.1	Utilização do programa HEC-RAS	14
3.1.1	Criação de um novo projecto e respectiva geometria	14
3.1.2	Coeficientes introduzidos nas secções transversais	15

3.1.3	Caracterização do curso do rio.....	17
3.1.4	Distâncias de interpolação entre secções	19
3.1.5	Condições de fronteira	20
3.1.6	Tempos de simulação.....	24
3.2	Utilização do programa MACGT.....	25
3.2.1	Dados de operação	26
3.2.2	Dados observados	28
3.2.3	Tarifário aplicado nas simulações e remuneração	29
4	TRATAMENTO DOS DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO.....	31
4.1	Caudais médios diários na barragem da Raiva e no açude ponte Coimbra.....	32
4.1.1	Organização e interpolação de valores intermédios	33
4.1.2	Análise temporal dos caudais	35
4.2	Caudais médios diários no rio Ceira.....	36
4.3	Sintetização de caudais.....	37
4.4	Organograma de procedimentos.....	41
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	42
5.1	Espectro de caudais observados	42
5.2	Resultados obtidos com o programa HEC-RAS	45
5.3	Resultados obtidos com o modelo MACGT	48
5.4	Influência na remuneração devido ao coeficiente Z.....	55
5.5	Tempos de percurso.....	56
5.6	Impacto da alteração das regras de operação	61
6	CONSIDERAÇÕES CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS.....	64
6.1	Considerações finais e conclusões.....	64
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Traçado do rio em planta.....	15
Figura 3.2 – Traçado do rio sobreposto ao mapa de referência.....	15
Figura 3.3 – Tabela 3-1 do manual de referência do HEC-RAS.....	16
Figura 3.4 – Tabela 3-3 do manual de referência do HEC-RAS.....	17
Figura 3.5 – Secções transversais.....	18
Figura 3.6 - Perfil longitudinal do rio.....	18
Figura 3.7 - Zonas mais relevantes.....	19
Figura 3.8 - Condição de fronteira a montante.....	20
Figura 3.9 - Condição de fronteira intermédia.....	21
Figura 3.10 - Descarregador de cheia utilizado no HEC-RAS.....	22
Figura 3.11 - Condição de fronteira no descarregador.....	22
Figura 3.12 – Variação da cota de montante do APC com o caudal (adaptado de Almeida et al, 2011).....	23
Figura 3.13 - Condição de fronteira a jusante.....	24
Figura 3.14 - Interface de apresentação do MACGT.....	25
Figura 3.15 - Esquema de abertura das comportas.....	26
Figura 3.16 - Curva de vazão das comportas.....	27
Figura 3.17 - Regras de operação.....	27
Figura 3.18 - Modos de exploração da central mini-hídrica.....	28
Figura 3.19 - Dados de entrada no MACGT.....	29
Figura 3.20 - Valores das parcelas correspondentes à remuneração.....	29
Figura 4.1 - Estação hidrométrica Ponte Conraria.....	31
Figura 4.2 - Escala de classificação do tipo de ano hidrológico.....	34
Figura 4.3 - Representação gráfica das percentagens correspondentes a cada ano.....	34
Figura 4.4 - Percentagens médias correspondentes ao rio Ceira.....	37
Figura 4.5 - Hidrograma afluente diário sintético.....	39
Figura 4.6 - Hidrograma de caudais médios diários.....	40
Figura 4.7 - Hidrograma de caudais médios diários gerado artificialmente.....	40
Figura 4.8 - Diagrama de fluxo dos procedimentos.....	41
Figura 5.1 - Caudais integrais anuais observados.....	42
Figura 5.2 - Caudais integrais anuais e hidrogramas dos anos de seca extrema.....	43
Figura 5.3 - Caudais integrais anuais e hidrogramas dos anos secos.....	43
Figura 5.4 – Caudais integrais anuais e hidrogramas dos anos médios.....	44
Figura 5.5 – Caudais integrais anuais e hidrogramas dos anos húmidos.....	44

Figura 5.6 – Caudais integrais anuais e hidrogramas dos anos extremamente húmidos.....	44
Figura 5.7 - Hidrogramas de comparação para o ano 2005.....	45
Figura 5.8 - Hidrogramas de comparação para o ano 2007.....	46
Figura 5.9 - Hidrogramas de comparação para o ano de 2010.....	47
Figura 5.10 - Comparação de resultados	48
Figura 5.11 - Remuneração mensal para a série cronológica considerada.....	49
Figura 5.12 – Receitas anuais e receita média.....	50
Figura 5.13 - Remuneração mensal dos anos extremamente secos.....	50
Figura 5.14 - Remuneração mensal dos anos secos	51
Figura 5.15 - Remuneração mensal dos anos médios.....	52
Figura 5.16 - Remuneração mensal dos anos húmidos	52
Figura 5.17 - Remuneração mensal dos anos extremamente húmidos.....	53
Figura 5.18 - Receitas anuais dos anos segundo a sua tipologia.....	54
Figura 5.19 - Comparação de receitas anuais obtidas por processos distintos.....	54
Figura 5.20 - Hidrograma de caudais (ano de seca extrema)	57
Figura 5.21 - Caudais máximos no intervalo considerado	57
Figura 5.22 - Hidrograma de caudais (ano húmido).....	58
Figura 5.23 - Caudais máximos no primeiro intervalo considerado.....	58
Figura 5.24 - Caudais máximos para o segundo intervalo considerado	58
Figura 5.25 - Hidrograma de caudais (ano extremamente húmido).....	59
Figura 5.26 - Tempos de percurso e respectivos caudais para o período analisado	60
Figura 5.27 – Reprogramação da matriz de manobra das comportas (a) e (b).....	61
Figura 5.28 - Comparação das alturas de água a montante para 2 de janeiro de 2001.....	62
Figura 5.29 - Comparação das alturas de água a montante de 9 a 10 de janeiro de 2001	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Coordenadas geométricas das secções transversais	18
Quadro 3.2 - Distâncias de interpolação.....	19
Quadro 4.1 - Percentagens dos caudais para os diferentes anos.....	33
Quadro 4.2 - Anos considerados nas simulações efectuadas (coloridos)	35
Quadro 4.3 - Geração de caudais médios diários para o rio Ceira	36
Quadro 4.4 - Percentagens médias correspondentes ao rio Ceira.....	37
Quadro 4.5 - Discretização horária de caudais diários	40
Quadro 5.1 - Volumes de aflúências ao açude ponte Coimbra (2005).....	45
Quadro 5.2 - Volumes de Afluências ao açude ponte Coimbra (2007).....	46
Quadro 5.3 - Volumes de aflúências ao açude ponte Coimbra (2010).....	47
Quadro 5.4 - Volumes anuais para os anos base	47
Quadro 5.5 - Quadro resumo das receitas mensais obtidas no MACGT.....	49
Quadro 5.6 - Comparação das receitas médias anuais.....	55
Quadro 5.7 - Receitas obtidas com afectação da parcela Z.....	56
Quadro 5.8 - Tempos de percuso.....	56
Quadro 5.9 - Tempos de percurso médios obtidos no HEC-RAS em regime variável	60
Quadro 5.10 – Intervalos de valores analisados	62

SIGLAS

APC – Açude Ponte de Coimbra

BR – Barragem da Raiva

INAG – Instituto da Água

MACGT – Modelo Açude Ponte de Coimbra Equipado com Grupos Turbo-Geradores

MODERN – Mobility, Development and Energy use Reduction

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

VBA – Visual Basic for Applications

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e objetivos

Os modelos computacionais de modelação de escoamentos e de simulação da exploração de aproveitamentos hidroeléctricos são poderosos auxiliares na fase de projecto, pois permitem antever características essenciais com que o operador se poderá confrontar durante a fase de exploração, proporcionando também receitas previsionais essenciais a uma análise do ponto de vista económico.

Este estudo pretende contribuir para a aplicação e adaptação de modelos computacionais à análise da viabilidade técnico-económica de pequenos aproveitamentos hidroeléctricos, considerando o caso hipotético da adição da produção hidroeléctrica no açude ponte de Coimbra (APC). Neste âmbito pretende-se avaliar a exequibilidade da implementação de uma abordagem baseada na utilização conjunta dos programas HEC-RAS e MACGT, de modo a gerar um conjunto de resultados complementares aos utilizados em estudos anteriores no âmbito do projecto Civitas MODERN (Almeida et al, 2012).

Através da utilização do programa HEC-RAS, pretende-se simular as características do escoamento verificado ao longo do rio Mondego, entre a barragem da Raiva (BR) e o APC, introduzindo informação hidrológica a montante de modo a gerar afluências no APC.

Deste modo espera-se obter um conjunto de informação útil relativamente aos tempos de percurso das descargas da BR, até atingirem a zona do APC. Esta informação permitirá dotar os operadores do conhecimento de informação relevante para a antecipação de certas manobras (p. ex. mitigação de cheias e/ou retirada de serviço da turbina para a proteger em situação de cheia), contribuindo para a melhoria da articulação da operação entre estes dois aproveitamentos.

Relativamente ao estudo económico, a utilização do programa MACGT proporciona as remunerações mensais para os anos considerados, pretendendo-se utilizar informação para uma série hidrológica temporal maior do que aquela que existe na actualidade, com o intuito de melhorar a análise da viabilidade económica do aproveitamento hidroeléctrico. Pretende-se também avaliar o impacto quanto à alteração das tarifas aplicadas na produção hidroeléctrica.

A utilização do MACGT será também explorada do ponto de vista da adaptação das regras de exploração das comportas do APC, de modo a testar modos alternativos de operação em

situação de cheia e avaliar o correspondente impacto no desempenho económico do aproveitamento.

1.2 Organização do texto

Este documento apresenta seis partes distintas.

No presente capítulo é feito um enquadramento do tema, são estabelecidos os objectivos e é descrita a estrutura do documento.

No capítulo 2 é apresentada uma abordagem sobre alguns programas no âmbito deste estudo referidos na bibliografia a que correspondem características computacionais semelhantes.

No capítulo 3 são descritos os procedimentos de utilização dos programas utilizados, respectivamente, quanto ao HEC-RAS e ao MACGT.

O capítulo 4 apresenta uma descrição do tratamento a que os dados recolhidos foram submetidos para que pudessem ser devidamente utilizados e a abordagem de cálculo do ponto de vista computacional.

No capítulo 5 é feita uma análise dos resultados obtidos através de cada programa e finalmente no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as pistas para futuros desenvolvimentos.

2 CONTRIBUTOS MAIS SIGNIFICATIVOS EXTRAÍDOS DA BIBLIOGRAFIA

2.1 Sumário

Neste capítulo serão apresentados de um modo geral, alguns dos programas que possibilitam a modelação e a simulação de características relacionadas com os objectivos em questão. Deste modo, pretende-se efectuar uma descrição das capacidades de cada programa, assim como alguns casos práticos em que tenham sido utilizados, com o intuito de inteirar o leitor das potenciais capacidades das ferramentas que irão ser utilizadas durante este estudo.

Dentro de um leque alargado de programas disponíveis, foram escolhidos aqueles que mais se enquadram dentro dos objectivos que se pretendem atingir.

2.2 Programa RIVERWARE

Fruto do esforço conjunto entre a Autoridade Valley do Tennessee (TVA), a U.S. Bureau of Reclamation (USBR), o Centro de Apoio Avançado à Decisão para a Água e Sistemas Ambientais (CADSWES), (CADSWES@ 2013), o RiverWare é uma ferramenta de modelação de rios e reservatórios, que possibilita o recurso à optimização multi-objectivo.

Esta ferramenta oferece diversos tipos de modelação iterativa que inclui a simulação simples ou personalizada. Permite uma representação efectiva dos modelos no que respeita a operação e planeamento de hidroeléctricas.

As principais capacidades desta ferramenta compreendem, a geração de sequências hidrológicas obtidas através de registos de grande dimensão temporal, de modo a analisar as variações e as tendências do clima, por forma a estudar previsões a longo prazo das suas alterações. Inclui ainda a capacidade de optimização multi-objectivo de bacias hidrográficas e albufeiras, de centrais hidroeléctricas e correspondentes valores de energia gerados, em (Zagona et al, 1999).

O RiverWare, segundo (Zagona et al, 2008), como ferramenta de simulação de escoamento simples, utiliza uma aproximação não-paramétrica na sua linguagem, baseada em *bootstrapping*, um conceito informático de leitura de informação de uma unidade de entrada de dados, sem ajuda externa de instruções inseridas manualmente. A integração da vasta gama de escoamentos recolhidos gera sequências de fluxos para os períodos secos e húmidos,

auxiliando assim à percepção das necessidades dos sistemas de recursos hídricos, com base numa estimativa aceitável. Este método foi demonstrado apenas nas bacias hidrográficas da zona ocidental dos Estados Unidos da América, de modo a gerar padrões de escoamento estocásticos semelhantes aos resultados estatísticos obtidos através das sequências históricas registadas. Este modelo é uma ferramenta simples, não requer suposições específicas e a linguagem interpretada neste modelo expressa as políticas operacionais multi-objectivo.

As aplicações do RiverWare compreendem, programação operacional, previsão, planeamento, avaliação de políticas, análises operacionais e processos de decisão. É assim o resultado de uma escolha iterativa computacional compreendida entre uma hora e um ano, (CADSWES@ 2013).

A modelação e os dados recolhidos permitem ao modelo representar as condições específicas do local através da criação de objectos de simulação, os quais são relacionados entre si de modo a formar uma rede rio/reservatório. A cada objecto é associada uma gama de dados correspondentes e são escolhidos algoritmos associados aos processos físicos e à função de cada um, assim como da sua representação geral no modelo.

A linguagem utilizada foi exclusivamente desenvolvida para ser aplicada e interpretada pela ferramenta RiverWare, utilizando regras de operação expressas em RPL, (RiverWare Policy Language). Existem algumas considerações a ter no que diz respeito às regras, ou políticas de operação. Estas devem ser lógicas do ponto de vista da operação do sistema, atendendo às condições hidrológicas, à estação do ano e a outras restrições a satisfazer. É definido um conjunto de regras prioritárias associado a cada sistema fluvial, que será aplicado nas iterações desenvolvidas pelo modelo.

A solução de optimização do RiverWare tem por base um algoritmo de programação linear multi-objectivo, de modo a optimizar as descargas de uma determinada albufeira, obedecendo a um conjunto de prioridades especificadas pelo utilizador. A formulação do problema, após concluída, é encaminhada para um “solver”, nesta ferramenta o módulo resolutivo utilizado é o CPLEX.

Relativamente à optimização das hidroeléctricas, a sua componente económica é representada através de uma variável implícita designada “Net Avoid Cost”, ou “Custos Evitados Líquidos”.

2.2.1 Modelo de operações diárias numa central hidroeléctrica

Um exemplo de aplicação do RiverWare, é o modelo de operações diárias numa central hidroeléctrica a implementar a sul da bacia do American River, Colorado, Estados Unidos da América, em (Zagona et al, 2008). Este modelo foi desenvolvido em 2006, pela AMEC (antiga *Hydrosphere Resource Consultants*), ao serviço da entidade *El Dorado Irrigation District (EID)*. A rede do projecto compreende um sistema composto por quatro reservatórios de grandes dimensões, aquedutos, canais de escoamento de superfície livre, tanques de armazenamento de água e uma central hidroeléctrica de 20 MW de potência instalada. As restrições do modelo foram consideradas tendo em conta o tipo de ano em análise para as diferentes hipóteses, seco, normal, húmido ou muito húmido. Os resultados permitiram ao operador uma análise prévia das hipóteses consideradas ao efectuar as decisões de operação.

2.2.2 Estudo de viabilidade para o abastecimento de água de uma região

O segundo exemplo de aplicação do RiverWare que é apresentado pelo mesmo autor, envolve um estudo de viabilidade para o abastecimento de água de uma determinada região. Este modelo foi desenvolvido pela empresa Tarrant Regional Water District (TRWD), Forth Worth, Texas, Estados Unidos da América, realizou um estudo com vista à viabilidade do fornecimento de água na região. O modelo utilizado para o planeamento permitiu a avaliação de futuros cenários possíveis, assim como das necessidades previstas para um ano horizonte de 2060, possibilitando deste modo a optimização de infra-estruturas a implementar. Os resultados obtidos são utilizados em diversas avaliações, nomeadamente quanto ao período de retorno de um investimento a nível de infra-estruturas, à produtividade relacionada com a utilização dos recursos hídricos e às medidas de prevenção para períodos de seca.

2.3 Programa ILM-River

O ILM-River é uma ferramenta universal, não gratuita, da MATLAB/Simulink, (MATHWORKS @ 2013), para simulação e controle em bacias e centrais hidroeléctricas dispostas em cascata. Esta ferramenta consiste em duas livrarias, uma de modelação de bacias e albufeiras, outra para controle de centrais hidroeléctricas individuais ou dispostas em cascata. As livrarias podem contêm módulos que podem ser associados entre si. Os parametros que são aplicados através de estimativa a estes módulos são da responsabilidade do projectista, em (Pfuetzenreuter e Rauschenbach, 2005).

O bloco correspondente ao “RIVER-MOD” facilita a construção do modelo, composto por um ou mais reservatórios, devido ao editor gráfico disponível. No entanto para correr a

simulação é necessário introduzir os critérios de controlo. Uma vez adicionados todos os critérios associados à operação do sistema, o bloco correspondente ao “RIVER-CON”, permite a otimizar medidas de prevenção em caso de inundações e planear estratégias de regularização e suavização de descargas.

A simulação do comportamento de um reservatório subentende uma descrição analítica, sendo que para o controlo apenas é necessário conhecer os níveis de água e fluxos correspondentes. Esta ferramenta foi desenvolvida utilizando modelos sintetizados de controlo tecnológico e baseados na teoria de Saint-Venant, uma vez que permite a descrição de um comportamento não-estacionário com precisão suficiente. O comportamento nas zonas em que a água ultrapassa as margens deve ser descrito, correspondendo assim a um factor que dificulta a modelação do sistema. É necessário considerar também estações de bombagem e entradas de pequenos afluentes nestas regiões.

O modelo “RIVER-MOD” apresenta módulos que permitem a representação gráfica e disposição dos diferentes componentes do sistema correspondente à região em estudo, assim como os resultados detalhados das características essenciais à análise de estratégias e acções a tomar. A livreria de programas “RIVER-MOD” apresenta a capacidade de obter trajectórias do escoamento para um intervalo de valores de referência e do nível de água ao longo do rio. Conhecendo a curva de vazão característica, esta ferramenta determina o nível de água imediatamente a montante de uma barreira física de armazenamento e as descargas efectuadas através de turbinas. Com base nesses resultados permite determinar as regiões submersas, onde a água galga as margens do rio e as zonas onde ocorre acumulação da água descarregada no caso de existir contra-embalse.

A implementação de albufeiras possibilita a utilização dos recursos hídricos para diversos fins como, por exemplo, a geração de energia renovável, que em muitos casos dá origem à construção de albufeiras em cascata ao longo do rio. Como resultado, o comportamento do curso natural do rio é influenciado, uma vez que existe uma ligação hidráulica entre os reservatórios. Os módulos integrados no modelo “RIVER-CON”, permitem uma monitorização e controlo das operações necessárias à produção de energia sem que a alteração dos caudais médios naturais na zona de implementação dos aproveitamentos hidroelétricos do rio sejam significativos. De modo a dar resposta à necessidade de otimizar as regras de operação, foram desenvolvidos dois módulos, o *PID-concept* e o *Fuzzy-concept FUGERA*, em Jiuping Xu (2012), que por si só não permitiam resolver as tarefas multicritério existentes, dando origem posteriormente ao *MEFURO-concept*.

O módulo *PID-concept*, (Proporcional/Integral/Diferencial) baseia-se num conceito de controle usado em automatização que permite controlar circuitos genéricos, é frequentemente utilizado em sistemas de controlo industrial. Nesta ferramenta os níveis de água são controlados com base num conjunto de níveis pré-definidos. Quanto ao módulo *Fuzzy-concept FUGERA*, realiza um controlo similar ao descrito anteriormente, diferindo no facto de que é necessário aplicar o controlo a todas as simulações realizadas, permitindo deste modo caracterizar as entradas no reservatório que atingem níveis que saem dos limites previstos, atribuindo posteriormente factores de ponderação adequados a cada situação.

De modo a otimizar a descarga de um reservatório, é activado o módulo *MEFURO-concept*, para um controlo coordenado de reservatórios em cascata assim que ocorre uma situação de escoamento prevista. A tarefa deste módulo é determinar pontos óptimos de ajuste para os sub-controladores de cada central hidroeléctrica, tendo por base diferentes objectivos. Melhorar o controlo do escoamento minimizando a descarga máxima de cada reservatório, evitando atingir ou ultrapassar os limites dos níveis de água máximos permitidos e maximizar a energia produzida durante a transição entre o funcionamento normal e o controlo de cheias. Por último, existe ainda um módulo de suavização das descargas, *RiverCon Wave – Control-concept* onde o objectivo é minimizar as oscilações do nível de água provocados por cada descarga.

2.3.1 Modelo de simulação para o reservatório Ybbs no rio Danúbio

Uma aplicação da ferramenta ILM-RIVER no reservatório Ybbs do rio Danúbio teve como base os modelos descritos anteriormente. O principal objectivo da sua utilização foi a modelação do comportamento dinâmico do escoamento numa secção compreendida entre duas centrais hidroeléctricas, Wallsee situada a montante e Ybbs a jusante. Este modelo permitiu a descrição do comportamento real do escoamento afluyente e das respectivas descargas, assim como das trajectórias do nível da água. O modelo apresentou bons resultados para todas as gamas de caudais, embora com pequenos erros, de alguns centímetros, relativamente aos níveis da água. O mesmo método de simulação foi desenvolvido posteriormente para três reservatórios dispostos em cascata, Abwinden, Wallsee e Melk, em (Rauschenbach e Wernstedt, 1999).

2.3.2 Controlo Coordenado de Quatro Reservatórios no Rio Danúbio

Outra aplicação do ILM-River, ainda segundo o mesmo autor, envolve a utilização do módulo *MEFURO-concept*, inserido no modelo “RIVER-CON”, o qual foi aplicado ao controlo coordenado de quatro reservatórios no rio Danúbio, Abwinden, Wallsee, Ybbs e Melk. A estratégia utilizada teve por base a teoria do controlo hierárquico, correspondendo a cada reservatório o seu respectivo controlador automático, os quais se mantêm em funcionamento enquanto se verificarem regras válidas de operação. Os resultados da trajectória de descarga óptima, de cada central hidroeléctrica disposta em cascata, são calculados através da activação de um coordenador quando se verifica um determinado escoamento previsto. A actualização constante referente aos reservatórios permite alterar estratégias de controlo para valores que ultrapassem os limites estabelecidos. Este controlo coordenado foi testado para ondas de cheia com diferentes caudais de ponta, de modo a verificar a sua eficácia para uma determinada gama de caudais. Os resultados permitiram concluir que com o aumento do caudal máximo a possibilidade de o reduzir se torna menor e que a eficácia de um controlo coordenado depende do volume da onda de cheia.

2.4 Programa SIMAHPP 4.8

A *Hydroxpert* (HYDROXPERT@ 2013), é uma companhia independente que fornece desenvolvimento tecnológico, serviços de engenharia e consultadoria na área da energia, águas e saneamento, infra-estruturas e ambiente. Desenvolveu o programa SIMAHPP 4.8, o qual permite a modelação e simulação do funcionamento de um sistema hidrológico.

A necessidade utilização de programas relacionados com a geração de energia hidroeléctrica levou ao desenvolvimento da ferramenta, não gratuita, de simulação SIMAHPP, (SIMAHPP 4.8@ 2013). Esta ferramenta é baseada num sistema de janelas de apresentação na interface do programa que permite a avaliação da viabilidade de projectos de centrais de energia hídrica. Foi inicialmente elaborada tendo em vista a simulação para sistemas de centrais mini-hídricas com capacidade de geração de energia até 10MW, embora actualmente simule também centrais hidroeléctricas superiores a 10MW, devido à integração de um módulo financeiro não existente anteriormente.

A última versão, SIMAHPP 4.8 apresenta ao utilizador duas opções relativamente à eficácia da turbina instalada, podendo esta ser variável ou com a fixação de um valor para a eficácia da turbina com base nos escoamentos registados.

O SIMAHPP é um simulador que pode ser utilizado em diferentes locais em simultâneo e oferece uma diversidade de opções, destinado à resolução de um alargado conjunto de problemas de optimização e rentabilidade de sistemas hidroeléctricos. Permite projectar caudais de utilização e respectiva escolha de hidro turbinas a serem implementadas, otimizar tempos de operação de modo a maximizar a produção de energia ao longo do ano, determinar as respectivas receitas provenientes dessa mesma energia e estimar o custo do investimento associado e custos inerentes. A nível económico oferece ainda a possibilidade de estabelecer taxas de amortização, analisar o Valor Actual Líquido associado (VAL) e correspondente Taxa Interna de Retorno (TIR), assim como aspectos ambientais a ter em conta no impacto da implementação, caso o projecto hidroeléctrico planeado seja tornado efectivamente operacional.

Os resultados são apresentados sob a forma gráfica e em tabelas, expressando desse modo as características detalhadas associadas ao projecto em questão. O módulo correspondente à análise de sensibilidade possibilita a introdução personalizada das características especificadas pelo utilizador.

A grande variedade de demonstrações gráficas e resultados de análise é possível uma vez que, o utilizador tem total controlo sobre os parâmetros de entrada no programa para os vários cenários previstos no projecto tendo em conta as possibilidades que apresentam. Deste modo a avaliação do estudo é feita com base numa análise multi-critério a nível hidrológico, financeiro e ambiental.

2.5 Programa POWERSIM

O programa de simulação Powersim Simulation (POWERSIM @ 2013), é uma ferramenta paga e permite criar modelos de sistemas dinâmicos. Estes sistemas permitem relacionar dados relativamente a períodos temporais distintos, de modo a obter índices característicos que obedecem a uma determinada tendência. Apresenta assim uma dimensão ilimitada de sub-modelos integrados numa modelação hierárquica de programação. As suas capacidades permitem a construção de um modelo de simulação representado por fluxogramas e oferece uma grande variedade de objectos para apresentação gráfica de resultados, exposição numérica ou tabelas.

Segundo Bosona e Gebresenbet (2010), esta ferramenta pretende modelar sistemas já existentes ou eventuais estudos a implementar, tendo como objectivo criar uma imagem visual do problema, de modo a oferecer ao utilizador o resultado, ao longo do tempo, no sistema por parte das decisões tomadas, admitindo determinadas estratégias. A sua utilização permite a

identificação de potenciais áreas problemáticas e consequente escolha de medidas de intervenção sujeitas a restrições ambientais a respeitar. Utiliza o método de dinâmica de sistemas na modelação e simulação do comportamento ao longo do tempo, oferecendo uma grande variedade de opções no controlo do comportamento durante a simulação. As potencialidades desta ferramenta permitem a sua utilização em diversas áreas da indústria e negócios, nomeadamente planeamento estratégico, planeamento e gestão de cenários críticos e gestão de recursos.

A comunicação entre múltiplas aplicações executadas em Microsoft Windows é possível na ferramenta Powersim devido à utilização da tecnologia Dynamic Data Exchange (DDE). Compreende também uma aplicação, Application Programmers Interface (API), que permite ao programador estabelecer uma ligação entre o simulador Powersim e outros programas desenvolvidos em Visual basic ou C++.

A modelação pretende apresentar todos os componentes existentes no sistema a implementar, tendo por base um diagrama em planta representativo do sistema. Cada componente é associado a diferentes aspectos relacionados com o funcionamento do sistema, como as entradas de fluxo mensal no reservatório, as descargas controladas, o caudal turbinado, as perdas de água e a energia produzida. Nesta modelação é possível integrar a opção de determinar o galgamento de uma barragem e estimar as perdas por evaporação como uma função linear de entrada do reservatório.

A construção do modelo é realizada através da definição de variáveis e suas relações correspondentes, de modo a obter resultados segundo determinados procedimentos lógicos, nomeadamente, média de armazenamento mensal de um reservatório, níveis de água, perdas por evaporação com base em funções lineares usadas na determinação da área de superfície do reservatório, perdas por galgamento quando a capacidade da albufeira é excedida, energia produzida e potência.

2.5.1 Modelação do sistema de uma central hidroeléctrica para melhorar o funcionamento da albufeira

Ainda segundo os mesmos autores, uma aplicação da ferramenta de simulação Powersim integra um estudo realizado para a central hidroeléctrica da barragem Melka Wakana, localizada na parte superior da bacia do rio Wabi Shebelle na Etiópia. Esta bacia tem um potencial de 5400 GWH/ano, sendo a central Melka Wakana a única da região, composta por quatro grupos turbo-geradores de 38.25MW de potência instalada cada um. As turbinas

instaladas são do tipo Francis Vertical com uma velocidade nominal de 600 r.p.m. e uma queda útil de 297 m.

De modo a tornar o desenvolvimento socioeconómico sustentável, tornou-se necessário desenvolver infra-estruturas de gestão integrada dos recursos hídricos locais, estabelecendo objectivos de fins múltiplos assim como introduzir novas técnicas de operação em sistemas de múltiplas albufeiras. A implementação destas medidas considerou eventuais benefícios referentes a rega de terrenos, produção de alimentos e continuidade da fauna fluvial, fornecimento de energia à região, prevenção contra cheias e garantia de caudais em períodos de seca.

O objectivo principal deste estudo recaiu no aumento anual da energia produzida e uniformização da sua produção através do desenvolvimento de novas medidas no sistema de operação da central hidroeléctrica Melka Wakena. Ambiciona também a quantificação da diferença entre a produção efectiva e a capacidade de projecto, de modo a analisar a possibilidade de economizar água reduzindo as perdas.

Este estudo permitiu concluir que o modelo de simulação dinâmico desenvolvido recorrendo à ferramenta Powersim, pode ser utilizado na optimização das regras de operação do reservatório associado à central hidroeléctrica do sistema. Como resultado das simulações, concluiu-se da possibilidade de melhoria da quantidade de energia produzida de uma maneira uniforme. Tendo em conta os objectivos iniciais, foi apresentada uma redução da diferença entre a produção máxima e mínima, de 8.97 para 1.88 GWh, um aumento da produção anual em 25.97 GWh e uma redução das perdas anuais por evaporação em 17.76 MCM (million cubic metre/millimetre).

A utilização desta ferramenta apesar de apresentar melhorias associadas á produção de energia, fica abaixo das capacidades de projecto da central hidroeléctrica em 12.21%, devido ao reduzido escoamento de entrada no reservatório e outras perdas por parte do sistema.

2.6 Programa HEC-ResSim

O simulador de sistemas de albufeiras (HEC-ResSim@ 2013) é um programa gratuito desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center of the U.S. Army Corps of Engineers que permite a simulação de um ou mais aproveitamentos dispostos em cascata, respeitando as regras de operação aplicadas às albufeira correspondentes. Esta ferramenta segue os critérios gerais de gestão em tempo real de aproveitamentos de fins múltiplos dividindo-se em

três módulos distintos, respectivamente “Watershed Setup”, “Reservoir Network” e “Simulation”.

A importação de mapas e a criação do sistema de albufeiras a analisar são feitos através do módulo “Watershed Setup”, que permite estabelecer as ligações entre linhas de água e albufeiras. Quanto às características físicas, hidrológicas e hidráulico-operacionais dos aproveitamentos, estas são definidas no módulo “Reservoir Network”. Este módulo permite ao utilizador definir para cada zona as regras de operação, segundo as condições, restrições e prioridades correspondentes. Após definição dos intervalos de tempo adoptados para os tempos de cálculo e de simulação, o módulo “Simulation” permite executar o modelo.

2.6.1 Modelação do aproveitamento de fins múltiplos em Kajakai, no valo do rio Helmand, Afeganistão

Uma das aplicações deste software é a modelação do aproveitamento de fins múltiplos em Kajakai, no vale do rio Helmand, Afeganistão (USACE, 2007). Com o objectivo de estudar diversas alternativas para a configuração do aproveitamento, foi utilizado o modelo HEC-ResSim, de modo a maximizar o caudal turbinado sem que a derivação de água para regadios fosse afectada. Foram consideradas três configurações distintas: aproveitamento sem comportas de descarregadores de cheia (existente), aproveitamento com instalação de comportas e aproveitamento com instalação de comportas e aumento da potência instalada na central. A cada configuração fizeram-se corresponder três zonas de operação, respectivamente, zona inactiva, zona conservativa e zona de controlo de zheia. As simulações efectuadas permitiram verificar um aumento da capacidade de armazenamento sem benefício para a central, com a instalação das comportas. Já a instalação das comportas e o aumento da potência instalada apresentou uma subida significativa da energia produzida.

2.7 Programa HEC-RAS

O programa HEC-RAS, cuja sigla significa Hydrologic Engineering Centers River Analysis System, é uma ferramenta gratuita de grande utilidade que permite a modelação e simulação unidimensional de escoamento em regime permanente e variável, a análise de transporte de sedimentos e da temperatura da água. Este programa pertence a um vasto grupo de ferramentas na área da hidrologia, desenvolvidas pelo corpo de engenharia do exército dos Estados Unidos da América, US Army Corps of Engineers (USACE). Este é então direccionado para a execução de cálculos hidráulicos de redes compostas por cursos de água naturais ou canais artificiais, apresentado assim uma grande variedade de capacidades, de que

serão descritas de seguida as principais, nomeadamente a interface do utilizador, a análise de componentes hidráulicas, o armazenamento e gestão de dados assim como os resultados gráficos e os relatórios.

A interacção do utilizador com o programa HEC-RAS é feita através de uma interface gráfica (GUI – Graphical User Interface), que permite uma fácil utilização do programa mantendo um alto nível de eficiência. A gestão de arquivos, a entrada e edição de dados, a análise hidráulica, a exibição de gráficos de entrada e saída de dados e também os relatórios de análise, são funções que a interface do programa fornece.

Em relação à modelação, é possível integrar no programa a geometria desejada, com base em secções transversais dispostas ao longo de um traçado em planta previamente pré-definido.

O programa apresenta quatro tipos de análise unidimensional para rios ou canais, nomeadamente, em regime permanente através de perfis transversais representativos do nível da superfície da água, em regime variável utilizando a simulação dinâmica, cálculo de transporte de sedimentos e uma análise da temperatura da água.

Relativamente ao regime permanente, o procedimento de cálculo computacional tem por base a solução resultante da equação de energia unidimensional, em que as perdas de energia são calculadas em relação ao coeficiente de atrito de Manning da superfície e ao coeficiente de contracção/expansão correspondente à mudança de velocidade no topo da coluna de água.

Quanto ao componente do sistema de modelação HEC-RAS respeitante ao regime variável, este possibilita a simulação de um escoamento unidimensional instável através de uma rede completa de secções abertas. Nestas secções é possível introduzir estruturas hidráulicas desenvolvidas para um regime permanente e adaptar posteriormente ao regime variável através da introdução de dados temporais.

O armazenamento de dados recorre à utilização de ficheiros ASCII e binários, bem como a uma funcionalidade do programa designada HEC-DSS, que permite a transferência entre o HEC-RAS e outros programas. Os dados de entrada são armazenados em ficheiros *.xls com informação de caudais separados por categorias relativamente ao plano de simulação utilizado, à geometria considerada e ao regime que se pretende, respectivamente permanente ou variável, enquanto que os dados de saída são armazenados em documentos de texto *.txt.

Os resultados podem ser monitorizados com o recurso à visualização de gráficos bidimensionais representativos das secções transversais, das curvas de vazão, dos hidrogramas, linhas de energia, entre outros resultados hidráulicos. Oferece ainda a

capacidade de representar o sistema fluvial considerado, através de um gráfico tridimensional que engloba um conjunto individualizado de secções transversais.

2.7.1 Quantificação hidrológica dos impactos provocados pela construção de uma barragem no rio Tana, Quénia

Como exemplo de utilização deste programa, é conhecido o estudo de quantificação hidrológica efectuado quanto aos impactos da construção de uma barragem no rio Tana, no Quénia. Foram analisados os dados de descargas pré-barragem e pós-barragem através da utilização de uma análise de frequência de cheias e cálculo de indicadores de alteração hidrológica. Dos resultados desta análise verificou-se um aumento significativo dos caudais mínimos e uma redução dos caudais de cheia. Foi também avaliada a frequência de inundações em 71 amostras de vegetação localizadas em planícies de inundação ao longo do rio, através da utilização do HEC-RAS. Verificou-se que as amostras provenientes de planícies situadas a 1.8m de altura acima do nível da água, durante uma época seca, apresentaram uma redução significativa nos dias de cheia no período pós-barragem, face ao período pré-barragem. Concluiu-se assim que uma mudança do regime hidrológico dessa magnitude teria um impacto negativo na vegetação fluvial que percorre o rio Tana.

2.8 Programa MACGT

2.8.1 Generalidades

O programa MACGT permite simular o comportamento hidráulico-operacional resultante da instalação de grupos turbo-geradores no açude ponte em Coimbra, fazendo assim jus ao significado dessa mesma sigla, Modelo do Açude-Ponte de Coimbra Equipado com Grupos Turbo-Geradores. Este programa foi desenvolvido com o objectivo de simular a exploração do aproveitamento de fins múltiplos que é o açude ponte Coimbra, de modo a proporcionar um estudo da melhor solução a implementar, com base nas condicionantes existentes por via das ocupações do leito, nas normas de funcionamento e controlo das comportas de segmento e atendendo também à nova escada de peixe.

A produção energética e correspondente remuneração podem ser avaliadas com base nos resultados obtidos nas simulações tendo por base o disposto no Decreto-lei nº 225/2007 publicado em Diário da República e a Declaração de Rectificação nº 71/2007 de 24 de Julho embora o programa seja também dotado da capacidade de personalizar o tarifário pretendido.

Esta ferramenta utiliza como dados de entrada os caudais horários os quais são interpolados para valores intervalados de 6 minutos, necessários para reproduzir o funcionamento do automático de gestão das comportas (Marques, 2010). Esta ferramenta proporciona ainda a possibilidade de sintetizar caudais horários a partir de caudais médios diários utilizando o hidrógrafo sintético poligonal proposto em (Costa, 1997).

Foi utilizada a linguagem Excel VBA no desenvolvimento deste programa, que apresenta uma interface apelativa, simples e intuitiva ao utilizador. A apresentação dos seus resultados é feita em forma de gráficos e tabelas que permitem a análise de resultados em termos de produção energética e correspondentes cálculos de remuneração. É ainda possível observar uma animação que apresenta todos os resultados obtidos da exploração anteriormente referidos de uma forma dinâmica e gradual ao longo do período de tempo que se pretende analisar.

O desenvolvimento do programa MACGT iniciou-se com o trabalho de dissertação de mestrado do Eng. Pedro Marques (Marques, 2010). Mais tarde e no contexto do projecto Civitas MODERN, o programa foi consideravelmente desenvolvido e melhorado até à sua versão actual (Almeida et al, 2011).

3 FERRAMENTAS DE CÁLCULO UTILIZADAS

3.1 Utilização do programa HEC-RAS

O programa HEC-RAS foi utilizado neste estudo para modelar as características físicas de um troço do Rio Mondego, compreendido entre a barragem da Raiva e o açude ponte de Coimbra. Esta modelação pretende simular o escoamento natural do rio, de modo a obter uma aproximação realista das afluências a jusantedeste troço, ou seja, no APC, com base nos caudais efluentes conhecidos a montante, na secção correspondente à BR, assim como as afluências numa secção intermédia correspondente à foz do Rio Ceira.

O troço considerado apresenta uma extensão de 27,985km, sendo descrito por 25 secções transversais. A montante do rio corresponde a secção 25, com uma largura total de 152,5m e uma cota do talvegue do leito do rio de 42.8m.

De seguida serão apresentados os procedimentos de execução a considerar no programa HEC-RAS.

3.1.1 Criação de um novo projecto e respectiva geometria

A modelação das características representativas a adoptar para o troço do rio em estudo tem início na criação de um novo projecto, o qual será carregado com a informação relativa aos aspectos geométricos do terreno, ao tipo de escoamento a ser considerado na simulação e às condições de fronteira nas zonas relevantes.

No caso em estudo, o traçado em planta da geometria do rio seguiu a delimitação feita pelo utilizador de montante para jusante, sobre um mapa obtido através da ferramenta Google Maps. De seguida, para o percurso estabelecido, é necessário introduzir os dados correspondentes a cada secção transversal, assim como a distância a partir da primeira secção até à segunda, continuando este processo sucessivamente até à última secção a jusante. Deste modo, as secções transversais serão dispostas automaticamente, na perpendicular, ao longo do troço estabelecido. As figuras 3.1 e 3.2 representam a interface do programa com e sem o mapa sobreposto. Relativamente às secções utilizadas, foram adoptadas secções existentes em estudos anteriores, Conde (2007) e Antunes do Carmo (2004).

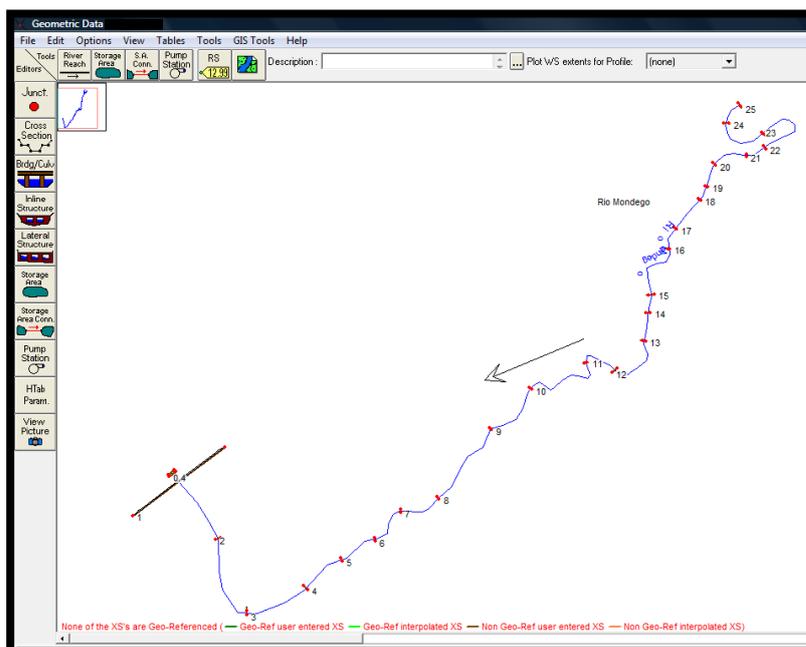


Figura 3.1 – Traçado do rio em planta

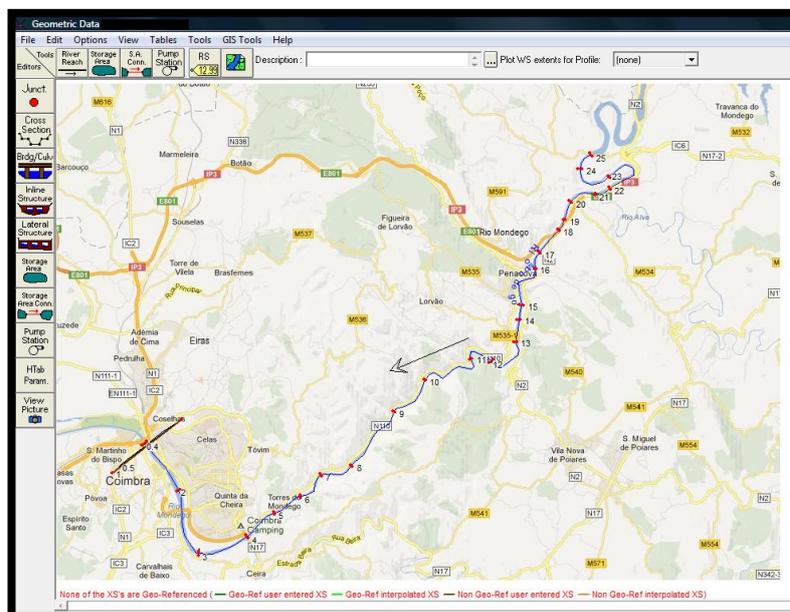


Figura 3.2 – Traçado do rio sobreposto ao mapa de referência

3.1.2 Coeficientes introduzidos nas secções transversais

As secções transversais são introduzidas por pontos, para os quais se conhecem as coordenadas. Em cada perfil da secção transversal o eixo das ordenadas corresponde às cotas, sendo a mais baixa o talvegue do leito do rio e o eixo das abcissas, orientado da esquerda para

a direita, representa a distância de cada ponto à origem. A cada secção é necessário atribuir um coeficiente de perda de carga atendendo ao tipo de leito. Neste estudo, para o canal principal foi atribuído um coeficiente de rugosidade de Manning com o valor de 0.035, o correspondente a um canal recto, cheio de água, pedras e vegetação natural. No que diz respeito às áreas inundadas, quando ocorre galgamento das margens, o coeficiente de Manning considerado foi de 0.06, o correspondente a um solo com pequenas árvores, arbustos ou outra pequena vegetação natural. Estes parâmetros foram utilizados em todo o percurso do rio considerado na simulação e os seus valores foram obtidos através da uma tabela 3-1 existente no manual de referência do programa HEC-RAS@ 2010, que é apresentada de seguida na Figura 3.3.

Table 3-1 Manning's 'n' Values

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
A. Natural Streams			
1. Main Channels			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. Flood Plains			
Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160

Figura 3.3 – Tabela 3-1 do manual de referência do HEC-RAS

Uma causa comum de perda de energia é a contracção ou o alargamento do escoamento devido às mudanças nas secções transversais. De modo a contabilizar esse factor, é necessário introduzir parâmetros correspondentes a cada secção. Os coeficientes considerados para a contracção e expansão do escoamento foram de 0.1 e de 0.3, respectivamente, uma vez que as alterações entre secções são pequenas. Estes valores foram retirados da tabela 3-3 do manual de referência do HEC-RAS, apresentada na Figura 3.4.

Table 3-3

Subcritical Flow Contraction and Expansion Coefficients

	Contraction	Expansion
No transition loss computed	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Typical Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Figura 3.4 – Tabela 3-3 do manual de referência do HEC-RAS

3.1.3 Caracterização do curso do rio

A secção a montante, representada pela secção transversal número 25, apresenta a configuração do terreno natural à saída da BR, com uma largura de 152.5m estendendo-se ao longo de 593m até à secção seguinte. O leito do rio encontra-se a uma cota de 42.8m, e a configuração do perfil termina com uma cota de 50.2m no limite esquerdo e 50.05m no limite da direita.

Quanto à secção intermédia de entrada de caudais considerada, é representada pela secção transversal número 4, representa a zona de chegada ao rio Mondego dos caudais efluentes do rio Ceira, com uma largura de 173.8m e uma extensão de 1596m até à secção seguinte. A configuração do perfil é definida pela cota limite de 27.03m à esquerda e de 27.8m à direita e apresenta uma cota do leito do rio de 20.72m.

A jusante, a secção transversal 0.2 representa a zona de saída dos caudais efluentes do APC, encontra-se a 310m da secção representativa do açude. Esta secção tem uma largura de 195.06m e estende-se ao longo de 20m até à secção seguinte. O leito do rio situa-se á cota de 12.8m e os limites, esquerdo e direito, terminam com cotas de 20.36m e 20.05m respectivamente. De seguida serão apresentadas as imagens correspondes aos perfis das secções caracterizadas, assim como as tabelas com os valores das distâncias à origem e das cotas de cada ponto.

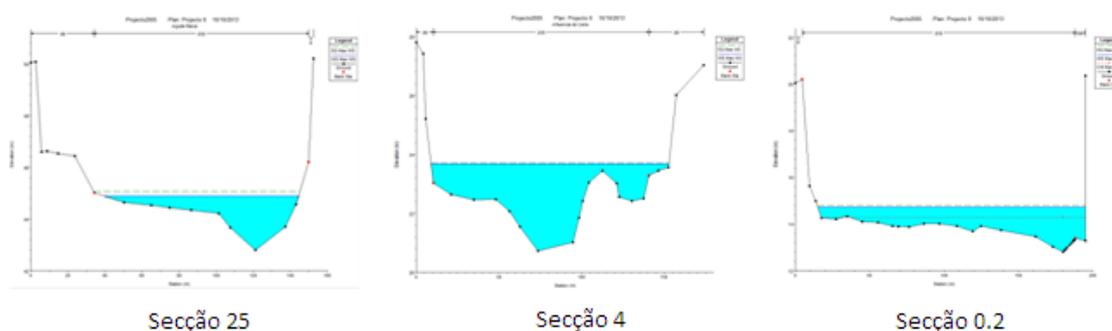


Figura 3.5 – Secções transversais

Secção 25			Secção 4			Secção 0.2		
Nº Ponto	Dist. Origem (m)	Cota z (m)	Nº Ponto	Dist. Origem (m)	Cota z (m)	Nº Ponto	Dist. Origem (m)	Cota z (m)
P/2	0.00	50.05	1	0.0	27.80	1	0.00	20.00
1	2.60	50.08	2	4.2	27.41	2	4.60	20.15
2	5.70	46.60	3	5.7	25.21	3	9.66	15.54
3	8.80	46.62	4	10.3	23.03	4	13.72	14.89
4	14.80	46.53	5	20.9	22.64	5	17.69	14.16
5	23.80	46.43	6	34.7	22.46	6	27.59	14.11
6	34.30	45.01	7	48.2	22.47	7	35.24	14.25
7	50.30	44.64	8	56.2	22.07	8	45.43	14.02
8	64.90	44.53	9	62.7	21.54	9	56.19	14.00
9	74.80	44.44	10	73.7	20.72	10	65.81	13.86
10	86.40	44.34	11	94.9	21.02	11	77.13	13.83
11	101.50	44.22	P/44	98.6	21.85	12	87.33	13.97
12	107.50	43.67	12	100.7	22.42	13	97.80	13.97
13	121.10	42.80	13	104.5	23.04	14	109.69	13.86
14	137.50	43.71	14	112.7	23.45	15	120.45	13.63
15	143.20	44.57	15	121.3	23.01	16	126.11	13.86
16	150.00	46.21	16	122.8	22.55	17	139.70	13.69
17	152.50	50.20	17	130.4	22.41	18	163.19	13.41
			18	137.6	22.50	19	174.80	12.96
			19	140.8	23.28	20	181.88	12.74
			20	146.4	23.44	21	188.95	13.30
			21	152.6	23.56	22	195.85	13.20
			22	157.4	26.02	23	195.85	20.35
			23	173.8	27.03			

Quadro 3.1 - Coordenadas geométricas das secções transversais

O perfil longitudinal apresenta uma diferença de cota de 30m da secção a montante para a secção a jusante e uma diferença de 7.92m entre a secção intermédia e a de jusante, como se observa na Figura 3.6. A secção S12, representa o açude implementado na zona do Louredo, em Penacova.

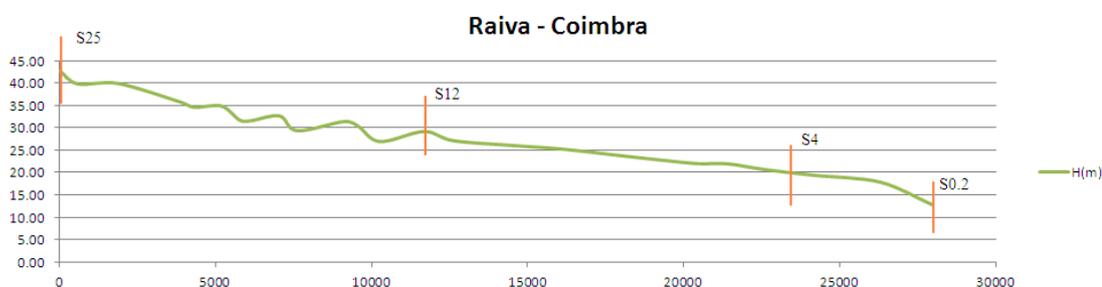


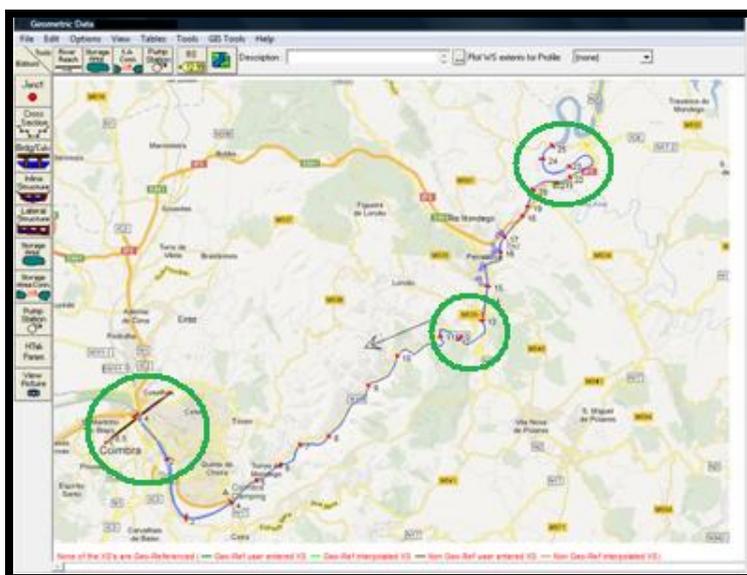
Figura 3.6 - Perfil longitudinal do rio

3.1.4 Distâncias de interpolação entre secções

O programa HEC-RAS requer para o cálculo de caudais entre secções, as distâncias que as separam entre si, sendo tanto mais correctos os valores calculados, quanto menores forem as distâncias que as separam. Essa condição é mais evidente na presença de curvas acentuadas, onde quanto maior for a distância entre secções, mais condicionados serão os resultados, uma vez que a configuração do terreno deixa de ser rigorosamente respeitada.

A variação das distâncias atinge um valor máximo de 2176m entre a secção 9 e a 8, sendo a mínima correspondente à distância que separa as secções 19 e 18 de 362m.

De modo a garantir o bom funcionamento do programa durante o processo de cálculo, é necessário interpolar as secções de modo a obter distâncias menores entre si nas zonas que requerem mais atenção, Figura 3.7. Nos troços rectos e com curvas pouco acentuadas, as secções foram interpoladas de modo a atingirem uma distância máxima de 100m entre secções. Nas curvas mais fechadas a interpolação foi feita de modo a garantir que a distância máxima entre duas secções fosse de 50m. Quanto à zona imediatamente a montante do APC, optou-se por uma modelação mais rigorosa, tornando-se o relevo mais próximo do existente, de modo a obter resultados de caudais o mais correctos possíveis, limitando a distância entre secções a 20m. A discretização das secções é apresentada no Quadro 3.2.



Secções	Distâncias de interpolação (m)
25 -> 21	50
21 -> 12	100
12 -> 10	50
10 -> 2	100
2 -> 1	20

Quadro 3.2 - Distâncias de interpolação

Figura 3.7 - Zonas mais relevantes

3.1.5 Condições de fronteira

A simulação que se pretende realizar é a de um escoamento em regime variável (ou transitório), o qual é caracterizado recorrendo aos registos históricos de caudais que estabelecem as condições de fronteira na BR e na foz do Ceira. O programa HEC-RAS oferece diferentes opções quer para a introdução das condições de fronteira de uma secção transversal, assim como condições de fronteira para descaregadores e barragens. Relativamente às secções transversais, as opções de condição de fronteira apresentadas pelo programa englobam, hidrogramas de alturas de água, hidrogramas de caudais, hidrogramas de alturas de água e de caudais, hidrogramas de escoamento lateral e hidrogramas de escoamento lateral uniforme.

O processo de cálculo deste programa requer a introdução das condições de fronteira correspondentes às secções de entrada, assim como as de saída.

As condições de fronteira utilizadas neste estudo são apresentadas de seguida.

- Secção de montante – Barragem da Raiva

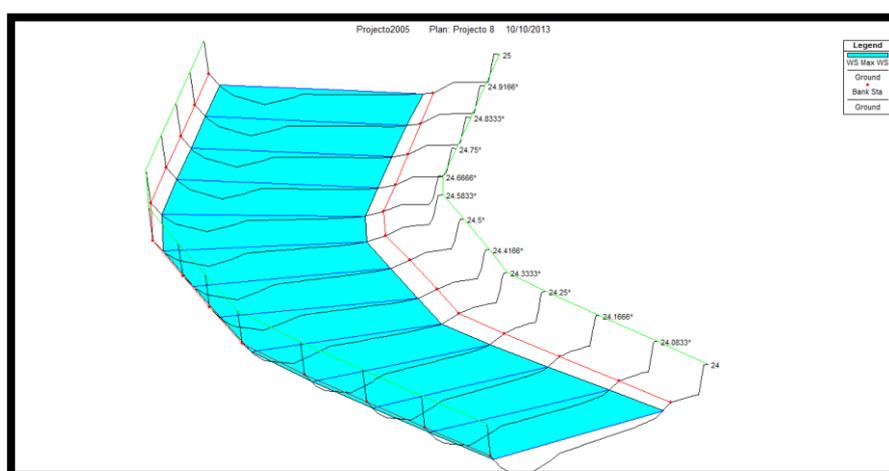


Figura 3.8 - Condição de fronteira a montante

Nesta secção foi introduzido um hidrograma de caudais horários como condição de fronteira, de modo a representar as efluências da BR ao longo do período de um ano.

A secção correspondente à de montante é a número 25, como referido anteriormente. A Figura 3.8, apresenta a configuração do rio para a zona considerada, entre as secções 25 e 24.

- Secção intermédia – Rio Ceira

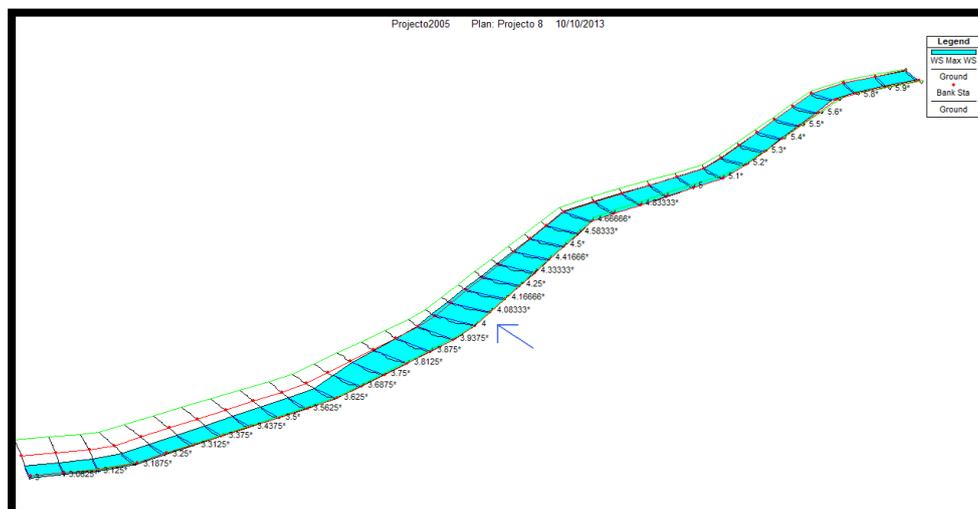


Figura 3.9 - Condição de fronteira intermédia

A contabilização dos caudais afluentes ao rio Mondego devido à contibuição do rio Ceira é estabelecida através da introdução de um hidrograma de escoamento lateral como condição de fronteira. Esta condição permite integrar numa secção intermédia localizada ao longo do rio Mondego a entrada de caudais para um mesmo período de tempo que o considerado para os dados introduzidos na BR. A secção transversal considerada para a localização desta afluência foi a número 4, como se observa na Figura 3.9.

- Secção a jusante do Açude-Ponte Coimbra

O APC é uma barragem móvel equipada com nove comportas de segmento cuja operação, na maior parte do tempo, é efectuada automaticamente por intermédio de um autómato de gestão. As regras de operação implementadas conduzem à abertura ou ao fecho gradual das comportas à medida que aumentam ou diminuem as afluências, mantendo estável a cota de montante em torno dos 17.8 m, como se pode verificar na Figura 3.12. O HEC-RAS não permite a modelação hidráulica directa deste tipo de comportamento dos órgãos de descarga. Por este motivo no presente estudo foi necessário recorrer à utilização de uma estrutura hidráulica que, embora geometricamente distinta da existente no APC, conduza a valores de cotas e caudais semelhantes aos verificados na realidade. A estrutura implementada no programa HEC-RAS é um descarregador fictício sem controle do tipo soleira espesso, com 2770m de comprimento de crista, em substituição do APC cuja largura é de apenas 202.4m (CNPGB@ 2013). A crista da soleira descarregadora está a uma cota próxima dos 17.8m. O facto de ser extraordinariamente larga leva a que a altura da lâmina líquida seja sempre muito

reduzida, independentemente dos caudais por ela descarregados, pelo que a cota a montante estará sempre ligeiramente acima da cota de soleira do descarregador. Desta forma consegue-se incorporar no HEC-RAS o comportamento do autómato de gestão que, como já foi referido, procura manter a cota de montante estável em torno dos 17.8m.

As Figuras 3.10 e 3.11 representam a estrutura descrita anteriormente.

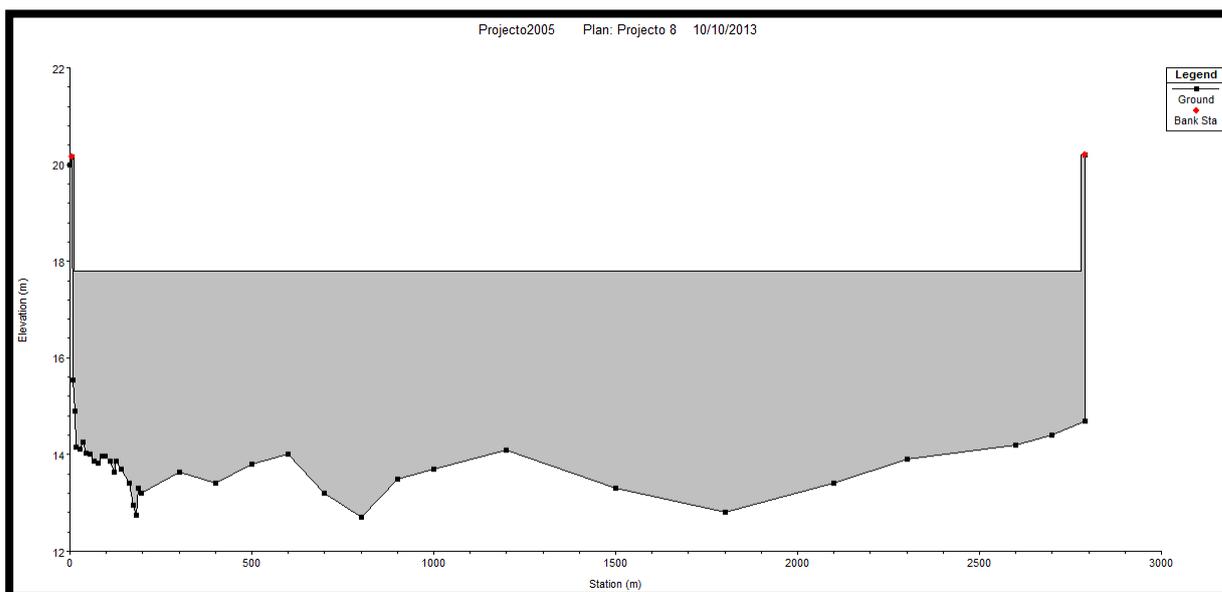


Figura 3.10 - Descarregador de cheia utilizado no HEC-RAS

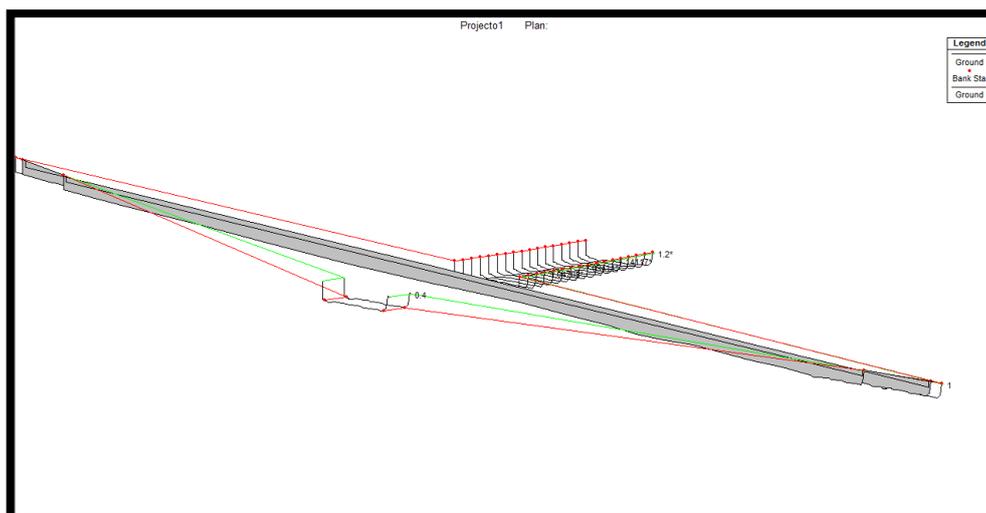


Figura 3.11 - Condição de fronteira no descarregador

A Figura 3.12 ilustra a variação da cota de montante do APC com o caudal (Almeida et al, 2011).

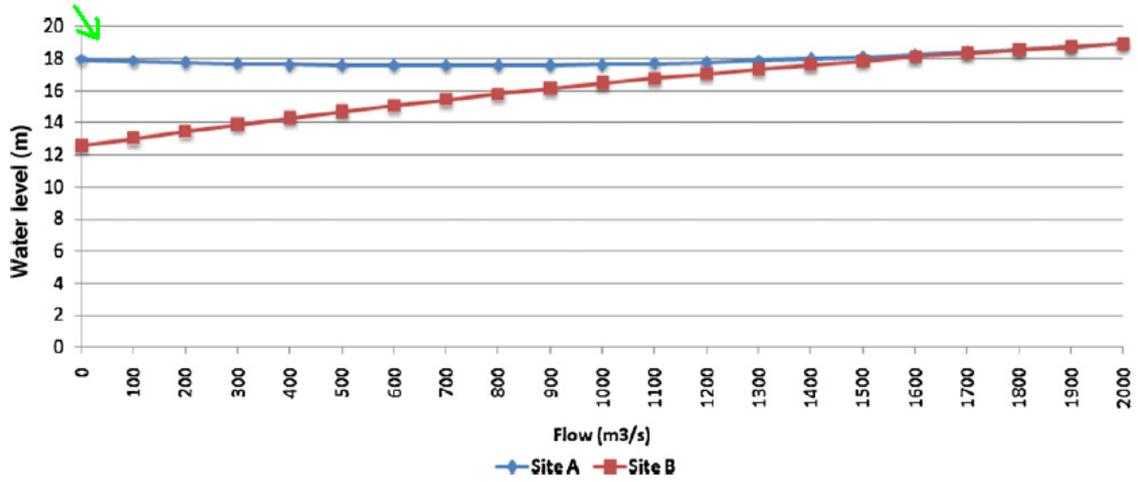


Fig. 13. Headwater and tailwater curves adopted in sites A and B, respectively.

Figura 3.12 – Variação da cota de montante do APC com o caudal (adaptado de Almeida et al, 2011)

- Secção de jusante – Açude Ponte Coimbra

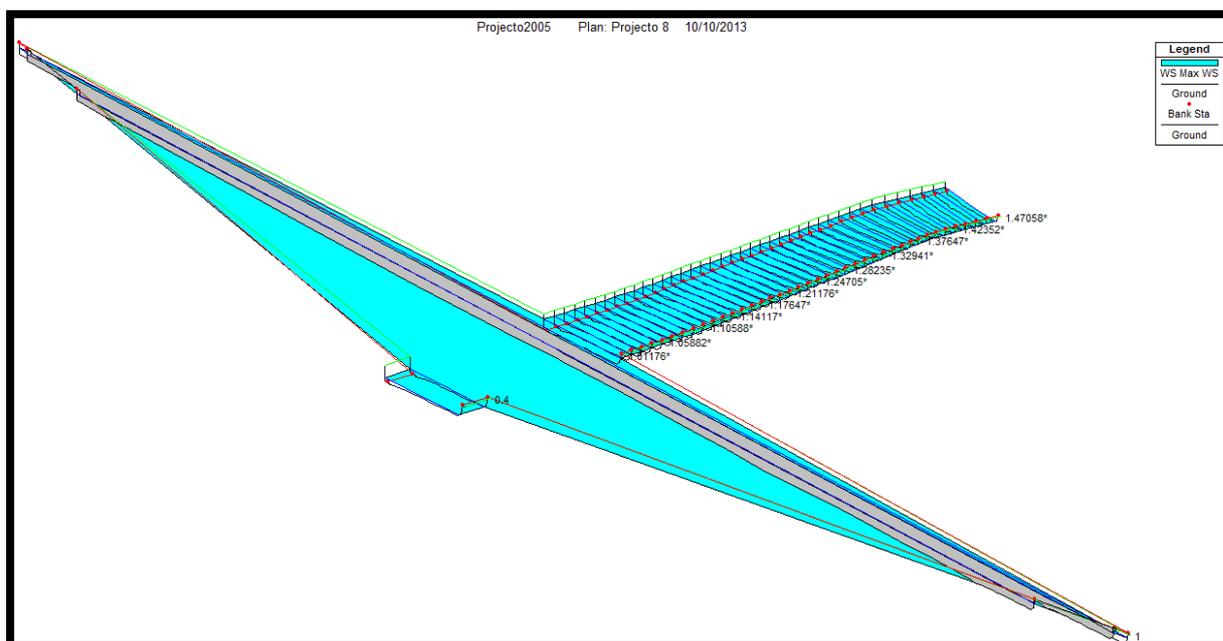


Figura 3.13 - Condição de fronteira a jusante

Na secção transversal número 0.2, correspondente à última pertencente ao percurso do rio a utilizar na simulação, visto que se pretende que o comportamento do escoamento actue como o curso natural do rio que recebe as descargas do açude-ponte Coimbra, foi imposto um escoamento superficial livre como condição de fronteira. A aplicação desta condição apenas requer a atribuição de uma inclinação para o leito do rio. A Figura 3.13 mostra a localização da última secção considerada no programa.

3.1.6 Tempos de simulação

A introdução dos tempos de simulação foi feita em três parcelas de quatro meses para cada ano hidrológico. Esta divisão cronológica deve-se ao facto de o programa não conseguir calcular um ano completo com caudais discriminados de hora a hora. É importante referir que para os últimos dias do primeiro e segundo períodos, assim como para os primeiros dias do segundo e terceiro períodos, foi necessário adoptar uma sobreposição de dados de simulação, de modo a obter uma uniformidade nos resultados para estes tempos de transição. Este procedimento acontece devido ao método de cálculo incorporado no programa HEC-RAS, onde os caudais introduzidos para as primeiras horas de simulação estão envolvidos no enchimento das secções inicialmente vazias.

De seguida, a título exemplificativo, são apresentados os tempos considerados para o ano de 2005:

- 31 de Dezembro de 2004 às 00:00 até 01 de Maio de 2005 às 02:00
- 29 de Abril de 2005 às 21:00 até 01 de Setembro de 2005 às 02:00
- 30 de Agosto de 2005 às 21:00 até 01 de Janeiro de 2006 às 02:00

3.2 Utilização do programa MACGT

O programa MAGCT (Modelo do Açude-Ponte de Coimbra equipado com Grupos Turbo-Geradores) foi associado ao programa HEC-RAS, para atingir os objectivos pretendidos neste estudo. Este modelo requer um tratamento prévio dos dados de entrada, assim como a escolha de determinados parâmetros, de modo a proceder ao cálculo da produção energética e consequente receita ao longo de um período previamente estabelecido. A Figura 3.14 ilustra a interface de apresentação, a qual apresenta todos os passos necessários para correr as simulações pretendidas.

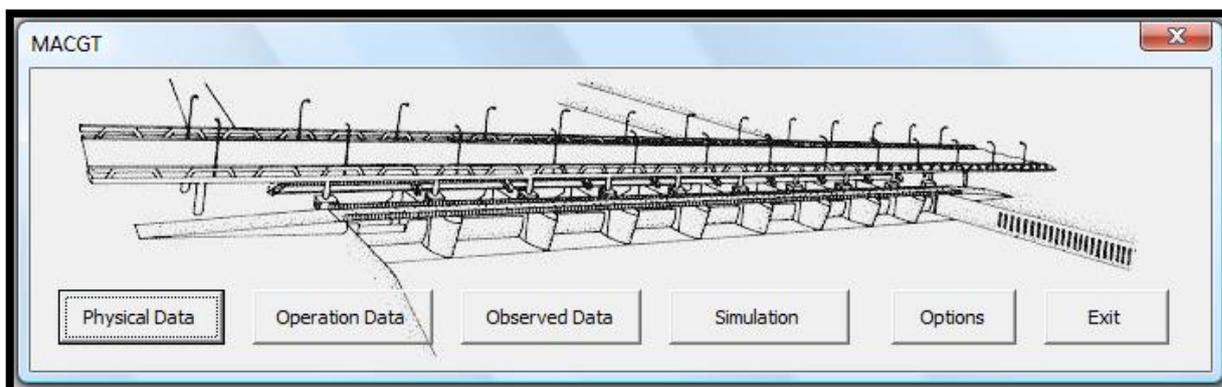


Figura 3.14 - Interface de apresentação do MACGT

Uma vez que se pretendem simular as características do aproveitamento hidroeléctrico a adicionar ao APC, todas as simulações foram feitas utilizando apenas um grupo turbo-gerador VLH 4000-45-4.0, dado que foi esta a solução final recomendada pelos estudos anteriores. O principal objectivo será, portanto o de adicionar mais informação, em termos de possíveis cenários hidrológicos de exploração, de modo a robustecer o estudo de viabilidade económica do empreendimento. Será também analisado o impacto que eventuais reduções tarifárias na remuneração dos produtores independentes de energia renovável poderão vir a ter na viabilidade económica deste empreendimento.

3.2.1 Dados de operação

A introdução dos dados correspondentes à operação das comportas e ao funcionamento das turbinas é feita através da escolha da segunda opção da interface do MACGT apresentada anteriormente.

Esta opção divide-se em três separadores distintos, correspondendo o primeiro às regras de operação das comportas, onde é estipulada a posição inicial das comportas, escolhida de entre as 46 possíveis apresentadas na matriz da Figura 3.15. A partir dessa situação inicial a abertura das 9 comportas processa-se gradualmente e de acordo com a matriz referida anteriormente. A abertura ou fecho das comportas resulta da análise comparativa entre a cota da água de montante e as cotas extremas permitidas, a qual é efectuada de 6 em 6 minutos pelo autómato de gestão. Acima dos 950 m³/s as comportas dos extremos laterais 8 e 9 abrem completamente.

A Figura 3.15 apresenta o esquema de abertura das quarenta e seis posições de abertura das comportas.

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
2	14.4	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
3	14.5	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
4	14.5	14.4	14.4	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
5	14.5	14.5	14.5	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
6	14.5	14.6	14.6	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
7	14.5	14.7	14.7	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
8	14.5	14.8	14.8	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
9	14.5	14.9	14.9	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
10	14.6	14.9	14.9	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
11	14.7	14.9	14.9	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
12	14.8	14.9	14.9	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
13	14.9	14.9	14.9	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3
14	14.9	14.9	14.9	14.4	14.4	14.3	14.3	14.3	14.3
15	14.9	14.9	14.9	14.5	14.5	14.3	14.3	14.3	14.3
16	14.9	14.9	14.9	14.6	14.6	14.3	14.3	14.3	14.3
17	14.9	14.9	14.9	14.7	14.7	14.3	14.3	14.3	14.3
18	14.9	14.9	14.9	14.8	14.8	14.3	14.3	14.3	14.3
19	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.3	14.3	14.3	14.3
20	14.9	14.9	14.9	15	15	14.3	14.3	14.3	14.3
21	14.9	14.9	14.9	15.1	15.1	14.3	14.3	14.3	14.3
22	14.9	14.9	14.9	15.2	15.2	14.3	14.3	14.3	14.3
23	14.9	14.9	14.9	15.3	15.3	14.3	14.3	14.3	14.3
24	14.9	14.9	14.9	15.4	15.4	14.3	14.3	14.3	14.3
25	14.9	14.9	14.9	15.5	15.5	14.3	14.3	14.3	14.3
26	14.9	14.9	14.9	15.6	15.6	14.3	14.3	14.3	14.3
27	15	15	15	15.6	15.6	14.3	14.3	14.3	14.3
28	15.1	15.1	15.1	15.6	15.6	14.3	14.3	14.3	14.3
29	15.2	15.2	15.2	15.6	15.6	14.3	14.3	14.3	14.3
30	15.3	15.3	15.3	15.6	15.6	14.3	14.3	14.3	14.3
31	15.4	15.4	15.4	15.6	15.6	14.3	14.3	14.3	14.3
32	15.5	15.5	15.5	15.6	15.6	14.3	14.3	14.3	14.3
33	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	14.3	14.3	14.3	14.3
34	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	14.4	14.4	14.3	14.3
35	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	14.5	14.5	14.3	14.3
36	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	14.6	14.6	14.3	14.3
37	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	14.7	14.7	14.3	14.3
38	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	14.8	14.8	14.3	14.3
39	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	14.9	14.9	14.3	14.3
40	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15	15	14.3	14.3
41	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.1	15.1	14.3	14.3
42	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.2	15.2	14.3	14.3
43	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.3	15.3	14.3	14.3
44	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.4	15.4	14.3	14.3
45	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.5	15.5	14.3	14.3
46	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	14.3	14.3

Figura 3.15 - Esquema de abertura das comportas

No que respeita às cotas extremas permitidas no embalse, foram utilizadas as que estavam em vigor no ano de 2007. Apresentam-se de seguida as imagens que ilustram os níveis de água que condicionam a operação das comportas ao longo de um ano.

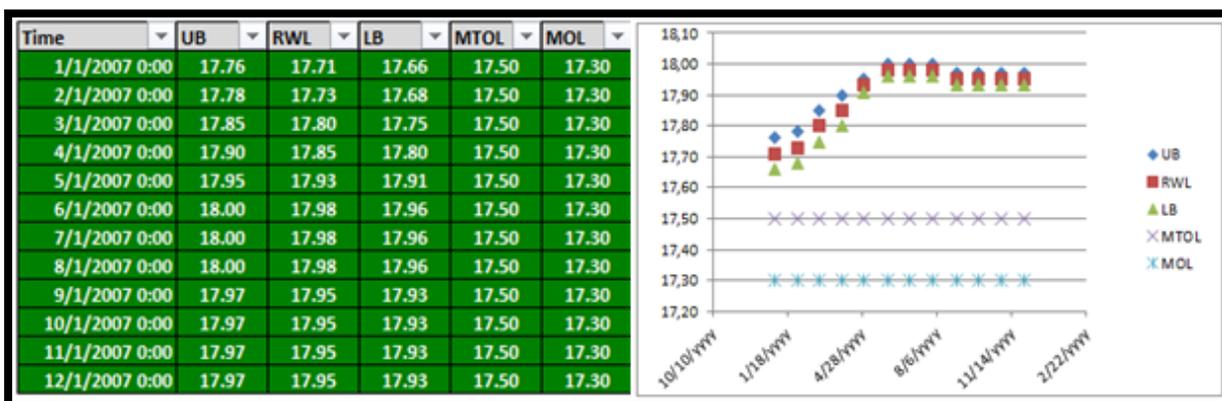


Figura 3.16 - Curva de vazão das comportas

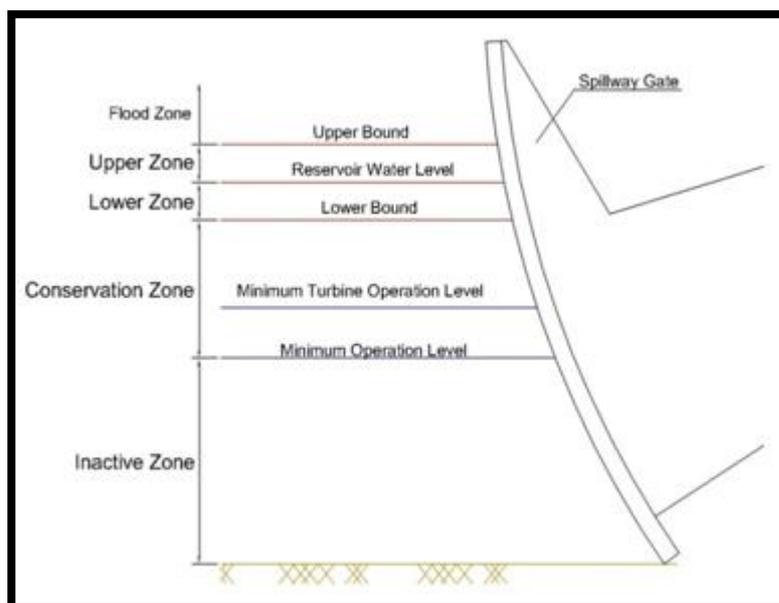


Figura 3.17 - Regras de operação

Por último, o terceiro separador está relacionado com o tipo de exploração que se pretende instalar na central mini-hídrica do APC. Um dos modos de exploração é a fio-de-água puro, onde o modelo admite que, na presença de caudais e níveis de água dentro dos limites de operação, os grupos turbogeradores são acionados sempre que possível, independentemente

do posto tarifário. O outro modo de exploração disponível tem em conta o posto tarifário. Este modo procura reter as afluências durante as horas de baixo valor tarifário para depois utilizar os volumes acumulados no embalse, no turbinamento nas horas cheias e de ponta imediatamente disponíveis.

Na Figura 3.18 podemos visualizar o menu de entrada dos dois modos de exploração possíveis.

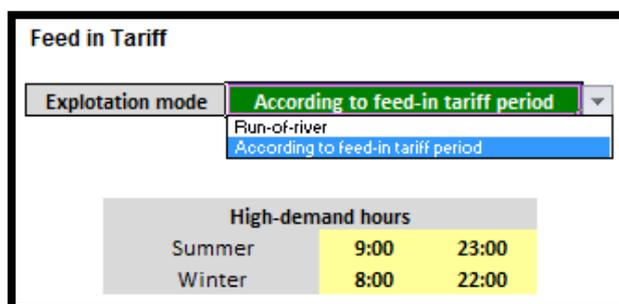


Figura 3.18 - Modos de exploração da central mini-hídrica

3.2.2 Dados observados

A introdução dos dados hidrológicos é feita através de um separador único onde são carregados os dados sujeitos a um tratamento prévio. A configuração da apresentação dos dados carregados é composta por quatro colunas, sendo a primeira reservada às datas do período em análise e as restantes três aos caudais afluentes e de irrigação dispensados pelos canais da margem esquerda e direita.

É possível escolher três séries temporais distintas de entrada de caudais no modelo, dispostas segundo três discretizações, dia-a-dia, hora a hora e de seis em seis minutos. Neste estudo, os caudais de entrada correspondem aos resultados obtidos no programa HEC-RAS, os quais foram calculados para intervalos de tempo horários.

O carregamento de dados, quando efectuado pelo MACGT, é feito considerando os caudais afluentes com intervalos de tempo horários, sendo depois interpolados para valores de 6 em 6 minutos. A Figura 3.19 apresenta as opções referidas anteriormente para a escolha de dados a carregar, assim como alguns dados carregados para o ano de 2007.

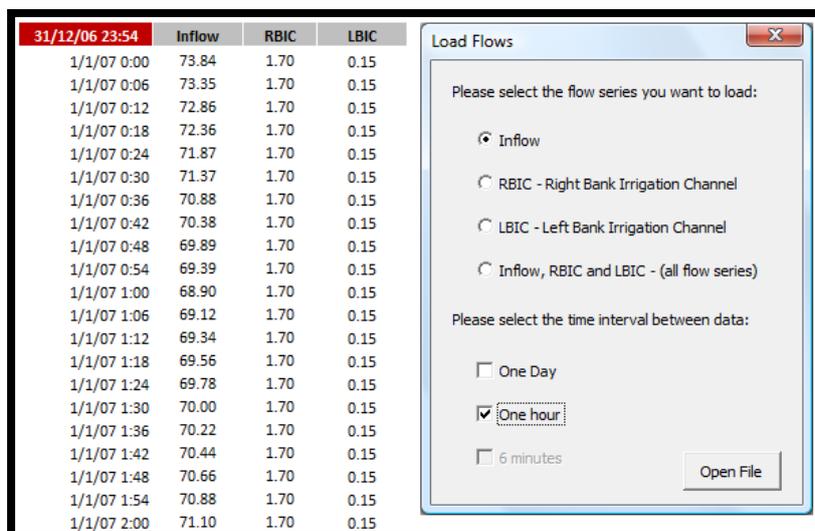


Figura 3.19 - Dados de entrada no MACGT

3.2.3 Tarifário aplicado nas simulações e remuneração

De modo personalizar as parcelas correspondentes ao tarifário de remuneração do fornecimento de energia à rede eléctrica, é necessário aceder ao menu principal do modelo MACGT, (Figura 3.14). Através da opção, Dados de Operação, é possível escolher o tarifário pretendido, no separador Tarifa Aplicada (“Feed in Tariff”).

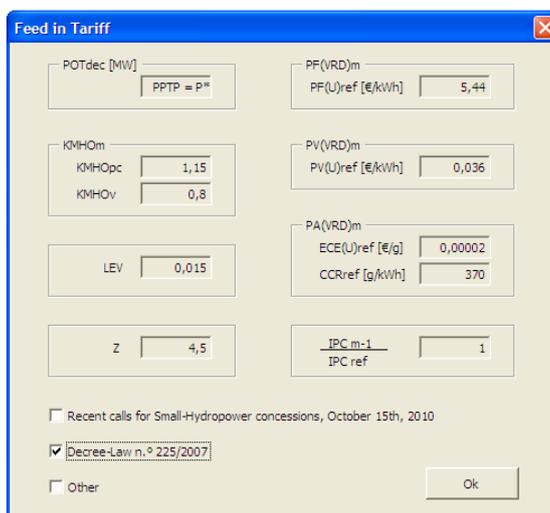


Figura 3.20 - Valores das parcelas correspondentes à remuneração

Os valores apresentados na Figura 3.20 estão segundo a legislação em vigor respeitante ao Decreto-lei nº 225/2007 publicado em Diário da República e a Declaração de Rectificação nº 71/2007 de 24 de Julho, referidas anteriormente e permitem o cálculo da remuneração mensal através da expressão:

$$VRD_m = KMHO_m \times PF_{VRD_m} + PV_{VRD_m} + PA_{VRD_m} \times Z \times \frac{IPC_m - 1}{IPC_{ref}} \times \left[\frac{1}{1 - LEV} \right] \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que,

VRD_m – remuneração aplicável a centrais renováveis, no mês m ;

$KMHO_m$ – coeficiente que modula os valores de $PF(VRD)_m$, de $PV(VRD)_m$ e de $PA(VRD)_m$ em função do posto horário em que a electricidade tenha sido fornecida;

$PF(VRD)_m$ – parcela fixa de remuneração aplicável a centrais renováveis, no mês m ;

$PV(VRD)_m$ – parcela variável de remuneração aplicável a centrais renováveis, no mês m ;

$PA(VRD)_m$ – parcela ambiental da remuneração aplicável a centrais renováveis, no mês m ;

Z – coeficiente adimensional que traduz as características específicas do recurso endógeno e da tecnologia utilizada na instalação licenciada;

IPC_{ref} – índice de preços no consumidor, sem habitação, no continente, referente ao mês anterior ao do início do fornecimento de electricidade à rede pela central renovável;

LEV – perdas nas redes de transporte e distribuição, evitadas pela central renovável;

4 TRATAMENTO DOS DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO

No capítulo anterior todos os dados de entrada nos programas utilizados, foram submetidos a um tratamento prévio de modo a adaptar e compatibilizar toda a informação hidrológica disponível. A pesquisa de informação relativamente aos registos históricos de caudais, no site do SNIRH para a zona da barragem da Raiva, açude ponte de Coimbra e rio Ceira, revelou-se útil apenas para obter as descargas efectuadas na BR e as afluições ao APC. Isto deve-se ao facto de não existirem quaisquer registos para a estação hidrométrica instalada na Ponte Conraria, no Ceira. A imagem que se segue foi retirada do site do SNIRH e ilustra a localização dessa mesma estação.

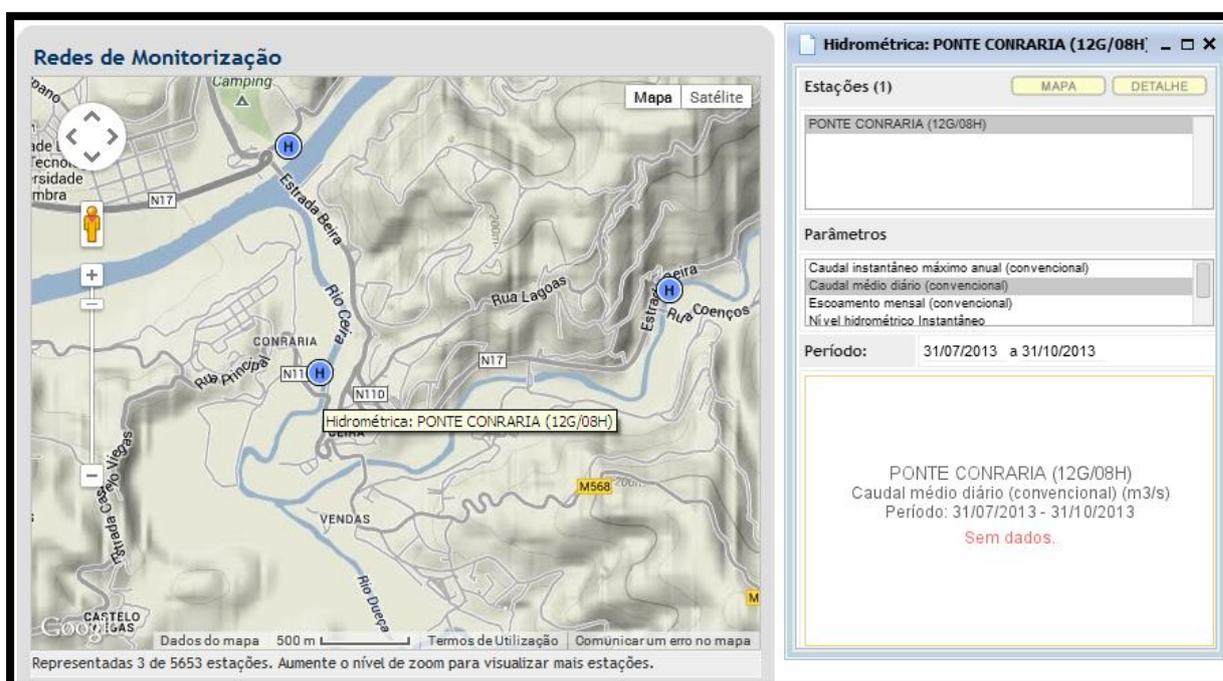


Figura 4.1 - Estação hidrométrica Ponte Conraria

Uma vez que se pretendem avaliar os caudais integrais anuais ao longo do percurso em questão, é necessário ter em conta os escoamentos naturais e as aduções e restituições antropogénicas ao longo do percurso. Alguns aspectos são desprezados neste estudo, nomeadamente os escoamentos superficiais gerados pela bacia própria situada entre a Raiva e a foz do Ceira aduzidos através de pequenas linhas de água, os caudais utilizados para abastecimento e irrigação, assim como as rejeições para este troço de rio. A contribuição do rio Alva foi também desprezada, uma vez que as suas afluições são quase totalmente desviadas pelo tunel que liga a barragem de Fronhas à barragem da Agueira, estando assim incorporadas nos caudais registados na Raiva. O rio Ceira, no entanto apresenta uma contribuição significativa, o que torna a chegada desse volume de água ao rio Mondego um

factor importante. Neste estudo estimou-se em aproximadamente 30% a contribuição dos caudais efluentes do rio Ceira, relativamente às afluências registadas no APC, sendo os restantes 70% devidos às descargas provenientes da barragem da Raiva. Estas percentagens, assim como outros aspectos considerados durante o processo de tratamento de dados, serão apresentados e aprofundados nos pontos que se seguem.

4.1 Caudais médios diários na barragem da Raiva e no açude ponte Coimbra

A informação relativa aos caudais efluentes da BR e afluentes ao APC, como referido anteriormente, foi retirada do site do INAG para os anos em que há registos simultâneos desses escoamentos. Os dados hidrométricos das afluências ao APC disponíveis para este estudo, são o caudal médio horário para o período de 2005 a 2010 da estação hidrométrica do APC, facultados pelo INAG.

Os caudais médios diários afluentes no APC são escassos, por isso irão ser usados caudais lançados na BR juntamente com caudais injectados pela foz do Ceira no Mondego, que serão propagados pelo programa HEC-RAS em regime variável.

Quanto aos caudais efluentes médios diários no APC, foram também tidos em conta os caudais efluentes médios diários no período de 1987 a 2005, disponíveis no SNIRH, relativos ao leito central do rio Mondego e ao canal condutor geral. Como o APC é um aproveitamento a fio de água puro, e desprezando o caudal na antiga escada de peixe bem como o caudal adutor de rega da margem esquerda, pode reconstruir-se de forma aproximada o caudal afluente médio diário pela soma dos dois caudais registados no SNIRH. Para simular a exploração do APC para estes anos é necessário seguidamente utilizar um hidrograma sintético para converter os caudais diários em caudais médios horários. Os anos base considerados para a viabilidade técnico-económica da instalação de uma central mini-hídrica no açude-ponte de Coimbra foram os de 2006 a 2010, consistindo de caudais médios horários facultados pelo INAG.

Do exposto pode concluir-se da pertinência de desenvolver um processo alternativo para conseguir incorporar informação hidrológica registada hora a hora, disponível noutras secções do rio. Este processo evitaria o recurso ao conjunto de aproximações adoptadas na conversão dos caudais efluentes em caudais afluentes.

Embora a utilização do programa HEC-RAS tenha o propósito de obter os caudais provenientes dos escoamentos ao longo do rio desde a BR, foi necessário a recolha do registo de chegadas ao APC, de modo a obter estimativas da contribuição do rio Ceira.

Encontram-se registos, na BR, de dezassete anos diferentes consecutivos, desde 1997 até 2013, sendo que alguns destes anos não serão considerados devido à ausência de uma quantidade significativa de registos. Estes anos foram divididos em grupos de características hidrológicas semelhantes. Esta caracterização será abordada nos pontos que se seguem. Deste modo pretende-se atingir uma coerência de resultados para períodos com as mesmas características.

4.1.1 Organização e interpolação de valores intermédios

Os ficheiros descarregados no site do SNIRH apresentam-se no formato *.csv, que posteriormente foram adaptados ao um tipo de ficheiro mais usual, *.xls. Estes ficheiros foram organizados de forma a poderem ser utilizados como referência de entrada no programa HEC-RAS para a secção a montante, BR e também para a secção intermédia, rio Ceira. Estas secções podem ser consultadas no capítulo anterior. Foram considerados os anos de 1998, 1999, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2010.

Uma vez organizados os dados procedeu-se ao preenchimento de algumas falhas detectadas utilizando uma interpolação linear para os dias em que não existem registos. Estas falhas justificam-se com a ausência de manutenção das estações de monitorização hidro-meteorológicas, o que leva à suspensão do serviço temporariamente, reflectindo-se num comprometimento da qualidade de dados.

De modo a obter uma caracterização coerente dos diferentes tipos de anos considerados, foi calculada a média de todos os caudais ao longo do período de um ano para cada ano. Posteriormente e para o conjunto de anos em que existem dados disponíveis, foi calculado o valor médio desse mesmo grupo. A caracterização foi então efectuada através da razão entre a média de cada ano e o valor médio do conjunto considerado, expressa em percentagem, conforme se verifica no Quadro 4.1.

	1998	1999	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2010	
Qmed anual (m3/s)	67.05	33.81	139.72	61.13	115.75	37.88	18.29	85.34	38.14	29.04	97.73	Qmed plurianual (m3/s)
												65.81
Qmed anual / Qmed plurianual * 100 (%)	102	51	212	93	176	58	28	130	58	44	149	

Quadro 4.1 - Percentagens dos caudais para os diferentes anos

A escala utilizada tem por base a definição dos diferentes anos tipo do SNIRH, a qual apresenta sete intervalos distintos. Esses intervalos dividem-se em três correspondentes a períodos secos, um a períodos médios e por último novamente três a períodos de muita precipitação. Importa referir que a escala adoptada provém de uma análise com base em registos de precipitações, sendo generalizada neste estudo para aos caudais registados. Esta escala é apresentada na Figura 4.2.

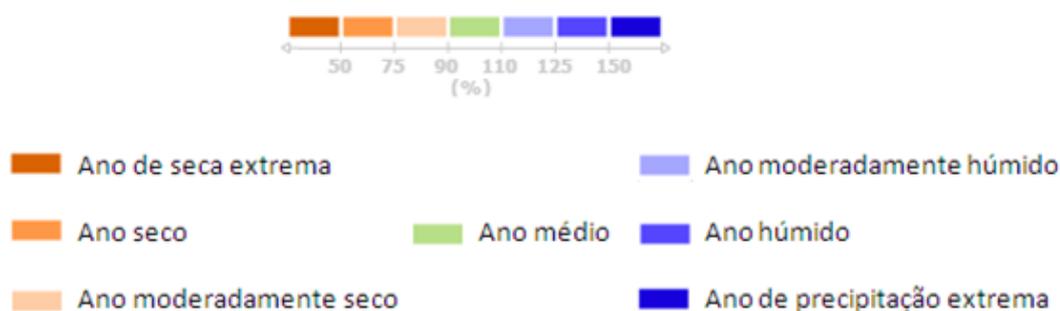


Figura 4.2 - Escala de classificação do tipo de ano hidrológico

Estabelecida a escala a utilizar, os anos do conjunto considerado, foram separados consoante as suas características hidrológicas, baseado na percentagem correspondente.

A Figura 4.3 representa uma correspondência entre os anos considerados e as percentagens obtidas.

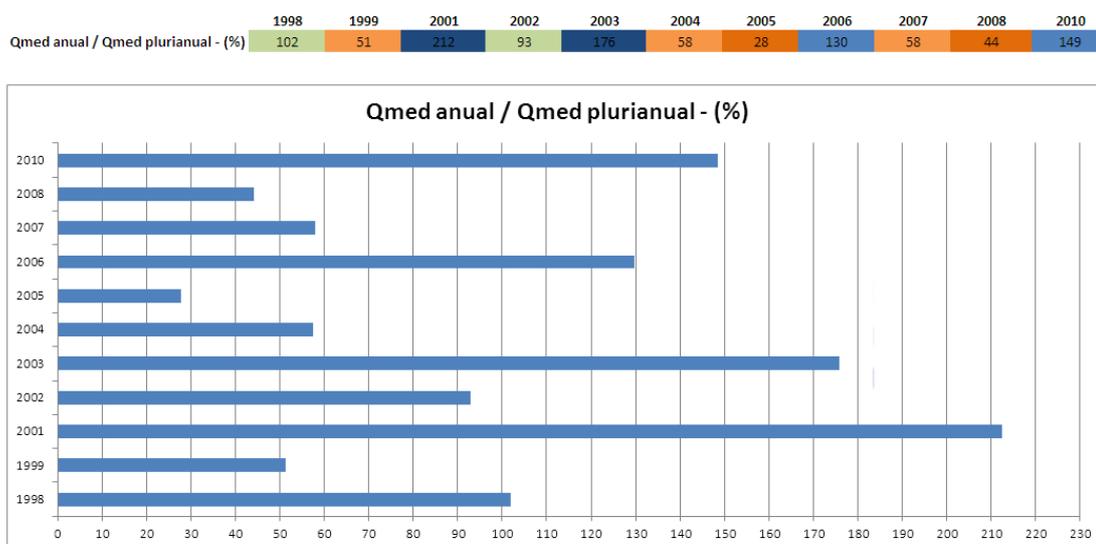


Figura 4.3 - Representação gráfica das percentagens correspondentes a cada ano

Por fim, é apresentado um quadro que apresenta os anos que foram considerados neste estudo, coloridos conforme as suas características hidrológicas anuais, nomeadamente anos húmidos, médios e secos de acordo com a escala anexa. Esta consideração baseou-se numa razão percentual entre o caudal anual e o caudal modular da amostra considerada. Os anos distinguidos a cor branca foram desprezados devido à ausência de dados válidos.

ANO	Açude Ponte Coimbra		Barragem da Raiva	
1997	Instituto da Água	-	SNIRH	
1998	Instituto da Água	-	SNIRH	
1999	Instituto da Água	-	SNIRH	
2000	Instituto da Água	-	SNIRH	
2001	Instituto da Água	-	SNIRH	
2002	Instituto da Água	-	SNIRH	
2003	Instituto da Água	-	SNIRH	
2004	Instituto da Água	-	SNIRH	
2005	Instituto da Água	CIVITAS MODERN	SNIRH	0 - 50 2005, 2008
2006	Instituto da Água	CIVITAS MODERN	SNIRH	50 - 75 1999, 2004, 2007
2007	Instituto da Água	CIVITAS MODERN	SNIRH	75 - 90 -
2008	Instituto da Água	CIVITAS MODERN	SNIRH	90 - 110 1998, 2002
2009	SNIRH	-	SNIRH	110 - 125 -
2010	SNIRH	CIVITAS MODERN	SNIRH	125 - 150 2006, 2010
2011	SNIRH	-	SNIRH	150 - 220 2001, 2003
2012	SNIRH	-	SNIRH	
2013	SNIRH	-	SNIRH	

Quadro 4.2 - Anos considerados nas simulações efectuadas (coloridos)

4.1.2 Análise temporal dos caudais

Nesta fase torna-se necessário calcular os caudais correspondentes à contribuição do rio Ceira. Esta análise baseou-se na determinação da diferença entre os caudais afluentes ao APC e os caudais efluentes da BR, para os anos em que existem registos simultâneos nestes dois locais. Este procedimento foi efectuado mensalmente, semanalmente e diariamente. Com esta análise pretendeu-se averiguar até que espaçamento temporalmente se poderia ir sem comprometer a aproximação à realidade. Verificou-se que a partir da análise diária, alguns valores dos caudais respeitantes ao rio Ceira tomariam valores negativos, o que é fisicamente impossível. Este acontecimento está relacionado com o facto de as descargas da BR levarem algum tempo até serem contabilizadas no APC, o que dá origem a distorções ao nível da contabilização de alguns caudais diários.

4.2 Caudais médios diários no rio Ceira

A avaliação dos caudais médios diários para o rio Ceira foi efectuada com base no escoamento semanal. Foram consideradas cinquenta e duas semanas ao longo de cada ano, cada uma com sete dias à excepção da última, que para os anos comuns foi de oito dias e para os anos bissextos de nove. O cálculo semanal foi então efectuado para todas as semanas ao longo do período de um ano, subtraindo o valor do caudal médio semanal obtido na BR ao correspondente no APC, obtendo assim caudal correspondente à foz do rio Ceira. Esta contribuição pode ser expressa através de uma razão entre o caudal semanal de entrada no rio Mondego em Ceira, e o caudal semanal para a mesma semana no APC. Esta razão é adimensional e reflecte, em percentagem, o tributo por parte do rio Ceira. Deste modo, esta razão assim obtida pode ser aplicada semanalmente aos caudais médios diários. A título de exemplo é apresentada na Figura 4.4, apenas para as primeiras cinco semanas do ano de 2007, uma representação esquemática da metodologia de cálculo descrita anteriormente.

		APC 2007		APC-CM 2007	BR 2007	CEIRA 2007	Média 0.33		
		Qmd1 (m3/s)	Qms1 (m3/s)		Qmd2 (m3/s)	Qms2 (m3/s)	Qms3 (m3/s)	%	Qmd3 (m3/s)
SEMANA 1	1/1/2007 0:00	42.57	55.00	-	27.07	45.18	9.82	0.18	7.60
	1/2/2007 0:00	54.88			48.46				9.80
	1/3/2007 0:00	58.40			48.86				10.43
	1/4/2007 0:00	60.25			49.60				10.76
	1/5/2007 0:00	55.74			47.04				9.95
	1/6/2007 0:00	56.61			47.43				10.11
	1/7/2007 0:00	56.58			47.81				10.10
SEMANA 2	1/8/2007 0:00	56.39	59.06	-	47.70	51.02	8.04	0.14	7.68
	1/9/2007 0:00	87.54			91.55				11.92
	1/10/2007 0:00	72.41			58.00				9.86
	1/11/2007 0:00	65.60			51.42				8.93
	1/12/2007 0:00	55.02			48.62				7.49
	1/13/2007 0:00	40.52			29.76				5.52
	1/14/2007 0:00	35.96			30.08				4.90
SEMANA 3	1/15/2007 0:00	70.48	52.72	-	71.88	46.17	6.54	0.12	8.75
	1/16/2007 0:00	52.07			48.24				6.46
	1/17/2007 0:00	53.87			47.74				6.69
	1/18/2007 0:00	51.69			47.91				6.41
	1/19/2007 0:00	58.25			47.72				7.23
	1/20/2007 0:00	43.06			29.88				5.34
	1/21/2007 0:00	39.59			29.85				4.91
SEMANA 4	1/22/2007 0:00	51.95	48.13	-	46.25	38.59	9.54	0.20	10.30
	1/23/2007 0:00	55.67			47.32				11.04
	1/24/2007 0:00	55.47			43.44				11.00
	1/25/2007 0:00	56.83			43.51				11.27
	1/26/2007 0:00	40.54			29.04				8.04
	1/27/2007 0:00	36.97			29.40				7.33
	1/28/2007 0:00	39.46			31.14				7.82
SEMANA 5	1/29/2007 0:00	52.14	43.87	-	46.76	36.94	6.93	0.16	8.24
	1/30/2007 0:00	82.86			67.38				13.09
	1/31/2007 0:00	29.64			28.42				4.68
	2/1/2007 0:00	36.38			29.11				5.75
	2/2/2007 0:00	35.67			29.20				5.64
	2/3/2007 0:00	35.42			29.00				5.60
	2/4/2007 0:00	34.97	28.68	5.53					

Quadro 4.3 - Geração de caudais médios diários para o rio Ceira

- Qmd1 – Caudal médio diário açude ponte Coimbra;
- Qms1 – Caudal médio semanal açude ponte Coimbra;
- Qmd2 – Caudal médio diário barragem da Raiva;
- Qms2 – Caudal médio semanal barragem da Raiva;
- Qms3 – Caudal médio semanal na foz do Ceira;
- % - Razão Qms3/Qms1;
- Qmd3 – Caudal médio diário na foz do Ceira;

Verifica-se assim, uma percentagem considerada para a contribuição do rio Ceira na ordem dos 30% dos valores no APC. Este valor foi obtido efectuando a média das percentagens diárias para todos os anos utilizados no estudo, como se pode constatar no Quadro 4.4.

Tipo de ano						Média
Seco	1999	2004	2005	2007	2008	
%	26	30	40	33	42	34.2
Médio	1998	2002				
%	24	29				26.5
Húmido	2001	2003	2006	2010		
%	29	27	35	34		31.25
Média da série						30.65

Quadro 4.4 - Percentagens médias correspondentes ao rio Ceira

4.3 Sintetização de caudais

A utilização da ferramenta MACGT, requer que o caudal afluente e os caudais reservados estejam discretizados de acordo com o passo temporal do modelo (intervalo de 6 minutos entre manobras de abertura/fecho das comportas utilizado na exploração do APC), Marques (2010). Como se referiu nos pontos anteriores, a informação existente tem uma base de registos diária, pelo que os caudais médios diários de que dispomos terão de ser convertidos em caudais médios horários. A sintetização destes caudais recorreu a hidrogramas sintéticos de caudais médios horários, os quais serão utilizados nas simulações efectuadas com o programa HEC-RAS.

Neste processo foi utilizado um método de definição de hidrogramas diários sintéticos a partir dos valores dos caudais médios diários, proposto em Costa et al (1997). Os critérios que este método tem por base, assim como as equações que utiliza, serão apresentados de seguida.

- Existe continuidade na passagem de um dia para o dia seguinte do hidrograma.

- A definição gráfica do hidrograma diário é feita através de dois segmentos de recta, para os quais são determinados três valores de caudal, respectivamente para as 0, 12 e 24h (havendo casos onde serão utilizados três segmentos de recta, aos quais correspondem quatro valores de caudal).

- O caudal q_1 representa as 0 horas e é determinado considerando a proporcionalidade dos caudais médios diários e dos dias precedentes

$$q_1 = \text{Min } Qmd_{-1}, Qmd_0 + Qmd_{-1} - Qmd_0 * \frac{\text{Min } Qmd_{-1}, Qmd_0}{Qmd_{-1} + Qmd_0} \wedge t_1 = 0 \quad (\text{Eq. 2})$$

- O caudal às 24h (q_4) é determinado de modo semelhante ao anterior

$$q_4 = \text{Min } Qmd_{+1}, Qmd_0 + Qmd_{+1} - Qmd_0 * \frac{\text{Min } Qmd_{+1}, Qmd_0}{Qmd_{+1} + Qmd_0} \wedge t_4 = 24 \quad (\text{Eq. 3})$$

- De modo a fazer corresponder o volume do hidrograma ao caudal médio diário do dia em causa é utilizada a seguinte condição para o caudal às 12h (q_2 e q_3)

$$q_2 = q_3 = 2 * Qmd_0 - \frac{q_1 + q_4}{2} \wedge t_2 = t_3 = 12 \quad (\text{Eq. 4})$$

Se o valor de Qmd_0 for significativamente maior, tanto a Qmd_{-1} como a Qmd_{+1} , serão pequenos os coeficientes incluídos nas equações 1 e 2, resultando os valores de q_1 e q_4 semelhantes de Qmd_{-1} e Qmd_{+1} . Nesse caso o valor de q_2 tende a ser maior, representando desse modo a possível existência de uma cheia.

- Em situações que apresentem um valor negativo para q_2 e q_3 na equação 3, o hidrograma poderá ser representado por três segmentos de recta definidos pelas seguintes condições

$$q_2 = q_3 = 0 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$t_2 = \frac{Qmd_0 * 24}{q_1 + q_4 / 2} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$t_3 = 24 - t_2 \quad (\text{Eq. 7})$$

As variáveis utilizadas nas expressões anteriormente apresentadas têm o seguinte significado:

Qmd – Caudal médio diário, em que os índices -1, 0 e +1 respeitam, respectivamente, aos dias anteriores, presente e seguinte;

q – caudal definidor do hidrograma diário estimado, em que os índices 1 a 4 respeitam aos quatro possíveis pontos de definição do hidrograma;

t – tempo (h) definidor do hidrograma diário estimado, em que os índices 1 a 4 têm o significado indicado para a variável anterior;

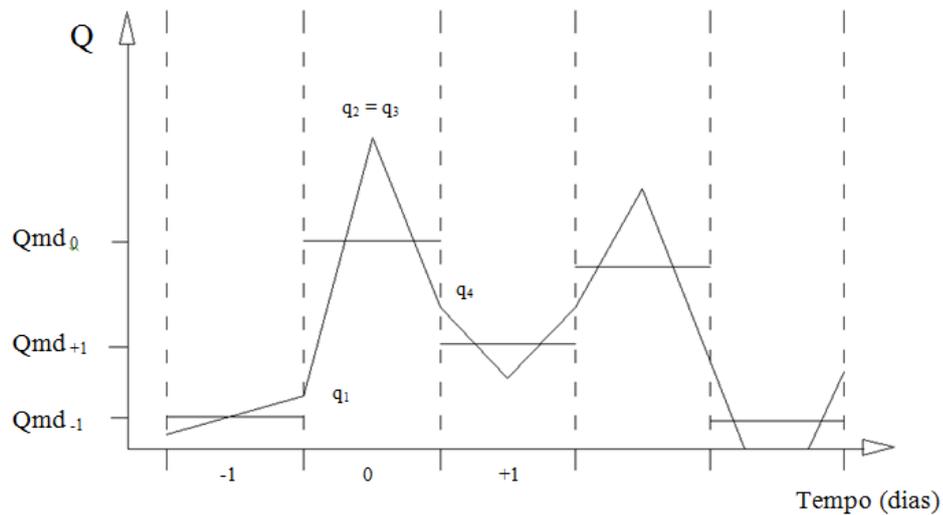


Figura 4.5 - Hidrograma afluente diário sintético

De seguida é apresentado um exemplo meramente exemplificativo do comportamento dos valores dos caudais médios horários após sintetização.

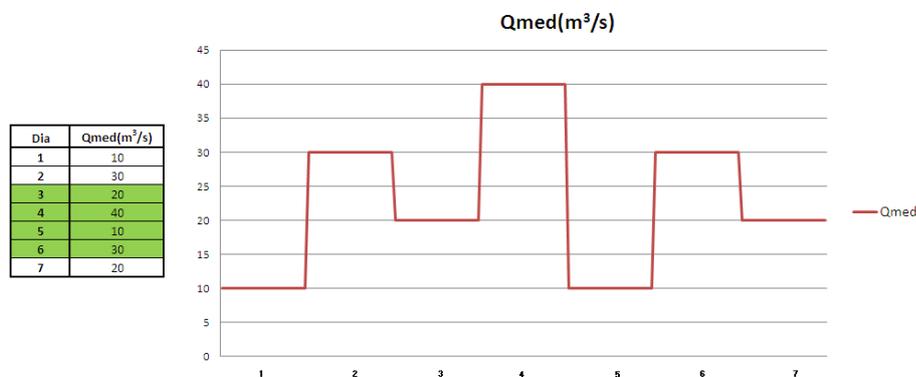


Figura 4.6 - Hidrograma de caudais médios diários

	Hora	Q (m3/s)	
Dia3	0	24.00	20
	1	23.22	20
	2	22.44	20
	3	21.67	20
	4	20.89	20
	5	20.11	20
	6	19.33	20
	7	18.56	20
	8	17.78	20
	9	17.00	20
	10	16.22	20
	11	15.44	20
	12	14.67	20
	13	15.67	20
	14	16.67	20
	15	17.67	20
	16	18.67	20
	17	19.67	20
	18	20.67	20
	19	21.67	20
	20	22.67	20
	21	23.67	20
	22	24.67	20
	23	25.67	20
Dia4	0	26.67	40
	1	29.33	40
	2	32.00	40
	3	34.67	40
	4	37.33	40
	5	40.00	40
	6	42.67	40
	7	45.33	40
	8	48.00	40
	9	50.67	40
	10	53.33	40
	11	56.00	40
	12	58.67	40
	13	55.11	40
	14	51.56	40
	15	48.00	40
	16	44.44	40
	17	40.89	40
	18	37.33	40
	19	33.78	40
	20	30.22	40
	21	26.67	40
	22	23.11	40
	23	19.56	40
Dia5	0	16.00	10
	1	15.04	10
	2	14.08	10
	3	13.13	10
	4	12.17	10
	5	11.21	10
	6	10.25	10
	7	9.29	10
	8	8.33	10
	9	7.38	10
	10	6.42	10
	11	5.46	10
	12	4.50	10
	13	5.38	10
	14	6.25	10
	15	7.13	10
	16	8.00	10
	17	8.88	10
	18	9.75	10
	19	10.63	10
	20	11.50	10
	21	12.38	10
	22	13.25	10
	23	14.13	10
Dia6	0	15.00	30
	1	17.13	30
	2	19.25	30
	3	21.38	30
	4	23.50	30
	5	25.63	30
	6	27.75	30
	7	29.88	30
	8	32.00	30
	9	34.13	30
	10	36.25	30
	11	38.38	30
	12	40.50	30
	13	39.13	30
	14	37.75	30
	15	36.38	30
	16	35.00	30
	17	33.63	30
	18	32.25	30
	19	30.88	30
	20	29.50	30
	21	28.13	30
	22	26.75	30
	23	25.38	30

Quadro 4.5 - Discretização horária de caudais diários

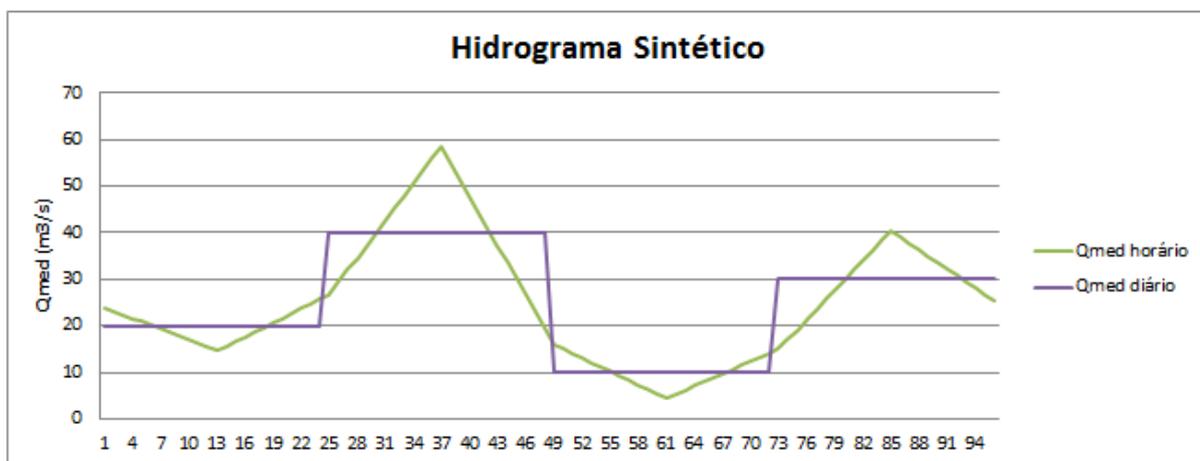


Figura 4.7 - Hidrograma de caudais médios diários gerado artificialmente

O Quadro 4.3 apresenta a discretização efectuada para os dias assinalados a cor verde na Figura 4.7. A cada um desses dias correspondem 24 valores obtidos com base no dia anterior e seguinte. Este modelo de cálculo faz uma distribuição com base no valor do caudal médio diário, de valores para cada hora de um mesmo dia, correspondendo às 12h de cada dia um máximo, ou mínimo dependendo dos caudais antecedentes. Esta distribuição é feita de modo a produzir áreas iguais para os valores superiores inferiores ao de referência.

Este procedimento foi realizado para todos os anos considerados nas simulações efectuadas com os programas HEC-RAS e MACGT, sendo o ponto de partida à análise de resultados obtidos, a qual será apresentada no capítulo que se segue.

4.4 Organograma de procedimentos

O organograma que se segue, apresenta uma síntese de todos os passos que foram efectuados quanto à organização dos dados disponíveis, assim como as conversões a que os caudais foram sujeitos e ainda o tipo de dados que foram introduzidos nos diferentes programas utilizados, assim como o resultado de cada programa até atingir o objectivo final, respectivamente, as devidas remunerações correspondentes aos anos que foram estudados.

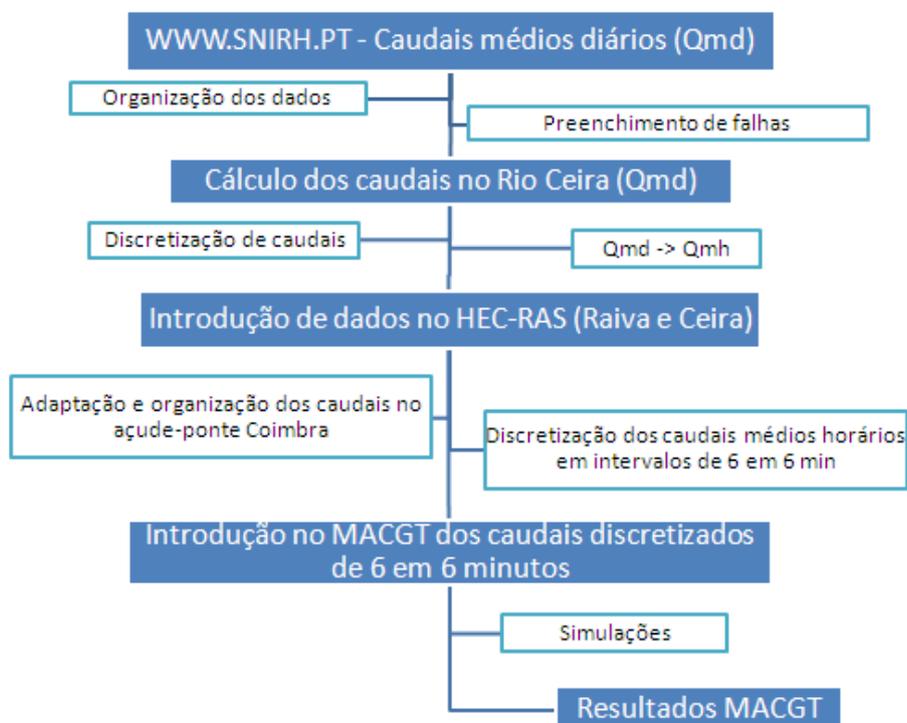


Figura 4.8 - Diagrama de fluxo dos procedimentos

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Após a utilização das ferramentas de cálculo passamos à análise dos resultados obtidos em cada um dos programas. Inicialmente serão analisadas as afluências ao APC obtidas com o HEC-RAS e correspondentes receitas determinadas através do modelo MACGT. Posteriormente será avaliado o tempo que leva uma descarga feita na Raiva a atingir o APC, de modo a apoiar o estudo do seu impacto na exploração do APC equipado com grupos turbo-geradores. No contexto das alterações económicas e ambientais actualmente em curso, parece também oportuno avaliar o impacto de eventuais alterações do regime tarifário de remuneração da produção eléctrica.

5.1 Espectro de caudais observados

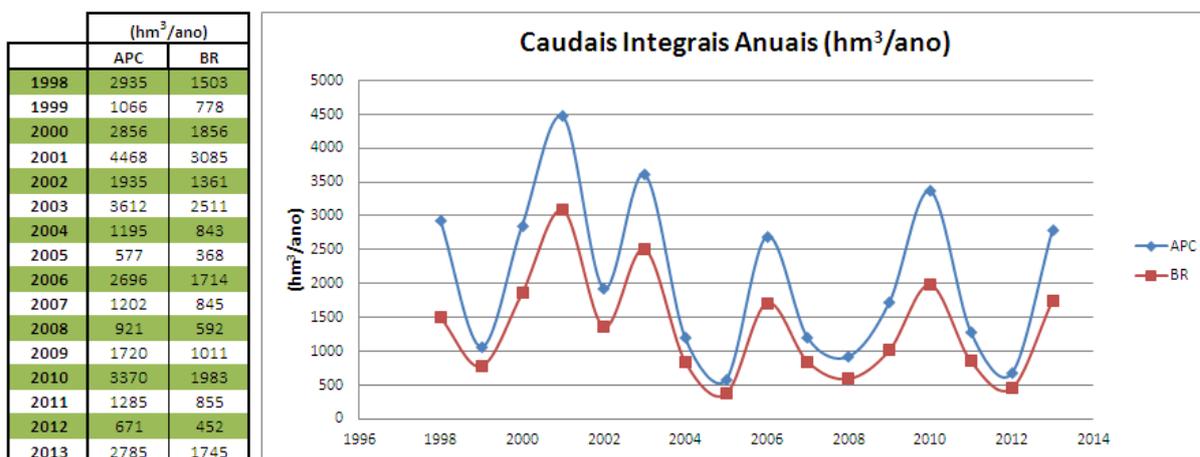


Figura 5.1 - Caudais integrais anuais observados

A Figura 5.1 retrata, ao longo do período considerado, o caudal integral anual no APC e na BR. Após observação destes dados, constatou-se uma repetição cíclica entre períodos de grandes e pequenas afluências. É notório também, na mesma Figura, que existe um desfasamento entre a linha correspondente ao APC e a linha representativa da BR. Este facto confirma o que já tinha sido descrito anteriormente, relativamente à existência de outros escoamentos que afluem ao longo do percurso, sendo aquele que eflui do rio Ceira o que tem um impacto mais significativo neste estudo.

Obtiveram-se portanto sete grupos distintos para este estudo, conforme apresentado no ponto 4.1.1, três relativamente aos períodos de grandes precipitações, os anos húmidos, onde o registo que se verifica ser maior é para o ano de 2001, com um caudal integral anual de 4468 hm³/ano. Relativamente aos anos secos, aquele que registou o valor mais baixo foi o ano de

2005, com um valor de 577 hm³/ano. Os restantes anos são apresentados de seguida, separados consoante as suas características hidrológicas.

Ano de seca extrema

Caudal Integral Anual (hm ³ /ano)	2005	2008
Açude Ponte Coimbra	577	921

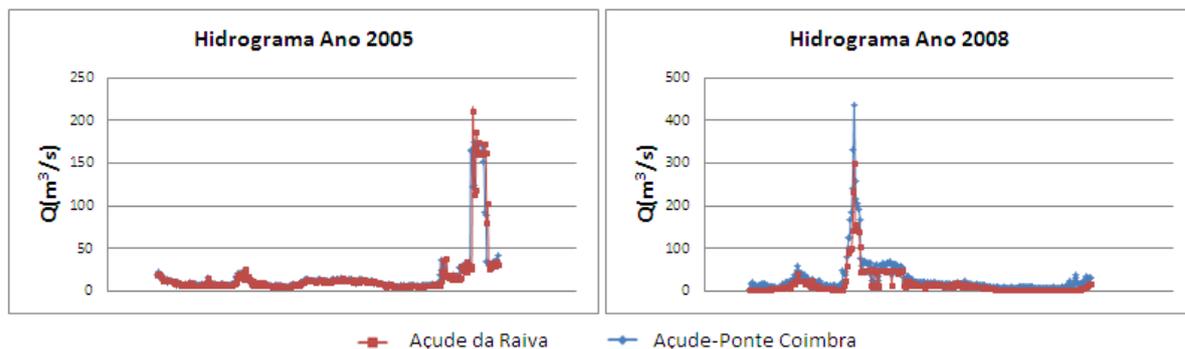


Figura 5.2 - Caudais integrais anuais e hidrogramas dos anos de seca extrema

Ano seco

Caudal Integral Anual (hm ³ /ano)	1999	2004	2007
Açude Ponte Coimbra	1066	1195	1202

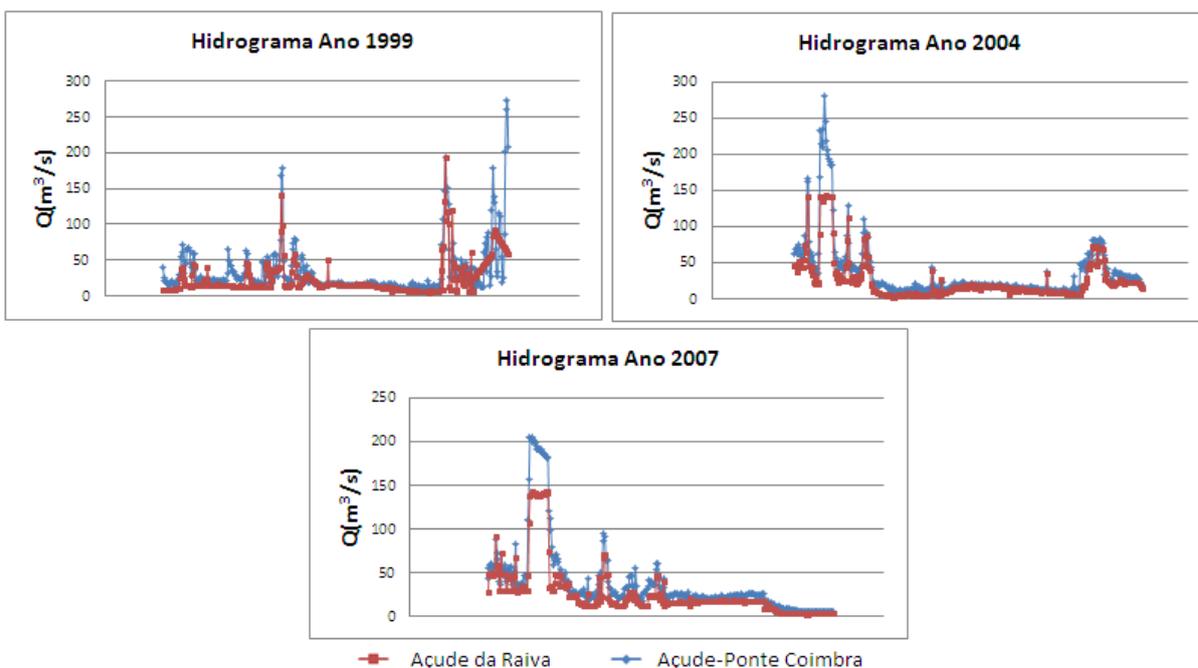


Figura 5.3 - Caudais integrais anuais e hidrogramas dos anos secos

Ano médio

Caudal Integral Anual (hm ³ /ano)	1998	2002
Açude Ponte Coimbra	2935	1935

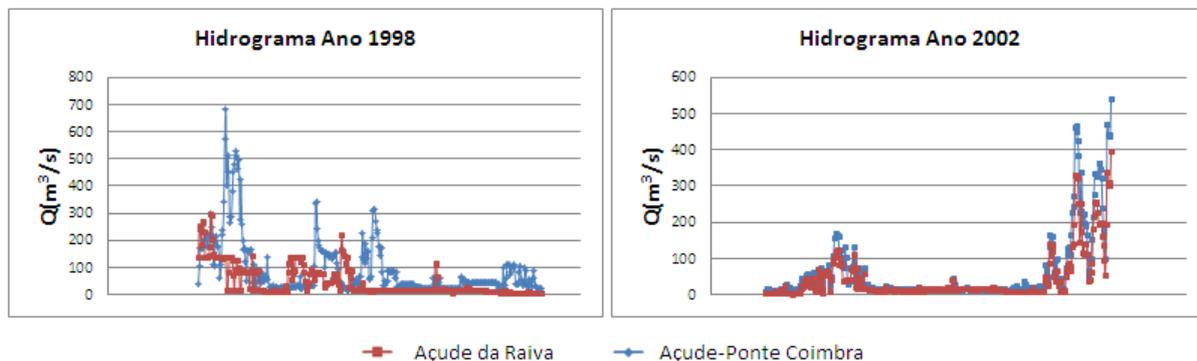


Figura 5.4 – Caudais integrais anuais e hidrogramas dos anos médios

Ano húmido

Caudal Integral Anual (hm ³ /ano)	2006	2010
Açude Ponte Coimbra	2696	3370

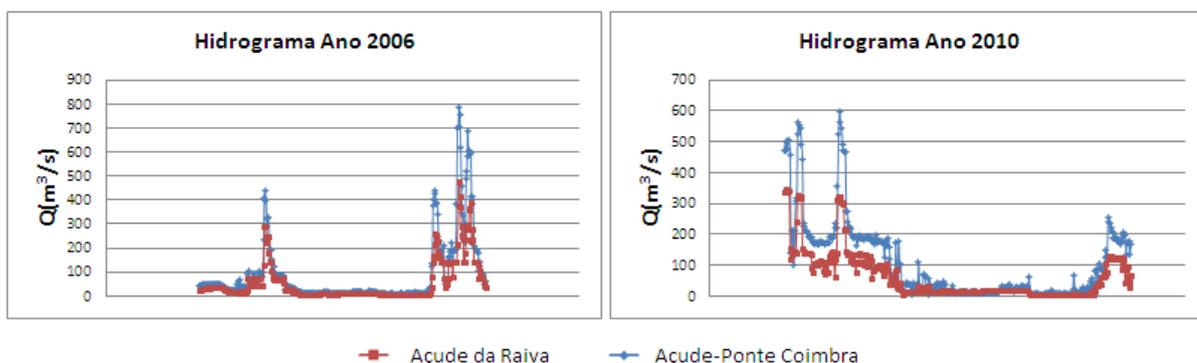


Figura 5.5 – Caudais integrais anuais e hidrogramas dos anos húmidos

Ano extremamente húmido

Caudal Integral Anual (hm ³ /ano)	2001	2003
Açude Ponte Coimbra	4468	3612

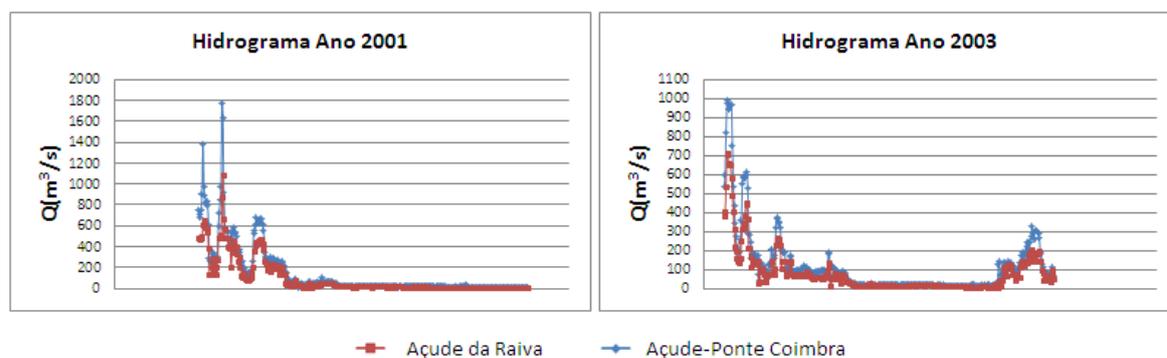


Figura 5.6 – Caudais integrais anuais e hidrogramas dos anos extremamente húmidos

Estes foram os resultados obtidos através do tratamento de dados existentes, pelos quais se procedeu à introdução de informação no programa HEC-RAS. Verifica-se a existência de uma quantidade homogênea de diferentes tipos de anos característicos, o que está de acordo com as características meteorológicas e hidrológicas da região considerada, uma vez que se faz corresponder aos períodos chuvosos, Outono e Inverno, um caudal maior e inversamente, pequenos caudais associados a períodos mais secos, respectivamente Primavera e Verão.

5.2 Resultados obtidos com o programa HEC-RAS

A utilização deste programa serve para comparar os resultados obtidos através do modelo HEC-RAS com os valores registados e avaliar a sua compatibilidade com o modelo MACGT, relativamente às afluências à zona do APC, sendo essa zona merecedora de especial destaque em períodos de cheia. De seguida serão apresentados resultados obtidos para os anos de 2005 (ano de seca extrema), 2007 (ano seco) e 2010 (ano húmido), anos em que foi possível obter informação para analisar criticamente o processo de transporte da informação hidrométrica da Raiva para o APC.

- Ano 2005 – Período de seca extrema

Dos registos disponíveis, o correspondente ao ano de 2005 é o que apresenta um menor caudal integral anual. Através da Figura 5.7 é possível constatar que o andamento dos hidrogramas ao longo do ano é bastante similar, existindo uma ligeira diferença de apenas de 1% nos correspondentes valores do caudal integral anual. Os valores correspondentes a esta análise podem ser consultados na Figura 5.8.

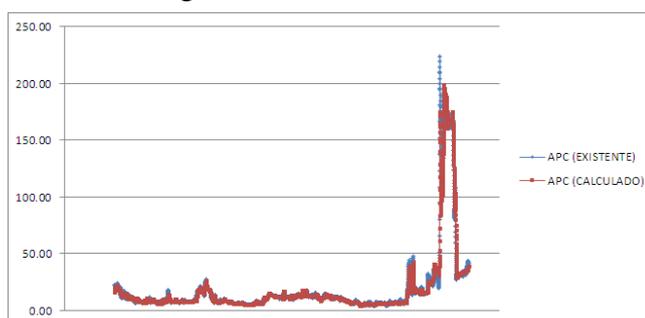


Figura 5.7 - Hidrogramas de comparação para o ano 2005

	Caudal Integral Anual (hm ³ /ano)		
	Dados pré-existentes usados no MACGT	Cálculos HEC-RAS	Diferença
2005	573	579	1%

Quadro 5.1 - Volumes de afluências ao açude ponte Coimbra (2005)

- Ano 2007 – Período seco

Relativamente a este ano característico, a análise dos hidrogramas obtidos revela mais uma vez, um andamento de acordo com a informação existente, como se verifica na Figura 5.9. A diferença neste período corresponde a um valor entre os obtidos para 2005 e 2010, de 3%.

A figura seguinte ilustra o acompanhamento dos resultados obtidos face à informação existente e os valores considerados nas diferenças referidas anteriormente são apresentados na Figura 5.10.

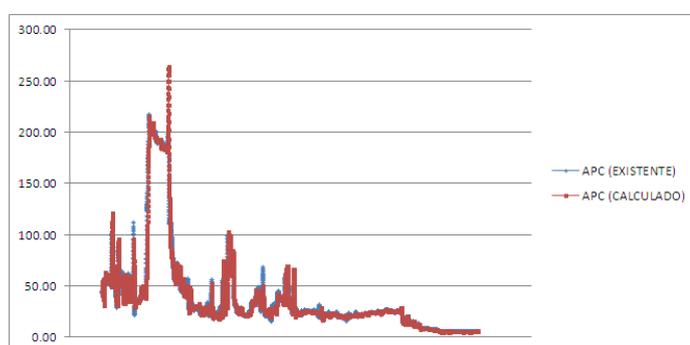


Figura 5.8 - Hidrogramas de comparação para o ano 2007

Caudal Integral Anual (hm ³ /ano)			
	Dados pré-existentes usados no MACGT	Cálculos HEC-RAS	Diferença
2007	1161	1207	3%

Quadro 5.2 - Volumes de Afluências ao açude ponte Coimbra (2007)

- Ano 2010 – Período húmido

O hidrograma referente ao ano de 2010, correspondente a um ano de grande pluviosidade e consequentemente maiores caudais integrais anuais, é o que apresenta um acompanhamento dos resultados obtidos com maior discrepância face à informação existente. Ainda assim, o hidrograma calculado apresenta uma configuração muito semelhante à que se pretende igualar, embora incorra numa maior diferença entre caudais para os tipos de anos considerados. Esta diferença é de 9%. Os hidrogramas, assim como os valores considerados nesta análise, são apresentados de seguida.

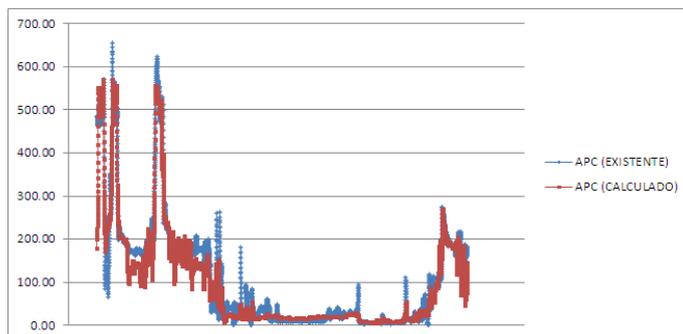


Figura 5.9 - Hidrogramas de comparação para o ano de 2010

Caudal Integral Anual (hm ³ /ano)			
	Dados pré-existentes usados no MACGT	Cálculos HEC-RAS	Diferença
2010	3414	3091	9%

Quadro 5.3 - Volumes de afluências ao açude ponte Coimbra (2010)

Os resultados analisados serão utilizados como dados de entrada na análise económica que será feita no ponto seguinte. Importa referir que este erro será considerado como condicionante apenas nos anos de características de cheia, pelo que apresentam uma diferença mais significativa em relação aos resultados dos restantes anos tipo, não sendo ainda assim um condicionamento muito relevante.

No Quadro 5.4 e na Figura 5.10 comparam-se os resultados obtidos com o HEC-RAS usando informação a montante e os dados pré-existentes usados no MACGT.

Caudal Integral Anual (hm ³ /ano)			
	Dados pré-existentes usados no MACGT	Cálculos HEC-RAS	Diferença
2005	573	579	1%
2006	1993	2696	15%
2007	1161	1207	3%
2008	7376	9388	12%
2010	3414	3091	9%

Quadro 5.4 - Volumes anuais para os anos base

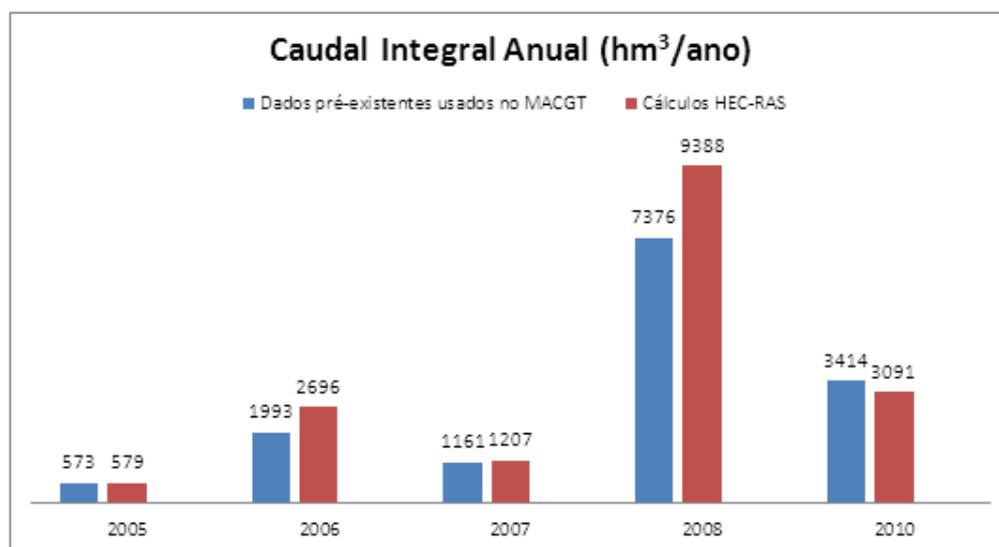


Figura 5.10 - Comparação de resultados

A Figura 5.10 apresenta a comparação dos caudais integrais anuais propagados pelo HEC-RAS com os caudais integrais anuais calculados com base nos dados pré-existentes usados no MACGT. É notório o aumento da diferença entre os resultados obtidos pelos dois processos quando os anos são mais pluviosos.

5.3 Resultados obtidos com o modelo MACGT

A utilização do modelo MACGT, permite-nos simular o funcionamento da central mini-hídrica de modo a obter as receitas resultantes da produção de energia, com base na potência instalada dos grupos turbo-geradores instalados. Cada simulação foi feita para o período de um ano e os resultados correspondentes foram obtidos para cada mês. Os dados introduzidos neste modelo foram obtidos através da utilização do programa HEC-RAS, como já foi referido anteriormente. Estes dados compreendem os caudais afluentes ao APC e estão separados por intervalos de uma hora.

A análise efectuada para a série cronológica considerada, aquela que engloba os anos em que existem dados históricos possíveis de utilizar, remete-nos para um máximo mensal da receita para o ano de 2003, durante o mês de Março.

Relativamente ao menor valor da receita mensal, existem dois anos em que é nula, nomeadamente para os meses de Maio, Julho, Agosto e Setembro de 2005 e também para o mês de Dezembro de 2007, uma vez que correspondem aos períodos de seca em que não há produção de energia. Imediatamente acima da receita nula registada nos meses referidos, temos ainda o valor mínimo de 463€ para o mês de Agosto de 2006.

Estes valores, assim como toda a informação relativamente à remuneração mensal, obtidos para os diferentes anos da série cronológica que foi considerada nas simulações são apresentados de seguida.

	1998	1999	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2010
Período	VRDm (€)										
Janeiro	29916	28107	14525	14840	19049	30519	11632	30140	22738	11588	27564
Fevereiro	27378	25757	24781	24122	27436	28551	4425	27454	21838	21492	26617
Março	30320	30513	26496	29228	30562	30318	7986	30394	27301	21102	29740
Abril	29488	26263	29474	24489	29580	12078	7076	29569	22988	23845	29576
Mai	30428	30286	30432	14773	27769	13731	0	10793	26353	29085	20597
Junho	25754	18928	17042	7864	10086	16146	1894	1982	14358	25553	14767
Julho	3271	5131	7676	2570	3999	10260	0	660	21832	7525	2261
Agosto	3234	4627	2049	1415	3370	6419	0	463	11457	5623	8108
Setembro	20666	7520	14150	11664	6890	9896	0	3475	21304	5259	12172
Outubro	27611	17577	16396	28043	18058	17005	2126	16935	24141	3264	6598
Novembro	17601	25194	10985	26525	29397	29398	24757	27252	2918	1076	24742
Dezembro	13837	30323	4387	30035	30380	30377	30380	28762	0	22746	30379
Total	259567	250346	198418	215643	236647	234815	90450	207948	217227	178224	233188
Máximo	30428	30513	30432	30035	30562	30519	30380	30394	27301	29085	30379
Mínimo	3234	4627	2049	1415	3370	6419	1894	463	11457	1076	2261
Média	21625	20852	16533	17964	19715	19558	7523	17323	18102	14847	19427

Quadro 5.5 - Quadro resumo das receitas mensais obtidas no MACGT

Observam-se também em termos gerais, maiores receitas associadas a períodos chuvosos, como seria de esperar, existindo uma diminuição significativa face aos restantes meses de cada ano para os períodos mais secos, respectivamente Junho, Julho e Agosto. Esta tendência pode ser verificada na imagem que se segue, a qual apresenta o valor de remuneração mensal para a série cronológica considerada.

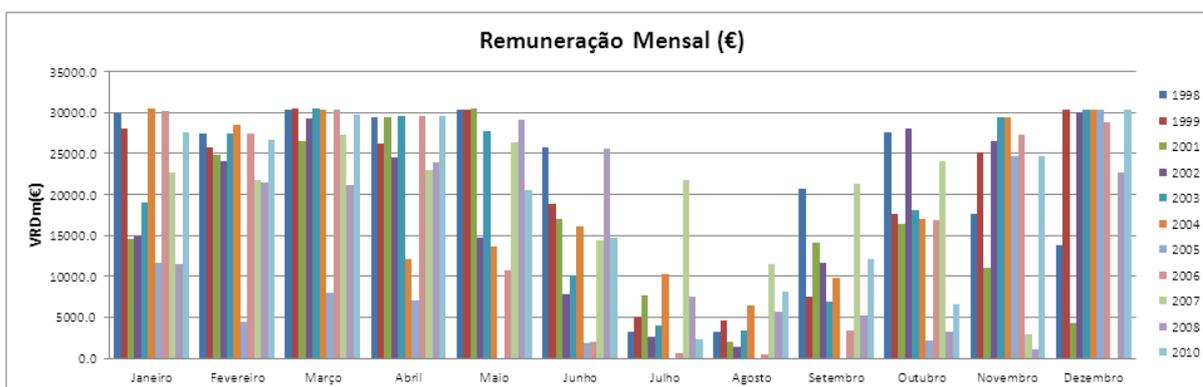


Figura 5.11 - Remuneração mensal para a série cronológica considerada

De seguida serão apresentadas as receitas anuais em comparação com a média anual obtida de 211.136€. Esta análise permite estabelecer um intervalo entre o valor mais baixo,

correspondente ao ano de 2005, de 90.450€ e o valor mais alto de 259.567€ para o ano de 1998. A diferença entre estes dois valores é de 169.117€, 42.019€ abaixo do valor médio obtido para os anos considerados. Verifica-se também que apenas em quatro dos onze anos analisados se obtiveram receitas inferiores à média. Estes valores são apresentados na Figura 5.17.

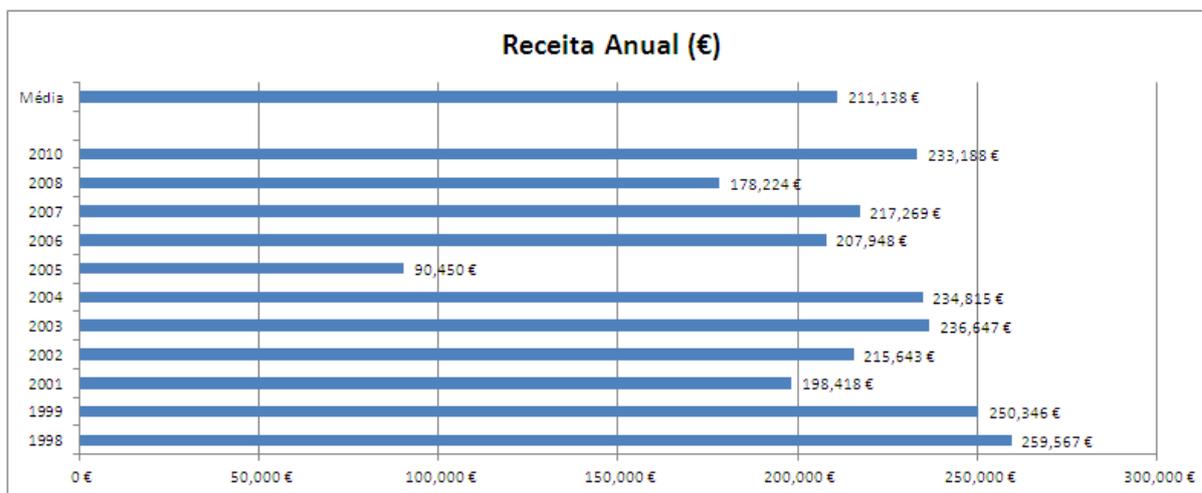


Figura 5.12 – Receitas anuais e receita média

Dos resultados obtidos com o modelo MACGT, foi efectuada uma separação consoante a tipologia hidrológica estabelecida no ponto 4.1.1, de modo a identificar características gerais correspondentes à remuneração observada para os períodos distintos. Segue-se assim a apresentação desses mesmos resultados no seguimento desta análise.

Anos de seca extrema 2005 e 2008

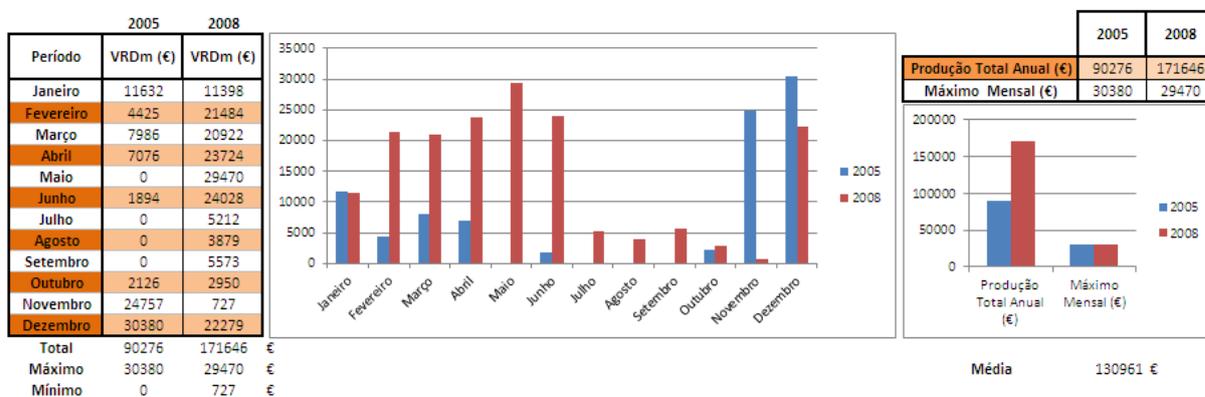


Figura 5.13 - Remuneração mensal dos anos extremamente secos

A Figura 5.18 apresenta as remunerações geradas mensalmente ao longo dos anos de seca extrema. Relativamente ao ano de 2005, este apresenta a receita mais baixa, uma vez que para quatro meses do ano não existiu exploração do aproveitamento mini-hídrico. Este valor reflecte aproximadamente metade da produção de energia obtida para o ano homólogo, onde se verifica uma remuneração 171.646€. A média da receita para este período de seca extrema encontra-se assim abaixo da média do grupo de anos analisados, com o valor de 130.961€.

Quanto ao valor máximo obtido durante um mês, remete-nos para um valor aproximado dos 30.000€, o qual é afectado de ligeiras variações para todos os anos em estudo, como se constata ao longo dos períodos que se seguem.

A simulação efectuada para estes anos teve em conta determinadas condições. Foi utilizada a posição 1 das comportas (Figura 3.15) e foram utilizados os valores relativos aos anos de 2005 e 2008, no que diz respeito aos caudais dispensados, tanto para a margem esquerda como para a da direita.

Anos secos 1999, 2004 e 2007

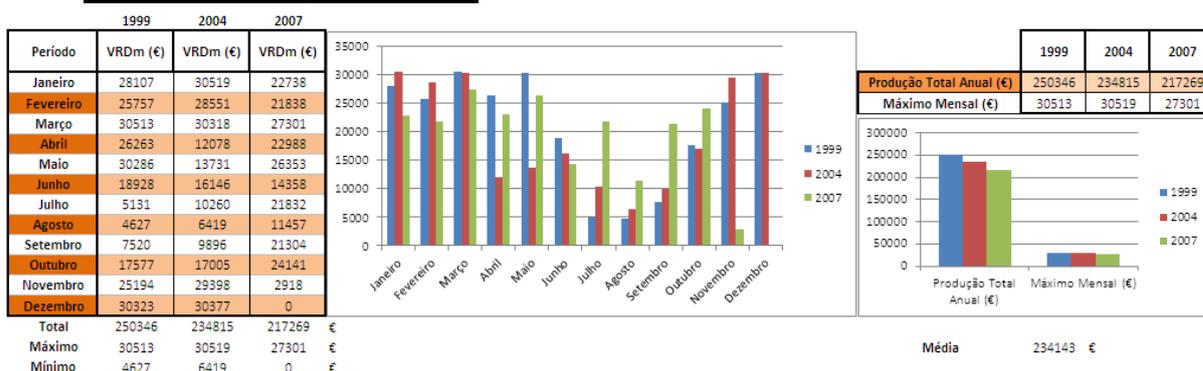


Figura 5.14 - Remuneração mensal dos anos secos

Relativamente aos períodos secos, é possível observar mais uma vez a tendência decrescente associada às receitas obtidas para os meses de Verão. Os valores máximos, no entanto neste período são bastante aproximados os três anos, correspondendo ao mais alto o valor de 250.346€, para o ano de 1999.

Quanto ao valor médio das receitas obtidas para este período foi de 234.143€, ligeiramente acima da média da série cronológica considerada. Importa também assinalar o registo da máxima remuneração para o ano de 2004, respectivamente 30.519€ em Janeiro.

Nesta simulação foi utilizada a posição 1 para a abertura inicial das comportas e os valores respeitantes ao ano de 2007, de modo a colmatar a falta dessa informação quanto aos caudais dispensados para as margens, nos anos de 1999 e 2004.

Anos médios 1998 e 2002

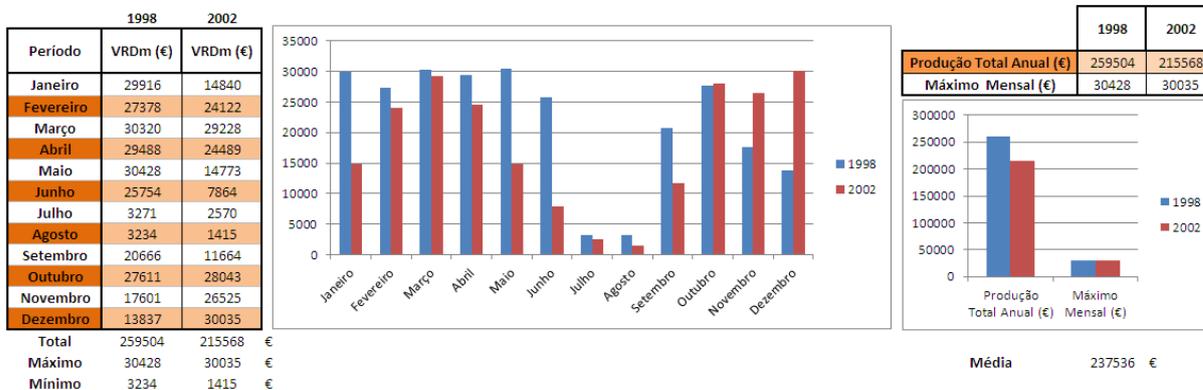


Figura 5.15 - Remuneração mensal dos anos médios

Novamente é possível verificar a tendência decrescente com o aproximar do período corresponde aos meses mais quentes do ano, característica observada também para os anos secos analisados anteriormente. Embora estejamos perante a ausência de meses de remuneração nula, obtiveram-se valores pouco significativos para os meses de Julho e Agosto nos dois anos. O ano de 1998, conta com um máximo de 259.504€ e mínimo de 3.234€. Já no ano de 2002 obteve-se um mínimo de 1.415€ e correspondente máximo de 215.568€. Ainda assim a média obtida para os anos secos, com o valor de 237.536€, é pouco maior do que a média da do conjunto de anos.

As comportas foram colocadas na posição inicial 46 para o ano de 1998 e posição 1 para o ano de 2002, de modo a proceder à simulação e os caudais usados como referência, correspondentes aos dispensados para as margens esquerda e direita foram os do ano de 2007.

Anos húmidos 2006 e 2010

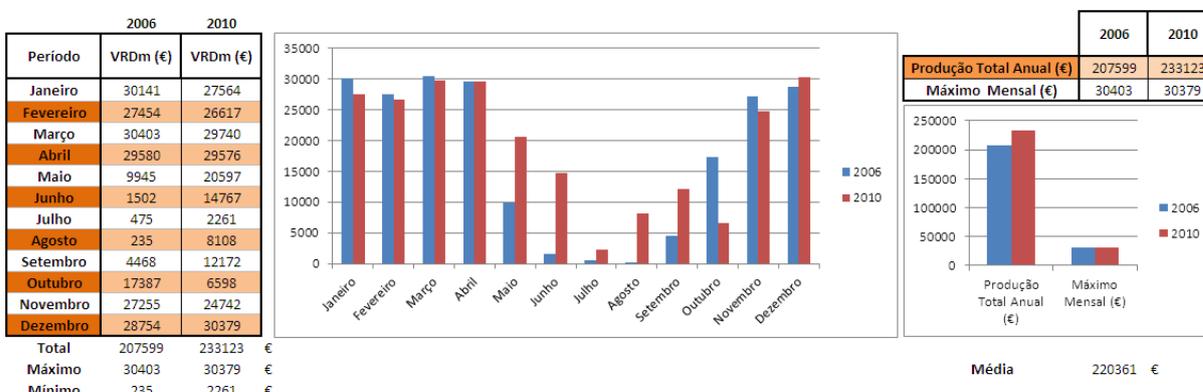


Figura 5.16 - Remuneração mensal dos anos húmidos

Os anos de características hidrológicas do tipo húmido apresentam remunerações muito semelhantes nos primeiros quatro meses do ano e nos últimos dois, sendo que os restantes meses há uma quebra mais significativa do que nos períodos analisados anteriormente. Com base nos resultados obtidos, verifica-se uma receita anual de 207.599€ para 2006 e de 233.123€ em 2010. O ano de 2006 é dos dois, aquele que apresenta uma remuneração mensal mais baixa, durante o mês de Agosto, seguido pelo mês de Julho do mesmo mês. Ainda assim, o valor médio entre o total das receitas correspondentes aos dois anos em análise, situa-se ligeiramente acima do valor da média obtida para o conjunto de anos, apresentando o valor de 220.361€.

Relativamente aos dados de entrada no modelo, importa referir que foi necessário utilizar aspectos diferentes para os dois anos. A posição inicial das comportas utilizada para o ano de 2006 foi a número 29 e foram considerados os caudais dispensados pelas margens do ano de 2006. Já para o ano de 2010, consideraram-se os caudais dispensados para o ano em questão, uma vez que existia informação disponível para tal e uma posição inicial das comportas número 46.

Anos extremamente húmidos 2001 e 2003

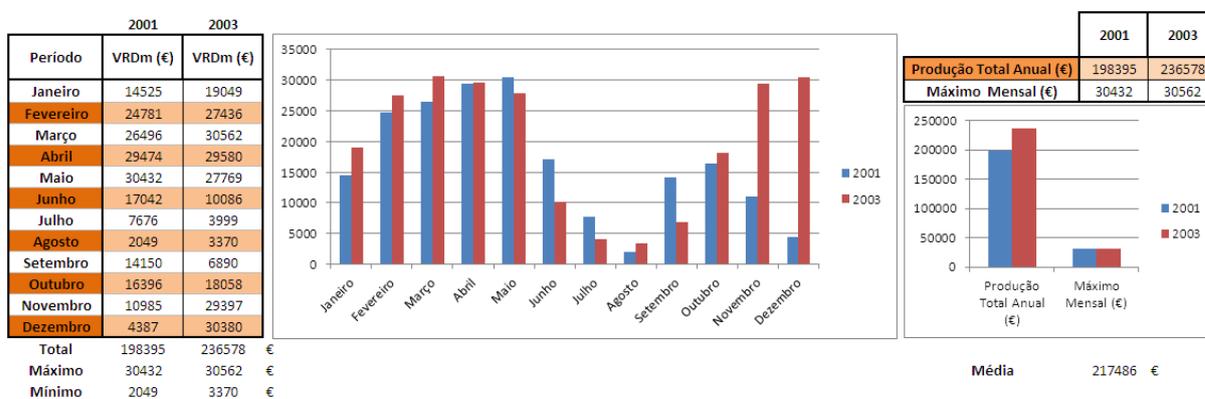


Figura 5.17 - Remuneração mensal dos anos extremamente húmidos

Por último, os anos extremamente húmidos apresentaram resultados anuais entre 200 e 250 mil euros, correspondendo ao ano de 2003 o valor de 236.578€. Existem, no entanto para este tipo de ano, mais concretamente em 2001, maiores receitas associadas aos primeiros meses, seguindo-se o decaimento já característico nos períodos correspondentes às estações com menos pluviosidade. O aumento da remuneração nos últimos meses do ano é marcante em 2003, como se observa na Figura 5.22. A média obtida para estes anos é de 217.486€, valor muito próximo da média do conjunto de anos analisados.

A posição inicial das comportas utilizada nestes anos foi a número 46 e os caudais dispensados os do ano de 2010.

De modo a proporcionar uma melhor percepção quanto às receitas anualmente obtidas em relação a cada grupo de anos com as suas determinadas características hidrológicas, foram separados e organizados os valores segundo a imagem que se segue.

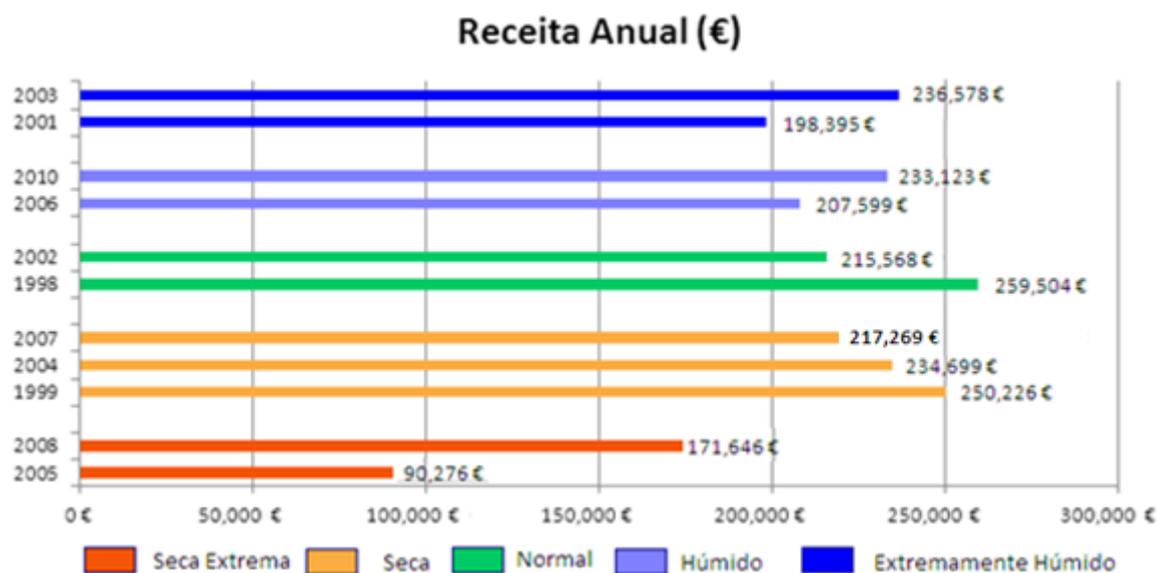


Figura 5.18 - Receitas anuais dos anos segundo a sua tipologia

Com base nos resultados obtidos é possível comparar os resultados deste estudo com os verificados em estudos anteriores, no âmbito do projecto CIVITAS MODERN, em Traça de Almeida et al (2012) e em Marques (2011). O conjunto de anos acessível de comparação remete para os anos de 2005, 2006, 2007, 2008 e 2010, como se observa na Figura 5.24.

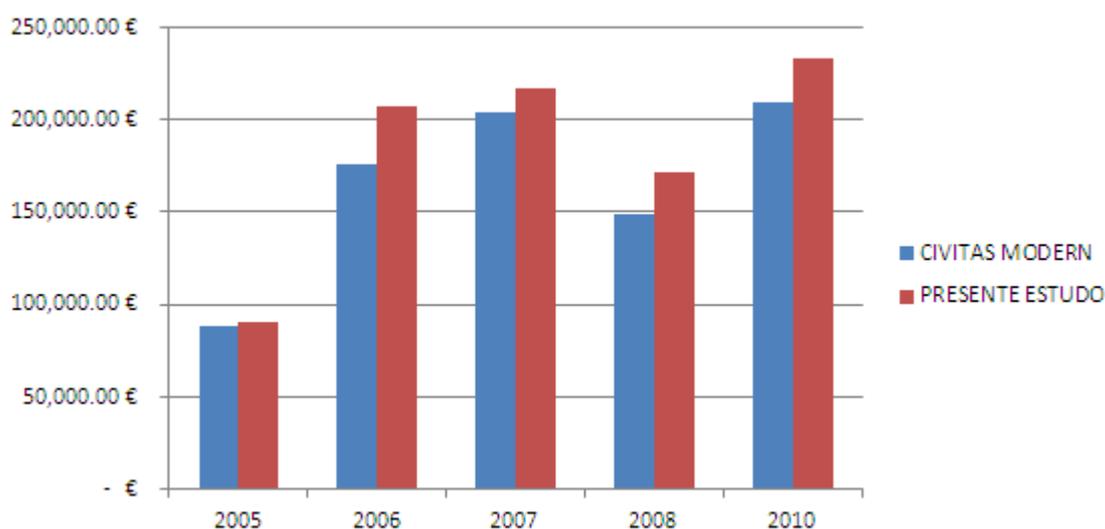


Figura 5.19 - Comparação de receitas anuais obtidas por processos distintos

Comparando as correspondentes receitas anuais, verifica-se um razoável acordo entre os resultados deste estudo, obtidos através da abordagem conjunta dos modelos HEC-RAS e MACGT e os obtidos no âmbito do projecto CIVITAS MODERN.

Assim sendo, considerando o processo aceitável, a receita média anual foi recalculada, adicionando aos anos de 2005, 2006, 2007, 2008 e 2010 (CIVITAS MODERN), os anos de 1998, 1999, 2001, 2002, 2003 e 2004 (HEC-RAS/MACGT). O Quadro 5.6 apresenta a comparação dos valores das receitas médias anuais.

	Receita Média Anual	
CIVITAS MODERN	202.262	€
HEC-RAS / MACGT	211.137	€

Quadro 5.6 - Comparação das receitas médias anuais

Verifica-se um valor superior obtido por este processo face ao calculado anteriormente, apresentando uma diferença pouco significativa de 4%.

5.4 Influência na remuneração devido ao coeficiente Z

A parcela Z, relacionada com a valorização ambiental da produção independente de energia renovável no âmbito da legislação aplicável, foi alterada neste estudo, com o intuito de perceber a sua importância face a uma eventual mudança do regime tarifário. Esta mudança, provavelmente para valores inferiores, pode ser implementada pela eliminação, parcial ou total, da bonificação que tem vindo a ser atribuída atendendo ao carácter não poluente deste tipo de energia renovável, nomeadamente às emissões de CO₂ evitadas por comparação com as emissões do *mix* do sistema electroprodutor nacional.

Deste modo foram efectuadas simulações relativamente ao ano de 2002, no qual se obteve o valor da receita anual de um ano hidrológico de características médias, face a eventuais alterações do regime de remuneração dos produtores independentes de energia renovável de origem hídrica.

De seguida são apresentados os resultados obtidos devido à alteração imposta, sendo o valor de $Z = 4.5$, aquele que foi utilizado em todas as simulações descritas no ponto anterior, que segue o disposto no Decreto-lei n° 225/2007 publicado em Diário da República e a Declaração de Rectificação n° 71/2007 de 24 de Julho.

Z	VRDm (€)	%
6.5	257,066 €	+20%
4.5	215,643 €	
2.5	174,221 €	-20%
0	122,443 €	-55%

Quadro 5.7 - Receitas obtidas com afectação da parcela Z

Verifica-se assim uma variação significativa perante a alteração do coeficiente Z, reduzindo para metade a receita média anual do ano médio de 2002, no caso de este coeficiente ser anulado. Esta alteração revela um impacto negativo sobre a viabilidade económica do projecto.

5.5 Tempos de percurso

O HEC-RAS permite ainda determinar os tempos de percurso com base na velocidade média calculada em cada secção transversal ao longo do rio. É necessário acrescentar a tabela “Trvl Tme Avr (hrs)”, na apresentação padrão dos resultados no HEC-RAS.

Q(m3/s)	Trvl Tme Avr (hrs)
50	13.39
200	6.94
400	5.22
650	4.34
900	3.86
1100	3.6
1300	3.41
1500	3.25
1700	3.12
2000	2.96

Quadro 5.8 - Tempos de percurso

Uma análise mais detalhada foi feita através da comparação entre os hidrogramas de partida a montante e os de chegada, a jusante. Foram assim efectuadas 10 simulações em regime permanente para diferentes valores de caudais. O Quadro 5.8 apresenta os resultados verificados na secção a jusante, correspondente ao APC. Esta análise permite-nos obter uma estimativa do tempo de reacção em situações de cheia, relativamente à activação da abertura

das comportas e à retirada de funcionamento dos grupos turbo-geradores que venham a ser instalados no APC. Será realizada apenas para os anos 2001, 2005 e 2010 visto que interessa conhecer os tempos em situações extremas. De seguida serão apresentados os resultados provenientes do tratamento de dados efectuado para obter os dados de introdução no HEC-RAS, no que diz respeito à BR e respectivas afluições ao APC.

- Ano 2005

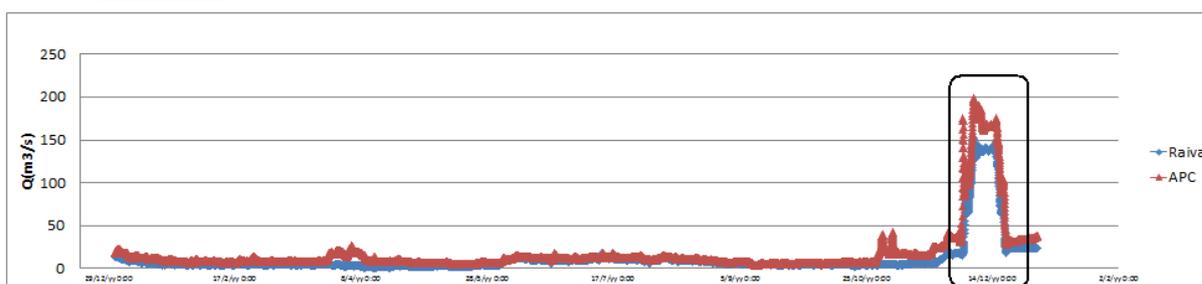


Figura 5.20 - Hidrograma de caudais (ano de seca extrema)

A zona assinalada na figura anterior corresponde ao intervalo temporal que apresenta a maior variação dos caudais escoados na BR e conseqüente chegada ao APC.

Foram tidas em conta dez horas na análise dos tempos de percurso que se pretendem determinar. Esses dias são apresentados na Figura 5.21, onde se verifica que o caudal máximo registado para o dia 6 de Dezembro, foi pelas 17h00 no APC. O maior pico observado corresponde à aflüência no APC, com um caudal de 198 m³/s, ou seja, cinco horas depois da descarga de 152 m³/s feita na BR às 12h00.

A Figura 5.29 apresenta a gama de caudais observados assim como o hidrograma associado às horas apresentadas.

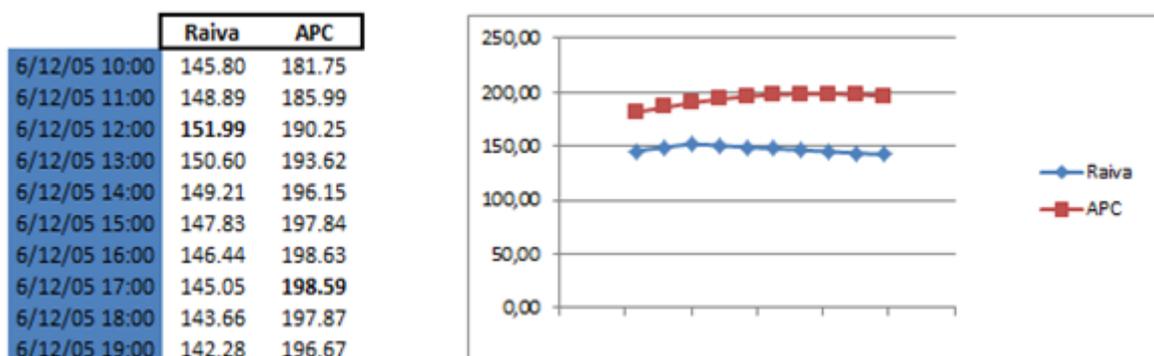


Figura 5.21 - Caudais máximos no intervalo considerado

- Ano 2010

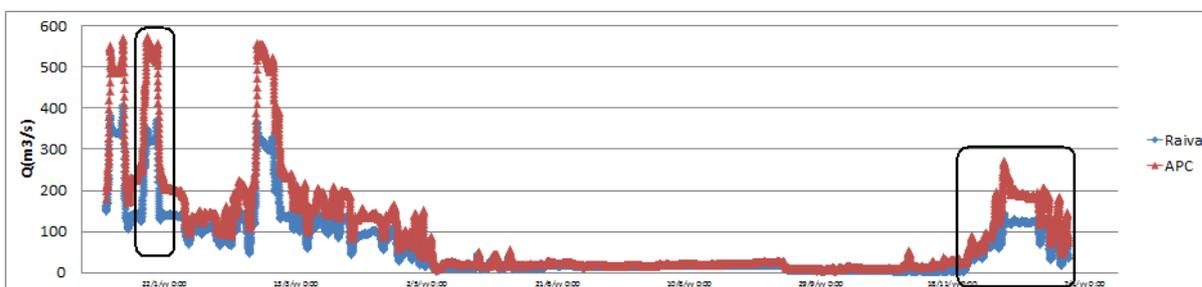


Figura 5.22 - Hidrograma de caudais (ano húmido)

Relativamente ao ano de 2010, foram estipulados dois intervalos abrangentes de valores de pico, o primeiro no inverno e o segundo no outono. Os critérios de comparação foram mantidos conforme a descrição feita anteriormente, resultando assim as Figuras 5.23 e 5.24, respectivamente para o primeiro e segundo períodos considerados.

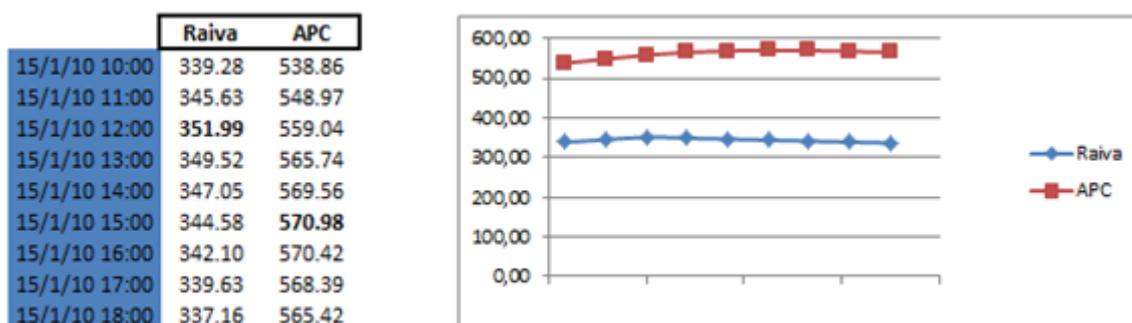


Figura 5.23 - Caudais máximos no primeiro intervalo considerado

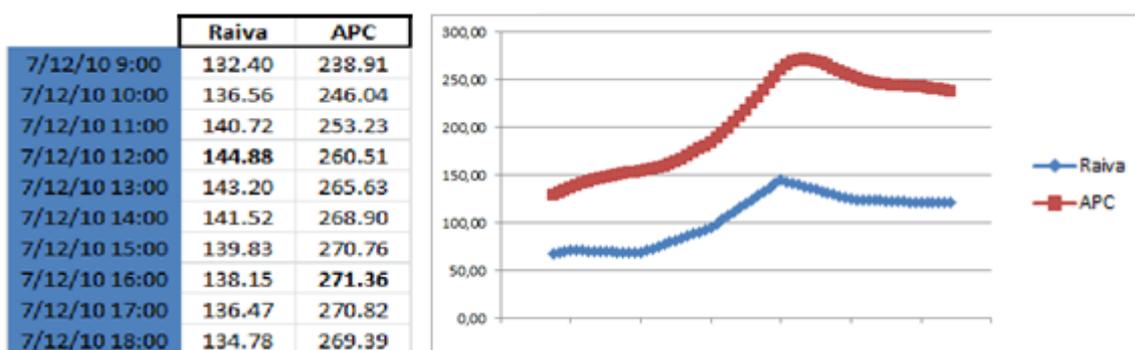


Figura 5.24 - Caudais máximos para o segundo intervalo considerado

O primeiro intervalo considerado remete-nos para o período de maiores descargas durante um ano húmido, o que envolve uma gama de caudais mais elevados do que a analisada anteriormente, já o segundo sucede um período de caudais baixos registados durante o verão, correspondendo assim às primeiras chuvas das estações em que existe uma tendência para maior pluviosidade. Deste modo, verifica-se um desfasamento horário entre picos de caudais, diferente para ambos os períodos. O primeiro apresenta uma descarga de $352 \text{ m}^3/\text{s}$ no dia 15 de Janeiro pelas 12h00, enquanto que o segundo $145 \text{ m}^3/\text{s}$ do dia 7 de Dezembro pela mesma hora. Já as afluições, os maiores registos ocorrem pelas 15h00 no primeiro caso e às 16h00 no segundo, o que nos remete para uma diferença temporal dos escoamentos em períodos distintos, de 3h e 4h respectivamente.

- Ano 2001

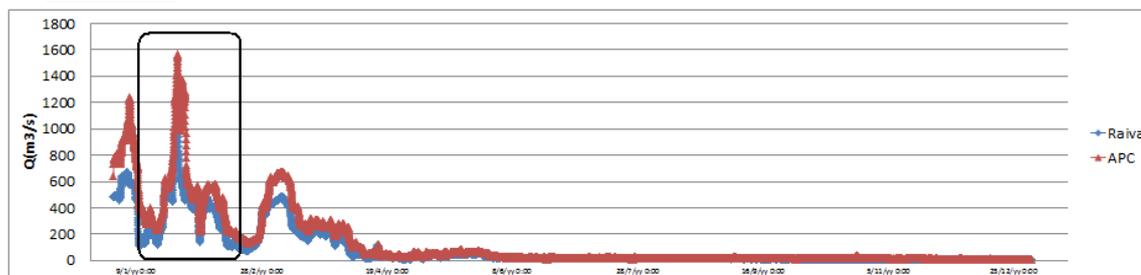


Figura 5.25 - Hidrograma de caudais (ano extremamente húmido)

Com base na simulação efectuada com o HEC-RAS, durante o ano de 2001 foram registados os maiores volumes de caudais afluentes ao APC, de todos os anos em análise, com o valor de $1570 \text{ m}^3/\text{s}$. Este pico foi observado entre as 09:00 do dia 25 de Janeiro e as 18:00 do mesmo dia, atingindo assim o seu máximo pelas 14:00 no APC, correspondendo ao maior valor descarregado na BR duas horas antes, às 12:00. Verifica-se também uma configuração diferente do hidrograma face aos anos analisados anteriormente, concentrando-se o período de precipitação significativa apenas nos primeiros 4 meses do ano.

O ano de 2001, por ter sido aquele que registou os maiores caudais descarregados na Raiva, foi alvo de uma análise mais detalhada, onde se procedeu a uma simulação no HEC-RAS para intervalos de resultados de 10 em 10 minutos. Foi então analisado o período que compreende os dias de pico, respectivamente de 20 a 30 de Janeiro, sendo o dia 25 aquele em que se verificou o maior valor, como referido anteriormente. De seguida serão apresentados os tempos de percurso para as 8:00, 13:00 e 20:00 horas dos dias acima indicados.

Data	Hora	Caudal (m3/s)	Tempo de percurso médio (horas)
20 Janeiro 2001	8:00	526	4.76
	13:00	612	4.47
	20:00	606	4.4
21 Janeiro 2001	8:00	551	4.58
	13:00	546	4.61
	20:00	560	4.57
22 Janeiro 2001	8:00	580	4.5
	13:00	588	4.48
	20:00	619	4.41
23 Janeiro 2001	8:00	689	4.23
	13:00	708	4.19
	20:00	784	4.06
24 Janeiro 2001	8:00	1049	3.67
	13:00	1185	3.51
	20:00	1247	3.43
25 Janeiro 2001	8:00	1436	3.3
	13:00	1567	3.2
	20:00	1404	3.28
26 Janeiro 2001	8:00	1073	3.58
	13:00	992	3.69
	20:00	1049	3.65
27 Janeiro 2001	8:00	1283	3.42
	13:00	1370	3.33
	20:00	1263	3.4
28 Janeiro 2001	8:00	1251	3.43
	13:00	1250	3.41
	20:00	916	3.73
29 Janeiro 2001	8:00	632	4.32
	13:00	591	4.44
	20:00	588	4.48
30 Janeiro 2001	8:00	578	4.5
	13:00	576	4.51
	20:00	556	4.55

Quadro 5.9 - Tempos de percurso médios obtidos no HEC-RAS em regime variável

A Figura 5.26, permite avaliar o tempo de reacção de que dispõe o operador, numa situação de cheia, para efectuar as manobras necessárias relativamente à retirada da turbina como medida de protecção do equipamento instalado. Como seria de esperar, ao maior caudal descarregado na Raiva, corresponde o menor tempo de percurso médio, respectivamente uma descarga de 1567 m³/s demora aproximadamente 3 horas a atingir o APC.

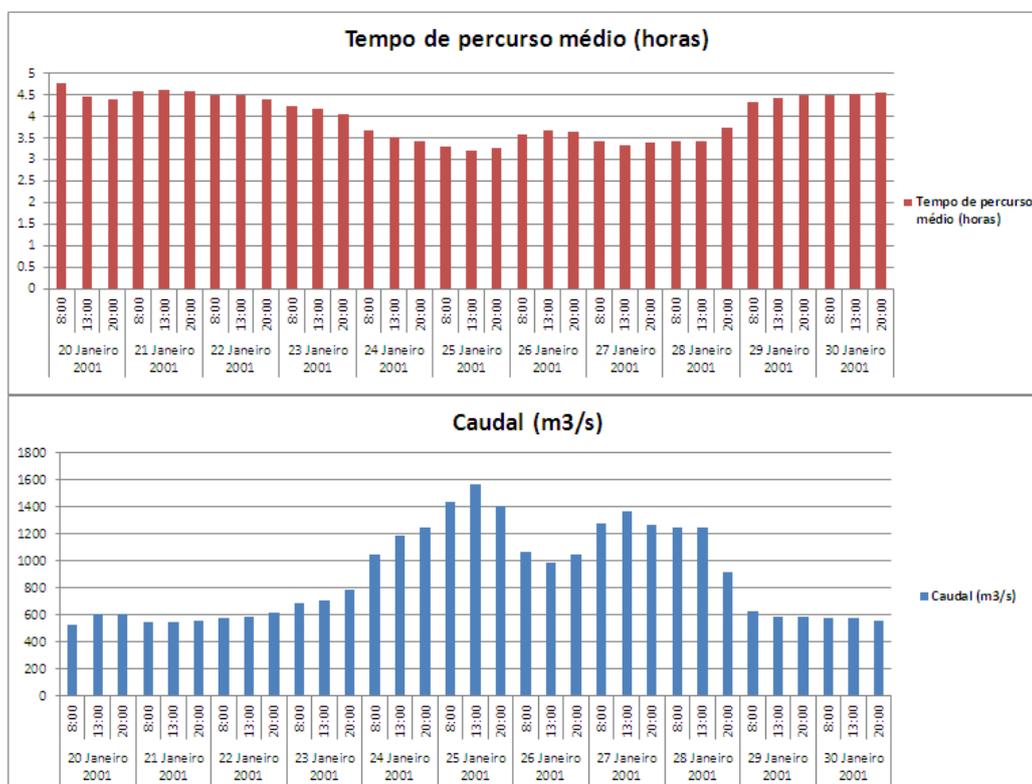


Figura 5.26 - Tempos de percurso e respectivos caudais para o período analisado

5.6 Impacto da alteração das regras de operação

Procedeu-se à alteração dos dados correspondentes às regras de operação das comportas, incrementando o passo de abertura para intervalos de 0.20m, face à configuração da matriz original apresentada na Figura 3.15, produzindo deste modo um encurtamento do tempo necessário até atingir a abertura total das sete comportas, permitindo assim um escoamento mais rápido para situações de cheia. A reprogramação do autómato foi feita para avaliar uma nova estratégia de reacção face às afluências respeitantes ao ano de 2001, de modo a obter resultados relativamente às das alturas de água a montante do APC e efectuar uma comparação com os valores homólogos alusivos à matriz original.

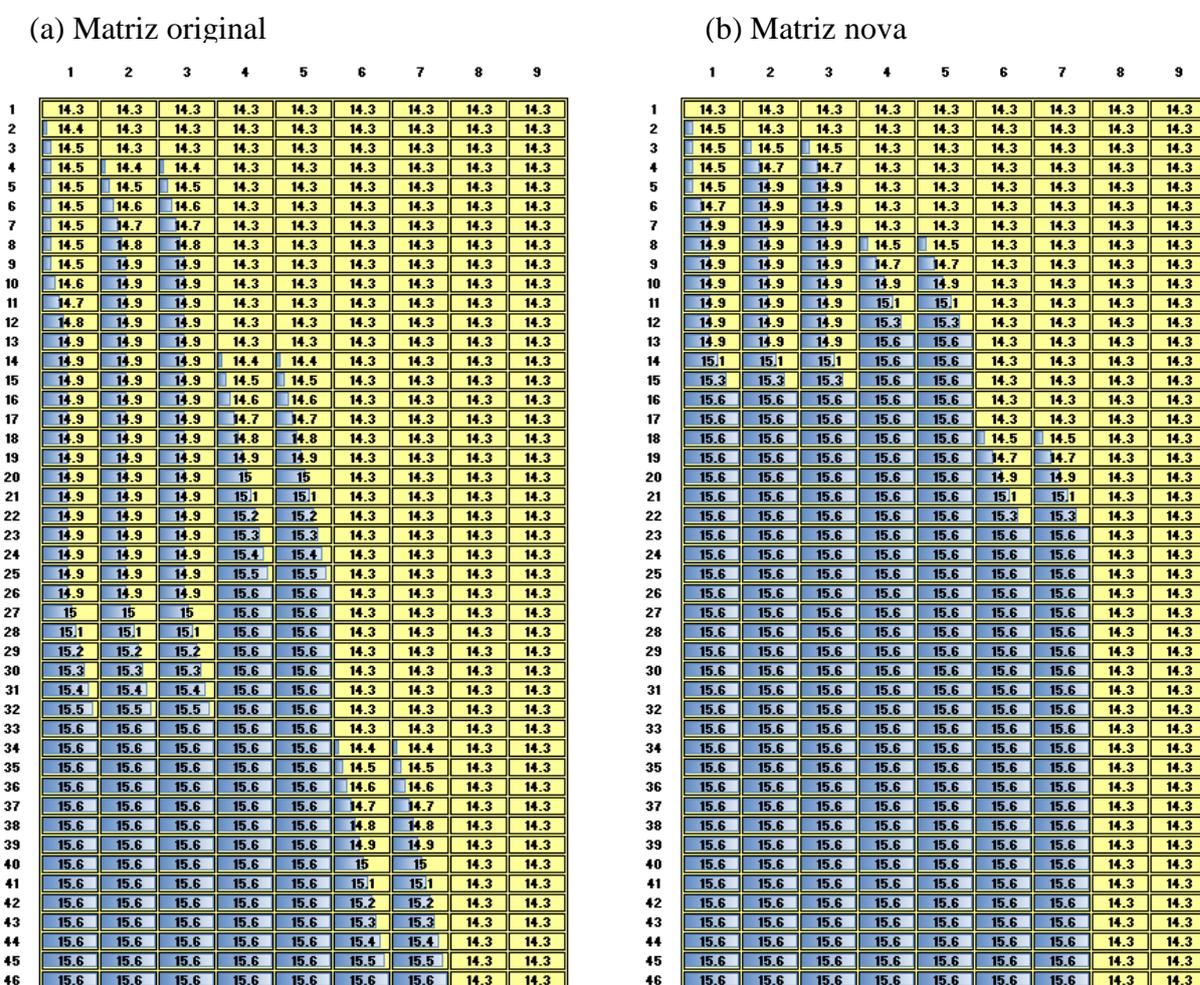


Figura 5.27 – Reprogramação da matriz de manobra das comportas (a) e (b)

Foram tidas em conta todas as considerações descritas no ponto 5.4, relativamente aos anos extremamente húmidos, quanto às condições iniciais de simulação.

Relativamente às receitas obtidas para a simulação efectuada, tendo em conta a alteração da matriz de abertura das comportas apresentada anteriormente, verificou-se um decréscimo pouco significativo, de apenas 141€ para todo o ano de 2001, correspondendo deste modo a uma remuneração anual de 198.277€.

Intervalo de valores	Matriz Original		Matriz Alterada	
		%		%
$h \geq 18 \text{ m}$	221	0.25	203	0.23
$h < 18 \text{ m e } h \geq 17.90 \text{ m}$	16137	18.42	16243	18.54
$h < 17.90 \text{ m e } h \geq 17.50 \text{ m}$	65829	75.13	65755	75.04
$h < 17.5 \text{ m e } h \geq 17.00 \text{ m}$	5436	6.20	5422	6.19

Quadro 5.10 – Intervalos de valores analisados

Foram considerados quatro intervalos distintos na comparação dos resultados obtidos com o MACGT para a utilização das diferentes matrizes quanto às alturas de água a montante. De um conjunto de 87.623 entradas de valores, verifica-se que a alteração da matriz induz a uma diminuição do número de vezes que a água atinge a cota de 18m, ou superior, na zona imediatamente a montante do açude, correspondendo a 203 vezes para a matriz alterada e 221 com a utilização da matriz original. Embora este valor corresponda a uma percentagem pouco significativa face ao número total de amostras, seguidamente serão apresentadas as configurações do desenvolvimento das alturas de água para períodos específicos.

Tendo em conta o hidrograma dos caudais para o ano de 2001, apresentado na Figura 5.6, foram analisados dois períodos distintos, um para 10 horas do dia 02 de janeiro e outro que combina 1 dia e 13 horas dos dias 09 a 10 de janeiro.

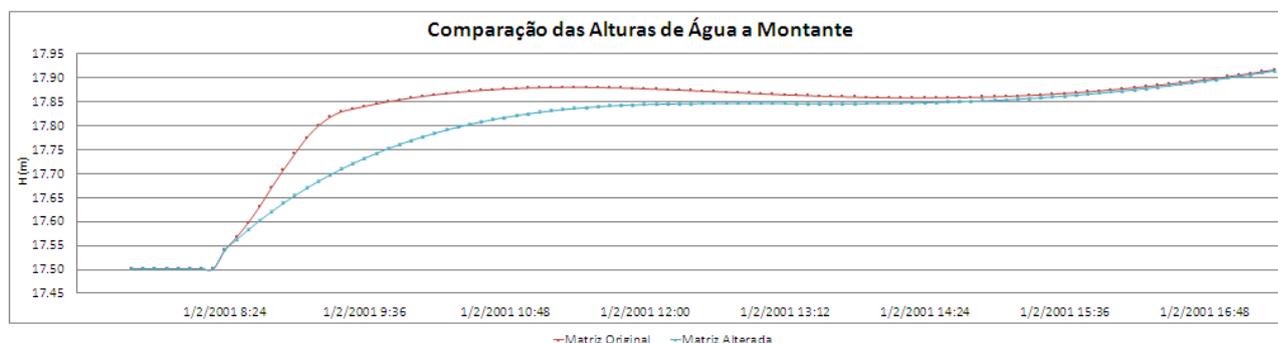


Figura 5.28 - Comparação das alturas de água a montante para 2 de janeiro de 2001

A Figura 5.28 representa o andamento das alturas de água a montante durante 10 horas do dia 02 de janeiro, tendo início pelas 07:42 até às 17:24. Os caudais associados a este período, iniciam-se no valor de $750,50 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondendo à posição de abertura total das sete comportas do meio, em que uma vez ultrapassado este valor por valores descendentes a regulação do autómato é feita a partir da posição 23, diminuindo assim a abertura das comportas em passos de $0,20\text{m}$. Os valores dos caudais para este intervalo inicialmente decrescem, até atingir os $731,04 \text{ m}^3/\text{s}$, subindo novamente para os $750,34 \text{ m}^3/\text{s}$ no final do intervalo em análise. A comparação dos resultados para o período homólogo face à imposição da nova matriz, revela uma nítida suavização nas alturas de águas correspondentes á subida do nível da água de $17,55\text{m}$ para $17,85\text{m}$.

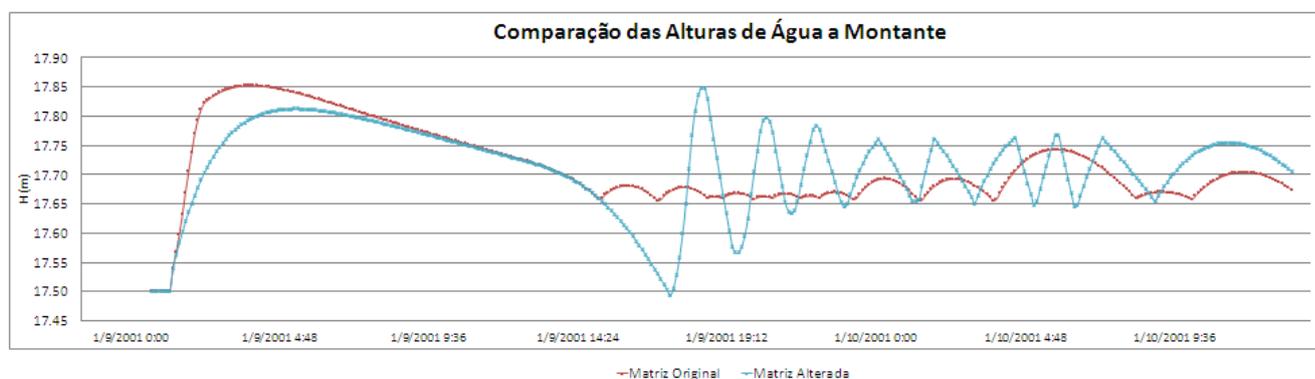


Figura 5.29 - Comparação das alturas de água a montante de 9 a 10 de janeiro de 2001

Relativamente ao segundo intervalo analisado, observa-se novamente um melhor comportamento na suavização das alturas de água quando sobem de $17,55\text{m}$ para $17,85\text{m}$, para caudais na ordem de grandeza dos $750\text{m}^3/\text{s}$, correspondendo neste caso ao dia 09 de janeiro pelas 00:54. Para as restantes horas deste período os caudais tendem para valores mais baixos, verificando-se assim ao fim de 1 dia e 13 horas, um caudal de $400,13 \text{ m}^3/\text{s}$ no dia 10 de janeiro pelas 13:24. É de realçar que na fase de diminuição das alturas de água a aplicação da nova matriz de manobras das comportas ocasiona um pior comportamento traduzido numa maior amplitude na oscilação dos níveis de água.

6 CONSIDERAÇÕES, CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

6.1 Considerações finais e conclusões

O objectivo deste estudo, tendo por base complementar informação para o estudo económico do APC recorrendo á utilização do HEC-RAS, em conjunto com o programa MACGT, utilizando informação obtida na BR e calculada na foz do Ceira, mostra que a sua implementação computacional é exequível e conduz a resultados aceitáveis.

Verifica-se que a diferença entre, os caudais integrais obtidos com o HEC-RAS e os obtidos localmente com os dados pré-existentes, se acentua no caso dos anos mais pluviosos. Isto deve-se provavelmente ao processo de estimação dos caudais na foz do Ceira que não consegue incorporar a real variabilidade do escoamento nesta bacia pouco regularizada, pelo que é de supor que esta abordagem poderá proporcionar maior precisão quando existirem dados de caudais na foz do Ceira.

Importa realçar que os resultados obtidos neste estudo não têm em conta factores externos que não foram considerados, como por exemplo, durante os períodos húmidos os caudais tomam um valor elevado embora o aproveitamento hidroeléctrico possa estar desactivado, pois o equipamento é retirado em situação de cheia e o funcionamento do açude é idêntico ao do curso natural do rio sem barreiras. Deste modo é admissível considerar que erros de 10%, fortemente influenciados por grandes caudais, não terão um impacto significativo na produção do aproveitamento.

Quanto às receitas obtidas para este estudo, face aos resultados do estudo base abrangido pelo projecto CIVITAS MODERN, apresentam uma diferença média, por excesso, de 11% para os anos que foram comparados, verificando-se assim um acompanhamento homogéneo para os diferentes tipos de anos analisados. Conclui-se então que existe um aumento da facturação anual, que se reflecte num ligeiro aumento da receita média anual adjacente a uma diminuição do risco do projecto.

A reprogramação do autómato no MACGT acomoda melhor as características hidrológicas do ano de 2001, na medida em que permite reduzir as ultrapassagens de cota máxima. Verifica-se, com base no exemplo simulado no MACGT para o ano de 2001, que a reparametrização do autómato de gestão das comportas mostrou uma suavização dos níveis de água na fase ascendente e uma maior instabilização na fase descendente. Uma possível explicação para

este facto é o aumento do passo de abertura (de 0.1m para 0.2m), o que leva a reacções mais bruscas, sendo melhor quando os caudais são elevados, mas não é bom quando são de reduzido valor. O efeito na remuneração é praticamente nulo.

Relativamente aos tempos de resposta, este estudo prevê que para os períodos secos o tempo de percurso até atingir o açude-ponte em Coimbra seja de aproximadamente 10 horas, para caudais libertados a montante com valores entre os $50\text{m}^3/\text{s}$ e $200\text{m}^3/\text{s}$. Já para os períodos de cheias, o tempo previsto é da ordem das 3 horas para caudais situados entre os $1700\text{ m}^3/\text{s}$ e os $2000\text{ m}^3/\text{s}$.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se o estudo análogo ao utilizado para propagar descargas na BR, procedendo ao transporte de caudais reais no rio Ceira mais a montante, mesmo que depois calibrados junto à foz do Ceira, com o intuito de eliminar eventuais condicionantes provocadas pela estimativa de aflúências ao rio Mondego nessa zona, acrescentando dessa forma informação real quanto aos dados utilizados como contribuição do rio Ceira no modelo HEC-RAS.

Seria também interessante efectuar a modelação com o HEC-RAS para um escoamento sobre o APC para caudais superiores a $930\text{ m}^3/\text{s}$, com as comportas totalmente abertas, de modo a determinar as curvas de vazão a montante e a jusante do açude para posteriormente serem comparadas com as curvas de vazão medidas localmente adoptadas actualmente no modelo MACGT.

A alteração das regras de operação associadas à matriz de descargas que define o autómato quanto à abertura das comportas revela que seria interessante o estudo dos casos pontuais associados a períodos de cheias, adaptando uma possível configuração que conjugue diferentes passos de aberturas, por exemplo, maiores na abertura e menores no fecho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, A., Inverno, C., Marques, J., Almeida, J. (2011), “Small-hydropower integration in a multi-purpose dam-bridge for sustainable urban mobility”. ELSEVIER - Renewable and Sustainable Energy Reviews, Issue 15, pp. 5092-5103.

Almeida, A., Santos, B., Constantino, E., Neto, J., Marques, J., Almeida, J., Marques, P., (2012). “Implementation project: Economical, environmental and legal feasibility study; financial engineering and institutional arrangements”. CIVITAS MODERN

Almeida, J. (2007). “Notas e elementos de apoio sobre aproveitamentos hidráulicos”. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Bosona, T., Gresenbet, G., (2010). “Modeling hydropower plant system to improve its reservoir operation”. Department of Energy and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences.

Carmo, J., (2004). “Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente”. Coimbra, Imprensa da Universidade.

CNPGB@ (2013). http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/ . Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens.

Conde, R., (2007). “Análise de Sensibilidade em Modelação Numérica de Escoamentos em Leito Móvel com HEC-RAS. Aplicação ao rio Mondego”. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Costa, S., Quintela, A., Pinheiro, A. N. (1997). “Exploração de aproveitamentos mini-hídricos com regularização diária”. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Declaração de Rectificação nº 71/2007 (24 de Julho de 2007). Diário da República Portuguesa.

Decreto-Lei nº 225/2007 (31 de Maio de 2007). Diário da República Portuguesa.

HYDROXPRT@ (2013). <http://www.hydroxpert.com/> . Hydroxpert Technology – Energy, Water, Environment, Infrastructure.

HEC-RAS (2010). “User’s Manual”. U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

HEC-RAS@ (2013). <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>. U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineer Center.

HEC-ResSim (2013). “User’s Manual”. U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

HEC-ResSim@ (2013). <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecrsim/>. U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineer Center.

Maingi, J., Marsh, S., (2001). “Quantifying hydrologic impacts following dam construction along the Tana River, Kenya”. Institute for Regional Analysis and public policy, Morehead State University, Kentucky.

Marques, P., (2010). “Desenvolvimento de um Modelo Computacional para a Simulação da Exploração do Açude-Ponte de Coimbra Equipado com Grupos Turbo-Geradores”. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Marques, P., (2010). “Estudo de integração de uma central mini-hídrica num aproveitamento de fins múltiplos existente, o açude ponde de Coimbra. Viabilidade técnico-económica da instalação”. Relatório da Ordem dos Engenheiros, Região Centro.

Ministério do Equipamento Social e do Ambiente, Direcção dos Serviços Hidráulicos, Direcção dos Serviços de Aproveitamentos Hidráulicos, (1975). “Regularização do baixo Mondego Açude-Ponte de Coimbra – Projecto Base, Volume 3, Estudos Hidráulicos”. Ministério do Equipamento Social e do Ambiente, Direcção dos Serviços Hidráulicos, Direcção dos Serviços de Aproveitamentos Hidráulicos.

POWERSIM@ (2013) <http://www.powersim.com> Software AS.

RIVERWARE@ (2013). <http://www.cadswes.colorado.edu/creative-works/riverware>. University of Colorado Boulder – Center for Advance Decision Support for Water and Environmental Systems.

Rauschenbach, T., Wernstedt, J. (1999). “ILM-RIVER - A General Design Tool for Simulation and Control of Rivers and Hydropower Plants”. European Control Conference ECC'99, Karlsruhe, Germany.

Rauschenbach, T., (2007). “Simulation and control of run-of-river hydropower plants cascades considering economical and ecological aspects”. Center for Applied Systems Technology, Fraunhofer Institute IITB Karlsruhe.

SIMAHPP 4.8@ (2013). <http://www.hydroxpert.com/simahpp-professional-hydropower-software> . Hydropower Software – Hydroxpert Technology.

SIMULINK@ (2013). <http://www.mathworks.com/products/simulink/> . Mathworks – Simulation and Model-Based Design

SNIRH@ (2013). <http://www.snirh.pt>. Serviço Nacional de Informação de Recursos Hídricos (página internet oficial), Portugal.

USACE (2007). “Water Balance and Regulation Alternative Analysis for Kajakai Reservoir using HEC-ResSim”. U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

Zagona, E., Magee, T., (1999). “Modeling Hydropower in RiverWare”. ASCE Waterpower '99, Proceedings of the International Conference on Hydropower, Las Vegas, NV.

Zagona, E., Rajagopalan, B., Setzer, S., (2008). “RiverWare Decision Support Tools for Planning Sustainable River Development with Hydropower”. Proceedings of the High-level International Forum on Water Resources and Hydropower, Ministry of Water Resources, Beijing, China.