

OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO OPERACIONAL DE ALBUFEIRAS DE APROVEITAMENTOS DE FINS MÚLTIPLOS EM SITUAÇÕES DE CHEIA.

Aplicação ao sistema Aguieira – Raiva - Fronhas.

FILIPE VALENTE SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

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

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

A meus Pais

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor Rodrigo Maia, pela orientação, pelas opiniões e críticas, assim como toda a disponibilidade demonstrada, que ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria igualmente de agradecer à Engenheira Juliana Mendes por todo o apoio, incentivo, disponibilidade, amizade e simpatia demonstrada ao longo do período de realização da tese.

Aos meus pais que ao longo de todo um percurso académico me incentivaram e me deram possibilidades de concretizar todos os objetivos a que me propus.

Por último, a todos os meus amigos que me acompanharam neste período da minha vida, por todo o apoio e amizade.

RESUMO

Devido às suas características hidrológicas Portugal é um país com uma grande rede de barragens nas suas bacias hidrográficas. As barragens formam albufeiras que podem ter vários fins. A sua gestão depende dos seus fins e da necessidade de os respeitar a todos. Isto leva a complexidade na criação de regras que irão ditar como é feita a gestão dos volumes de água, existentes na albufeira e que lhe são afluentes.

Esta tese tem como objetivo a proposta de um conjunto de regras de gestão operacional de albufeiras de fins múltiplos, que devem definir os volumes descarregados pela barragem e as cotas do nível de água da albufeira em eventos de cheia. O caso de estudo escolhido foi o sistema de albufeiras Aguireira-Raiva-Fronhas, localizado no rio Mondego. Esta escolha deveu-se à ocorrência de múltiplos eventos de cheia nos últimos cem anos, alguns dos quais com consequências gravosas. As consequências destes eventos foram sentidas, nomeadamente, na cidade de Coimbra e a jusante da mesma. O controlo das cheias é feito pelo sistema das três barragens. Para efetuar o estudo desta zona foram escolhidos dois eventos, correspondentes a diferentes magnitudes de precipitação e escoamento (i.e., valores de caudais e volumes de cheia). O primeiro evento foi de menor magnitude e as suas consequências também menores, relativamente ao segundo, de grande magnitude com um elevado número de consequências, tanto a nível social como económico.

Foi usado um programa de simulação de sistemas de albufeiras – HEC-ResSim - para a simulação dos dois eventos escolhidos, usando i) as regras de operação em uso atual ii) as regras de operação sugeridas no âmbito deste trabalho. Para tal, foram procuradas regras que tentassem controlar ou diminuir os impactes de ambos os tipos de eventos de cheia e, simultaneamente, respeitar os restantes fins das albufeiras, otimizando a capacidade de armazenamento de água. As regras propostas foram posteriormente validadas, através da comparação com as regras em vigor. Para o primeiro (menor) evento de cheia foi também efetuado um estudo económico do efeito do volume descarregado, pelas regras sugeridas, na produção de energia hidroelétrica.

Constatou-se que as regras propostas permitiriam melhorar a gestão da capacidade de armazenamento da albufeira e conduzir a um amortecimento do caudal de cheia eficaz. Simultaneamente, não ocorreriam grandes perdas de receita a nível energético, pois o menor volume de caudal efluente seria compensado pelo seu armazenamento que viria a ser descarregado numa altura de margens de receita mais elevadas.

Palavras-Chave: Cheias, Albufeiras, Otimização, Gestão de volumes, HEC-ResSim.

ABSTRACT

Due to its hydrological characteristics, Portugal is a country with a big network of dams in all basins. Dams form reservoirs that may have multiple purposes. Its management depend on its purposes and the need to respect all purposes. This leads to complexity in the creation of rules that will control the management of the water, inflow and outflow, in the dam.

This thesis goal is the creation of a guideline of rules for the management of reservoirs with multiple purposes, that must define the dam discharges or/and height of water of the reservoir for a given moment during a flood event. For this purpose a case study was chosen, which was the Mondego River. This river was chosen because of the frequent occurrence of multiple flood events in the last hundred years, with minor or major consequences. In this basin the flood consequences are mainly felt in its biggest city, Coimbra, and downstream of it. The flood events are controlled by a three dams system. To study the flood control in this area two events were chosen because of their intensity differences, in rainfall and runoff. The first event was less intense and with less consequences and the second event was more intense and with catastrophic consequences.

Using a reservoir system simulation program - HEC-ResSim - the two events were studied using i) the current operating rules and the rules suggested in this thesis. Being the aim of the simulation to propose rules that could control or diminish both type of flood events impacts and, simultaneously, respecting the dams other purposes, optimizing the water storage. The suggested rules were simulated and tested through the comparison with the current operating rules. For the less intense event there was also performed an economic study to study the benefits from the discharge proposed, by the rules suggested, in the production of power.

It was concluded that the suggested rules would optimize the management of the reservoir storage capability and achieve an efficient flood control. Simultaneously the economic losses in the energy production would be balanced by the storage of more inflow that would be turbinated later, with higher profit.

KEYWORDS: Floods, Reservoirs, Optimization, Volumes management, HEC-ResSim.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABELAS	xv
ABREVIATURAS	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	5
2.1. INTRODUÇÃO.....	5
2.2. ENQUADRAMENTO	5
2.3. ALBUFEIRAS – AMORTECIMENTO DE CHEIA.....	6
2.4. LEGISLAÇÃO	7
2.5. MODELOS DE GESTÃO E OTIMIZAÇÃO DE ALBUFEIRAS.....	10
2.6. PREVISÃO HIDROLÓGICA	10
2.6.1. PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO	11
2.6.2. PREVISÃO DO ESCOAMENTO	11
2.6.3. SISTEMA NACIONAL DE PREVISÃO DE CHEIAS	12
3. CASO DE ESTUDO	13
3.1. INTRODUÇÃO.....	13
3.2. CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA	14
3.3. CARACTERIZAÇÃO HIDRO-METEOROLÓGICA.....	15
3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS	15
3.4.1. ALBUFEIRA DA ÁGUEIRA	16
3.4.2. ALBUFEIRA DA RAIVA	17
3.4.3. ALBUFEIRA DE FRONHAS	18
3.5. REGRAS DE OPERAÇÃO	19

4. METODOLOGIA	23
4.1. INTRODUÇÃO	23
4.2. DESCRIÇÃO TRABALHO REALIZADO	23
4.3. HEC-RESSIM	25
4.3.1. FUNCIONAMENTO	25
4.3.2. CRIAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO	28
5. SIMULAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO	35
5.1. INTRODUÇÃO	35
5.2. EVENTO DE CHEIA OCORRIDO A 6 E 7 FEVEREIRO DE 2014.....	35
5.2.1. ALBUFEIRA DE FRONHAS	37
5.2.2. ALBUFEIRA DA ÁGUEIRA	39
5.2.3. ALBUFEIRA DE RAIVA	41
5.3. CONCLUSÃO.....	42
6. ESTUDO DE REGRAS PROPOSTAS	43
6.1. INTRODUÇÃO	43
6.2. REGRAS DE EXPLORAÇÃO PROPOSTAS	43
6.2.1. ALBUFEIRA DA ÁGUEIRA	44
6.2.2. ALBUFEIRA DE RAIVA	45
6.2.3. ALBUFEIRA DE FRONHAS	46
6.3. EVENTO DE FEVEREIRO DE 2014	48
6.3.1. ÁGUEIRA	48
6.3.1.1. CAUDAIS AFLUENTES	48
6.3.1.2. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 1	49
6.3.1.3. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 2	51
6.3.1.4. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 3	52
6.3.1.5. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 4	53
6.3.2. RAIVA.....	55
6.3.2.1. CAUDAIS AFLUENTES	55
6.3.2.2. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 1	56
6.3.2.3. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 2	58
6.3.2.4. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 3	60
6.3.2.5. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 4	62
6.3.3. FRONHAS	64

6.3.3.1. CAUDAIS AFLUENTE	64
6.3.3.2. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 1	65
6.3.3.3. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 2	67
6.3.3.4. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 3	68
6.3.3.5. CAUDAIS EFLUENTES – ALTERNATIVA 4	70
6.3.4. SUB-BACIAS DO CEIRA E DE COIMBRA.....	72
6.3.5. ANÁLISE GLOBAL EM COIMBRA	75
6.4. EVENTO DE JANEIRO DE 2001	79
6.4.1. CAUDAIS AFLUENTES	81
6.4.2. CAUDAIS EFLUENTES, CONSIDERANDO AS REGRAS PROPOSTAS.....	85
6.4.2.1. AGUEIRA	85
6.4.2.2. RAIVA.....	86
6.4.2.3. FRONHAS	88
6.4.2.4. COIMBRA.....	90
6.5. ESTUDO COMPARATIVO COM CAUDAIS OBSERVADOS	91
6.5.1. REGRAS PROPOSTAS VS REGRAS EM VIGOR.....	91
6.5.1.1. EVENTO DE FEVEREIRO DE 2014.....	91
6.5.1.2. EVENTO DE JANEIRO DE 2001	94
6.5.2. REGRAS PROPOSTAS VS OPERAÇÃO REAL.....	96
6.6. ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDROELÉTRICA	99
7. CONCLUSÕES	101
BIBLIOGRAFIA	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Amortecimento do caudal de cheia através de um reservatório (Maia, HRH a)	7
Figura 2 - Classes de segurança de albufeiras (RSB, 2007).....	7
Figura 3 Ciclo Hidrológico (Lencastre, 2010).....	11
Figura 4 Bacia Hidrográfica do Mondego e Zona de Risco de Inundação, Mondego (SNIRH, 2015) .	14
Figura 5 Sistema regulado Aguieira-Fronhas-Raiva (ARH-Centro, 2011).....	16
Figura 6 Barragem da Aguieira (Pinto, 2015a).	17
Figura 7 Barragem da Raiva (CNPGB, 2015).....	18
Figura 8 Barragem de Fronhas (Pinto, 2015b)	19
Figura 9 Esquema de funcionamento do HEC-ResSim com os 3 módulos (USACE, 2013)	26
Figura 10 Zonas de controlo de operação de albufeiras consideradas pelo HEC-ResSim (Hanbali, 2014)	27
Figura 11 Esquema da sub-bacia criada para a simulação.....	29
Figura 12 Rede de ligação entre albufeiras e pontos iniciais e finais dos rios	30
Figura 13 Relação entre a cota do nível de água e: i) o volume da albufeira e ii) a área do espelho de água.....	30
Figura 14 Curva vazão dos descarregadores da albufeira da Aguieira.....	31
Figura 15 Regras de operação inseridas com base nas regras de operação atuais	32
Figura 16 Criador de Alternativas de Simulação.....	32
Figura 17 Dados a serem fornecidos para o funcionamento da alternativa criada	33
Figura 18 Criação de uma simulação, escolha do período em estudo e das alternativas	33
Figura 19 Efeito das cheias na cidade de Coimbra no dia 6 de Fevereiro (Cortez, 2015)	36
Figura 20 Efeito das cheias no Parque Verde, Coimbra (Cortez, 2015)	36
Figura 21 Caudais Afluentes à albufeira da Aguieira entre 2 e 12 de Fevereiro	36
Figura 22 Caudais Afluentes à albufeira de Fronhas entre 2 e 12 de Fevereiro	37
Figura 23 Caudal afluente e efluente da albufeira de Fronhas entre os dias 2 e 12 de Fevereiro.....	38
Figura 24 Caudal efluente da Albufeira de Fronhas entre os dias 2 e 12 de Fevereiro	39
Figura 25 Nível de água observado na albufeira de Fronhas entre os dias 2 e 12 de Fevereiro.....	39
Figura 26 Caudal efluente da albufeira da Aguieira entre os dias 2 e 12 de Fevereiro.....	40
Figura 27 Nível de água da albufeira da Aguieira entre os dias 2 e 12 de Fevereiro.....	41
Figura 28 Caudal efluente na albufeira de Raiva entre os dias 2 e 12 de Fevereiro.....	42
Figura 29 Nível de água na albufeira de Raiva entre os dias 2 e 12 de Fevereiro.....	42
Figura 30 Caudais afluentes à albufeira da Aguieira entre os dias 2 e 12 de Fevereiro	49

Figura 31 Alternativa 1 (Percentil 25): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Agueira no período de 2 e 12 de Fevereiro	49
Figura 32 Alternativa 1 (Percentil 25): Nível de água na albufeira da Agueira no período de 2 e 12 de Fevereiro	50
Figura 33 Alternativa 2 (Percentil 50): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Agueira no período de 2 e 12 de Fevereiro	51
Figura 34 Alternativa 2 (Percentil 50): Nível de água na albufeira da Agueira no período de 2 e 12 de Fevereiro	51
Figura 35 Alternativa 3 (Percentil 75): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Agueira no período de 2 e 12 de Fevereiro	52
Figura 36 Alternativa 3 (Percentil 75): Nível de água na albufeira da Agueira no período de 2 e 12 de Fevereiro	53
Figura 37 Alternativa 4 (Caudal Observado): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Agueira no período de 2 e 12 de Fevereiro	54
Figura 38 Alternativa 4 (Caudal Observado): Nível de água na albufeira da Agueira no período de 2 e 12 de Fevereiro	54
Figura 39 Caudais afluentes para a albufeira de Raiva correspondentes à sub-bacia entre as barragens da Agueira e da Raiva, no período de 2 e 12 de Fevereiro.	55
Figura 40 Caudais afluentes totais à albufeira de Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro.....	56
Figura 41 Alternativa 1 (Percentil 25): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro	56
Figura 42 Alternativa 2 (Percentil 50): Nível de água na albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro	57
Figura 43 Alternativa 1 (Percentil 25): Distribuição do caudal efluente da albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro	58
Figura 44 Alternativa 2 (Percentil 50): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro	58
Figura 45 Alternativa 2 (Percentil 50): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro	59
Figura 46 Alternativa 2 (Percentil 50): Distribuição do caudal efluente da albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro	60
Figura 47 Alternativa 3 (Percentil 75): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro	60
Figura 48 Alternativa 3 (Percentil 75): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro	61
Figura 49 Alternativa 3 (Percentil 75): Distribuição do caudal efluente da albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro	62
Figura 50 Alternativa 4 (Percentil 50 c/ caudal observado): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro.....	62

Figura 51 Alternativa 4 (Percentil 50 c/ caudal observado): Caudal afluyente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro.....	63
Figura 52 Alternativa 4 (Percentil 50 c/ obs): Distribuição do caudal efluente da albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro	64
Figura 53 Caudais afluentes para a albufeira de Fronhas entre os dias 2 e 12 de Fevereiro.....	65
Figura 54 Alternativa 1 (Percentil 25): Caudal afluyente e efluente para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	65
Figura 55 Alternativa 1 (Percentil 25): Nível de água para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	66
Figura 56 Alternativa 1 (Percentil 25): Distribuição do caudal efluente da albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	66
Figura 57 Alternativa 2 (Percentil 50): Caudal afluyente e efluente para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	67
Figura 58 Alternativa 2 (Percentil 50): Nível de água para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	67
Figura 59 Alternativa 2 (Percentil 50): Distribuição do caudal efluente da albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	68
Figura 60 Alternativa 3 (Percentil 75): Caudal afluyente e efluente para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	69
Figura 61 Alternativa 3 (Percentil 75): Nível de água para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	69
Figura 62 Alternativa 3 (Percentil 75): Distribuição do caudal efluente da albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	70
Figura 63 Alternativa 4 (Percentil 50 c/ Obs): Caudal afluyente e efluente para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	71
Figura 64 Alternativa 4 (Percentil 50 c/ Obs): Nível de água para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	71
Figura 65 Alternativa 4 (Obs c/ Percentil 50): Distribuição do caudal efluente da albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro	72
Figura 66 Caudais afluentes à sub-bacia do rio Ceira no período de 2 e 12 de Fevereiro, para diferentes percentis de caudal	73
Figura 67 Caudais afluentes à sub-bacia de Coimbra (entre Raiva e Coimbra) no período de 2 e 12 de Fevereiro, para diferentes percentis de caudal.....	74
Figura 68 Caudais, não regularizados, afluentes a Coimbra, com proveniência da sub-bacia de Coimbra e do rio Ceira, no período de 2 e 12 de Fevereiro, para diferentes percentis de caudal	74
Figura 69 Alternativa 1 (Percentil 25): Caudal regularizado e caudal não regularizado afluentes a Coimbra no período de 2 e 12 de Fevereiro	75
Figura 70 Alternativa 2 (Percentil 50): Caudal regularizado e caudal não regularizado afluentes a Coimbra no período de 2 e 12 de Fevereiro	76

Figura 71 Alternativa 3 (Percentil 75): Caudal regularizado e caudal não regularizado afluentes a Coimbra no período de 2 e 12 de Fevereiro	77
Figura 72 Alternativa 4 (Percentil 50 com caudal observado): Caudal regularizado e caudal não regularizado afluentes a Coimbra no período de 2 e 12 de Fevereiro.....	78
Figura 73 Efeitos das cheias de Janeiro de 2001 (SNIRH, 2015)	80
Figura 74 Queda de ponte devido à cheia de Janeiro de 2001 (Lourenço, 2015)	80
Figura 75 Caudal observado afluente à albufeira da Aguieira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001	82
Figura 76 Caudal observado afluente à albufeira de Fronhas no período de 23 e 29 de Janeiro 2001	83
Figura 77 Caudal previsto afluente à sub-bacia da albufeira de Raiva no período de 23 e 29 de Janeiro 2001.....	83
Figura 78 Caudal previsto afluente à sub-bacia do rio Ceira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001	84
Figura 79 Caudal previsto afluente à sub-bacia de Coimbra no período de 23 e 29 de Janeiro 2001	84
Figura 80 Caudal afluente e efluente à albufeira da Aguieira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001	85
Figura 81 Nível de água na albufeira da Aguieira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001	85
Figura 82 Diferenciação do caudal efluente da albufeira da Aguieira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001.....	86
Figura 83 Caudal afluente e efluente à albufeira da Raiva no período de 23 e 29 de Janeiro 2001 ...	87
Figura 84 Nível de água na albufeira de Raiva no período de 23 e 29 de Janeiro 2001	87
Figura 85 Diferenciação do caudal efluente da albufeira de Raiva no período de 23 e 29 de Janeiro 2001.....	88
Figura 86 Caudal afluente e efluente à albufeira da Aguieira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001	88
Figura 87 Nível de água na albufeira de Fronhas no período de 23 e 29 de Janeiro 2001	89
Figura 88 Diferenciação de caudais efluentes à albufeira de Fronhas no período de 23 e 29 de Janeiro 2001.....	90
Figura 89 Caudais não-regularizados (total e parcial) e regularizado afluentes a Coimbra no período de 23 e 29 de Janeiro 2001.....	91
Figura 90 Comparação entre caudais efluentes da Aguieira, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, para as regras propostas neste estudo com as regras apresentadas em 3.5.....	92
Figura 91 Comparação entre caudais efluentes da Raiva, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, para as regras propostas neste estudo com as regras apresentadas em 3.5.....	93
Figura 92 Comparação entre caudais efluentes da Fronhas, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, para as regras propostas neste estudo com as regras apresentadas em 3.5.....	93
Figura 93 Comparação entre caudais regularizados afluentes a Coimbra, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, para as regras propostas neste estudo com as regras apresentadas em 3.5.....	94
Figura 94 Caudal efluente da Aguieira, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, com as regras apresentadas em vigor e para as regras propostas	95

Figura 95 Caudal regularizado afluente a Coimbra, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, para as regras em vigor e para as regras propostas	96
Figura 96 Hidrograma do caudal afluente e do caudal efluente da Albufeira da Agueira entre os dias 26 e 29 de Janeiro (Rodrigues et al, 2001)	97
Figura 97 Caudal afluente a Coimbra não regularizado previsto (linha a azul) e caudal observado (linha vermelha) entre os dias 23 e 29 de Janeiro (Rodrigues et al, 2001)	98
Figura 98 Evolução do preço da energia entre os dias 2 e 21 de Fevereiro	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Legislação aplicável às barragens.	8
Tabela 2 Tempo de retorno para a cheia de projeto (NPB)	8
Tabela 3 Nível de pleno armazenamento (NPA) dependente do caudal afluente à Aguieira.	19
Tabela 4 Dados de entrada (Input) e dados de saída (output) do HEC-ResSim	28
Tabela 5 Limite do aumento/diminuição do caudal descarregado, de acordo com a cota do nível de água na albufeira da Aguieira.	45
Tabela 6 Regras de descarga do aproveitamento da Raiva para mitigação do risco de ultrapassar o NMC	46
Tabela 7 Albufeira de Fronhas: regras de abertura do descarregador de fundo de acordo com o caudal afluente	46
Tabela 8 Albufeira de Fronhas: alteração às regras de abertura do descarregador de fundo de acordo com o caudal afluente	47
Tabela 9 Análise de receita na barragem da Aguieira por motivos de produção de energética	99

ABREVIATURAS

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

ANPC – Autoridade Nacional de Proteção Civil

CNPGB – Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens

CGA – Comissão de Gestão de Albufeiras

CSB – Comissão de Segurança de Barragens

EDP – Energias de Portugal

IGOT – Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa

INAG – Substituído pela APA

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

NCB – Normas de Construção de Barragens

NDO – Nível de Defesa de Obra

NEB – Normas de Exploração de Barragens

NmE – Nível mínimo de Exploração

NMC – Nível Máximo de Cheia

NOIB – Normas de Observação e Inspeção de Barragens

NPA – Nível de Pleno Armazenamento

NPB – Normas de Projeto de Barragens

RSB – Regulamento de Segurança de Barragens

SNPC – Serviço Nacional de Proteção Civil

SVARH – Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Em Portugal os principais cursos de água são regularizados através de barragens - existindo cerca de 351 barragens com capacidade de armazenamento superior a 1hm^3 ou com mais de 15 metros de altura (CNPGB, 2015). A estas barragens estão associadas albufeiras com um ou vários fins, como a produção de energia hidroelétrica, proteção contra cheias, abastecimento de água às populações, à indústria ou à agricultura ou para atividades de lazer.

Em determinadas situações – nomeadamente em situações de escassez ou excesso de água –, as diferentes utilizações poderão ser concorrentes e entrar em conflito. Por este motivo, há a necessidade de criação de regras de gestão das albufeiras que tenham em conta a satisfação das diferentes finalidades da albufeira para vários cenários de afluências. Comummente, essas regras são definidas de acordo com as estações do ano, associando a cada estação diferentes níveis de procura e de risco.

Um exemplo desta prática é a imposição da permanência, durante os meses húmidos, de um nível baixo de água nas albufeiras que têm como função a proteção contra cheias. Esta regra pretende garantir um volume livre na albufeira para encaixe e amortecimento de uma possível cheia, durante o período do ano em que a probabilidade da ocorrência desses eventos é maior. Contudo, essa regra conflitua com a maximização da produção hidroelétrica, uma vez que diminui o desnível hidráulico do aproveitamento, e consequentemente a sua potência útil. Além disso, se esse ano for especialmente seco, essa regra poderá pôr em causa a existência de uma reserva de água considerável para satisfazer as restantes utilizações nos meses seguintes, especialmente as mais prioritárias como o abastecimento doméstico, industrial e agrícola.

Neste contexto, é fundamental analisar as restrições que as regras de proteção de cheias – ainda muito conservadoras –, representam a nível de gestão dos aproveitamentos hidráulicos, nomeadamente o impacto que poderão ter na satisfação das diferentes utilizações, sobretudo na produção de energia hidroelétrica. Em Portugal, não há ainda legislação para definição de regras de gestão operacional das albufeiras (ICOLD European Club, 2014). No entanto, seguindo as orientações da legislação europeia que prevê a implementação de medidas que contribuam para mitigar os efeitos das inundações e secas (CE, 2000), é importante analisar o papel das albufeiras nessas situações e de que forma a definição de

regras de gestão mais flexíveis podem contribuir para uma melhor satisfação das diferentes utilizações sem por em causa a função de proteção contra cheias.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho consiste na proposta de regras de gestão operacional para albufeiras de fins múltiplos, incluindo a função de regularização de cheias, tendo em conta a otimização dos volumes armazenados para os diversos fins e a minimização dos impactos das cheias.

O presente trabalho enquadrou-se no âmbito de uma tese de Doutoramento em desenvolvimento na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela Mestre Eng^a Juliana Mendes, cujo tema é “Previsão de Alerta de Cheias em Bacias Regularizadas. Aplicação ao caso de uma bacia portuguesa”. Neste contexto, este trabalho focou-se no estudo do sistema de albufeiras Fronhas-Agueira-Raiva, localizado na bacia do rio Mondego, correspondente também à área de estudo da referida tese de Doutoramento. Desta forma, neste estudo utilizaram-se os mesmos dados de base e alguns resultados dessa tese, nomeadamente as previsões de caudais de cheia afluentes às secções de estudo, obtidas através de simulação hidrológica com dados de previsão de precipitação.

O objetivo específico deste estudo consistiu na análise de medidas operacionais para o sistema regulado Fronhas-Agueira-Raiva, que através da gestão interligada das três albufeiras, evitem ou minimizem as inundações fluviais na cidade de Coimbra e no vale a jusante. Para tal, primeiro foram selecionadas situações de cheia com registo de inundações em Coimbra e, com base nos dados existentes, foi analisado – para cada uma dessas situações – o efeito causado em Coimbra pela regularização dos caudais nas albufeiras de Fronhas, Agueira e Raiva, através da aplicação das regras de exploração dessas albufeiras, em vigor à data da cheia correspondente. Depois, com base nos resultados da análise anterior, foram estudadas outras alternativas de gestão operacional do sistema, entrando em conta com previsões de caudais resultantes do trabalho de doutoramento referido.

Neste estudo foi utilizado o modelo de simulação da gestão de albufeiras Hec-ResSim.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se estruturado em 7 capítulos, sendo esta introdução o primeiro.

O segundo capítulo serve como contextualização do estudo em questão. São apresentados os principais conceitos referentes ao planeamento e à gestão de albufeiras assim como breves referências à previsão de caudais afluentes em situações de cheia.

No terceiro capítulo apresenta-se uma caracterização do caso de estudo e descrevem-se os dados utilizados ao longo do trabalho.

No quarto capítulo descreve-se a metodologia utilizada, que tem por base a simulação da gestão interligada das albufeiras, efetuada com o programa de simulação HEC-ResSim.

No capítulo cinco são apresentados e discutidos os resultados das simulações de um evento de cheia, com as regras de exploração em vigor na data do evento em questão, servindo esta simulação para validar o modelo e para reflexão sobre quais as medidas que poderão ser alteradas no sentido de melhorar a gestão do sistema, tornando-o mais sustentável do ponto de vista das suas várias utilizações.

O sexto capítulo apresenta os resultados do estudo das alternativas para a gestão operacional do sistema com base em previsões de caudais para dois eventos de cheia – um dos analisados já no capítulo anterior

e outro diferente, de magnitude superior –, definindo assim regras de gestão que possibilitem a manutenção de níveis elevados de água nas albufeiras durante os meses húmidos, sem por em causa capacidade de encaixe de cheias para o qual o sistema foi planeado.

Finalmente, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como algumas propostas gerais para otimização da gestão operacional de albufeiras em situações de cheia.

2

CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

2.1. INTRODUÇÃO

Neste subcapítulo vão ser referidos os principais conceitos utilizados neste trabalho e cujo conhecimento melhora a compreensão do mesmo. Vai ser feita uma revisão sobre albufeiras assim como sobre a previsão hidrológica, desde a previsão de precipitações até à previsão de escoamentos superficiais derivados da precipitação.

2.2. ENQUADRAMENTO

Este trabalho, como já referido, foca-se no controlo de situações de cheia através do uso de albufeiras. Para melhor entender como este controlo se realiza é necessário compreender o funcionamento de uma albufeira nesta situação e conhecer a legislação existente nesta matéria. Também é importante entender o que se entende por cheias e como se podem obter previsões do escoamento nessas situações. Estes processos são explicados neste capítulo.

As cheias correspondem a um fenómeno de elevação do nível de escoamento, frequentemente durante um período relativamente curto de tempo (horas/dias), até ser atingido um pico de caudal afluente após o qual o nível de água retrocede a um ritmo mais lento (WMO, 2009). É um fenómeno hidrológico extremo que, frequentemente, se traduz no transbordo do leito corrente do curso de água, originando a inundação dos terrenos ribeirinhos, terrenos vizinhos ao leito do curso de água. Este terreno é denominado leito de cheia.

Neste contexto, existe a necessidade de controlar o comportamento dos cursos de água, tentando reduzir ou até mesmo eliminar os efeitos nocivos de uma cheia. O risco de cheia encontra-se sempre presente num curso de água; contudo é possível minimizá-lo através de soluções estruturais, não-estruturais ou (frequentemente, o ideal) usando os dois tipos (Maia e Ribeiro, 1998).

As albufeiras são normalmente utilizadas para controlo de cheias, permitindo alterar as características dos caudais de cheia a jusante da mesma, através do armazenamento temporário de uma parte do volume afluente. Deste modo, é possível modificar o hidrograma de cheia e reduzir o caudal de pico efluente a determinado local, evitando ou minimizando – conforme as características do hidrograma de cheia e a capacidade de encaixe da albufeira – os efeitos que a mesma provocaria em regime não regularizado.

Como as albufeiras são reservatórios de capacidade limitada, há portanto, a necessidade de se criarem regras que permitam gerir o seu volume armazenamento e que salvaguardem tanto a segurança da barragem, como também o cumprimento das suas diferentes funções.

O registo de eventos de precipitação e correspondente escoamento superficial permite obter a noção dos possíveis eventos de cheia nas diferentes zonas do país.

Através da experiência adquirida com o estudo de eventos passados, é possível prever o comportamento das bacias para diferentes cenários meteorológicos, associando a ocorrência de determinados volumes de caudais a determinadas magnitudes de precipitação. O conhecimento das previsões meteorológicas, associado ao entendimento dos fenómenos hidrológicos em ação, é fundamental para a previsão de eventos de cheia que possam ocorrer. Com este fim são usados modelos hidrológicos da área em estudo, devidamente calibrados, para se obter a previsão dos possíveis volumes de caudais afluentes aos diversos pontos de interesse, como as albufeiras e os pontos de maior probabilidade de cheia. O conhecimento antecipado de determinado evento permite gerir as albufeiras afetadas pelo mesmo de um modo mais eficaz.

2.3. ALBUFEIRAS – AMORTECIMENTO DE CHEIA

As albufeiras podem ter vários fins: o abastecimento público, agrícola e industrial, a produção de energia hidroelétrica, atividades de lazer, navegação e controlo de cheias. Um dos problemas na gestão de operação de albufeiras tem a ver com o conflito entre os diversos fins da albufeira. A formulação das regras de utilização dos volumes armazenados depende de albufeira para albufeira, dos objetivos a cumprir, das variáveis de decisão e restrições existentes.

Nas albufeiras, a regularização de cheias traduz-se no amortecimento temporal das mesmas. Este fenómeno depende do tipo de descarregador de cheia associado ao aproveitamento hidráulico, sendo que, mais frequentemente, a descarga pode ser livre ou realizada com controlo por comportas. De qualquer modo, o amortecimento da cheia vai corresponder a uma diminuição para jusante da barragem do caudal máximo (de pico, de ponta) no rio. No caso do descarregador livre, e tendo sido atingido o nível da crista do descarregador, o caudal efluente vai aumentar à medida que o nível da albufeira vai aumentando, atingindo o valor máximo quando o nível da albufeira atinge o nível máximo de cheias (NMC). Com descarregadores com comporta, o grau de abertura destas depende, em geral, do aumento do nível da água, sendo que a abertura total e a descarga do caudal máximo descarregado ocorre no momento em que é atingido o nível de máxima cheia. Outras soluções podem ocorrer por meio da abertura das comportas com diferentes níveis da água (Quintela et al., 2001).

No amortecimento de cheia, o caudal de ponta efluente só vai ocorrer após o caudal de ponta afluente, na curva descendente do hidrograma afluente (Quintela et al., 2001). Na Figura 1 apresenta-se um exemplo de amortecimento de caudal de cheia, onde se representam dois hidrogramas, o afluente e o amortecido, respetivamente a linha preta e laranja. A área tracejada azul representa o volume temporariamente armazenado pela albufeira, que permitiu modular o hidrograma de cheia efluente.

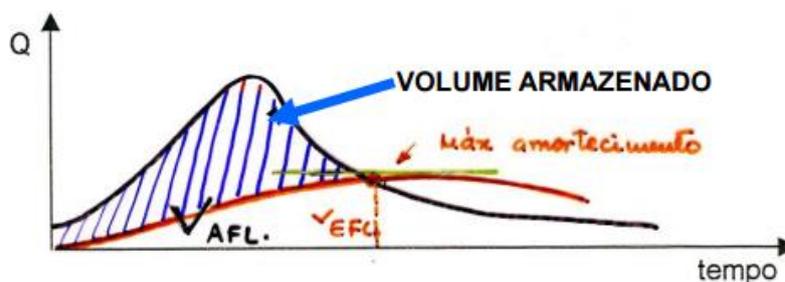


Figura 1 Amortecimento do caudal de cheia através de um reservatório (Maia, HRH a)

2.4. LEGISLAÇÃO

As grandes barragens são definidas pelo RSB como as barragens que respeitam pelo menos um dos seguintes parâmetros:

- Altura igual ou superior a 15m, sendo a altura medida desde a cota mais baixa da superfície geral das fundações até a cota de coroamento;
- Altura inferior a 15m com albufeira cuja capacidade de armazenamento é superior a 100.000m³;
- Barragem com classificação I (na classificação referida no paragrafo seguinte);

A classificação das barragens em função dos danos potenciais, presente no RSB, é feita em função dos danos potenciais causados pelas mesmas. Estes danos dizem respeito a vidas humanas, perdas materiais ou ambientais, entre outras. Existem 3 classes de segurança (referidas na figura 2).

Classe	Ocupação humana, bens e ambiente
I	Residentes em número igual ou superior a 25.
II	Residentes em número inferior a 25; ou Infra-estruturas e instalações importantes ou bens ambientais de grande valor e dificilmente recuperáveis ou existência de instalações de produção ou de armazenagem de substâncias perigosas.
III	As restantes barragens.

Figura 2 - Classes de segurança de albufeiras (RSB, 2007)

Neste trabalho as três barragens em estudo são consideradas grandes barragens porque respeitam pelo menos um dos parâmetros definidos pelo RSB. São as três barragens de classe I, têm altura superior a 15m e a sua capacidade de armazenamento é superior a 100.000 m³.

A legislação portuguesa incide sobre todos os períodos de existência de uma barragem, desde a sua fase de projeto até ao fim da sua utilização (abandono ou demolição), passando pela fase de construção e exploração. Com o objetivo de abranger todos os períodos de existência de uma barragem, a legislação portuguesa para grandes barragens divide-se por dois regulamentos e quatro normas, estando um dos regulamentos e uma das normas ainda a aguardar publicação no Diário da República (Tabela 1).

Tabela 1 Legislação aplicável às barragens.

Diploma	Publicação
Regulamento de Segurança de Barragens (RSB)	Decreto-lei 344/2007, de 14 de Outubro
Normas de Projeto de Barragens (NPB)	Portaria 846/93, de 10 de Setembro
Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB)	Portaria 847/93, de 10 de Setembro
Normas de Construção de Barragens (NCB)	Portaria 246/98, de 21 de Abril
Normas de Exploração de Barragens (NEB)	A aguardar publicação
Regulamento Técnico para a Elaboração dos Programas de Exploração de Albufeiras	A aguardar publicação

Existem três comissões que se desenvolvem atividades neste domínio: a Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB), Comissão de Segurança de Barragens (CSB) e a Comissão de Gestão de Albufeiras (CGA).

É importante também fazer referência ao tempo de retorno associado à cheia de projeto para a qual é dimensionada uma barragem e os respetivos órgãos de descarga. O tempo de retorno dessa cheia é definido nas NPB, em função da altura da barragem, h , e do nível de risco potencial dessa obra, sendo neste caso analisados os tempos de retorno apenas para barragens de betão (tabela 2).

Tabela 2 Tempo de retorno para a cheia de projeto (NPB)

Barragem	Risco Potencial	
	Elevado	Significativo
Betão		
$h \geq 100$	10 000 a 5 000	5 000 a 1 000
$50 \leq h < 100$	5 000 a 1 000	1 000
$15 \leq h < 50$	1 000	1 000
$h < 15$	1 000	500

Uma vez que o presente trabalho se foca na fase de exploração da barragens e tratando-se de barragens que se encontram no âmbito do RSB, apenas se irá referir com mais detalhe as regras impostas pelo RSB e pelas NOIB, dado que o NEB ainda não está publicado.

De acordo com o RSB, artigo 15º, os descarregadores de cheia devem ser dimensionados de modo a descarregarem a cheia de projeto em qualquer circunstância, sem necessidade do auxílio das descargas de fundo e outros dispositivos. Enquanto os descarregadores de fundo devem permitir o esvaziamento da albufeira, estando equipados de duas comportas, uma de segurança e outra de serviço.

O artigo 16º do RSB faz referência à segurança de albufeiras. O número 1 do artigo requiere a apresentação dos critérios considerados nos estudos da albufeira com especial ênfase nas escolhas do

volume total e morto, na sedimentação esperada e no volume da albufeira com o fim de amortecimento de cheia. O ponto 4 requiere a elaboração do plano de exploração da albufeira, sendo que nos planos de exploração devem também ser apresentados os volumes definidos para a exploração da albufeira, assim como o controlo de segurança durante a fase de exploração é abordado na Secção V do RSB.

O artigo 34º faz referência às regras de exploração, estabelecendo que as mesmas, a definir pela entidade gestora da obra, devem respeitar a segurança estrutural, hidráulico-operacional e ambiental e conter disposições relativas à exploração da albufeira e à operação, manutenção e conservação dos órgãos que constituem a barragem.

O controlo de segurança estrutural visa o conhecimento do estado da barragem, a deteção oportuna de anomalias e uma intervenção eficaz, caso esta seja necessária, através da aplicação de medidas ao longo do seu período de via. Realizado por observação de cada barragem, deve estar em conformidade com as NOIB em vigor.

O controlo de segurança hidráulico-operacional é realizado por inspeções e por aplicação das regras de exploração da barragem. Tem como finalidade a verificação e eventual revisão de regras relativas à operação dos equipamentos dos órgãos de segurança e exploração, às medidas de manutenção, medidas de conservação e aos critérios de projeto. Neste controlo de segurança podem vir a assumir importância as NEB, quando publicadas.

O controlo de segurança ambiental tem como finalidade a verificação dos impactes ambientais provocados pela exploração da albufeira. O controlo deve ser feito pelo cumprimento das regras de operação, tendo em conta, nomeadamente, a qualidade da água, o assoreamento da albufeira e a evolução do leito a jusante, a alteração dos níveis freáticos e outros aspetos ecológicos (Quintela et al, 2001).

A EDP, como principal concessionária dos grandes aproveitamentos hidroelétricos nacionais, tem um papel de maior relevo na definição das regras de operação dos aproveitamentos deste tipo. Baseada na sua experiência, define como pontos obrigatórios, na criação de um conjunto de regras de exploração, os seguintes:

- Uma breve descrição do aproveitamento, descrevendo também a zona geográfica onde se insere tal como as bacias hidrográficas das quais faz parte;
- Especificar os órgãos de segurança e exploração assim como o seu funcionamento;
- O fim ou fins a que se destina;
- O modo de funcionamento do aproveitamento, podendo este ser manual e/ou automático e local e/ou à distancia;
- As principais características de exploração;
- E as curvas de regolfo a montante para um dado caudal;

A EDP faz também referência a normas de descarregamento, que devem funcionar em paralelo com as normas de exploração. Estas regras destinam-se a regular o funcionamento dos órgãos de segurança e exploração. Têm a finalidade de garantir que o nível máximo na albufeira (NMC) não seja ultrapassado no caso da ocorrência da cheia de projeto, repartir o caudal descarregado pelos diversos descarregadores de modo a garantir maior eficiência da bacia de dissipação, minimizar efeitos erosivos nas margens e a agitação na zona de restituição, proteger as populações a jusante e garantir o lançamento de um caudal ecológico mínimo (Quintela et al, 2001).

As normas de descarregamento ajudam a definir os planos de Prevenção e Previsão de Cheias. Nestas devem estar incluídos os planos de emergência internos assim como as entidades que interagem no

mesmo, sendo essas entidades contactadas, pela entidade que gere a albufeira, em função dos caudais lançados a jusante e/ou, no caso da existência, das previsões de afluências. As regras de manobras dos órgãos, em casos de cheias, devem também ser descritas nestas normas (Quintela et al, 2001).

Além do nível de máxima cheia, para uma albufeira devem ser analisados, pelo menos mais dois níveis: o nível de pleno armazenamento (NPA) e o nível mínimo de exploração (NmE). O volume armazenado até à cota do NmE é usado para controlo de sedimentação e usos recreativos. O volume armazenado entre o NmE e o NPA é usado para regular o curso de água e fornecer volume de água para os diversos fins da albufeira. A diferença entre o NPA e o NMC vai, em geral, constituir a capacidade a considerar para o encaixe de volumes afluentes em situação cheia (Quintela et al, 2001).

2.5. MODELOS DE GESTÃO E OTIMIZAÇÃO DE ALBUFEIRAS

Os modelos de gestão e otimização de albufeiras podem ser classificados em quatro categorias (Simonovic, 1992):

- Simulação;
- Otimização;
- Análise de múltiplos fins;
- Combinação dos anteriores;

Um modelo de simulação, como o usado no programa HEC-ResSim (que irá ser descrito no capítulo 4), é um modelo de representação física. Usualmente é utilizado para simular o funcionamento de uma albufeira para um conjunto de condições. Um modelo de simulação não é capaz de gerar uma solução ótima para uma albufeira, porque serve para simular eventos definidos. O programa não procura otimizar os dados inseridos pelo utilizador, simplesmente simula aquilo que é fornecido como *input*. Porém, quando utilizado para o estudo de várias alternativas com regras de operação diferentes, é possível, através da análise das simulações, obter uma solução ótima ou quase ótima. Estes modelos podem também incluir análise custo-benefício em relação a proteção contra cheias, hidroeletricidade, entre outros. Normalmente são modelos que incluem a computação da equação de conservação de massa.

Os modelos de otimização permitem gerar regras de operação de albufeiras e decisões com o objetivo de otimizar o funcionamento de um reservatório. Os modelos de otimização podem-se classificar em modelos de programação linear, dinâmica ou não linear. Todos os modelos de otimização necessitam de uma função objetivo, variáveis de decisão e restrições (Simonovic, 1992).

2.6. PREVISÃO HIDROLÓGICA

Para obter o caudal resultante de um evento de precipitação será necessário, em primeira análise, compreender a inter-relação das componentes do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica (figura 3).

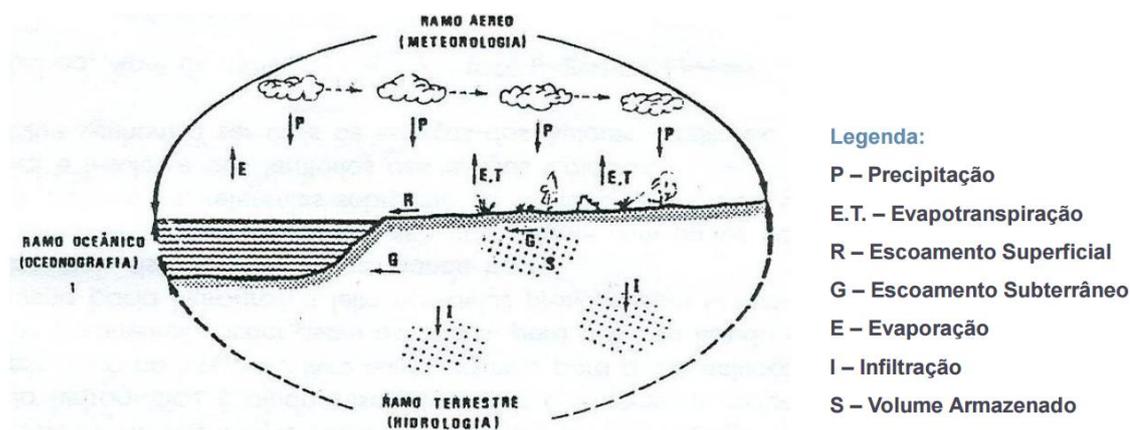


Figura 3 Ciclo Hidrológico (Lencastre, 2010)

Os principais componentes dessa inter-relação são, naturalmente, a precipitação e o escoamento superficial, cuja previsão é de importância fundamental para a minimização dos riscos de cheia. Referem-se seguidamente as noções, dados e modelos de base considerados relevantes e/ou que serviram de referência ao desenvolvimento do trabalho.

2.6.1. PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO

A previsão de variáveis meteorológicas, como a precipitação, é realizada através de modelos numéricos, que se baseiam em equações que representam o comportamento atmosférico e utilizando informação referente ao estado atmosférico inicial. Os modelos meteorológicos podem ser de escala global ou regional, conforme a sua abrangência espacial. A qualidade das previsões emitidas está assim condicionada pelas incertezas em relação às condições iniciais do modelo, e pelas limitações dos modelos em si. As previsões meteorológicas podem ser realizadas com um período de antecedência de horas, dias, semanas ou até, anos. O grau de eficácia dos modelos vai também depender muito do alcance de previsão que se pretende: quanto menor o alcance, mais eficaz são os modelos. Assim, como a fiabilidade dessas previsões diminui com o tempo, na previsão de cheias não se utilizam previsões meteorológicas superiores a 10 dias.

Uma técnica de previsão, cada vez mais usual, é o sistema de previsão por *Ensemble* (Mendes, 2012). Uma previsão por *ensemble* consiste na análise probabilística de um conjunto de múltiplas previsões, permitindo deste modo, ter em conta as incertezas existentes na previsão do estado do tempo. Em Portugal, a entidade responsável pelas previsões meteorológicas – Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA) – usa um sistema de previsão por *ensemble* com alcance temporal de 10 dias, constituído por 51 previsões diferentes realizadas pelo modelo atmosférico global do centro meteorológico europeu – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), que são tratadas estatisticamente e, posteriormente, analisadas. Além dessas previsões, o IPMA utiliza também um modelo de área regional – o ALADIN – para realizar previsões até 2 dias (Mendes, 2012).

2.6.2. PREVISÃO DO ESCOAMENTO

O uso de modelos hidrológicos para previsão dos caudais afluentes é uma ferramenta muito útil na prevenção de cheias. O conhecimento prévio de um determinado fenómeno hidrológico permite às entidades que gerem uma albufeira escolher o melhor modo de evitar grandes caudais efluentes e assim evitar a possibilidade de cheias a jusante da albufeira.

Para obter a previsão do escoamento superficial através das previsões de precipitação é necessário o uso de modelos hidrológicos ou modelos precipitação-escoamento. Existem vários *software* com essa finalidade. Um dos *software* que permite simular o processo precipitação-escoamento ao nível das bacias hidrográficas é, por exemplo, o HEC-HMS, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* dos *US Army Corps of Engineers* (Moore e Bell, 2011; Quintela e Portela, 2002). Este programa permite simular todos os processos que ocorrem na bacia hidrográfica aquando da precipitação prevista, possibilitando a realização de simulações com um passo temporal definido entre um minuto e um dia. Dessa forma, e sendo um programa de utilização livre e criado por uma entidade oficial com notoriedade na área a nível internacional, este *software* é muito utilizado a nível nacional e internacional.

2.6.3. SISTEMA NACIONAL DE PREVISÃO DE CHEIAS

Em Portugal, o Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos (SVARH), desenvolvido e operado pela autoridade nacional da água - a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) -, foi estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro como o sistema de previsão e de alerta para salvaguarda de pessoas e bens em situações de cheias. Este sistema, apesar de ainda não integrar as previsões de precipitação emitidas pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, IPMA, permite conhecer em tempo útil a informação referente aos rios e às albufeiras do país (caudais, níveis de água e volumes armazenados) através da rede da rede nacional de monitorização dos recursos hídricos.

Das entidades que cooperam neste sistema destacam-se o Serviço Nacional de Proteção Civil (SNPC), as Direções Regionais de Ambiente e os Produtores de Eletricidade.

Na cheia do rio Mondego ocorrida a 26-27 de Janeiro de 2001 – uma das cheias com maiores impactos registados na bacia – o SVARH permitiu conhecer em tempo real a evolução da situação e, através desse conhecimento, foi possível, ainda assim, tomar medidas ao nível da gestão das albufeiras da Aguieira e de Fronhas para reduzir os efeitos da cheia, reduzindo-se os caudais máximos descarregados (Rodrigues et al, 2001).

3

CASO DE ESTUDO

3.1. INTRODUÇÃO

A história do rio Mondego está marcada pela ocorrência frequente de cheias que provocam a inundação das zonas marginais da cidade de Coimbra e do vale do Baixo Mondego, a jusante dessa cidade, algumas das quais tiveram graves consequências económicas e sociais. Segundo a base de dados DISASTER, do Centro de Estudos Geográficos, do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa (IGOT), no período entre 1865 a 2010 ocorreram 153 eventos de cheia/inundação com efeitos danosos. A essas ocorrências corresponderam 20 mortos, 873 evacuados e 628 desalojados. Estas situações devem-se à ocorrência comum de fenómenos de precipitação intensos na bacia hidrográfica, cuja localização e topografia são fatores favoráveis a esses fenómenos.

O sistema de albufeiras interligadas Fronhas-Agueira-Raiva foi construído, a montante de Coimbra, com a finalidade de regular os caudais afluentes a essa zona e armazenar água para diferentes fins, entre os quais se destacam a produção hidroelétrica, o abastecimento urbano, a rega de explorações agrícolas e o controlo de cheias. Com esse fim, este sistema de reservatórios tem capacidade total de armazenamento de 512,21 hm³.

Neste contexto, o sistema de albufeiras Fronhas-Agueira-Raiva foi escolhido como caso de estudo deste trabalho, devido i) à possibilidade de minimizar os impactos de inundações em Coimbra através da diminuição antecipada dos volumes de água armazenados nas diferentes albufeiras para encaixe dos caudais cheias e também ii) à necessidade de manter os níveis de água suficientemente elevados nas albufeiras, para satisfazer as restantes utilizações de água, nomeadamente a sua importante vertente hidroelétrica.

Neste capítulo vão ser apresentados os dados da bacia hidrográfica e do referido sistema de albufeiras, relevantes para o conhecimento dos eventos de cheia em estudo e para as simulações que foram realizadas. Será, também, apresentadas as regras de operação das albufeiras em vigor, propostas pela EDP, e aprovadas pelo Instituto Nacional da Água, INAG (atualmente integrado na Agência Portuguesa do Ambiente, APA)

3.2. CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA

O rio Mondego nasce na Serra da Estrela, a uma altitude de 1525 m, e a sua foz localiza-se na Figueira da Foz. O seu traçado tem orientação de nordeste a sudoeste e um comprimento total de 258 km.

A bacia hidrográfica do rio Mondego tem uma área de 6645 km² e é limitada pelas bacias dos rios Vouga e Douro, a norte, e dos rios Lis e Tejo, a sul. Os principais afluentes, no caso de estudo, são o rio Dão, Alva e o Ceira.

Ao longo do seu traçado, o rio Mondego atravessa vales com características distintas, distinguindo-se normalmente os seguintes troços:

- Alto Mondego: localizado na Serra da Estrela, caracterizado por vales glaciares;
- Médio Mondego: localizado entre as fraldas da Serra da Estrela e Coimbra, caracterizado pelo rio serpenteado através de vales encaixados. Nesta zona afluem os rios Dão, Alva e Ceira;
- Baixo Mondego: localizado a jusante de Coimbra, zona de vales abertos em zonas de planície. Afluem neste troço os rios Arunca e Pranto.

O presente trabalho focou-se no troço do médio Mondego, onde se localiza o sistema Fronhas-Agueira-Raiva e a cidade de Coimbra, que é a principal cidade afetada pelas cheias ocorridas na bacia. Portanto, neste trabalho apenas se consideraram as contribuições dos afluentes Dão, Alva e Ceira. Neste trabalho os caudais afluentes aos cursos de água vão ser limitados tendo em atenção Coimbra e o troço do baixo Mondego que é a zona da bacia hidrográfica com maior área de inundação (figura 4) apresentando maior risco de cheia que os restantes troços.



Figura 4 Bacia Hidrográfica do Mondego e Zona de Risco de Inundação, Mondego (SNIRH, 2015)

O rio Dão nasce próximo de Aguiar da Beira, na freguesia de Eirado. Conflui com o rio Mondego na albufeira da barragem da Aguieira. Tem um desnível máximo de cerca de 800m, nascendo a cota 840m, e comprimento de 92km, drenando uma área de 1377km². É o afluente do rio Mondego com maior área de bacia hidrográfica.

O rio Alva nasce próximo de Sabugueiro, Serra da Estrela, e conflui com o Mondego a cerca de 4km de Penacova, a jusante do aproveitamento de Raiva, na freguesia de Oliveira do Mondego. A sua nascente encontra-se à cota 1700, tendo de vencer um desnível de cerca de 1650m, o seu comprimento é de 111km e a sua bacia hidrográfica drena uma área de 708km².

O rio Ceira nasce na Serra do Açor, próximo da cota 1150 m, e conflui com o rio Mondego em Coimbra. O seu comprimento é cerca de 100 km e a sua bacia hidrográfica drena uma área de 737 km².

3.3. CARACTERIZAÇÃO HIDRO-METEOROLÓGICA

A nível meteorológico, a bacia hidrográfica do rio Mondego é caracterizada por um clima temperado, havendo aumento de humidade à medida que se verifica aumento da altitude. O clima é assim condicionado pelo relevo, pelo que a área da Serra da Estrela e Viseu têm características de clima húmido. A influência do oceano Atlântico provoca a entrada de superfícies frontais que, ao se deslocarem para o interior, irão encontrar as zonas de maior relevo, dando origem a maior ocorrência de precipitação. Portanto, a zona da Serra da Estrela e Viseu são marcadas por um aumento da precipitação em relação à restante bacia hidrográfica.

A precipitação anual ponderada, na bacia hidrográfica do Mondego, varia entre 641 mm e 1836 mm, apresentando um valor médio de 1136 mm. Num ano médio, o escoamento superficial médio é cerca de 3800hm³, sendo observado que cerca de 76 % do volume de escoamento ocorre no semestre húmido.

3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS

Como já referido, os aproveitamentos hidráulicos estudados fazem parte de um sistema de três barragens – a barragem de Fronhas, no rio Alva, e as barragens Aguieira e Raiva, no rio Mondego – cujas albufeiras funcionam como um sistema de reservatórios interligados (Figura 5 – esquema do sistema). Este sistema tem uma potência instalada de 360 MW e uma produtividade média anual de 254,8GWh (EDP, 2015). A montante existe o Sistema Hidroelétrico da Serra da Estrela que é constituído por nove albufeiras e cinco centrais hidroelétricas. Estas apresentam potência instalada de 47 MW e uma produção média anual de 160 GWh. (INAG,2001).

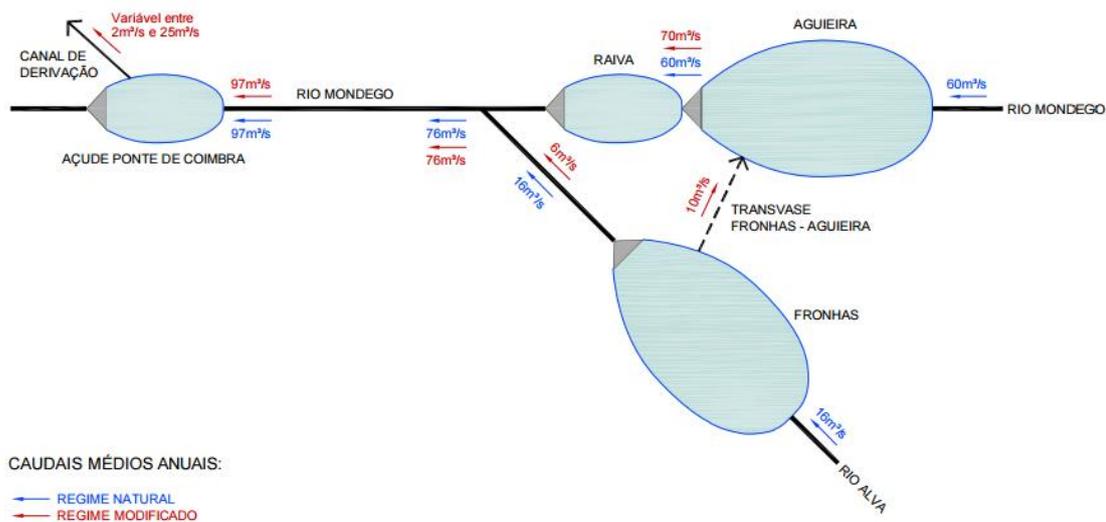


Figura 5 Sistema regulado Aguieira-Fronhas-Raiva (ARH-Centro, 2011)

A albufeira da Aguieira é o grande reservatório desse sistema, recebendo água: i) da bacia a montante da sua barragem, ii) do rio Alva, através do túnel de transvase existente entre as albufeiras de Fronhas e Aguieira, e iii) da albufeira da Raiva, localizada a jusante, através do sistema de bombagem existente na barragem da Aguieira.

Relativamente ao grau de risco, estas três barragens são todas de classe I, classe que, segundo o regulamento de segurança de barragens (RSB), é atribuída às barragens que possuam no vale a jusante, onde a onda de inundação pode afetar a população, os bens e o ambiente, um nível de população residente igual ou superior a 25 pessoas. Neste caso, só em Coimbra, a população é 143.396 habitantes (Censos, 2011).

3.4.1. ALBUFEIRA DA AGUIEIRA

A barragem da Aguieira está localizada no rio Mondego, distrito de Viseu, no concelho de Mortágua. É uma barragem de abóbadas múltiplas, em betão, que entrou em funcionamento em 1981 (figura 6). Tem como funções a produção de energia hidroelétrica, o abastecimento de água para rega e o controlo de cheias. A barragem tem altura de 89 m, acima da fundação, e o desenvolvimento do coroamento tem 400 m. O coroamento encontra-se à cota 126 m (EDP, 2015).

Tem como órgãos de descarga:

- 2 descarregadores de cheias sobre a barragem, sendo a sua descarga controlada por comportas. A correspondente soleira está à cota 111 e apresentam um desenvolvimento 2x9,5 m. O caudal descarregado máximo é de 2080 m³/s;
- 1 descarregador de fundo, que atravessa a barragem, controlado por comporta e com um caudal de projeto de 180 m³/s;
- 3 grupos geradores reversíveis (turbinas-bombas) que funcionam numa central localizada no pé da barragem. O caudal descarregado máximo das turbinas é de 3x180 m³/s;

A albufeira da Aguieira tem como área inundada 2000ha e uma capacidade total de volume armazenado de 450hm³. O nível de pleno armazenamento (NPA) é variável e depende das regras de operação

enquanto o nível mínimo de exploração (NmE) é de 110 m e o nível máximo de cheia (NMC) é de 126 m (SNIRH, 2015)



Figura 6 Barragem da Aguieira (Pinto, 2015a).

3.4.2. ALBUFEIRA DA RAIVA

A barragem de Raiva está localizada no rio Mondego, distrito de Coimbra, no concelho de Penacova. É uma barragem de gravidade, em betão, que entrou em funcionamento também em 1981 (figura 7). Tem como funções a produção de energia hidroelétrica e o controlo de cheia. A barragem tem de altura 36 m, acima da fundação, e o desenvolvimento do coroamento tem 200 m. A cota do coroamento encontra-se nos 64,5 m (EDP, 2015).

Tem como órgãos de descarga:

- 2 descarregadores de cheias, sobre a barragem, sendo a sua descarga controlada por comportas, estando a sua soleira a cota 52 m, com desenvolvimento 2x20 m. O caudal descarregado máximo é de 2000 m³/s;
- 1 descarregador de fundo, que passa através da barragem, controlado por comporta e com um caudal de projeto de 45,5 m³/s;
- 2 turbinas tipo Bolbo que funcionam numa central localizada no pé da barragem. O caudal de descarregado máximo das turbinas é de 2x80 m³/s;

A albufeira de Raiva tem como área inundada 300 ha e uma capacidade total de 21 hm³. O NPA é variável, encontrando-se entre 60 m e 61,5 m, enquanto o NmE é de 54 m e o NMC é de 61,5 m.



Figura 7 Barragem da Raiva (CNPGB, 2015)

3.4.3. ALBUFEIRA DE FRONHAS

A barragem de Fronhas está localizada no rio Alva, distrito de Coimbra, no concelho de Arganil. É uma barragem em Arco, em betão, que entrou em funcionamento em 1984 (figura 8). Tem como funções a produção de energia hidroelétrica e o controlo de cheias. A barragem tem de altura 62 m, acima da fundação, e o desenvolvimento do coroamento tem 250 m. A cota do coroamento encontra-se nos 140 m.

Tem como órgãos de descarga:

- 2 descarregadores de fundo, que passam através da barragem, controlados por comportas, estando o eixo do orifício a cota 92,5 m. Para o nível de água correspondente ao primeiro nível de defesa de obra o caudal descarregado é igual a $2 \times 125 \text{ m}^3/\text{s}$;
- 2 descarregadores de meio fundo, que passam através da barragem, controlados por comportas, estando o eixo do orifício a cota 100 m. Para o nível de água correspondente ao primeiro nível de defesa de obra o caudal descarregado é igual a $2 \times 125 \text{ m}^3/\text{s}$;

A albufeira de Fronhas tem como área inundada 535 ha e uma capacidade total de 89 hm^3 . O NPA é variável, enquanto o NmE é de 117 m e o NMC é de 140 m. Possui dois níveis de defesa de obra (NDO) o primeiro à cota 130,5 m e o segundo à cota 136,5 m. O nível de defesa de obra tem como finalidade definir, em conjunto com o NMC, a capacidade de amortecimento da cheia milenar.

A albufeira de Fronhas possui um túnel de derivação, controlado com comportas, com um comprimento de 8,2 km, que permite o transporte de água até à albufeira da Aguieira. Este túnel permite aumentar o potencial hidroelétrico das albufeiras da Aguieira e da Raiva.



Figura 8 Barragem de Fronhas (Pinto, 2015b)

3.5. REGRAS DE OPERAÇÃO

As regras de operação atuais foram definidas pela EDP, em 2007, para as três albufeiras. As regras em vigor obedecem às anteriormente definidas em 1983 e 1988.

Cada albufeira possui as suas próprias regras de operação, sendo que as de Raiva estão dependentes do nível de água da Aguieira.

As regras dependem da altura do ano. Note-se que as regras em estudo são as definidas para a época de cheias (15 de Outubro a 14 de Abril).

Para a Aguieira os níveis de água da albufeira correspondentes ao NmE e ao NMC são os originalmente definidos, isto é, correspondem à cota 110m e 126m, respetivamente. Já o NPA depende do caudal médio do dia anterior.

Tabela 3 Nível de pleno armazenamento (NPA) dependente do caudal afluente à Aguieira.

Caudal médio no dia t	Nível a atingir na albufeira no dia t+1
0 a 25m ³ /s	124,45m
25 a 50m ³ /s	123,90m
50 a 100m ³ /s	121,40m
100 a 150m ³ /s	119,35m
Superior a 150m ³ /s	117,85m

O nível de defesa de obra (NDO) definido é 123m. Esta capacidade é o volume disponível entre os dois níveis de água.

Os descarregamentos dependem da cota do nível de água na albufeira da Agueira. Para níveis de armazenamento entre as cotas 117,85m e 119,35m permitem-se oscilações de nível, entre essas cotas, se tal for aconselhado por razões energéticas. Todas as descargas são feitas somente através de turbinamento. Quando o nível de água na albufeira da Agueira se encontra entre as cotas 119,35m e 123m, o caudal mínimo a ser lançado é de 150m³/s. O caudal máximo é o mínimo entre 450m³/s e o complemento para um escoamento máximo de 1200 m³/s em Coimbra. Este complemento tem a finalidade de analisar a totalidade dos caudais afluentes a Coimbra (regularizados e não-regularizados¹) e evitar caudais superiores a 1200 m³/s através da limitação dos volumes descarregados. O valor de 1200 m³/s é escolhido por ser o caudal de dimensionamento do leito do rio Mondego a jusante de Coimbra (Rodrigues et al, 2001), provocando cheias consideráveis quando ultrapassado. O caudal efluente deverá ser descarregado através das turbinas da central hidroelétrica. Quando o nível de água da albufeira da Agueira atingir a cota 123 m, que é o correspondente ao NDO, o caudal é incrementado de 350 m³/s por hora até à abertura completa dos descarregadores de cheia. Se entretanto o nível da albufeira tiver tendência para estabilizar ou baixar, então o caudal descarregado passa a ser igual ao afluente, se este for superior a 600 m³/s, ou igual a 600 m³/s, se o caudal afluente for menor ou igual a este valor.

Nas regras de exploração da albufeira de Raiva os níveis definidos são o NmE, igual 54m, o NPA, igual a 60m e o NMC, igual a 61,5m.

Os caudais descarregados dependem do nível da albufeira de Agueira. Quando o nível de água da Agueira se encontra entre 117,85 e 119m, o caudal descarregado em Raiva nunca é superior a 450 m³/s ou ao complemento para 1200 m³/s em Coimbra. Se a cota da albufeira da Agueira se encontram entre as cotas 119 e 123m, o caudal descarregado na Raiva tem as mesmas limitações que as indicadas para a Agueira. Quando a cota na albufeira da Agueira é superior a 123m, o caudal descarregado na Raiva tem as mesmas limitações que as indicadas para a Agueira. No entanto, se existir uma tendência para a cota do nível de água na Raiva subir, então o caudal efluente tem de ser igual ao caudal afluente.

Para a albufeira de Fronhas, os níveis definidos são o NmE, igual a 117m, o NMC, igual a 140m e o NPA, apesar de não ser definido, é possível observar, através de análise de outros eventos, que se encontra em volta da cota 122m. Estão definidos dois níveis de defesa de obra, NDO1 e NDO2, nas cotas 130,5m e 136,5m, respetivamente.

As regras definidas para Fronhas, a nível de caudais descarregados, só dizem respeito aos NDO. Atingindo o primeiro deve-se proceder à abertura completa do descarregador de fundo; Atingido o segundo, deve-se proceder também à abertura do descarregador de meio fundo. Devido à falta de informação sobre as descargas quando o nível de água da albufeira de Raiva é inferior à cota 130,5m, foi necessário analisar as descargas que ocorreram em determinado evento em que se possuíam os caudais afluentes e os efluentes. Observando os caudais efluentes foi possível concluir que estes

¹ Neste trabalho, entende-se por caudais regularizados os caudais descarregados pelas albufeiras e os caudais não-regularizados provenientes do rio Ceira e da sub-bacia de Coimbra. Por caudais não regularizados entende-se o somatório de todos os caudais não regularizados afluentes às cinco sub-bacias em estudo (ver subcapítulo 4.2.)

dependiam dos caudais afluentes. Quando os caudais afluentes são inferiores a 50 m³/s, o caudal descarregado é o caudal ecológico, que é 2,0m³/s. Quando os caudais afluentes se encontram entre 50 e 80 m³/s, o caudal descarregado é igual a 50 m³/s e enquanto os caudais afluentes se encontram entre 80 e 120 m³/s os caudais descarregados são iguais a 100 m³/s. Por fim, se o caudal afluente é superior a 120 m³/s, o caudal descarregado será igual a 150 m³/s.

O túnel de derivação entre a albufeira de Fronhas e a da Aguieira transporta caudal gravitícamente. Portanto, enquanto a cota do nível de água da albufeira de Fronhas for superior à da Aguieira, o túnel mantém-se em funcionamento. Se as cotas se iguam ou a cota do nível de água da albufeira da Aguieira é superior à de Fronhas o túnel é fechado através das comportas que fazem parte do mesmo.

Dada a importância deste sistema em situação de cheia, a sua exploração em eventos de cheia é feita em cooperação com a Agência Portuguesa do Ambiente, a APA, fornecendo esta as indicações que considerar adequadas, sobrepondo-se às regras em vigor.

4

METODOLOGIA

4.1. INTRODUÇÃO

No seguinte capítulo é apresentada a metodologia adotada neste estudo. O trabalho baseia-se na simulação da gestão do sistema de albufeiras Fronhas-Aguieira Raiva, para os eventos de cheia ocorridos em Janeiro de 2001 e em Fevereiro de 2014.

O trabalho realizado para a criação desta tese é resumido em:

1. Seleção dos eventos de cheia;
2. Obtenção dos dados de base (Caudais, observados e previstos);
3. Formulação do modelo de cálculo no *software* escolhido;
4. Validação do modelo computacional, simulando o primeiro evento de cheia (de Fevereiro de 2014 utilizando as regras de operação em vigor);
5. Formulação de novas regras de operação;
6. Simulação do primeiro evento de cheia utilizando as regras formuladas;
7. Estudo económico de energia produzida durante o primeiro evento;
8. Simulação do segundo evento de cheia (Janeiro de 2001) utilizando as regras formuladas.

4.2. DESCRIÇÃO TRABALHO REALIZADO

A primeira tarefa do trabalho consistiu em identificar situações de cheia registadas em Coimbra, para as quais existissem dados relativos à exploração das albufeiras de Fronhas, Aguieira e Raiva. Assim, seleccionaram-se dois eventos de cheia: i) o evento que ocorreu no início de Fevereiro de 2014 e, ii) o evento que ocorreu no final de Janeiro de 2001.

Depois, com base nos dados existentes relativos ao sistema de albufeiras, construiu-se o modelo do sistema no programa no HEC-ResSim, cujo procedimento é explicado em detalhe no subcapítulo 4.3.

Para validar o funcionamento do modelo, realizaram-se simulações relativas ao evento de Fevereiro de 2014. Este evento foi escolhido devido à existência de dados observados relativos à exploração das três albufeiras, a nível de caudais efluentes e afluentes e da evolução da cota do nível de água das albufeiras. As simulações foram realizadas usando, como dados de entrada, os caudais afluentes observados nas

albufeiras da Agueira e de Fronhas e, como regras de operação, as regras em vigor, apresentadas em 3.5. Como as albufeiras da Agueira e da Raiva estão muito próximas, considerou-se que o caudal afluente à Raiva correspondem apenas ao caudal efluente da Agueira. O modelo foi validado através da comparação dos dados da exploração das albufeiras – caudais turbinados, descarregados e transferidos e níveis de água – com os resultados da simulação. Os resultados deste processo são apresentados no capítulo 5.

De seguida foram realizadas outras simulações relativas ao mesmo evento, mas utilizando os resultados das previsões de caudais com um alcance de 10 dias – produto do trabalho de doutoramento referido no capítulo 1 – realizadas através de simulação hidrológica, para cada dia, com um conjunto de 51 previsões diferentes de precipitação, provenientes do ECMWF. Dessa forma, para cada dia podem ser produzidas 51 previsões de caudal em cada secção, com alcance até 10 dias. Assim, de modo a incluir o período de cheia ocorrido de 6 a 12 de Fevereiro, consideraram-se as previsões realizadas no dia 2 de Fevereiro, que permitem prever até dia 12. De forma a facilitar a sua análise e utilização, foram calculados os percentis 25, 50 e 75 relativos às 51 previsões de caudais. Para o mesmo período foi obtido através da simulação hidrológica os dados de caudais associados à precipitação observada, existindo os dados de precipitação observada para as sub-bacias das albufeiras da Agueira e de Fronhas. Os caudais foram previstos para cinco sub-bacias: i) a sub-bacia da albufeira da Agueira, ii) a sub-bacia da albufeira de Fronhas, iii) a sub-bacia da Raiva, referente à área que se localiza a montante da Raiva e a jusante da albufeira da Agueira, iv) a sub-bacia da foz do rio Ceira, referente à bacia total do rio Ceira, e v) a sub-bacia de Coimbra, referente à área referente a jusante da albufeira da Raiva, de Fronhas e do rio Ceira. Utilizando-se esses resultados para simular o funcionamento das albufeiras para quatro alternativas diferentes. As alternativas formaram-se usando os vários percentis: i) a primeira alternativa usou os percentis 25 relativos aos caudais previstos, ii) a segunda alternativa usou os percentis 50 relativos aos caudais previstos, iii) a terceira alternativa usou os percentis 75 relativos aos caudais previstos e iv) a quarta alternativa usou os percentis 50 relativos aos caudais previstos às sub-bacias da albufeira de Raiva, do rio Ceira e de Coimbra e os caudais obtidos por modelação hidrológica, através da precipitação observada, para as albufeiras da Agueira e Fronhas. Esta ultima alternativa teve como função usar caudais de maior proximidade com o caudal observado.

Utilizando estes caudais foi possível simular o evento tendo em consideração as restantes sub-bacias cujos caudais afluem a Coimbra. Simulou-se o mesmo evento com as regras de operação em vigor, apresentadas no capítulo 3.5, e formularam-se regras novas, de modo a aperfeiçoar o comportamento das albufeiras e reduzir o caudal afluente a Coimbra.

O segundo evento analisado foi o de Janeiro de 2001. Este evento foi escolhido devido à sua excecionalidade. O caudal natural afluente a Coimbra tinha um caudal de pico previsto superior a 2500 m³/s. Para este evento obtiveram-se dados relativos aos caudais afluentes observados na Agueira e em Fronhas, o caudal natural previsto e o caudal observado em Coimbra, dados obtidos através do relatório da APA sobre o evento (Rodrigues et al, 2001). Nas restantes bacias em que não se dispunha de dados de caudais observados, utilizou-se a previsão de caudal média, obtida através do procedimento descrito. Foram simulados os caudais com as regras de operação em vigor, apresentadas no subcapítulo 3.5, e com as regras sugeridas no âmbito deste trabalho.

Para cada simulação os valores obtidos são os caudais afluentes e efluentes, havendo a discriminação dos caudais efluentes dependendo do órgão de descarga utilizado, e as variações do nível de água. Para Fronhas, devido à existência do transvase, este também é analisado, e na Agueira e Fronhas foi analisada a energia produzida pela sua central hidroelétrica para o primeiro evento estudado.

Os dados obtidos foram posteriormente analisados graficamente através do *Excel*. A comparação entre caudais foi realizada entre os caudais previstos e comparando com os caudais observados, resultados apresentados e discutidos no capítulo 6.

4.3. HEC-RESSIM

O HEC-ResSim, Hydrologic Engineering Center – Reservoir System Simulation, é um *software* desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, do Institute for Water Resources.

Como o nome indica é um *software* de simulação de operações de reservatório(s) de acordo com os objetivos, restrições e regras de operação que se pretendam definir para o mesmo (U.S. Army Corps of Engineering, 2013).

O programa é utilizado para simular a gestão operacional de reservatórios em situações de cheia, para suprir necessidades de abastecimento de água para efeitos de caudais afluentes reduzidos, investigações sobre regulamentações para a gestão de reservatórios, servindo de suporte para a tomada de decisões em tempo real.

O *software* é composto por i) uma interface gráfica, com a função de facilitar a criação e compreensão de modelos de cálculo, ii) um programa computacional, com a finalidade de simular as operações dos reservatórios, iii) e pelo armazenamento de dados e capacidade de apresentar os resultados graficamente e através de relatórios pormenorizados.

O armazenamento de dados, a introdução de dados de *input* e a obtenção de dados de *output* foram realizados através do HEC-DSS, que é um programa, desenvolvido pela mesma entidade, para armazenamento e análise de dados.

O HEC-ResSim é o *software* sucessor do HEC-5, *software* também indicado para a simulação de operação de albufeiras.

4.3.1. FUNCIONAMENTO

O HEC-ResSim funciona através de três módulos (figura 9), sendo necessário definir cada módulo para possibilitar a definição do módulo seguinte.

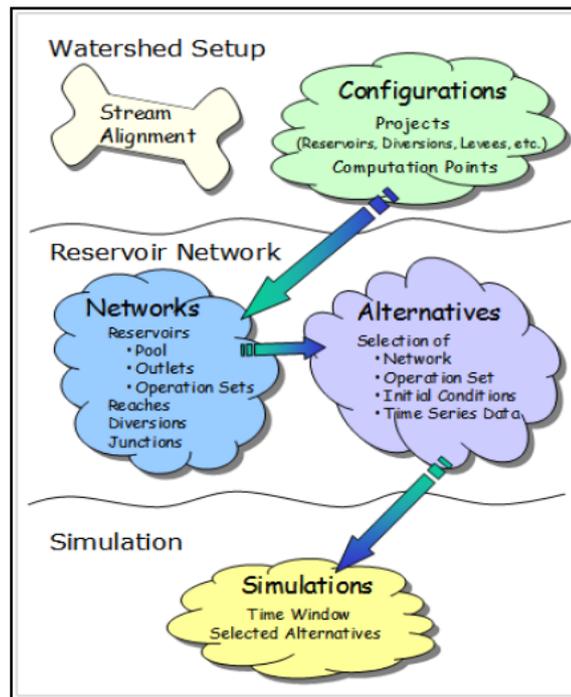


Figura 9 Esquema de funcionamento do HEC-ResSim com os 3 módulos (USACE, 2013)

O primeiro módulo, *Watershed Setup*, é a definição gráfica da bacia ou sub-bacia hidrográfica em estudo, com referência para as obras hidráulicas que dela fazem parte. Na bacia vão estar incluídos os cursos de água, as obras existentes e todos os dados hidrológicos e hidráulicos do modelo, assim como os pontos de cálculo que serão usados na simulação.

O segundo módulo, *Reservoir Network*, tem como função criar uma rede de ligações dos elementos, hidrológicos e das obras hidráulicas que constituem a área em estudo. Neste módulo são descritos e caracterizados quantitativamente os elementos físicos e operacionais, bem como definidas as alternativas que se deseja analisar. Essas alternativas correspondem às diferentes opções tomadas para uma mesma simulação, como por exemplo caudais afluentes ou regras de operação de albufeiras diferentes, com a finalidade de comparar resultados.

Nesse módulo são definidos os reservatórios, transvases, pontos de controlo, pontos de afluência de caudal e troços dos cursos de água que ligam as obras definidas. Para os reservatórios é necessário definir os dados físicos dos mesmos, as relações entre cotas, volume de água armazenado e área de superfície do espelho de água. Além dos dados de armazenamento, é necessário definir os dados físicos da barragem, a sua altura e o comprimento do coroamento, assim como as curvas de vazão para os seus descarregadores, a altura de água a jusante da albufeira, as curvas de vazão das turbinas do sistema de geradores reversíveis e dos tuneis de derivação, caso existam.

Também é necessário fornecer os dados operacionais de cada reservatório. As regras de operação são definidas de acordo com diferentes zonas operacionais. As zonas operacionais são definidas de acordo com intervalos de cotas do nível de água na albufeira. O *software* cria três zonas, podendo o utilizador criar mais, conforme o desejado. As zonas base para o funcionamento da simulação são: *Flood Control* (zona do nível de água da albufeira com a função de controlo de caudais de cheia), *Conservation* (zona do nível de água utilizada para os restantes fins da albufeira que não o controlo de cheia) e *Inactive Zones* (zona abaixo do NmE, nível mínimo a ser mantido sempre na albufeira) (figura 11). A primeira

zona encontra-se entre a segunda zona e a cota máxima que pode ser atingida pelo nível de água, o NMC. A segunda zona encontra-se entre o nível de água desejável, o NPA, e a cota da terceira zona, o NmE. A terceira zona é definida pela cota do nível de água mínima que pode ser atingida, o NmE. As zonas definidas podem ser função de outros fatores, como por exemplo a data e a hora ou o caudal afluyente atual.

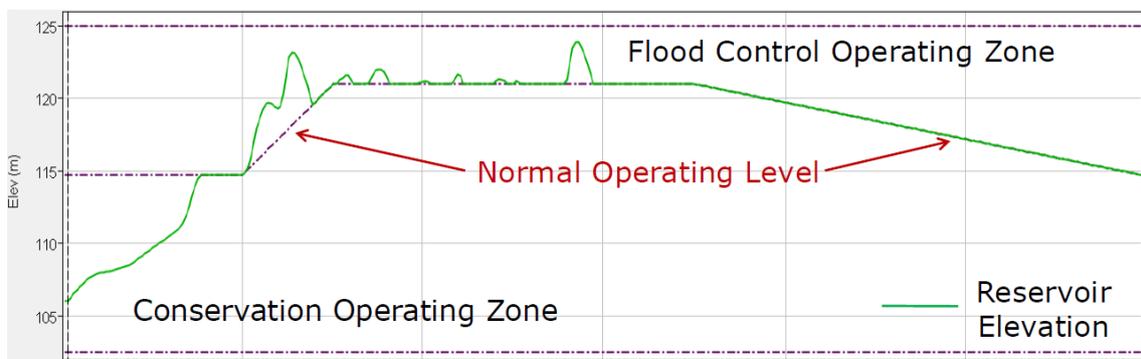


Figura 10 Zonas de controlo de operação de albufeiras consideradas pelo HEC-ResSim (Hanbali, 2014)

Após definição das zonas de operação é necessário definir as regras de operação a simular. As regras são um conjunto de objetivos ou restrições que impõem limites ao funcionamento dos órgãos da albufeira. Estas regras podem definir o caudal efluente, o nível da albufeira, a energia gerada ou a taxa de alteração, máxima ou mínima, do caudal efluente ou/e do nível da albufeira. A definição das regras pode depender de outros fatores para além da zona de operação, podendo depender de variáveis do modelo, como por exemplo o funcionamento de outras albufeiras, ou até mesmo de variáveis exteriores ao modelo, que podem ser introduzidas pelo utilizador através do HEC-DSS.

O cálculo de volume armazenado, dependente do volume de caudal efluente, é feito pela equação da conservação massa:

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{(I_t + I_{t+1})}{2} - \frac{(O_t + O_{t+1})}{2} - \text{Perdas} \quad (\text{Eq. 1})$$

Na equação anterior, S_t e S_{t+1} , representam respetivamente o armazenamento inicial e final, I_t e I_{t+1} , representam respetivamente o caudal afluyente inicial e o final, e O_t e O_{t+1} , representam respetivamente o caudal efluente inicial e o final. As perdas podem ser, por exemplo, de evaporação de água na albufeira, que caso aconteça é definido nas suas regras de operação. O valor de caudal efluente final é baseado na decisão de volume descarregado do programa (Hanbali, 2014).

O volume descarregado, determinado pelo programa, tem como passos lógicos de tomada de decisão:

1. Determinar as limitações físicas dos descarregadores definidos;
2. Aplicar as regras de operação para identificar os limites dos caudais efluentes, máximo e mínimo;
3. Calcular o caudal efluente para manter o nível de água desejado, NPA;
4. Identificar conflitos entre restrições;

5. Decidir que caudal efluente se aplica na situação, dependente de todas as limitações definidas e dos dados de *input* no momento da decisão;
6. Tomada de decisão e consequente cálculo do volume armazenado;

Algumas regras de operação podem entrar em conflito entre elas. Nessa situação, o programa prioriza segundo três parâmetros. Por ordem de prioridade estão: i) as limitações físicas, ii) as regras definidas pelo utilizador, dependendo da prioridade escolhida pelo utilizador, e iii) o caudal que permite manter o nível de água desejado, NPA (Hanbali, 2014)

É com base neste 2º módulo que se avaliam as alternativas a serem simuladas. Para cada alternativa são definidos o espaço temporal de decisão e das series temporais do *input*, o modo de cálculo a utilizar, as regras de operação a serem utilizadas, os dados de entrada (tabela 4) e as series temporais, que são introduzidos através do HEC-DSS.

A existência de várias alternativas é útil pois permite, para o mesmo evento em estudo, efetuar comparações de operação nas diferentes situações definidas para cada alternativa. Tal permitiu, neste trabalho, comparar várias alternativas para um mesmo evento, nomeadamente o diferente comportamento das regras propostas neste estudo com as regras de operação atuais (ver subcapítulo 3.5.) e comparar o comportamento das regras sugeridas para situações de diferentes caudais afluentes.

Tabela 4 Dados de entrada (*Input*) e dados de saída (*output*) do HEC-ResSim

Dados de Entrada (<i>Input</i>)	Dados de Saída (<i>output</i>)
Caudal afluente para período anterior ao simulado e para o período da simulação	Caudal efluente por órgão definido
Caudal efluente por órgão definido para período anterior ao simulado	Cota do nível de água
Cota do nível de água ou volume armazenado para período anterior ao simulado	Volume armazenado
-	Energia Produzida
-	Informação da abertura das comportas

O terceiro módulo, *Simulation*, é o que permite realizar a simulação. Antes de efetuada a simulação é necessário configurá-la, definir o espaço temporal em que a simulação se vai realizar, data e hora inicial e final, e a data e hora dos dados iniciais, e escolher quais as alternativas, criadas no segundo módulo, que irão ser analisadas. Após configurada a simulação é possível obter o *Output* (tabela 4) em forma gráfica ou através de relatório.

Os dados finais obtidos são, nomeadamente, os caudais descarregados, os níveis de água obtidos, aberturas de comportas e energia produzida por albufeira.

4.3.2. CRIAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO

O primeiro passo para a criação do modelo foi a definição da sub-bacia hidrográfica no HEC-ResSim. Inicialmente no módulo *watershed*, foi criada a sub-bacia definindo-se os troços dos rios Mondego, a jusante e a montante da foz do Rio Alva, do Alva e do Ceira, com confluência em Coimbra. Foram definidos nós no início dos troços e na confluência dos rios Alva e Ceira com o Mondego.

Foi definido o local das albufeiras e das barragens da Aguieira e Raiva, no rio Mondego, e de Fronhas no rio Alva. Também foi definido o transvase da albufeira de Fronhas para a da Aguieira (figura 11). Ao definir o local das albufeiras e barragens, o programa automaticamente criou pontos de computação nas duas extremidades das obras, a montante e a jusante.

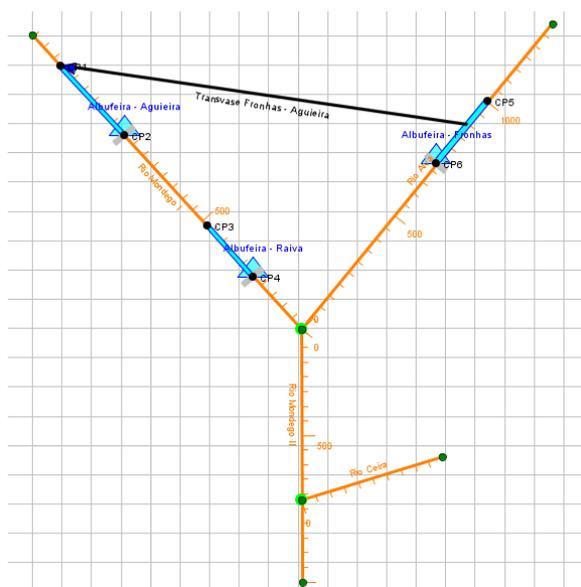


Figura 11 Esquema da sub-bacia criada para a simulação

Após a referida definição do módulo, *watershed*, foi criada a rede de ligações entre todas as obras e troços dos rios, no módulo *Reservoir Network*.

O programa estabeleceu a localização das albufeiras e do transvase, de acordo com a configuração definida primeiro módulo. A estes locais associou pontos de cálculo. De seguida limitaram-se os troços de rio, a serem simulados, a montante das albufeiras de Aguieira e Fronhas, o troço de ligação entre as albufeiras de Aguieira e Raiva, os troços a jusante da albufeira de Raiva e Fronhas até à foz do Alva, o troço da foz do rio Alva até ao ponto correspondente à confluência com o rio Ceira e por fim o troço até Coimbra (Figura 12).

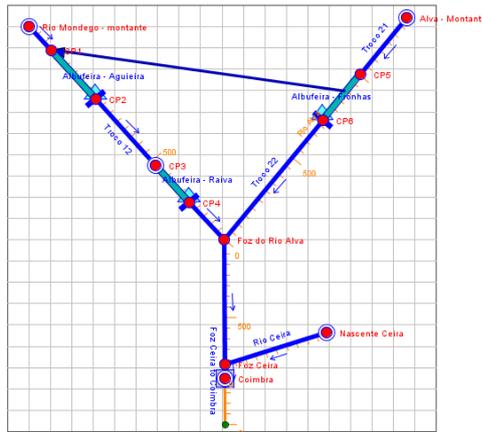


Figura 12 Rede de ligação entre albufeiras e pontos iniciais e finais dos rios

Após a criação gráfica da rede de reservatórios e dos rios em estudo foi necessário atribuir os dados físicos de cada obra e ponto de afluência de caudais.

No caso das albufeiras, os dados requeridos são as relações entre a cota da água e: i) o volume armazenado e ii) a área da superfície do espelho de água (figura 13). Estes dados foram obtidos através das curvas de capacidade das albufeiras e das curvas de áreas inundadas.

Além dos dados das albufeiras é necessário fornecer os dados das barragens. No caso da Agueira, esta possui um descarregador de fundo e dois de cheia (ambos controlados por comporta) e uma central hidroelétrica com três grupos com funcionamento controlado através de comportas (figura 14). Na Raiva, existe um descarregador de fundo e dois de cheia e uma central hidroelétrica com dois grupos com funcionamento controlado através de comportas. Em Fronhas existem dois descarregadores fundo, dois de meio fundo e um transvase com afluência na albufeira de Agueira.

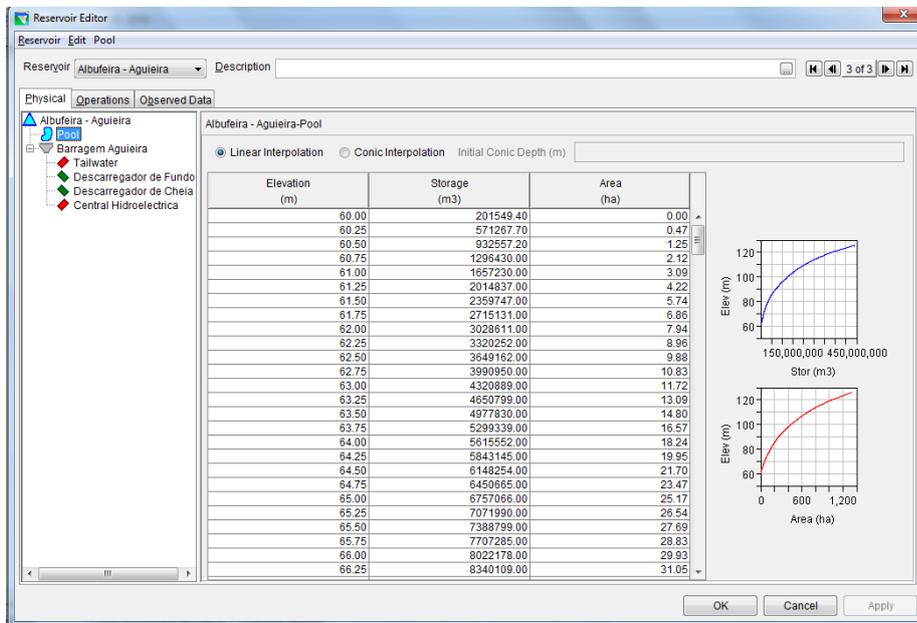


Figura 13 Relação entre a cota do nível de água e: i) o volume da albufeira e ii) a área do espelho de água.

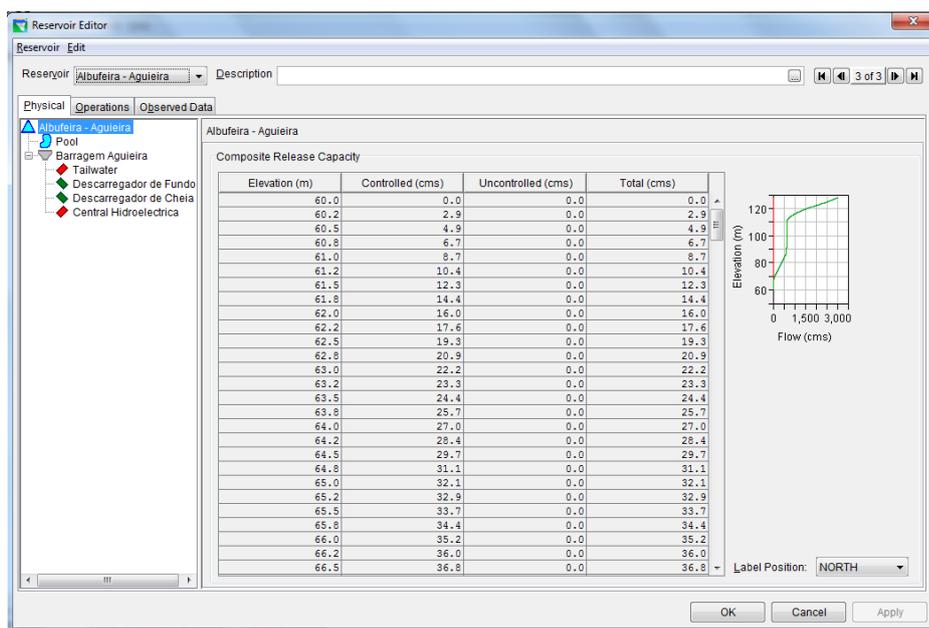


Figura 14 Curva vazão dos descarregadores da albufeira da Agueira

As informações sobre os descarregadores, sobre o funcionamento das centrais e do transvase de Fronhas para Agueira foram obtidos através das curvas de vazão desses órgãos, definindo-se para determinadas aberturas de comportas ou para a abertura total.

No caso da existência de centrais hidroelétricas é necessário fornecer a informação da cota imediatamente a jusante da barragem, *tailwater*, assim com as características da mesma. No caso da Agueira o nível de água a jusante vai depender da cota da albufeira de Raiva e no caso de Raiva vai depender da curva de vazão do açude a jusante desta. Também é necessário fornecer ao programa os dados relativos à central hidráulica, como, definir uma lei de vazão para o circuito hidráulico (relacionando o caudal máximo descarregável através do circuito hidráulico com a altura da água na albufeira), a potência instalada, a eficiência e as perdas hidráulicas. Estes valores vão permitir obter os dados da energia produzida para as simulações realizadas.

Após definidos os dados físicos das albufeiras e das barragens é necessário indicar em que pontos irá ocorrer afluência de caudal na bacia criada. No caso em estudo afluência de caudal através dos pontos a montante das albufeiras de Agueira e Fronhas, no início do rio Ceira, a montante da albufeira de Raiva, referente à sua sub-bacia, e em Coimbra, também referente à sua sub-bacia.

De seguida é necessário inserir as regras de operação das albufeiras. Para a primeira simulação foram usadas as regras de operação atual (ver subcapítulo 3.5.) para as três barragens (figura 15).

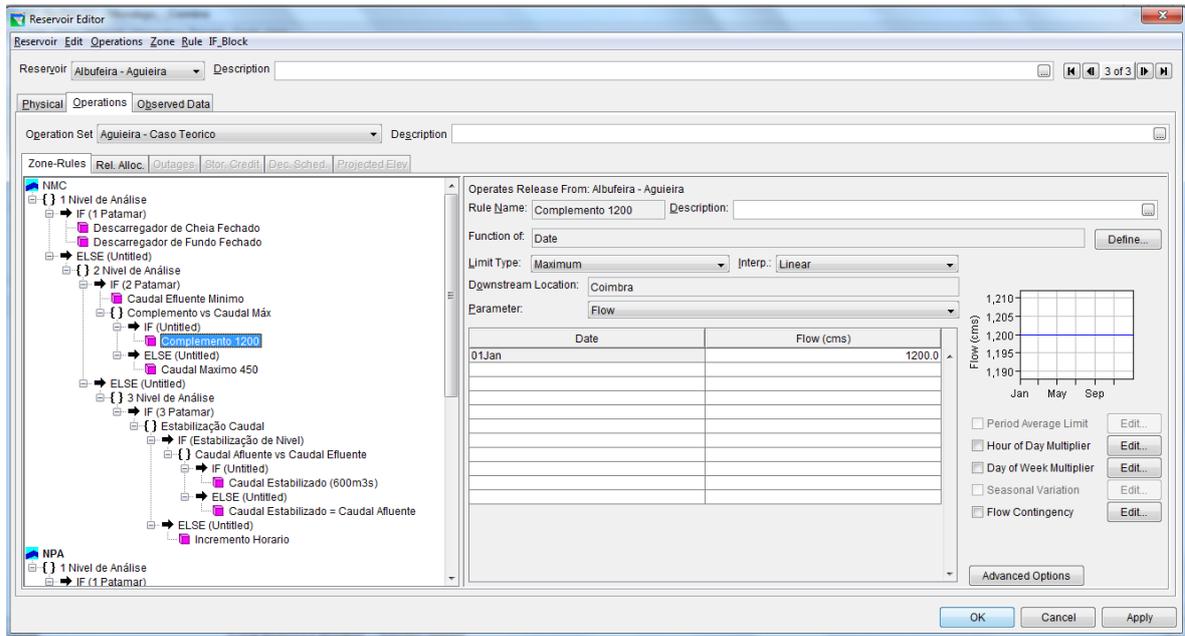


Figura 15 Regras de operação inseridas com base nas regras de operação atuais

Após definidas todas regras de operação é necessário criar a configuração da(s) alternativa(s) a ser utilizada na simulação (figura 16). Na configuração é escolhido o intervalo de tempo de análise (*time step*), que pode se encontrar entre de 5min a 24h - no caso em estudo escolheu-se 3h. O cálculo dos caudais é definida de modo a dar os valores instantâneos dos mesmos.

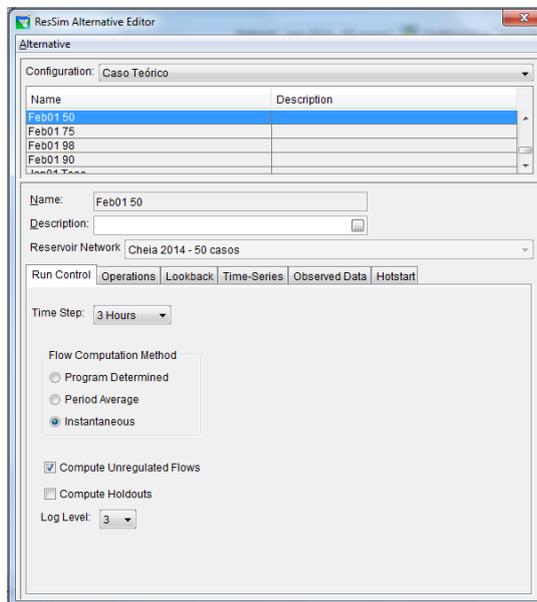


Figura 16 Criador de Alternativas de Simulação

Para as alternativas deve ser definido as regras de operação a serem simuladas, para cada albufeira. São fornecidos os dados de entrada das condições fronteira, podendo estes ser constantes ou fornecidos através do HEC-DSS e das condições para a simulação, fornecidos também através do HEC-DSS (figura 17).

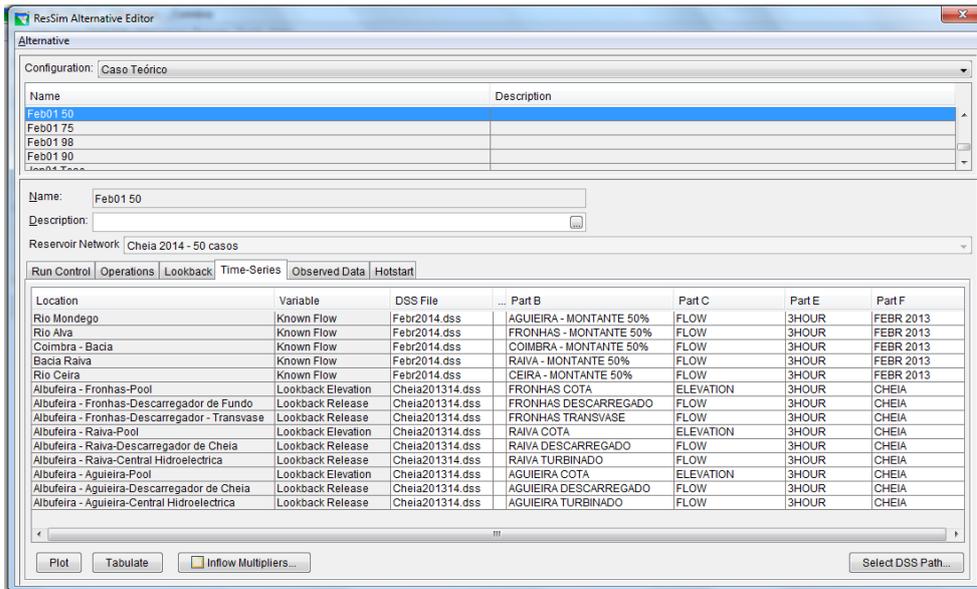


Figura 17 Dados a serem fornecidos para o funcionamento da alternativa criada

O passo final, antes da simulação e da obtenção dos dados de saída, é criar uma simulação, fornecendo a data e hora do início das condições iniciais, e do início e do fim da simulação e escolher as alternativas a simular (figura 20).

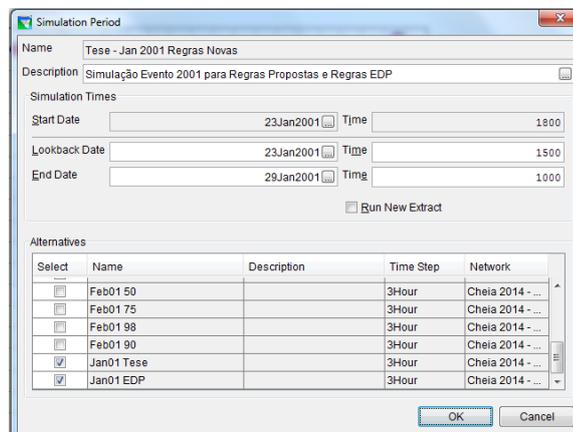


Figura 18 Criação de uma simulação, escolha do período em estudo e das alternativas

5

SIMULAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados da validação do modelo, que foi realizada através da simulação da gestão do sistema com os dados dos caudais afluentes registados nas albufeiras de Fronhas e da Aguieira, para o período de 2 a 12 de Fevereiro de 2014, utilizando as regras de operação em vigor (ver subcapítulo 3.5.). Como as albufeiras da Aguieira e da Raiva estão muito próximas, considerou-se que as aflúncias à Raiva correspondem apenas às descargas da Aguieira. A validação foi efetuada comparando os resultados das simulações com os valores das variáveis registadas – caudais descarregados, turbinados e transferidos e níveis de água – nas três albufeiras em estudo e com a finalidade de verificar a utilização das regras de operação em vigor para as três albufeiras.

5.2. EVENTO DE CHEIA OCORRIDO A 6 E 7 FEVEREIRO DE 2014

No dia 6 de Fevereiro de 2014, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) divulgou um comunicado onde previa um aumento generalizado de precipitação no país. Associado a este aumento, a Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC) alertou para a possibilidade de cheias nas bacias de vários rios, entre estes, o Mondego. A zona de Coimbra encontrava-se em aviso laranja, que representa um risco moderado a elevado (JN, 2014 a).

Como se pode verificar através dos meios de comunicação nos dias seguintes, ocorreram cheias em Coimbra nos dias 6 e 7 de Fevereiro de 2014, tendo inundado o designado Parque Verde, parque citadino que se localiza ao longo da margem direita do Mondego. Nas figuras 19 e 20 pode constatar-se a dimensão das inundações ocorridas.



Figura 19 Efeito das cheias na cidade de Coimbra no dia 6 de Fevereiro (Cortez, 2015)



Figura 20 Efeito das cheias no Parque Verde, Coimbra (Cortez, 2015)

Também ocorreram cortes de estradas devido às chuvas fortes, nos municípios de Mira, Figueira da Foz e Montemor-o-Velho (JN, 2014 b).

Para este evento de cheia houve acesso aos dados observados de caudal afluente às albufeiras da Aguieira e de Fronhas, e aos dados observados das três albufeiras (caudais efluentes e níveis de água). Os dados observados foram usados como dados de entrada, como dados fronteira.

Os caudais afluentes observados, de 2 a 12 de Fevereiro, na albufeira da Aguieira e Fronhas são apresentados nos gráficos das Figuras 23 e 24, respetivamente.

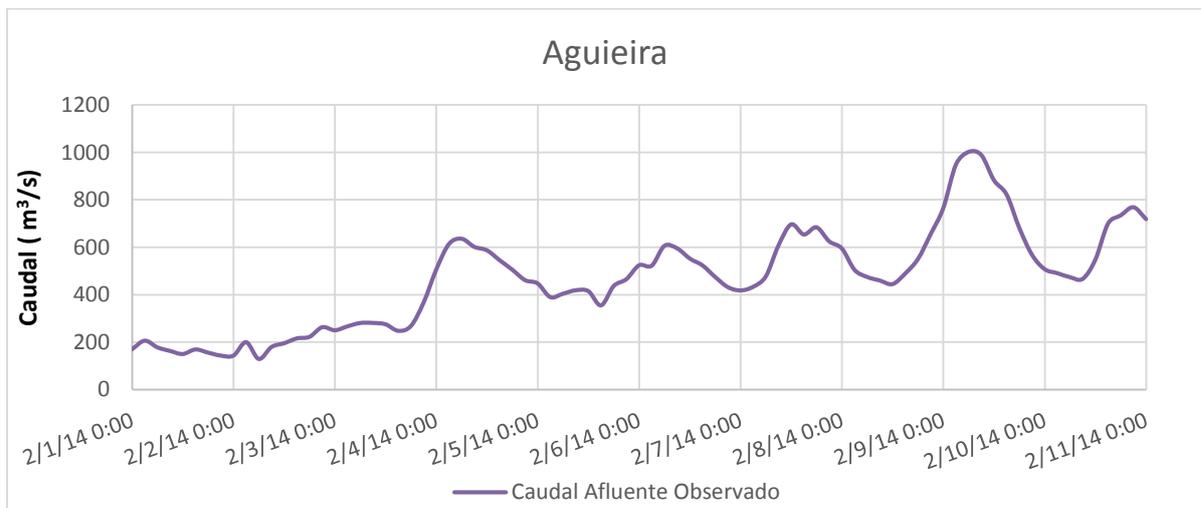


Figura 21 Caudais Afluentes à albufeira da Aguieira entre 2 e 12 de Fevereiro

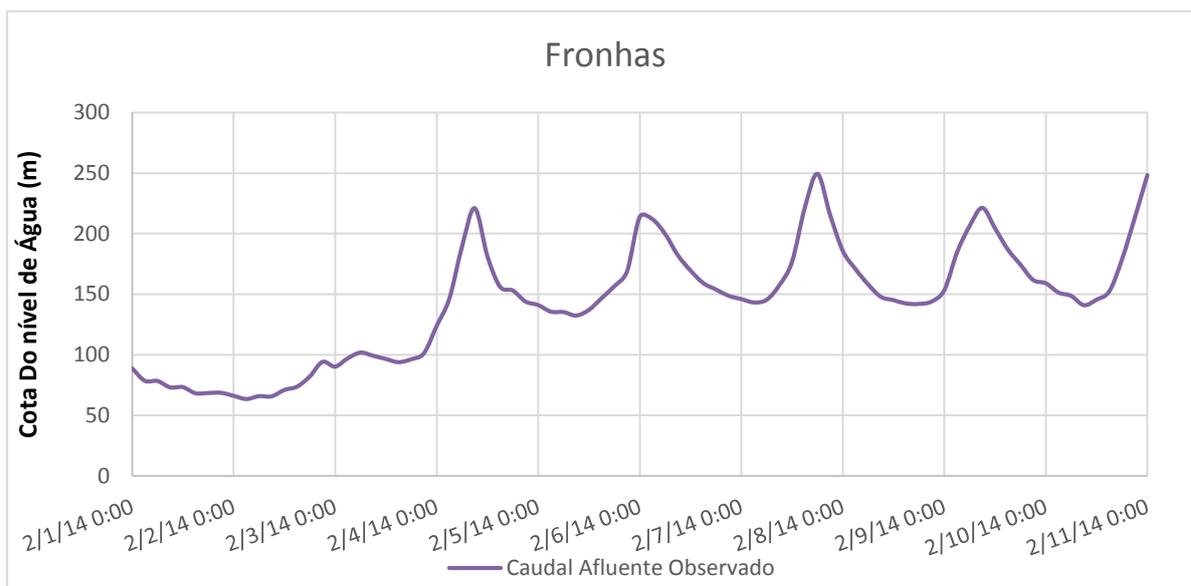


Figura 22 Caudais Afluentes à albufeira de Fronhas entre 2 e 12 de Fevereiro

O Açude-Ponte de Coimbra foi concebido de forma a evitar que o nível de água do rio em Coimbra ultrapasse a cota 18,8 m para caudais até 1200 m³/s, a partir do qual se antevêm graves prejuízos nessa cidade e no vale a jusante. No período aqui analisado, a cheia registada não atingiu essas dimensões. No entanto, a partir dos 800 m³/s afluentes a Coimbra, as zonas marginais da cidade são inundadas, como foi o caso.

5.2.1. ALBUFEIRA DE FRONHAS

Na albufeira de Fronhas as regras de operação atuais só fazem referência aos níveis de água na albufeira superior a 130,5m. Para os restantes foram deduzidas, através da análise de caudais observados noutros eventos além dos estudados. Estas não se encontravam definidas nas regras de operação apresentadas no subcapítulo 3.5., o que poderá indicar a não existência de condicionantes. De modo a estudar a albufeira foram então deduzidas e aplicadas as regras deduzidas para se tentar obter a operação de Fronhas na situação de o nível de água ser inferior ao nível de defesa de obra. Inicialmente vai-se efetuar uma análise às regras propostas (figura 23) e depois uma análise às regras deduzidas (figura 24).

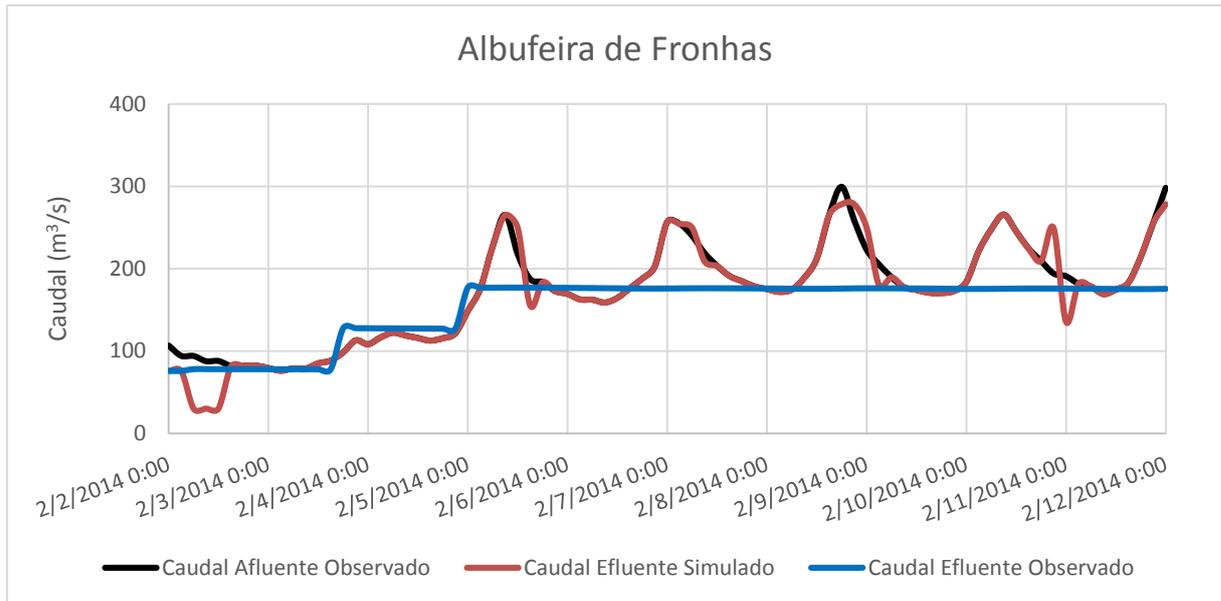


Figura 23 Caudal afluente e efluente da albufeira de Fronhas entre os dias 2 12 de Fevereiro

Analisando a figura 23, verifica-se a diferença entre o caudal efluente simulado e o observado para o mesmo caudal afluente. As regras de operação em vigor só preveem descargas de caudais superiores a $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal ecológico) a partir da cota 130,5m. Isto leva a que a albufeira de Fronhas tenha descargas inconstantes. A discrepância de valores das descargas previstas quando o nível de água se encontra cerca da cota 130,5 m leva a descargas, em média, semelhantes ao caudal afluente, mantendo o nível de água constante nos 130,5m. Estando a cota do nível de água nos 130,5m sabe-se que o transvase de Fronhas para a Agueira se vai encontrar sempre ativo e portanto soma-se o caudal transferido ao caudal descarregado, sendo este o caudal efluente.

Observando o caudal efluente observado foi possível deduzir as regras de operação, já que este apresenta um padrão em relação ao caudal afluente, que ocorreram entre o NmE (117m) e o primeiro NDO (130,5m), referidas no subcapítulo 3.5.

Observando a figura 24 e comparando o caudal efluente observado com o obtido através da simulação computacional pôde observar-se uma semelhança no comportamento de ambas as situações. Os valores correspondentes à simulação tem um comportamento quase idêntico ao real, exceto no período entre dia 4 de Fevereiro às 21:00h e dia 5 de Fevereiro às 18:00h, onde o caudal simulado é superior ao caudal observado. Esta diferença justifica a diferença de níveis de água da albufeira (Figura 25) de cerca de 1,4 metros atingida no dia 5 de Fevereiro, mantida sensivelmente constante no restante período da simulação.

Concluindo, apesar de as regras propostas oportunamente pela EDP e aprovadas pela APA, não fornecerem informações ou limitações em relação aos níveis de água inferiores ao primeiro NDO, foi possível deduzir as mesmas com relativa similaridade em relação ao que foi observado.

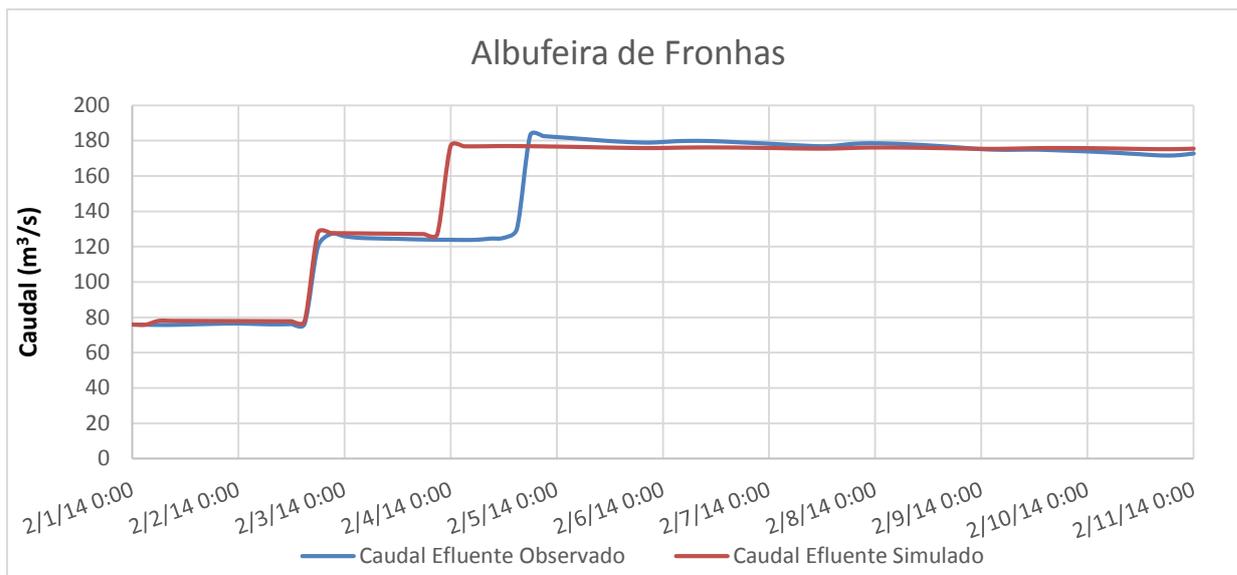


Figura 24 Caudal efluente da Albufeira de Fronhas entre os dias 2 e 12 de Fevereiro

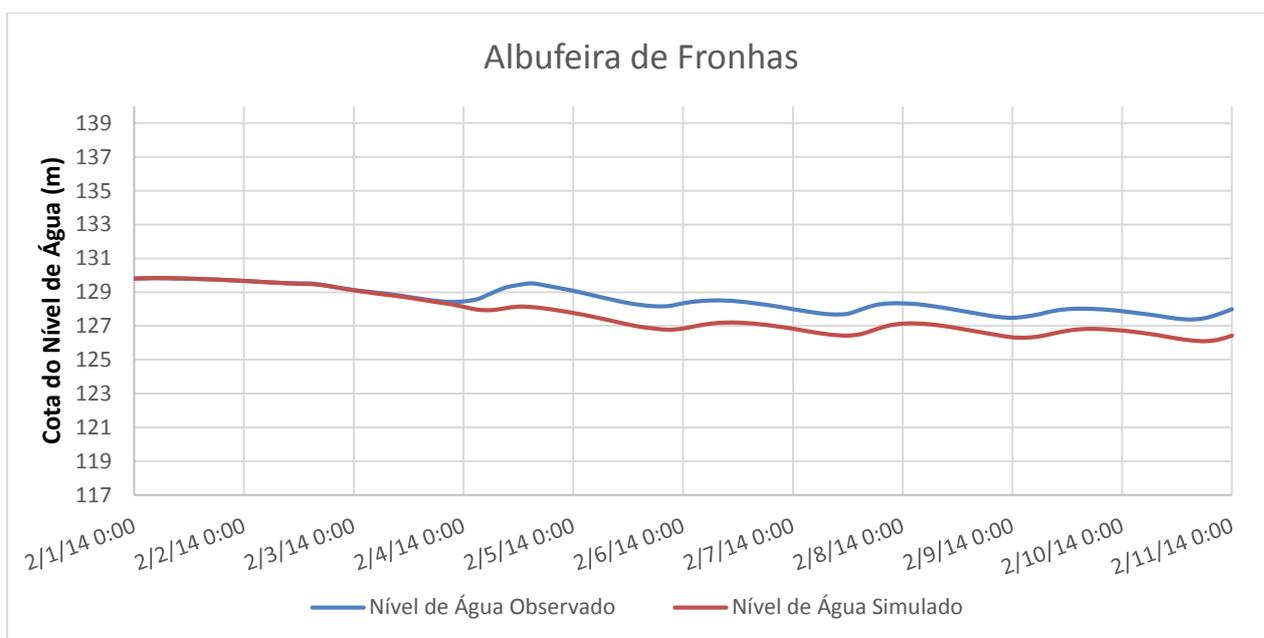


Figura 25 Nível de água observado na albufeira de Fronhas entre os dias 2 e 12 de Fevereiro

5.2.2. ALBUFEIRA DA AGUIEIRA

Na albufeira da Aguieira podemos analisar as diferenças entre os caudais efluentes observados e simulados (figura 26) e as diferenças entre os níveis de água (figura 27).

Observando os caudais efluentes verifica-se a existência de diferenças entre o observado e o simulado. Entre os níveis 117,85m e 119,35m (ver 3.5.), os valores de caudais turbinados não são restringidos, por isso o modelo vai permite turbinar o caudal máximo possível de modo a baixar o nível de água inicial e atingir o NPA, baixando o caudal efluente quando este nível é atingido. No caudal observado podemos verificar que o caudal turbinado máximo atinge o nível de 400m³/s, havendo diminuição do caudal

turbinado ou até mesmo fecho das turbinas, nas primeiras horas do dia, entre a 00:00h e as 06:00h (traduzindo potencial conveniência de exploração de rotina, em período de menor valia energética). No caudal simulado, após atingido a cota 117,85 (NPA) o caudal turbinado vai depender do caudal efluente.

No dia 5 de Fevereiro, quando se verifica um aumento do caudal afluente, o caudal efluente observado e o simulado sofreram um acréscimo, que, na simulação, devido à falta de restrições do caudal turbinado vai ser novamente o caudal máximo possível, sofrendo decréscimos sempre que a cota atinge a cota 117,85. Após este aumento, ambos os caudais atingem um valor de caudal máximo, valor que se vai manter constante. A principal diferença entre os níveis de água (figura 27) vai ocorrer no início do dia 5, onde no início do dia, novamente entre as 00:00h e as 06:00h se vai diminuir o caudal turbinado. Obteve-se uma diferença máxima de cerca de 1m entre os dois níveis.

Atingida a cota do nível de água 119,35m, o caudal observado efluente manteve-se, no entanto o caudal simulado vai diminuir porque as regras em vigor limitam um caudal máximo, que vai ser 450 m³/s.

Em conclusão, pode-se analisar que o caudal observado foi semelhante ao simulado e as suas diferenças ocorrem em situação de caudal afluente mais reduzido, pela prática de regras de operação não explícitas, que, nomeadamente, regem o fecho, mas que regem o fecho, parcial ou total, das turbinas durante certas horas do início do dia.

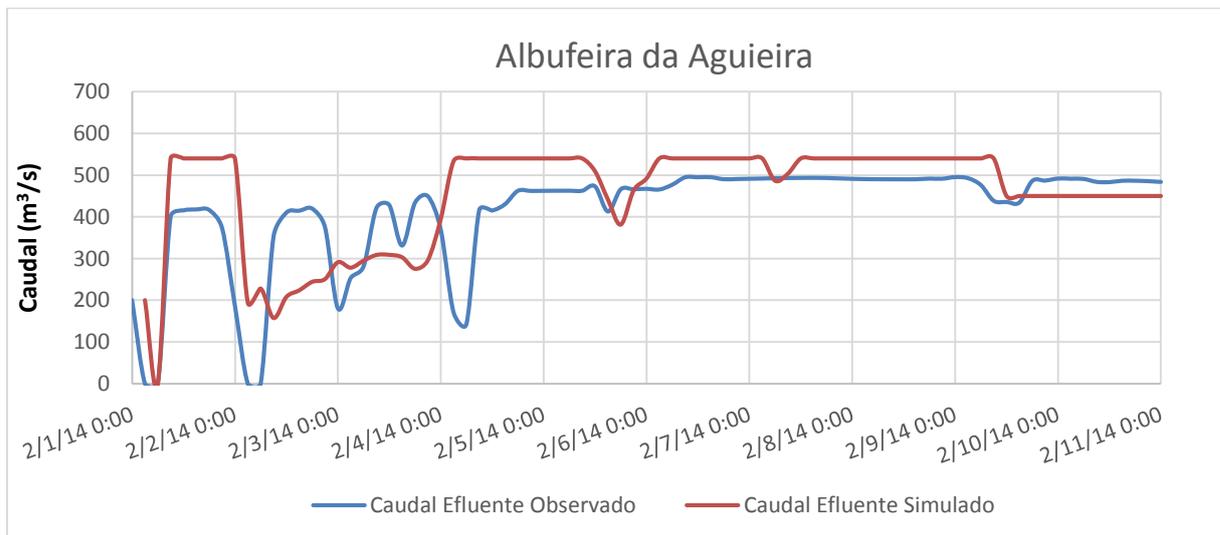


Figura 26 Caudal efluente da albufeira da Agueira entre os dias 2 e 12 de Fevereiro

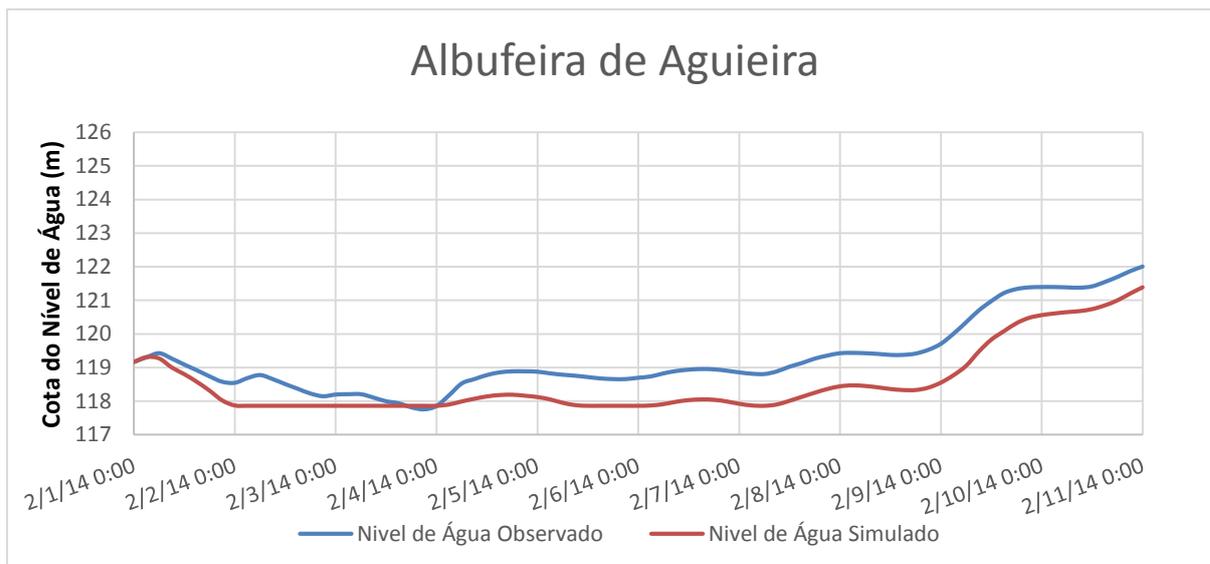


Figura 27 Nível de água da albufeira da Aguieira entre os dias 2 e 12 de Fevereiro

5.2.3. ALBUFEIRA DE RAIVA

O comportamento da albufeira de Raiva depende da albufeira da Aguieira. A albufeira de Raiva tem uma capacidade de armazenamento de cerca de 0,6% da capacidade da Aguieira, esta capacidade de armazenamento reduzida vai levar a que qualquer variação de caudal provoque a variação do nível de água de um modo mais notório que nas restantes albufeiras do sistema. Também devido à sua reduzida capacidade de armazenamento, o correspondente caudal efluente vai ser semelhante ao afluyente e, portanto, ao efluente da Aguieira. Portanto as grandes diferenças entre os caudais efluentes e as cotas de nível de água de Raiva observados e simulados, vão ser causados pelo ocorrido na Aguieira.

Essas disparidades são sentidas sobretudo na evolução do nível de água, onde se encontram diferenças entre o que foi observado e simulado. Entretanto, poderá desde logo salientar-se o menor significado dessas diferenças de nível, tendo em conta a baixa capacidade de armazenamento da albufeira de Raiva, o que implica que as correspondentes diferenças de volumes armazenados sejam reduzidas.

Assim, as diferenças de caudal efluente na albufeira da Aguieira, entre o caudal observado e o simulado e a reduzida capacidade de armazenamento de Raiva (ver subcapítulo 3.5.) permitem justificar as diferenças encontradas a nível de caudais (figura 28) e, principalmente, a nível da evolução do nível de água (figura 29).

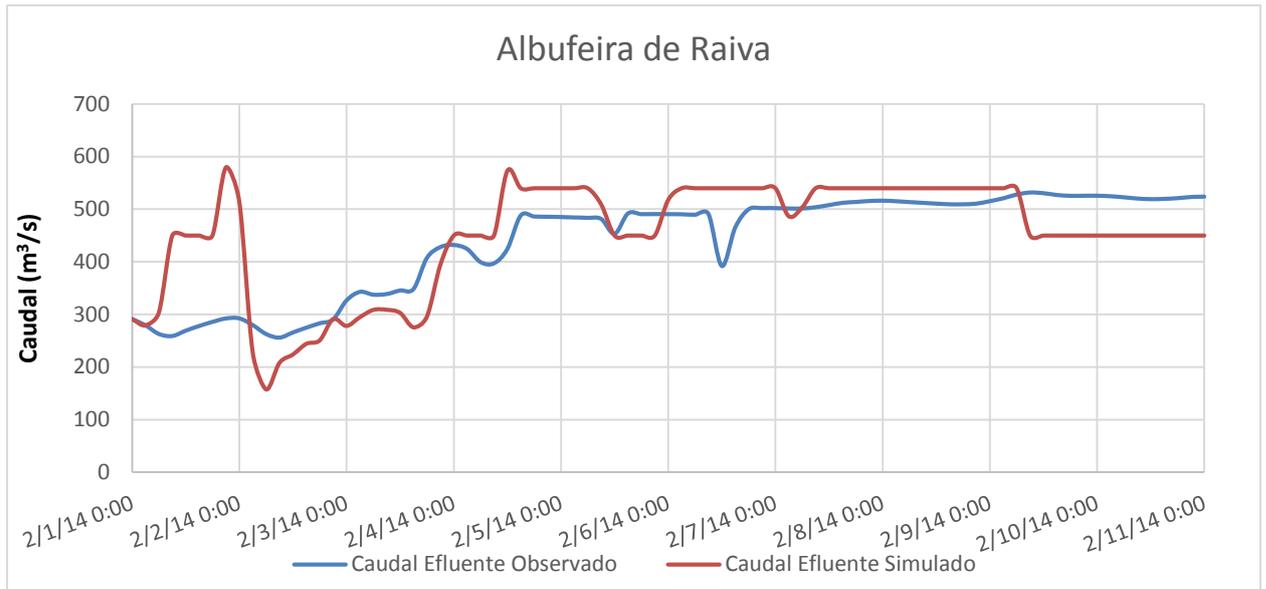


Figura 28 Caudal efluente na albufeira de Raiva entre os dias 2 e 12 de Fevereiro

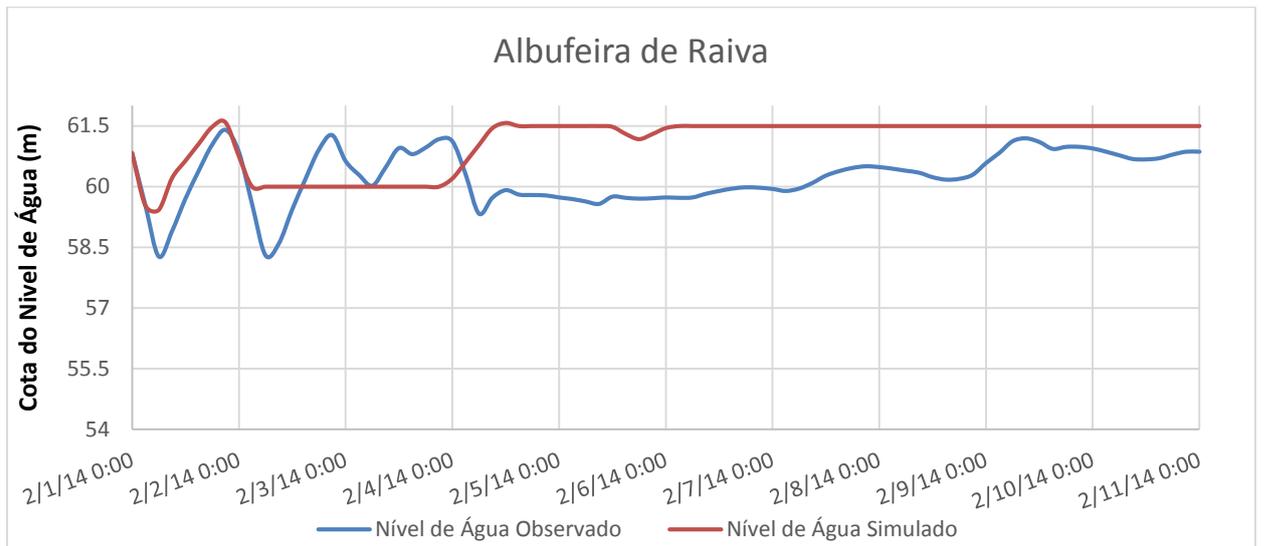


Figura 29 Nível de água na albufeira de Raiva entre os dias 2 e 12 de Fevereiro

5.3. CONCLUSÃO

Na albufeira de Fronhas foi possível analisar e deduzir os caudais efluentes para os níveis inferiores a 130,5m, onde se observou a falta de informação ou limitações do caudal efluente comparado com o caudal efluente observado. Nas albufeiras de Raiva houve diferenças observáveis que se deveram às diferenças ocorridas na albufeira da Agueira. Nesta última pode-se concluir que, relativamente ao que ocorre abaixo da cota 119,35m, não existem dados de limitação de caudais efluentes, o que levou às diferenças observadas (Figura 26).

6

ESTUDO DE REGRAS PROPOSTAS

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo vão ser simuladas e analisadas novas regras de exploração de albufeiras, sugeridas no decorrer deste trabalho (ver subcapítulo 6.2.). O objetivo da formação de novas regras é melhorar o comportamento do sistema de três albufeiras (Aguieira, Fronhas e Raiva) no controlo de cheia para Coimbra e o baixo Mondego. Utilizando os dois eventos escolhidos, esperou-se obter um conjunto de regras de operação cujo comportamento fosse satisfatório para os dois eventos de magnitude diferente, tendo em consideração a manutenção de uma cota de nível de água suficiente para o cumprimento de outras finalidades das albufeiras. Com esse fim, apresentam-se os resultados das simulações dos eventos de Fevereiro de 2014 e Janeiro de 2001. Para o primeiro evento foram simuladas quatro alternativas e no segundo evento só foi simulada uma alternativa (ver subcapítulo 4.2.). Os resultados da simulação do primeiro evento foram analisados (ver subcapítulo 6.3.) e mais tarde comparados com as regras de operação em vigor (ver subcapítulo 6.5.1.1.). Os resultados do segundo evento foram analisados (ver subcapítulo 6.4.) e mais tarde comparados com as regras em vigor (ver subcapítulo 6.5.1.2.) e com os dados de caudal observados (ver subcapítulo 6.5.2.).

6.2. REGRAS DE EXPLORAÇÃO PROPOSTAS

Neste subcapítulo são apresentadas as regras de exploração sugeridas no âmbito deste trabalho. É simulada a sua aplicação com base em dois eventos, de Fevereiro de 2014 e Janeiro de 2001 (ver 6.3 e 6.4., respetivamente). As regras propostas são especificadas ao período entre 15 de Outubro a 31 de Março, período do ano com maior probabilidade de ocorrência de cheias.

Foram ponderadas novas possibilidades de regras de operação, usando a albufeira da Aguieira como principal reservatório de amortecimento do caudal de cheia, devido à sua elevada capacidade de armazenamento quando comparada com as outras duas albufeiras do sistema, e gerindo a albufeira de Raiva de acordo com a da Aguieira, devido à limitada capacidade de armazenamento que esta última albufeira apresenta. Em relação à albufeira de Fronhas, procurou-se utilizar regras que explorassem o transvase para a Albufeira da Aguieira e que, no caso de caudais afluentes mais elevados, utilizassem a capacidade de armazenamento da mesma, limitando o caudal efluente, mantendo a atual definição de níveis de defesa de obra. As regras sugeridas são as apresentadas nos subcapítulos 6.2.1., 6.2.2. e 6.2.3..

6.2.1. ALBUFEIRA DA AGUEIRA

Para a Agueira foram sugeridos, no âmbito deste trabalho, os seguintes níveis de água:

- NMC -126 m (Nível de Máxima Cheia), mantendo-se igual ao atual;
- NmE – 117 m (Nível mínimo de Exploração), alterando o atual que se encontrava na cota 110 m;
- NDO – 124,5 m (Nível de Defesa de Obra), alterando o atual que se encontrava na cota 123,5 m;
- O NPA (Nível de Pleno Armazenamento), foi alterado, e é dependente do caudal afluente instantâneo, sendo que, para um caudal até 190 m³/s, o NPA corresponde à cota 119 m, e quando o caudal é superior a 190 m³/s, o NPA corresponde à cota 117,5 m.

As regras para descarga de caudais foram definidas de acordo com o nível atual da albufeira (pontos 1 a 4, abaixo). Nos (3) níveis de análise correspondentes aos pontos 2 a 4, abaixo, são usados três controlos de caudal a jusante o complemento para 1200 m³/s e dois outros controlos. O complemento, como já definido em 3.5., é a diferença entre o caudal que se pretende limitar para um determinado ponto a jusante das albufeiras, estabelecido pelo utilizador, e o caudal afluente não regularizado a esse ponto. Essa diferença, ou complemento, corresponde ao valor máximo do caudal que deverá ser descarregado por todas as albufeiras. O software – HEC-ResSim -, através de iterações, analisa o caudal total afluente ao ponto de controlo (regularizado e não regularizado) e, com base nessa informação, condiciona o volume que deve ser descarregado de modo a limitar o caudal afluente a esse ponto de controlo de acordo com o valor limite definido. Neste caso iremos usar como ponto de controlo Coimbra e o complemento vai sempre limitar o caudal máximo nesse local. O primeiro complemento limita em Coimbra caudais afluentes de 800 m³/s, de modo a tentar evitar cheias na cidade de Coimbra, ao longo das margens do Mondego. O segundo complemento limita em Coimbra caudais de 1000 m³/s, servindo como um complemento intermédio entre 800 m³/s e 1200 m³/s de modo a tentar minimizar as consequências de se ter ultrapassado os 800 m³/s e baixar a probabilidade de se atingir os 1200 m³/s.

1. Quando o nível de água na albufeira estiver abaixo de 119 m consideram-se regras distintas para 3 situações:
 - Se o caudal afluente se encontrar entre os valores 190 m³/s e 250 m³/s e o nível da albufeira for superior a 117,5 m, o caudal descarregado é o caudal máximo de turbinamento da central hidroelétrica, que é igual a 540 m³/s. Este valor irá permitir esvaziar a albufeira até à cota 117,5 m. Os valores de caudal afluente definidos foram definidos com base na observação temporal dos caudais, que, habitualmente, antecedem eventos de cheia;
 - Se o caudal for superior a 300 m³/s, o caudal efluente é igual a 300 m³/s;
 - Entre 250 m³/s e 300 m³/s o caudal efluente é igual ao afluente. Tal, de modo a manter a cota obtida através do descarregamento inicial da albufeira através das turbinas, provocado pela operação descrita no primeiro ponto;
 - Quando o caudal afluente se encontra abaixo de 190 m³/s não há restrições a nível de caudal descarregado e/ou turbinado.

Em todos os casos referidos, a descarga deve ser efetuada pela central hidroelétrica, mantendo-se o descarregador de cheia fechado.

2. Quando o nível de água se encontrar entre os níveis 119m e 121m, o caudal descarregado mínimo é igual a 400m³/s e o caudal máximo é o complemento para Coimbra de 800m³/s.

3. Se o nível de água se encontrar entre 121m e 124,5m, o caudal mínimo descarregado é 500m³/s e o caudal máximo é o complemento para Coimbra de 1000m³/s.
4. Quando o nível de água atinge a cota 124,5m, correspondente ao NDO, o caudal é aumentado de acordo com o nível de água. O incremento horário de caudal segue a regra da tabela 5. As correspondentes regras, limites e valores da Tabela 5 são também aplicáveis em termos de decrementos do nível de água, para a limitação do decréscimo do caudal de acordo com o nível de água, quando o mesmo se encontra a cota superior a 124,5m.

Tabela 5 Limite do aumento/diminuição do caudal descarregado, de acordo com a cota do nível de água na albufeira da Agueira.

Cota do nível de água na Agueira (m)	Limite de aumento/diminuição horário (m ³ /s/hr)
124.5	50.0
125.0	75.0
125.2	90.0
125.4	115.0
125.5	125.0
125.6	150.0
125.8	180.0
126.0	350.0

Para a situação do nível de água estabilizar, fixa-se um caudal mínimo igual a 700 m³/s e o caudal máximo de acordo com o complemento para 1200 m³/s para Coimbra, sendo a última a regra com menor prioridade em relação às restantes regras sugeridas para o 4 nível de análise.

6.2.2. ALBUFEIRA DE RAIVA

Na albufeira de Raiva foram definidos os seguintes níveis de água (idênticos aos atuais, 3.5.):

- NMC – 61,5m;
- NPA – 60m;
- NmE – 54m.

As regras de operação na albufeira de Raiva funcionam de acordo com o nível de água na albufeira da Agueira. Quando o nível de água na Agueira é menor ou igual a 119m o caudal mínimo a descarregar será 100m³/s e o máximo será o complemento para Coimbra de 800m³/s. Se o nível de água na Agueira é maior que 119m e menor que 121m então o caudal mínimo a descarregar é 400m³/s e o máximo o complemento para 800m³/s. Quando o nível de água na Agueira é maior ou igual a 121 e menor que 124,5m o caudal mínimo a descarregar é igual a 500m³/s e o caudal máximo será igual ao complemento para Coimbra de 1000m³/s.

Se a cota do nível de água na Agueira é superior a 124,5m o caudal efluente deve ser igual ao afluente.

No caso de a cota do nível de água na Raiva atingir a cota 61,4m o caudal efluente deve respeitar as regras de descarregamento indicadas na tabela 6.

Tabela 6 Regras de descarga do aproveitamento da Raiva para mitigação do risco de ultrapassar o NMC

Caudal Afluente em Raiva (m ³ /s)	Caudal Efluente em Raiva (m ³ /s)
0	400
400	400
800	800
1500	1500

6.2.3. ALBUFEIRA DE FRONHAS

Na albufeira de Fronhas foram definidos os seguintes níveis de água (idênticos aos níveis em vigor):

- NPA – 120m;
- NMC – 140m;
- NDO1 – 130,5m;
- NDO2 – 136,5m;
- NmE – 117m.

Quando a cota do nível de água na albufeira de Fronhas é menor que 130,5m as regras de descarga pelo descarregador de fundo, são dependentes do caudal afluente e seguem as regras indicadas na tabela 7.

Tabela 7 Albufeira de Fronhas: regras de abertura do descarregador de fundo de acordo com o caudal afluente

Caudal Afluente m ³ /s	Caudal descarregado m ³ /s.
0.0-40.0	20.0
40.0-80.0	50.0
80.0-150	100.0
150.0-180.0	120.0
180.0-200.0	140.0
200.0-250.0	160.0
250.0-300.0	200.0
300.0-400.00	220.0
>400.0	250.0

O caudal descarregado também vai depender da cota do nível de água da albufeira. Dependendo da sua curva de vazão pode não ser possível descarregar o caudal pretendido, sendo descarregado o caudal máximo limitado pela curva de vazão do descarregador de fundo. Uma situação favorável porque usa a capacidade de armazenamento da albufeira, que é o objetivo pretendido.

Recorde-se que quando a cota é menor que 130,5 m o descarregador de meio fundo se encontra fechado.

Quando a cota do nível da água atinge 130,5 m (NDO1), procede-se à abertura total da comporta referente ao descarregador de fundo, ocorrendo a descarga máxima do mesmo, 250 m³/s. A esta cota mantem-se o descarregador de meio fundo fechado.

Se atingida a cota do nível da água 136,5 m (NDO2), deve-se manter a abertura do descarregador de fundo e proceder-se à abertura completa da comporta do descarregador de meio fundo. Para esta cota o descarregador de meio fundo efetua a sua descarga máxima, aproximadamente 250m³/s, o que permite, a partir desta cota, uma descarga conjunta de 500 m³/s.

O transvase da albufeira de Fronhas para a albufeira da Aguieira é realizado graviticamente. Como tal devem ser tidas em consideração as cotas do nível de água de ambas as albufeiras. Se a cota do nível da água da Aguieira for igual ou superior a de Fronhas, então procede-se ao fecho das comportas de modo a evitar que o caudal se desloque no sentido Aguieira – Fronhas, oposto ao desejado.

No caso da análise do evento de 2014 para a quarta alternativa (6.3.3.5.) e para o evento de 2001 (6.4.2.4.) foi sugerida uma regra diferente da indicada quando o nível de água na albufeira de Fronhas se encontra a uma cota inferior a 130,5 m. O caudal descarregado foi alterado, passando a ser o apresentado na tabela 8.

Tabela 8 Albufeira de Fronhas: alteração às regras de abertura do descarregador de fundo de acordo com o caudal afluente

Caudal Afluente m ³ /s	Caudal descarregado m ³ /s.
0.0-40.0	20.0
40.0-80.0	50.0
80.0-120	100.0
120.0-150	140.0
150.0-180.0	150.0
180.0-200.0	160.0
200.0-250.0	180.0
250.0-300.0	200.0
300.0-400.00	220.0
>400.0	250.0

6.3. EVENTO DE FEVEREIRO DE 2014

Neste subcapítulo são apresentados os resultados para a análise do evento de Fevereiro de 2014 (ver 5.2.). Para este evento são apresentados os resultados obtidos, a nível de caudais efluentes, cotas do nível de água e da discriminação do caudal efluente (dependendo do órgão em que a descarga foi efetuada) por albufeira e para cada alternativa estudada.

Como referido em 4.1., os valores dos caudais afluentes utilizados nesta análise corresponderam aos percentis 25, 50 e 75 relativos ao conjunto de resultados da simulação hidrológica utilizando 51 previsões de precipitação do ECMWF, com alcance temporal de 10 dias. Foram utilizados também os caudais obtidos a partir da precipitação observada nas sub-bacias relativas às albufeiras da Agueira e de Fronhas. Foram, portanto, utilizadas as 4 alternativas definidas no subcapítulo 4.2..

Os dados de entrada utilizados para as albufeiras correspondem aos dados observados no período anterior ao início do evento simulado, os mesmos dados utilizados no estudo realizado no capítulo 4.

6.3.1. AGUEIRA

6.3.1.1. Caudais Afluentes

Analisando a Figura 30, que apresenta os vários dados referentes ao caudal afluente à Agueira, previstos e observado, atenta-se que a previsão de caudal que mais se aproximou do hidrograma observado foi a referente ao percentil 75. O volume afluente no percentil 75 é 5% inferior ao observado, enquanto no percentil 50 e no 25, o volume previsto é 26 e 40% menor que o observado, respetivamente. Devido às discrepâncias entre os caudais previstos e o observado, também se simulou com os mesmos, além dos previstos. Como se analisará mais à frente, foi nos últimos caudais de pico que houve maior dificuldade em amortecer o caudal de cheia afluente para as últimas duas alternativas (percentil 75 e caudal observado) enquanto nas duas primeiras (percentil 25 e 50) foi obtido um bom controlo de caudal de cheia com maior facilidade.

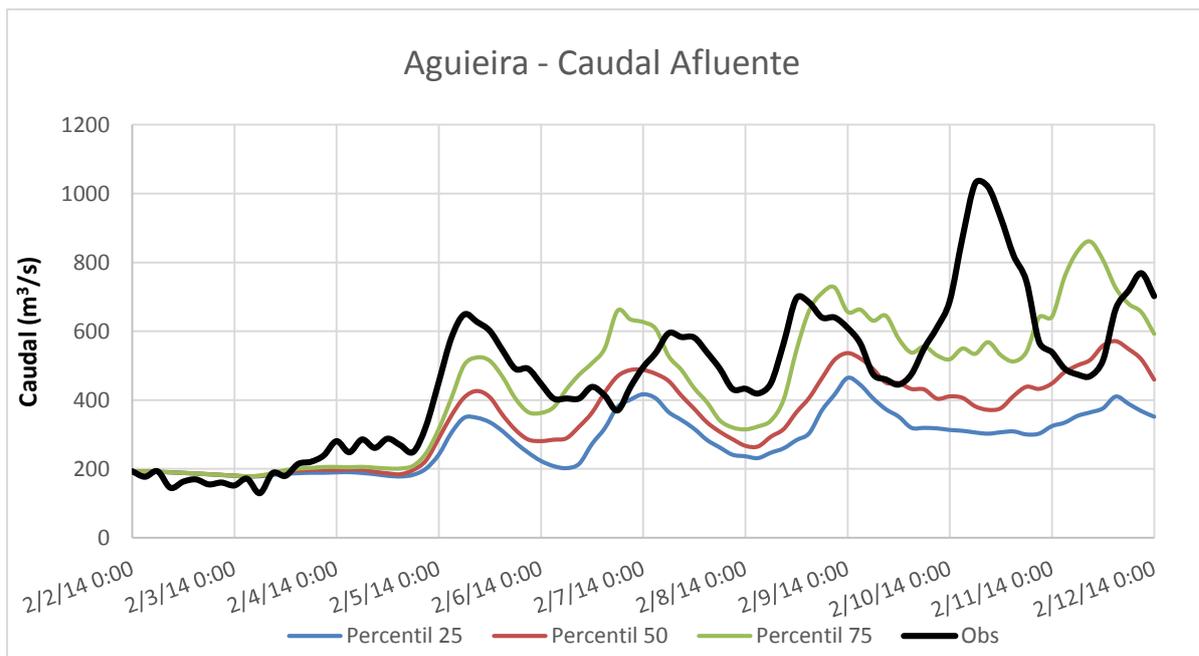


Figura 30 Caudais afluentes à albufeira da Aguieira entre os dias 2 e 12 de Fevereiro

6.3.1.2. Caudais Efluentes – Alternativa 1

Nas Figuras 31 e 32 apresentam-se os resultados das simulações para a primeira alternativa estudada, para os caudais afluentes, referentes ao percentil 25.

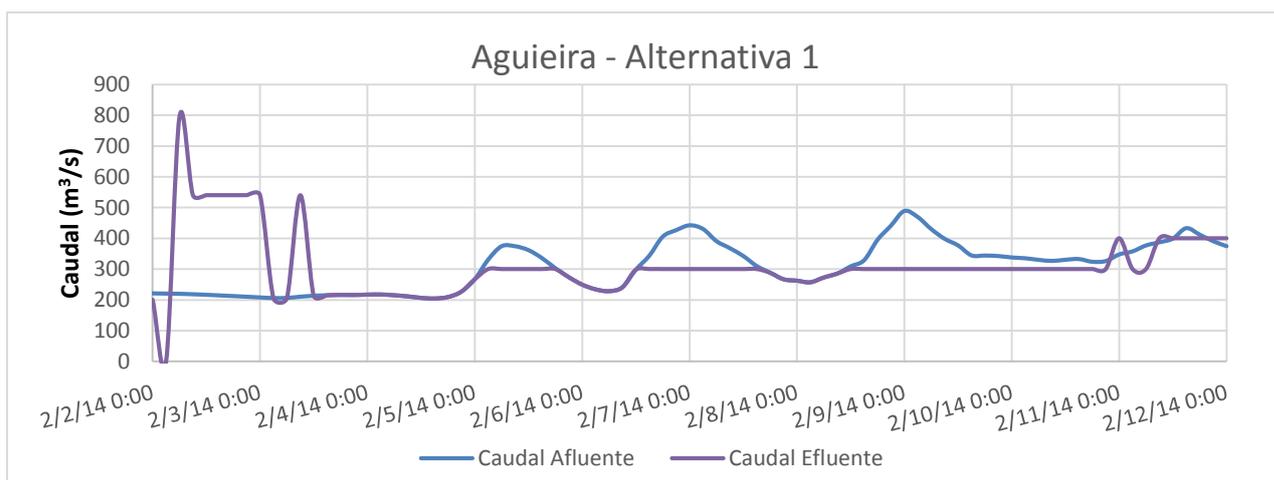


Figura 31 Alternativa 1 (Percentil 25): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Aguieira no período de 2 e 12 de Fevereiro



Figura 32 Alternativa 1 (Percentil 25): Nível de água na albufeira da Aguieira no período de 2 e 12 de Fevereiro

Considerando as previsões relativas ao percentil 25, os valores dos caudais afluentes são relativamente reduzidos, portanto o amortecimento dos picos de cheia não implica o uso de um volume significativo da capacidade de armazenamento da albufeira.

Utilizando as regras propostas em 6.2., verificou-se que o caudal efluente resulta maioritariamente, num caudal constante de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, e no fim do evento igual a $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Isto ocorre pois o caudal afluente é um caudal reduzido, o que permite que, com um caudal efluente igual a $300 \text{ m}^3/\text{s}$, o nível de água só ultrapasse a cota 119m no fim do evento, quando ocorre o aumento do caudal afluente para $400 \text{ m}^3/\text{s}$, devido à alteração de regras, conseqüente devido à alteração de nível de água. No início do evento é realizada a descarga da albufeira, justificando os caudais elevados de $794,46 \text{ m}^3/\text{s}$ e $540 \text{ m}^3/\text{s}$.

O modelo faz uma análise do nível de água e do caudal afluente de modo a definir o caudal efluente. Na primeira descarga mais elevada, entre o início do dia 2 e o fim do dia 3, o nível de água encontra-se ligeiramente superior a 119,0 m o que implica o respeito das regras referentes ao correspondente patamar (superior a 119 m mas inferior a 121 m); devido ao baixo caudal natural afluente a Coimbra e ao amortecimento do caudal em Raiva, foi possível efetuar uma maior descarga, respeitando o complemento para $800 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondente a um caudal efluente de $794,46 \text{ m}^3/\text{s}$, que levou à diminuição do nível de água para um valor inferior a 119,0m. Após esta diminuição o modelo começa a respeitar as regras de descarregamento referentes ao nível de água à cota 119 m, mantendo se um caudal turbinado constante de $540 \text{ m}^3/\text{s}$.

No início do evento, ocorre um caudal efluente de $0 \text{ m}^3/\text{s}$ e um conseqüente aumento da cota do nível de água, valores que decorrem das condições iniciais fornecidas ao modelo e que se referem aos valores observados. Sendo as condições iniciais idênticas nas quatro alternativas, isto vai acontecer em todas as alternativas estudadas.

Após o caudal afluente ultrapassar os $250 \text{ m}^3/\text{s}$, o caudal efluente passa a ser igual ao afluente, até este atingir $300 \text{ m}^3/\text{s}$; a partir deste valor o caudal efluente mantém-se constante e igual a $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Sempre que o caudal afluente se encontra inferior a $300 \text{ m}^3/\text{s}$, o efluente volta a ser igual ao afluente, o que permite nestes períodos manter o nível de água.

Como se pode observar na figura 32, durante o dia 11 de Fevereiro, a cota do nível de água ultrapassa os 119m, aumentando o caudal mínimo de 300 m³/s para 400 m³/s, caudal que é turbinado até ao final do evento.

Durante este evento só foi utilizado o descarregador de cheia durante o período de 3 horas em que se descarregaram 794.46 m³/s, sendo que no restante período correspondente ao evento simulado o caudal nunca foi superior a 540 m³/s, o que permitiu que o caudal efluente fosse sempre turbinado e nunca houvesse necessidade de abertura do descarregador de cheia.

6.3.1.3. Caudais Efluentes – Alternativa 2

Nas Figuras 33 e 34 apresentam-se os resultados das simulações para a segunda alternativa estudada, com os caudais afluentes referentes ao percentil 50.

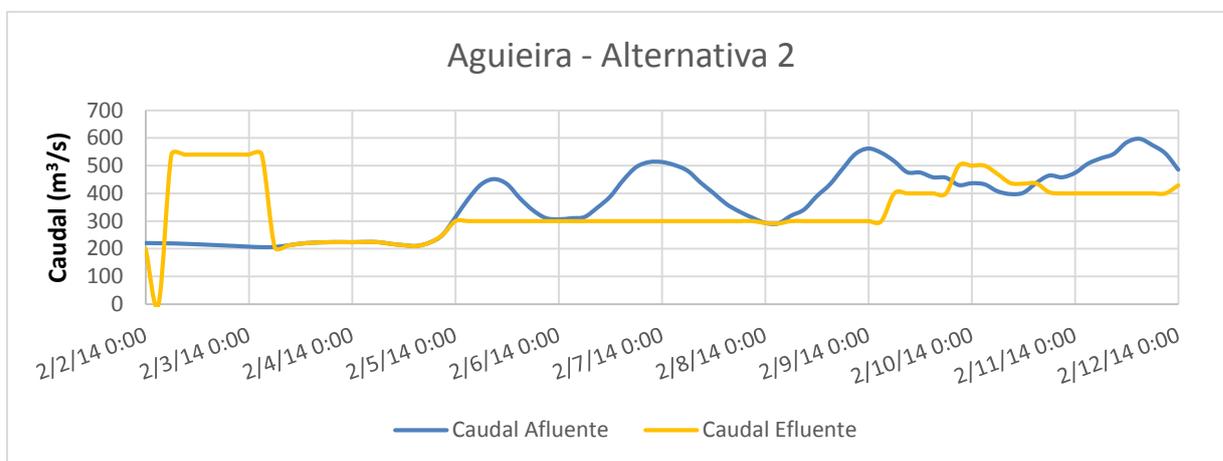


Figura 33 Alternativa 2 (Percentil 50): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Aguieira no período de 2 e 12 de Fevereiro



Figura 34 Alternativa 2 (Percentil 50): Nível de água na albufeira da Aguieira no período de 2 e 12 de Fevereiro

Considerando as previsões relativas ao percentil 50, assistimos a caudais afluentes mais elevados que na alternativa 1, com caudais de pico entre os 500 m³/s e os 600 m³/s. No início do evento, devido ao caudal efluente e à cota da albufeira, efetuou-se a descarga da albufeira, baixando a cota da albufeira de 119,17 m para 117,46 m. Após atingida a cota de 117,46m, o caudal efluente passou a ser igual ao afluente, mantendo o nível de água com a cota constante e igual a 117,46m.

Quando se verificou um aumento do caudal afluente, ainda com o nível de água a uma cota inferior a 119m, o caudal efluente aumentou para 300 m³/s. Este caudal mantém-se constante até ao início do dia 8 de Fevereiro, no qual se ultrapassou a cota do nível de água 119m, e portanto o caudal mínimo passou de 300 m³/s para 400 m³/s. Verificando-se este caudal mínimo até ao fim do evento.

No início do dia 9 de Fevereiro, houve um aumento do caudal efluente para 500 m³/s. Este caudal ocorreu respeitando a regra do complemento para 800 m³/s para Coimbra, voltando a baixar para o mínimo. Este aumento para 500m³/s ocorre devido à uma diminuição do caudal natural afluente a Coimbra, permitindo aumentar o efluente, sem ultrapassar o limite de 800 m³/s em Coimbra.

O nível de água na Agueira, na figura 35, demonstra o que foi discutido acerca dos caudais efluentes. Inicialmente temos o decréscimo devido à descarga inicial. No resto do evento verificamos uma tendência para o nível de água aumentar.

6.3.1.4. Caudais Efluentes – Alternativa 3

Nas Figuras 35 e 36 apresentam-se os resultados das simulações para a primeira alternativa estudada, com os caudais afluentes referentes ao percentil 75.

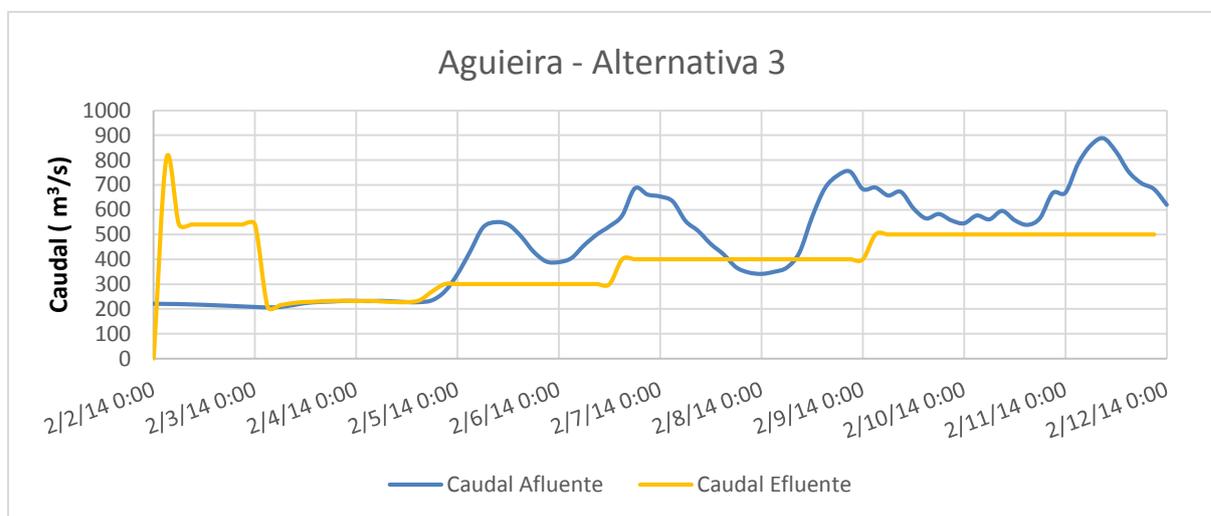


Figura 35 Alternativa 3 (Percentil 75): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Agueira no período de 2 e 12 de Fevereiro

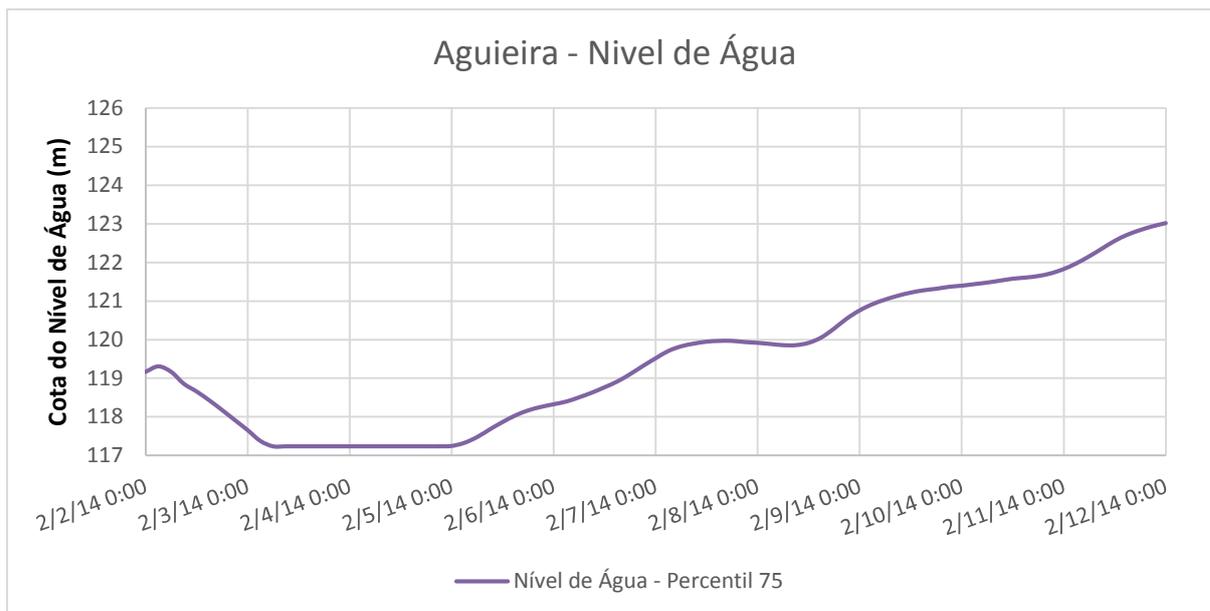


Figura 36 Alternativa 3 (Percentil 75): Nível de água na albufeira da Aguieira no período de 2 e 12 de Fevereiro

No percentil 75, o caudal afluente apresenta caudais de pico mais elevados, sendo o maior afluente superior a $800 \text{ m}^3/\text{s}$.

O comportamento inicial será semelhante ao ocorrido nos restantes percentis com uma descarga inicial em que a cota do nível de água decresce até à cota 117,37 m, seguida de um período em que o caudal efluente é igual ao caudal afluente.

Como a cota inicial, do nível de água, se encontra acima de 119m então a descarga inicial vai ser superior, porque as regras neste período dizem respeito ao patamar entre as cotas 119m e 121m. Com uso do amortecimento da albufeira de Raiva, pode-se descarregar $800 \text{ m}^3/\text{s}$ respeitando o complemento para $800 \text{ m}^3/\text{s}$ para Coimbra. Sendo esta descarga realizada pelas turbinas da central hidroelétrica mais o descarregador de cheia, que descarrega a diferença entre o máximo turbinável e o efluente total. Atingida a cota 119m, o descarregamento passa a ser efetuado somente pelas turbinas.

Até ao fim do dia 4 e início do dia 5 o caudal mantém-se igual ao afluente, nessa altura, o afluente ultrapassa os $300 \text{ m}^3/\text{s}$ e, respeitando as regras, o caudal efluente passa a ser $300 \text{ m}^3/\text{s}$ até atingir o nível de água atingir a cota 119m. Isto acontece no dia 6, aumentando o caudal mínimo para $400 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal que se mantém constante até ao dia 9, quando o nível de água ultrapassa a cota 121m. Ultrapassada a cota 121m, o caudal mínimo passa a ser $500 \text{ m}^3/\text{s}$ mantendo-se este caudal até ao fim do evento, em que a cota do nível de água atinge os 123m.

Estes caudais mínimos não vão conseguir impedir a ocorrência de cheias como se vai verificar no subcapítulo 6.5..

6.3.1.5. Caudais Efluentes – Alternativa 4

Nas Figuras 37 e 38 apresentam-se os resultados das simulações para a primeira alternativa estudada, com os caudais afluentes referentes ao percentil 50 e aos caudais obtidos através da precipitação observada.

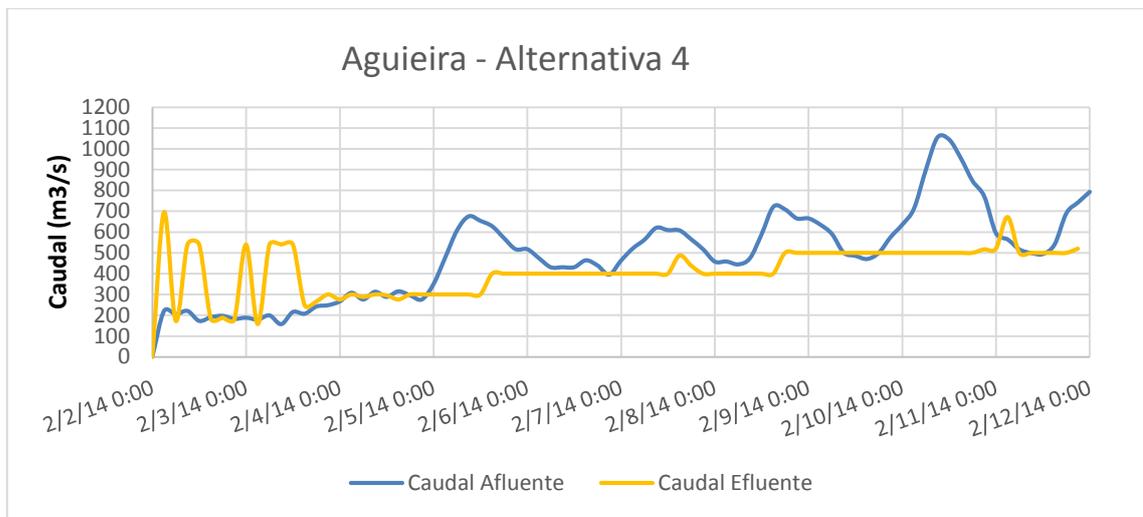


Figura 37 Alternativa 4 (Caudal Observado): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Aguieira no período de 2 e 12 de Fevereiro

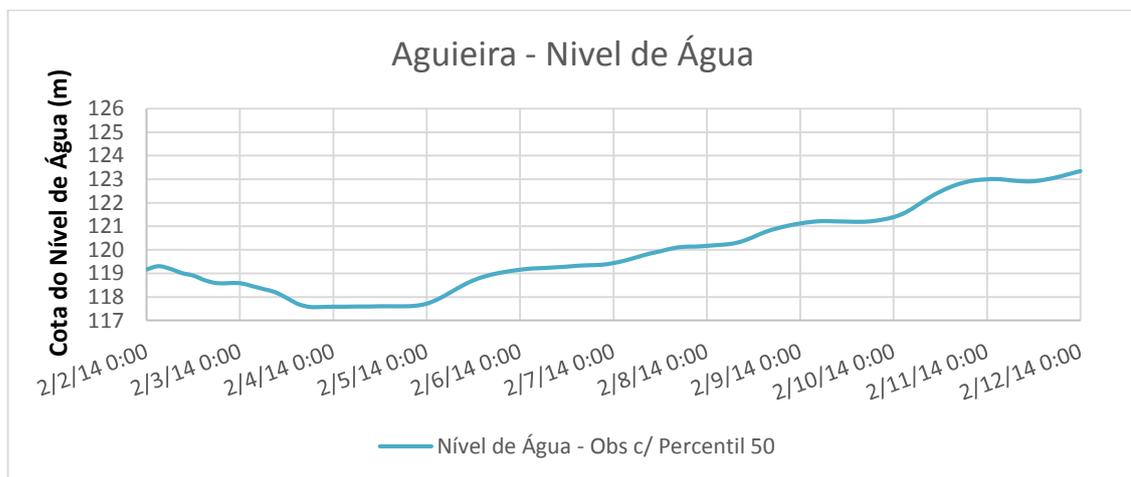


Figura 38 Alternativa 4 (Caudal Observado): Nível de água na albufeira da Aguieira no período de 2 e 12 de Fevereiro

Na quarta alternativa a descarga inicial é inconstante devido aos caudais afluentes também o serem. O caudal afluente inicial encontra-se inferior a $190 \text{ m}^3/\text{s}$ durante alguns períodos o que não permite que a descarga inicial, com o objetivo de baixar o nível da albufeira, seja constante. Apesar de não ser constante o caudal efluente, a cota mínima atingida é igual a $117,58 \text{ m}$. Após atingida esta cota o caudal efluente mantém-se igual ao afluente. Quando o caudal afluente ultrapassa os $300 \text{ m}^3/\text{s}$, o caudal efluente passa a ser o mínimo para a cota inferior a 119 m , $300 \text{ m}^3/\text{s}$.

Devido ao grande caudal inicial, quando comparado com $300 \text{ m}^3/\text{s}$, o nível de água rapidamente ultrapassa a cota 119 m . Ao ultrapassar esta cota o caudal mínimo efluente passa a ser $400 \text{ m}^3/\text{s}$. O caudal efluente só é superior a $400 \text{ m}^3/\text{s}$ durante um período, este aumento respeita a regra do complemento para $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Como os caudais afluentes são sempre superiores ao caudal mínimo, então a cota tem sempre tendência para aumentar, até atingir e ultrapassar a cota 121 m , no fim do dia 7.

Quando o caudal atinge e ultrapassa a cota 121 m , então o caudal mínimo efluente passa a ser igual a $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Este caudal mínimo a esta cota permite, durante o maior caudal de pico, amortecer o caudal

de 1055,4 m³/s para 500 m³/s. Após este caudal de pico, a albufeira da Aguieira aumenta ligeiramente o seu caudal efluente até 672,51 m³/s durante um período de 3 horas, aproveitando uma diminuição do caudal afluente a Coimbra para descarregar mais e consequentemente diminuir ligeiramente a cota do nível de água, este caudal através o complemento para 1000 m³/s respeita o limite de 1200 m³/s (o valor definido como efluente será o menor possível de modo a tentar cumprir o limite de 1000 m³/s, mas quando ultrapassado, como se tenta diminuir-lo, cumpre o de 1200 m³/s), complemento definido para quando a cota é superior a 121m e inferior a 124,5m. Durante o período em que o nível de água ultrapassa a cota 121m, a alteração das regras provoca um aumento do caudal efluente e uma mudança do complemento em utilização, levando a que haja alteração no caudal afluente a Coimbra, que ultrapassa o limite de 800 m³/s mas cumpre o limite de 1200 m³/s.

6.3.2. RAIVA

6.3.2.1. Caudais Afluentes

No gráfico da Figura 39 pode-se observar o caudal previsto afluente à sub-bacia da albufeira da Raiva, área localizada a jusante da albufeira da Aguieira e a montante da albufeira da Raiva. O caudal afluente à albufeira da Raiva corresponde á soma desse valor com o caudal efluente da albufeira da Aguieira, representado graficamente na figura 40.

A comparação das Figuras 39 e 40 permite constatar que o caudal correspondente à referida sub-bacia é pouco significativo quando comparado com a totalidade do caudal afluente à albufeira de Raiva.

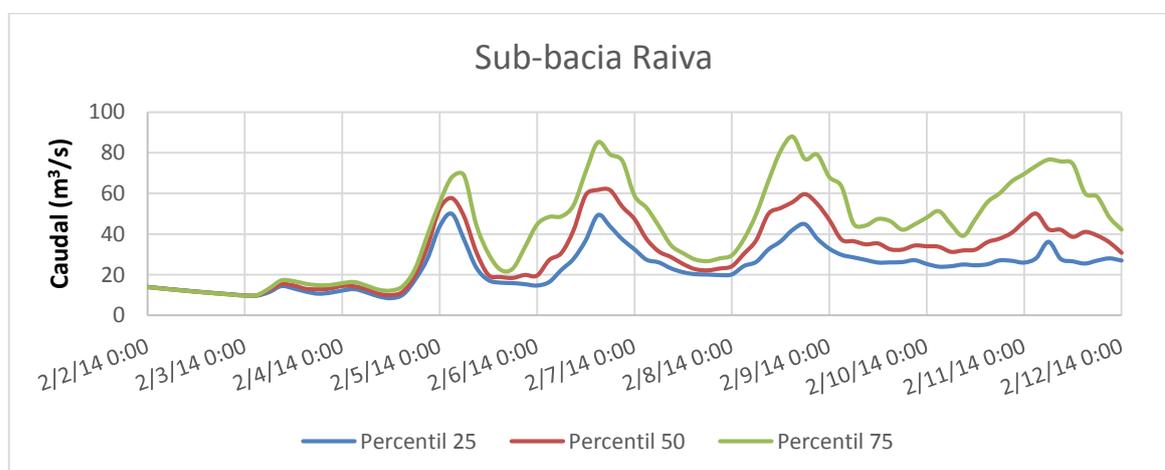


Figura 39 Caudais afluentes para a albufeira de Raiva correspondentes à sub-bacia entre as barragens da Aguieira e da Raiva, no período de 2 e 12 de Fevereiro.

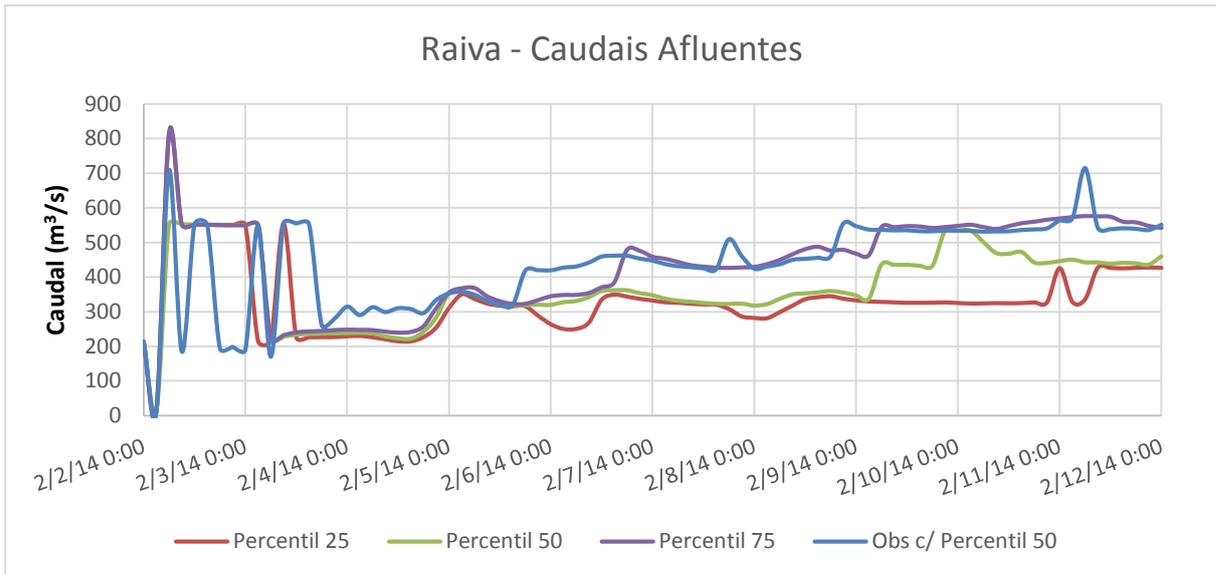


Figura 40 Caudais afluentes totais à albufeira de Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

6.3.2.2. Caudais Efluentes – Alternativa 1

Nas Figuras 41 e 42 apresentam-se os resultados das simulações para a primeira alternativa estudada, para os caudais afluentes referentes ao percentil 25. Na figura 43 apresenta-se a discriminação do caudal efluente, dependendo do órgão de descarga que foi utilizado.

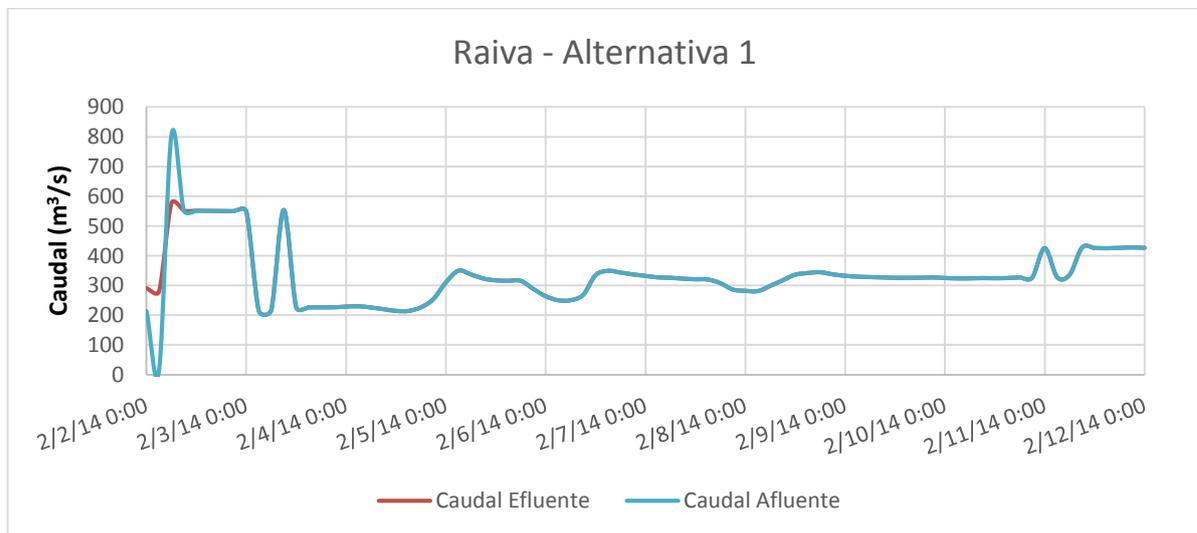


Figura 41 Alternativa 1 (Percentil 25): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

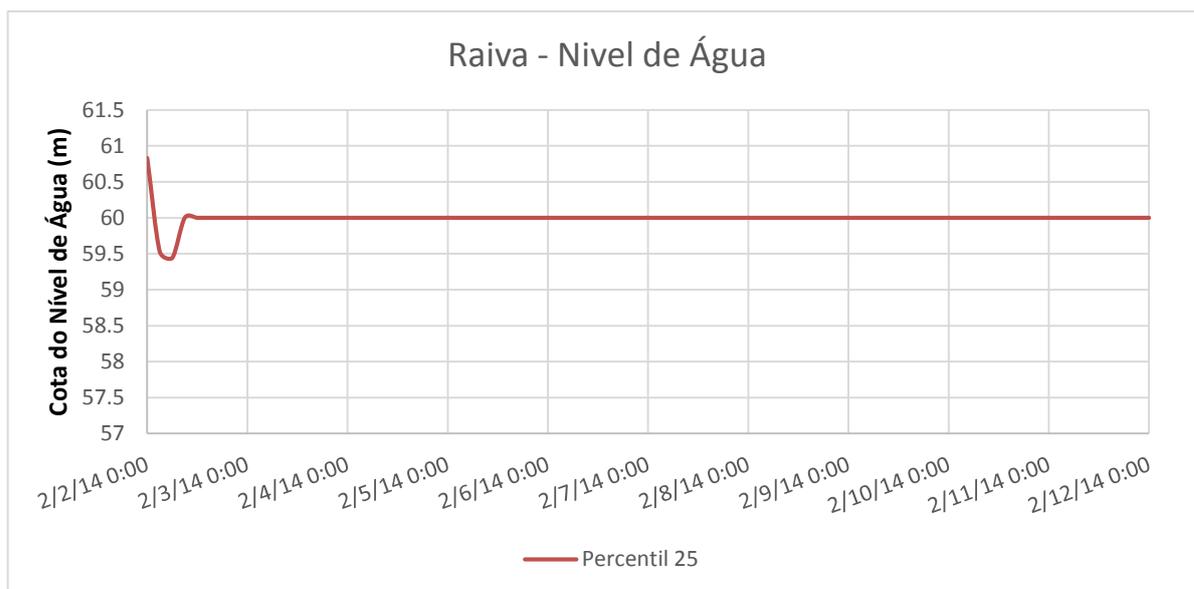


Figura 42 Alternativa 2 (Percentil 50): Nível de água na albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

O caudal efluente da Raiva vai ser genericamente idêntico ao caudal afluente, devido à reduzida contribuição da sub-bacia drenante específica da Raiva. No início do evento, no dia 2 de Fevereiro às 16:00 horas, o caudal efluente da Aguieira é amortecido, permitindo à Aguieira ter um caudal de esvaziamento inicial maior; este amortecimento permitiu uma descarga mais elevada respeitando a regra do complemento para $800 \text{ m}^3/\text{s}$ para Coimbra em ambas as albufeiras. Durante o restante período do evento o caudal efluente é sempre igual ao afluente. A figura 43 traduz tal facto, observando-se que a cota do nível de água é sempre igual a 60 após a descarga inicial.

Concluindo, para esteve evento o controlo de cheia foi exclusivamente efetuado na albufeira da Aguieira, excetuando a descarga inicial ocorrida na Aguieira, de $796,46 \text{ m}^3/\text{s}$, que foi reduzida na Raiva.

Como o caudal efluente da albufeira de Raiva nunca é inferior a $160 \text{ m}^3/\text{s}$, então teremos sempre descarga pelas turbinas da central hidroelétrica, sendo o restante caudal descarregado pelo descarregador de cheia, como se pode verificar na figura 44. Isto vai também verificar-se nas restantes alternativas.

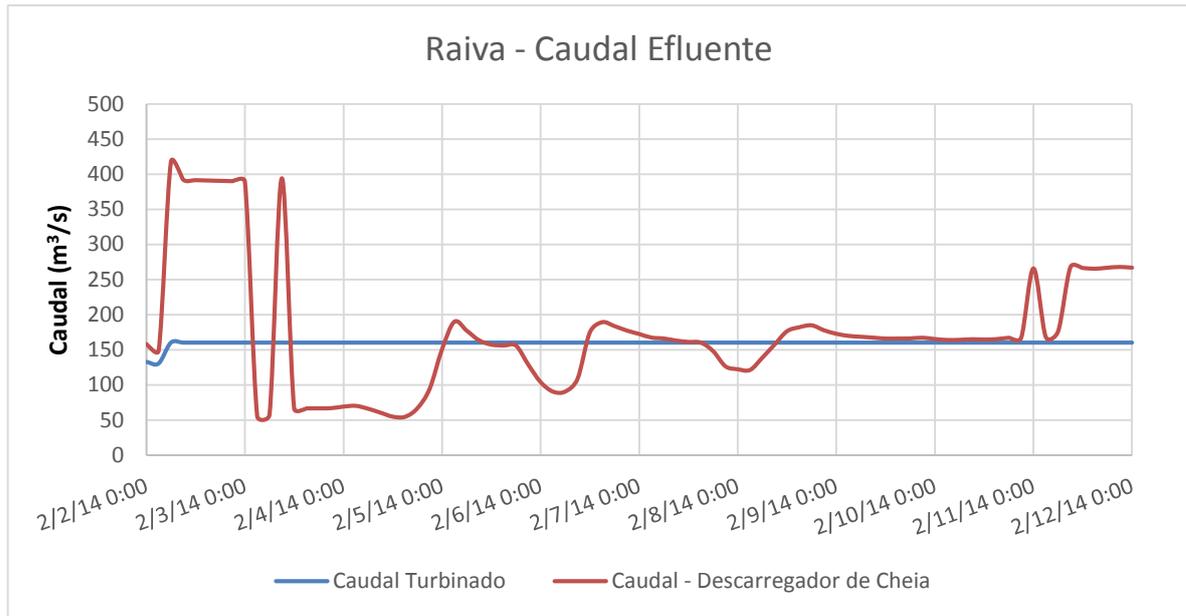


Figura 43 Alternativa 1 (Percentil 25): Distribuição do caudal efluente da albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

6.3.2.3. Caudais Efluentes – Alternativa 2

Nas Figuras 44 e 45 apresentam-se os resultados das simulações para a segunda alternativa estudada, com os caudais afluentes referentes ao percentil 50. Na figura 46 apresentação a discriminação do caudal efluente, dependendo do órgão de descarga que foi utilizado.

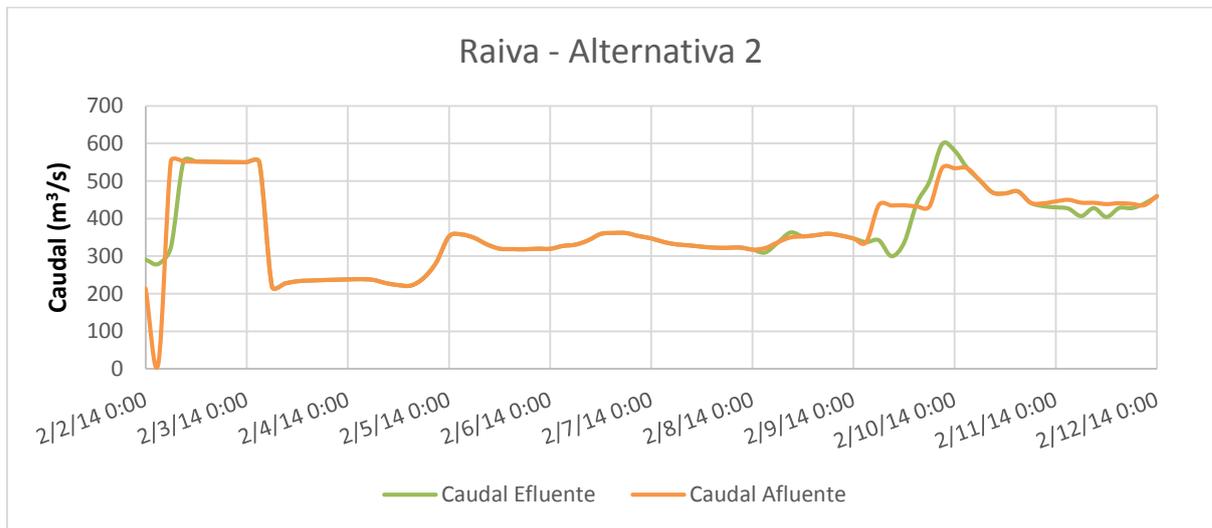


Figura 44 Alternativa 2 (Percentil 50): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

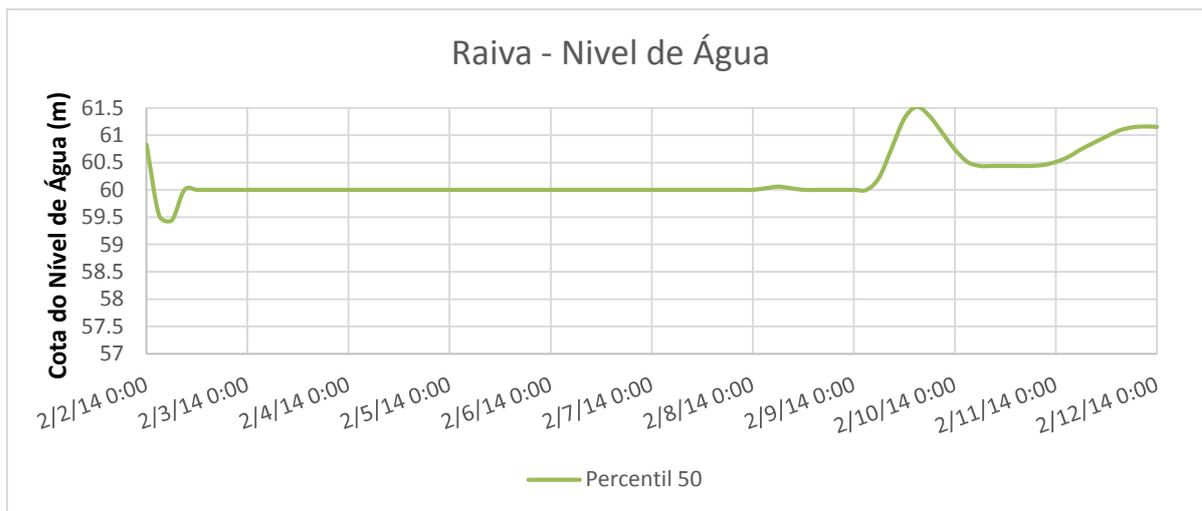
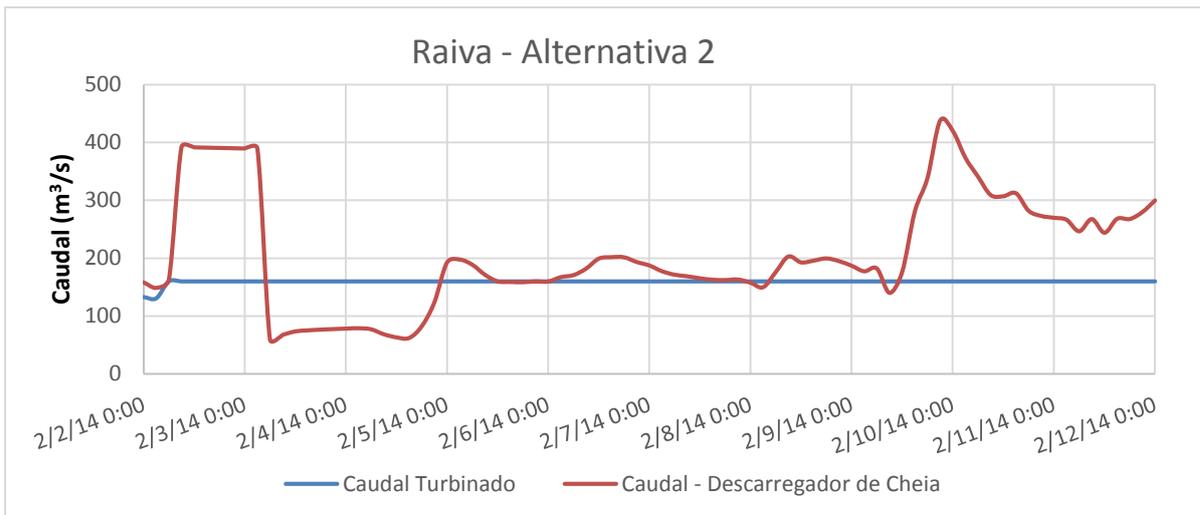


Figura 45 Alternativa 2 (Percentil 50): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

No percentil 50, voltamos a verificar uma semelhança entre o caudal afluente e o efluente, o nível de água na Raiva mantém-se constante entre metade do dia 2 e o início do dia 9 de Fevereiro.

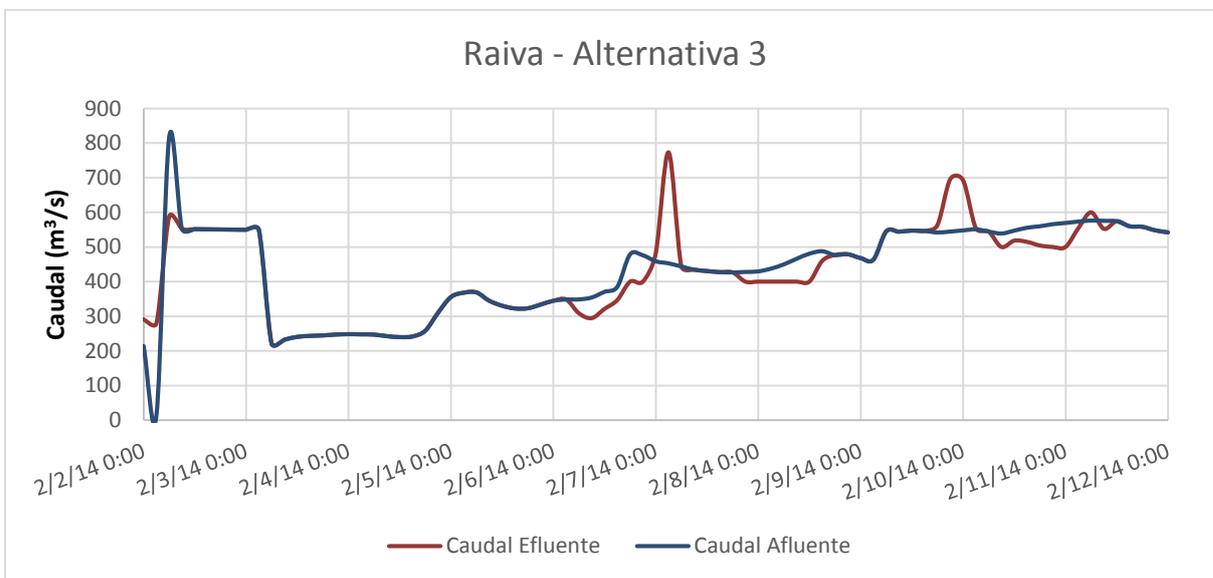
Observando a figura 45 podemos ver que no início do evento e no final vão ocorrer variações no nível de água da albufeira e, portanto, disparidades entre o caudal efluente e o afluente. No início do evento as variações de cota devem-se as condições iniciais que foram observadas, e de modo a que a cota atingida e mantida seja 60m que é o NPA. Mantendo-se este nível até ao final do evento.

No dia 9 ocorre uma ligeira variação do nível de água de modo a cumprir a regra do complemento para 800 m³/s para Coimbra. No final do dia 9 começam a ocorrer variações mais expressivas. As alterações do caudal efluente são feitas com o objetivo de cumprir o complemento para 800 m³/s para Coimbra. Quando comparadas as alturas em que houve modificações do caudal efluente com o caudal afluente na albufeira da Aguieira com Coimbra verifica-se que o afluente a Coimbra é 800 m³/s, com exceção do período em que houve maior pico de caudal efluente de Raiva (no início do dia 10), voltando rapidamente a baixar para os 800 m³/s. Este aumento ocorreu de modo a evitar que o nível de água ultrapassasse a cota 61,5 m, o NMC, cota que voltou a baixar e no fim do evento se encontrava igual 61,152 m.



6.3.2.4. Caudais Efluentes – Alternativa 3

Nas Figuras 47 e 48 apresentam-se os resultados das simulações para a terceira alternativa estudada, com os caudais afluentes referentes ao percentil 75. Na figura 49 apresenta-se a discriminação do caudal efluente, dependendo do órgão de descarga que foi utilizado.



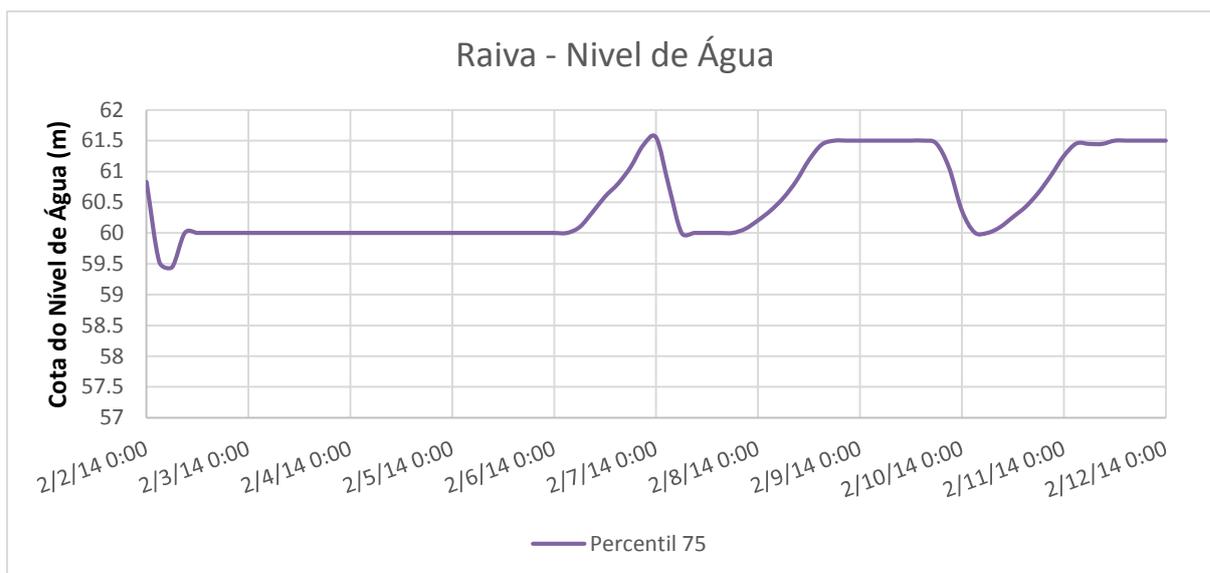


Figura 48 Alternativa 3 (Percentil 75): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

No percentil 75 voltamos a obter uma variação do nível de água inicial, de modo a baixar o nível para a cota 60m e cumprir o complemento para 800 m³/s para Coimbra. Até ao início do dia 5 de Fevereiro o caudal efluente mantém-se igual ao afluente, sendo o controlo de Coimbra efectuado pela albufeira da Aguieira. Após este dia começamos a ter variações do nível de água.

No dia 6 de Fevereiro ocorre um aumento do caudal afluente a Raiva e do caudal não regularizado a Coimbra. De modo a ser cumprido o complemento dos 800 m³/s, mantém-se um caudal efluente mais baixo, elevando o nível de água. Quando este atinge os 61,5m, foi necessário descarregar um maior caudal que anteriormente de modo a rapidamente baixar a cota. Esta descarga de 773,2 m³/s não cumpre o complemento para 800 m³/s, mas cumpre o complemento para 1200 m³/s. Esta descarga vai inundar a zona marginal de Coimbra mas evita consequências mais gravosas nesse local e no vale a jusante pois o valor do caudal é inferior a 1200 m³/s.

Após ocorrido o pico de caudal efluente o caudal volta a baixar, sendo este igual ao afluente e no início do dia 8 amortecendo o caudal, que vai provocar caudais em Coimbra na ordem dos 1000 m³/s. Este caudal mantém-se até ao início do dia 9, onde mesmo com o amortecimento da Aguieira e de Raiva, o caudal afluente a Coimbra vai ultrapassar ligeiramente os 1200 m³/s, não cumprindo o complemento para 1200 m³/s. Rapidamente este caudal volta a diminuir, permitindo em Raiva uma descarga mais elevada, baixando novamente o nível de água da albufeira, mas sem provocar caudais superiores a 1200 m³/s.

O caudal efluente final, de dia 11, também vai provocar caudais elevados em Coimbra. Neste dia ocorrem os caudais de pico dos caudais não regularizados mais elevados, e como tal foi necessário o amortecimento de Raiva de modo a cumprir o complemento para 1200 m³/s para Coimbra, o que provocou um aumento do nível de água até à cota 61,5m.

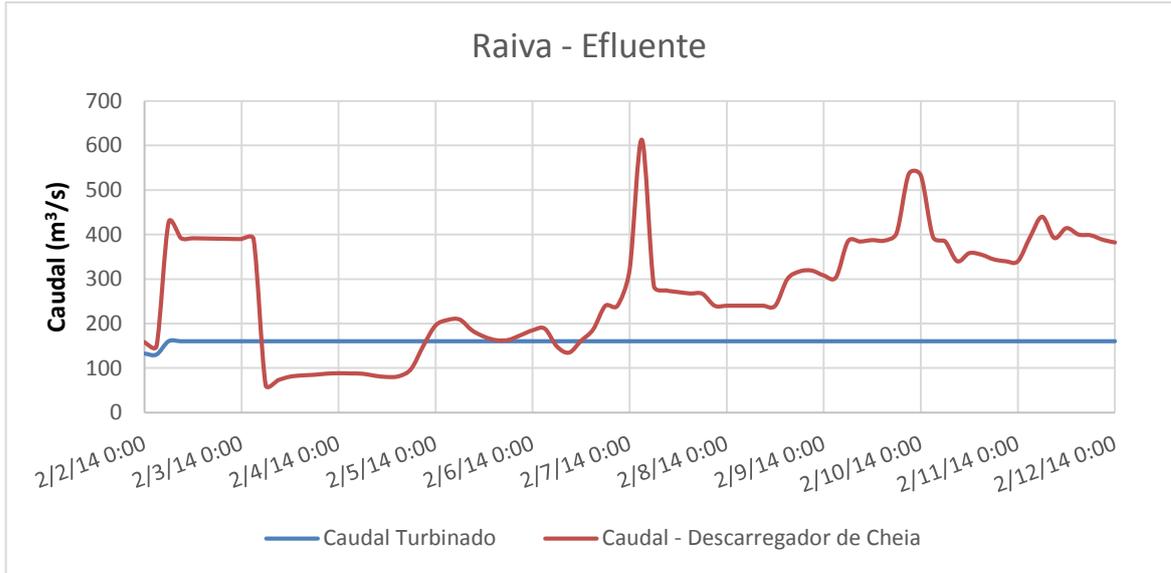


Figura 49 Alternativa 3 (Percentil 75): Distribuição do caudal efluente da albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

6.3.2.5. Caudais Efluentes – Alternativa 4

Nas Figuras 50 e 51 apresentam-se os resultados das simulações para a quarta alternativa estudada, com os caudais afluentes referentes ao percentil 50 e ao caudal obtido através da precipitação observada. Na figura 52 apresenta-se a discriminação do caudal efluente, dependendo do órgão de descarga que foi utilizado.

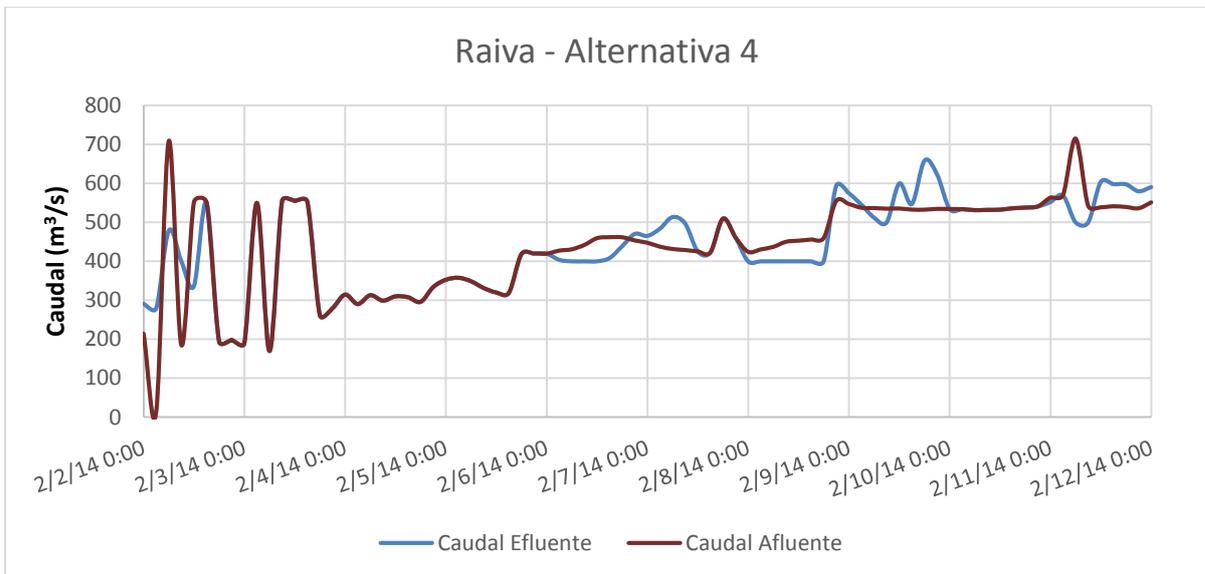


Figura 50 Alternativa 4 (Percentil 50 c/ caudal observado): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

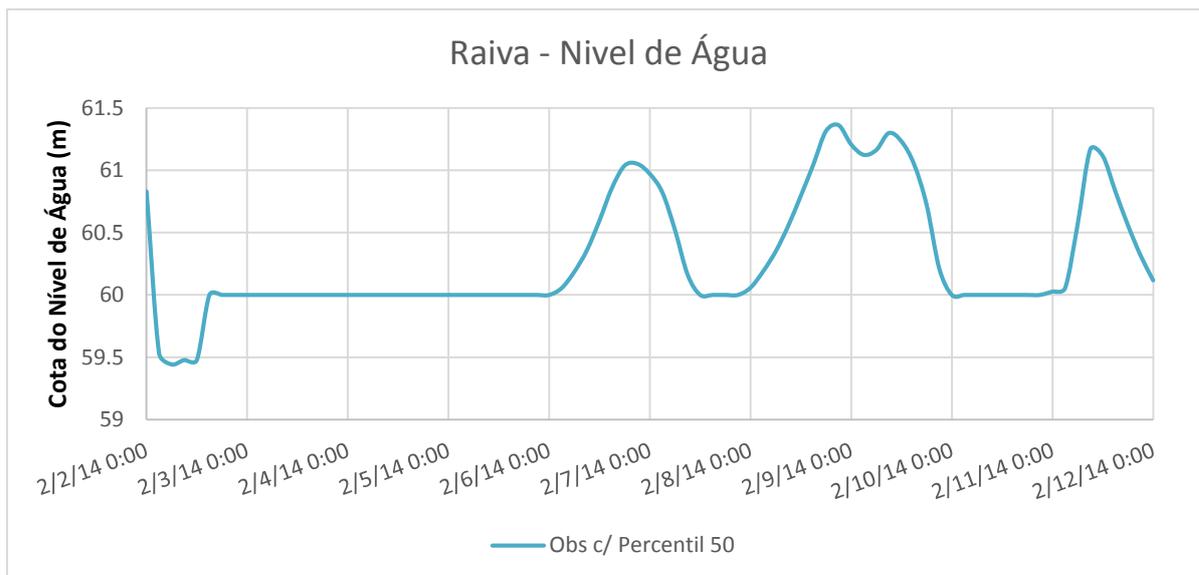


Figura 51 Alternativa 4 (Percentil 50 c/ caudal observado): Caudal afluente e efluente para a albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

No início do evento correspondente à quarta alternativa ocorre o descarregamento da Albufeira, durante o qual o nível de Raiva obtido é o NPA. Durante este período, através do uso do nível de água na Raiva, foi possível descarregar a albufeira da Aguieira cumprindo o complemento para $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Seguiu-se um período em que o caudal efluente foi igual ao afluente, mantendo a cota igual ao NPA (figura 51) e mantendo o caudal afluente a Coimbra menor que $800 \text{ m}^3/\text{s}$.

No início do dia 6 verificou-se um aumento no caudal afluente de Raiva, devido à cota do nível de água da albufeira da Aguieira ter ultrapassado os 121m, e um aumento no caudal não regularizado afluente a Coimbra, proveniente da sub-bacia de Coimbra e do rio Ceira. Este aumento fez com que fosse necessário reduzir o caudal efluente de Raiva, de modo a cumprir o complemento para $800 \text{ m}^3/\text{s}$, levando a um aumento do nível de água em Raiva, nível que foi baixado no início do dia 7 cumprindo o complemento para $800 \text{ m}^3/\text{s}$ para Coimbra.

No início do dia 8, houve um aumento do caudal afluente a Raiva e do caudal não regularizado a Coimbra. Foi necessário diminuir o caudal efluente de Raiva, elevando o nível de água em Raiva até 61,3m. Apesar não ter sido possível cumprir o limite dos $800 \text{ m}^3/\text{s}$, foi possível cumprir o limite dos $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Este limite foi cumprido até ao fim do evento, através da gestão da Aguieira e Raiva e das respetivas capacidades de armazenamento.

O caudal máximo afluente a Coimbra ocorreu durante o dia 9 de Fevereiro, caudal de valor igual a $1103 \text{ m}^3/\text{s}$, e que não foi possível amortecer, apesar de ter sido evitado caudais mais elevados, porque este caudal máximo é coincidente com os caudais de pico dos caudais afluentes, tanto os regularizados como os não regularizados, que perfizeram cerca de $370 \text{ m}^3/\text{s}$, e coincidente com o aumento do caudal efluente da Aguieira derivado da subida de nível de água, alterando as regras de descarregamento.

Novamente, os caudais efluentes serão o caudal máximo turbinável somado ao caudal descarregado, que descarregará o resto do caudal efluente.

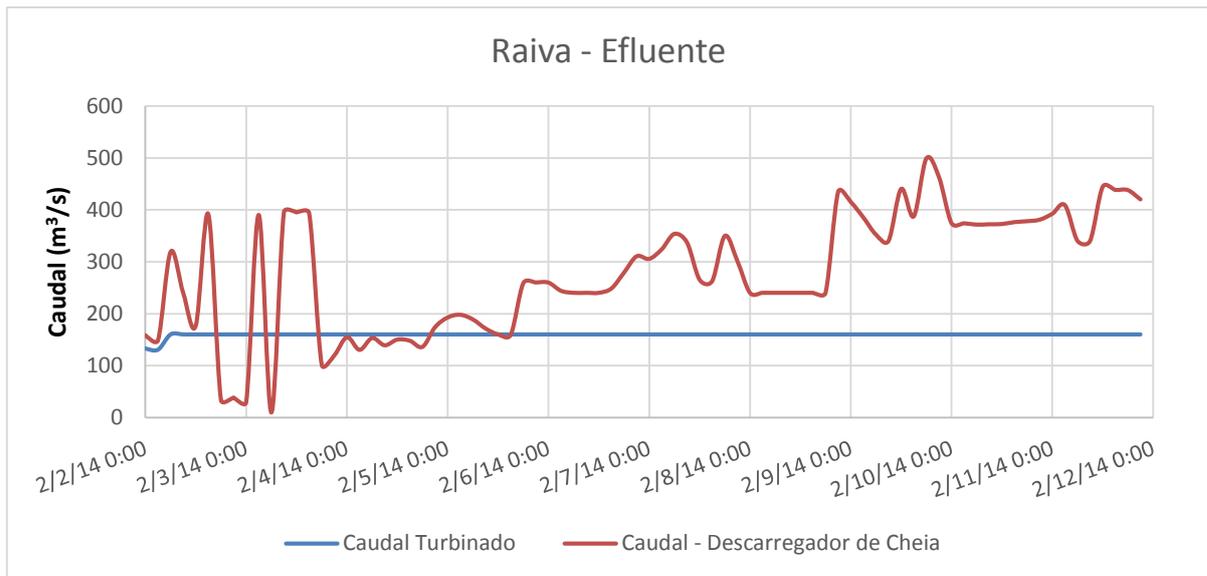


Figura 52 Alternativa 4 (Percentil 50 c/ obs): Distribuição do caudal efluente da albufeira da Raiva no período de 2 e 12 de Fevereiro

6.3.3. FRONHAS

6.3.3.1. Caudais Afluente

No gráfico 53 podem observar-se os caudais afluentes referentes às várias alternativas simuladas. No caso de Fronhas, tal como na Aguieira, possuem-se os caudais obtidos através das precipitações observadas (4.2.). Os valores dos caudais previstos mais aproximados aos referidos caudais observados correspondem às previsões de caudal do percentil 75. Apesar dessa semelhança deverá salientar-se que a curva de caudais correspondente ao percentil 75 apresenta maior volume de cheia e maiores valores de picos de cheia. Tal como na Aguieira (6.3.), foi simulado também o caudal observado devido às diferenças entre os caudais previstos

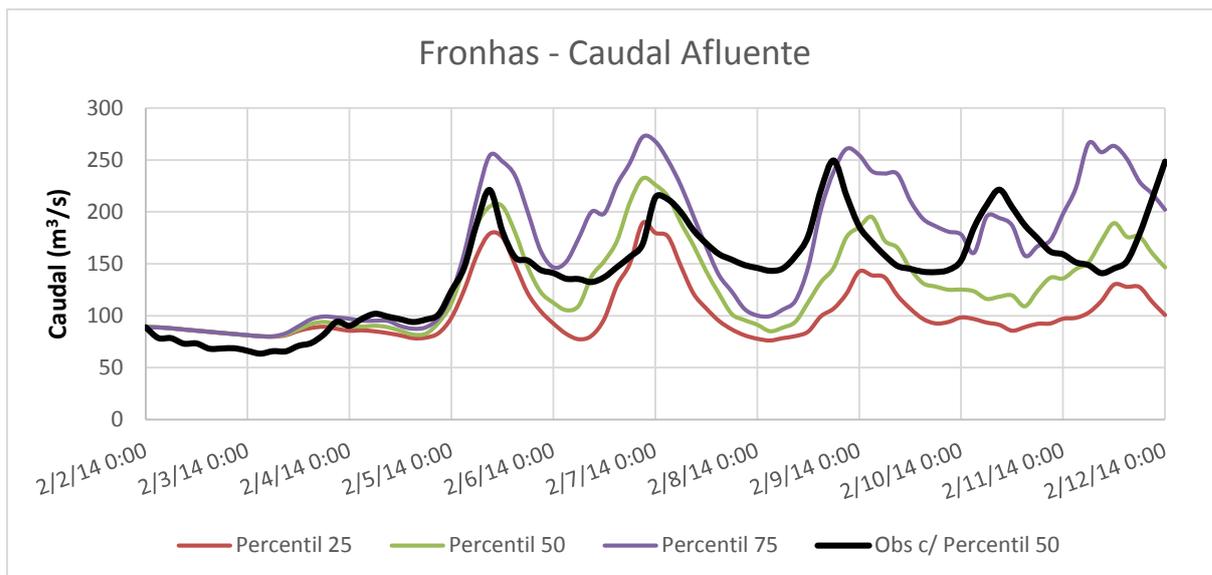


Figura 53 Caudais afluentes para a albufeira de Fronhas entre os dias 2 e 12 de Fevereiro

6.3.3.2. Caudais Efluentes – Alternativa 1

Nas Figuras 54 e 55 apresentam-se os resultados (caudais e níveis de água, respetivamente) das simulações para a primeira alternativa estudada, para os caudais afluentes referentes ao percentil 25. Na figura 56 é apresentada a discriminação da distribuição do caudal efluente, entre o valor do transvase (para a Aguieira) e a descarga para jusante (através da descarga de fundo).

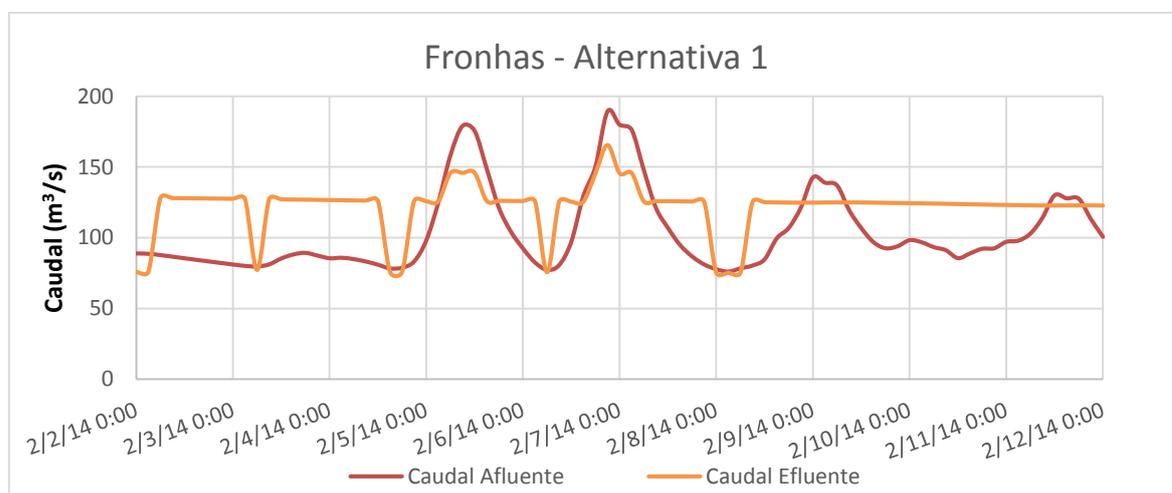


Figura 54 Alternativa 1 (Percentil 25): Caudal afluente e efluente para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

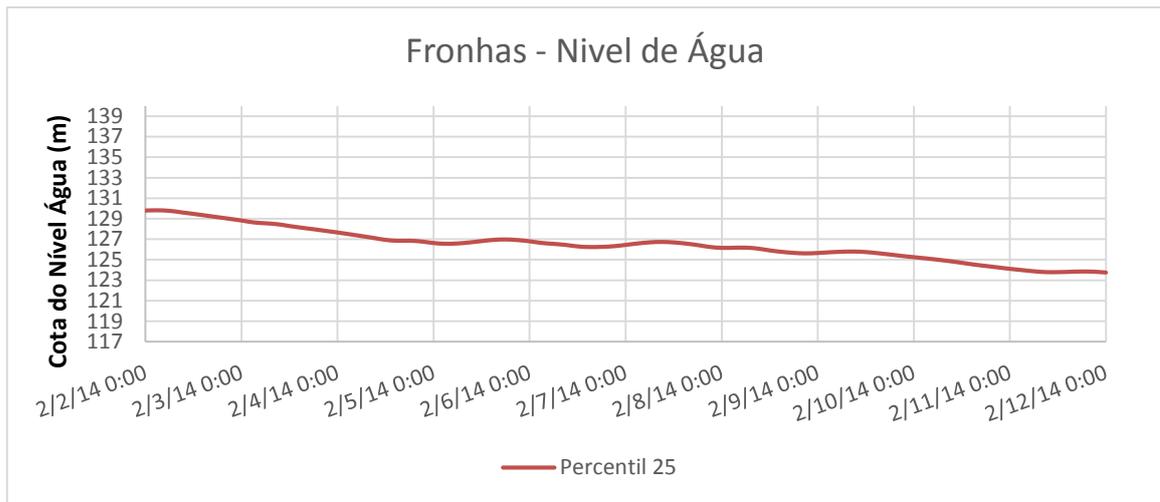


Figura 55 Alternativa 1 (Percentil 25): Nível de água para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

Para o percentil 25 o caudal afluente é relativamente baixo. Os caudais de pico são inferiores a $200 \text{ m}^3/\text{s}$, o que, segundo as regras definidas no subcapítulo 6.2.3., vai conduzir a caudais descarregados máximos, de $140 \text{ m}^3/\text{s}$. Os reduzidos valores dos caudais afluentes vai conduzir a que o nível de água seja progressivamente descendente. Durante o evento analisado a cota do nível de água foi reduzida de 129,81m para 123,75m.

Devido ao baixo caudal que, em simultâneo, aflui à albufeira da Aguieira, a cota do nível de água desta não vai igualar ou ultrapassar a cota do nível de água da albufeira de Fronhas, pelo que o transvase Fronhas-Aguieira se mantém em funcionamento durante todo o evento. Por outro lado, devido à tendência de diminuição do nível de água em Fronhas, o caudal transferido terá também tendência a diminuir.

A alternativa analisada (percentil 25) não apresenta grandes problemas de gestão operacional dos caudais. Neste caso poderiam, até, ser descarregados pela descarga de fundo caudais mais baixos de modo a armazenar mais água na albufeira, o que permitiria aumentar o aproveitamento energético da Aguieira e Raiva.

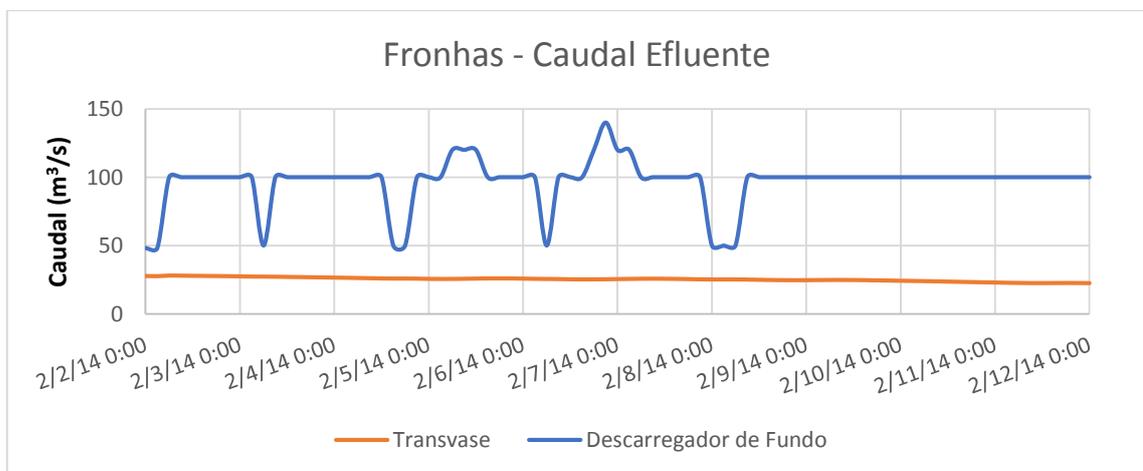


Figura 56 Alternativa 1 (Percentil 25): Distribuição do caudal efluente da albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

6.3.3.3. Caudais Efluentes – Alternativa 2

Nas Figuras 57 e 58 apresentam-se os resultados das simulações para a segunda alternativa estudada, com os caudais afluentes referentes ao percentil 50. Na figura 59 apresentação a discriminação do caudal efluente, dependendo do órgão de descarga que foi utilizado.

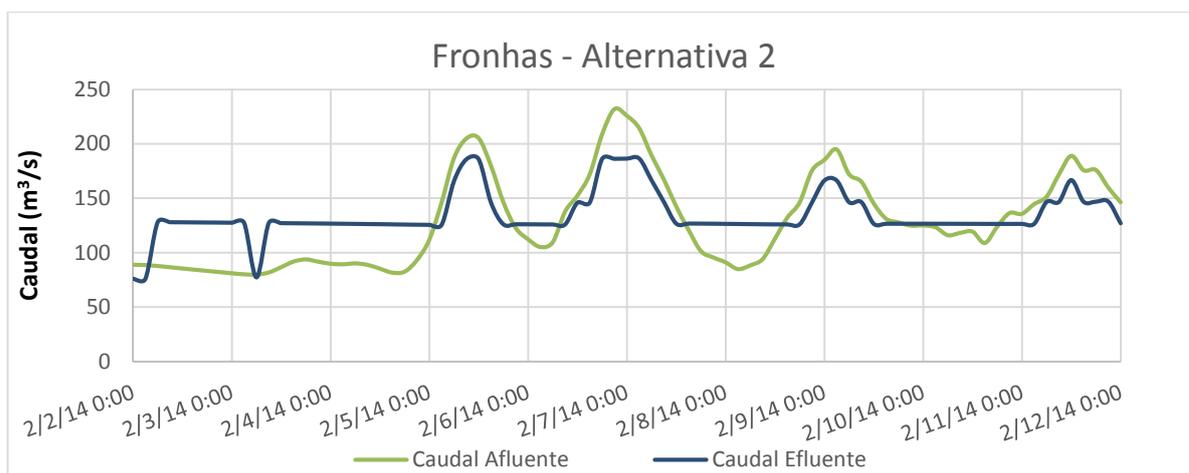


Figura 57 Alternativa 2 (Percentil 50): Caudal afluente e efluente para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

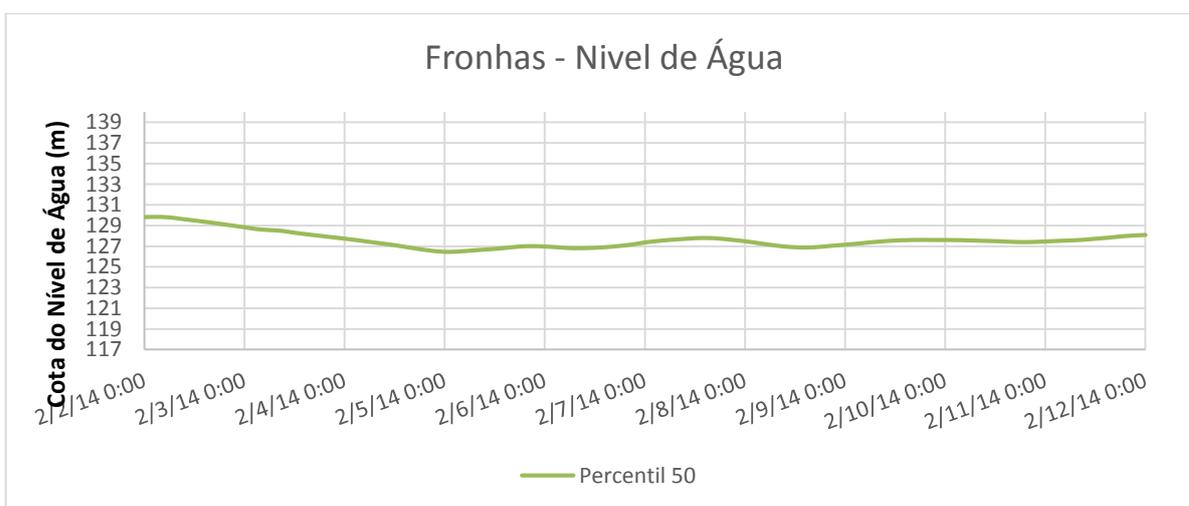


Figura 58 Alternativa 2 (Percentil 50): Nível de água para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

No caudal associado ao percentil 50, ocorre um caudal superior que influencia tanto a evolução da cota do nível de água na albufeira como o caudal a ser descarregado e transferido. Esta alternativa, comparativamente com o percentil 25, tem uma cota mais elevada, não há um decréscimo tão acentuado. A cota mínima atingida é 126,48m.

O facto de manter uma cota mais elevada permite ter um caudal transferido para a albufeira da Aguieira maior, superior a $25,568\text{m}^3/\text{s}$, e não há necessidade de fechar a comporta do transvase, já que a cota da albufeira da Aguieira nunca é superior a 126m, o seu NMC.

A nível de caudal efluente descarregado através do descarregador de cheia, em média, é semelhante ao descarregado na alternativa usando o percentil 25. Sendo no primeiro, percentil 50, igual a $107,982\text{m}^3/\text{s}$ e, no percentil 25, igual a $96,377\text{m}^3/\text{s}$. O que justifica a evolução da cota do nível da água para a alternativa do percentil 50, comparativamente com a primeira alternativa, com uma cota superior a partir do primeiro caudal de pico afluente. Ou seja, nesta alternativa, há maior armazenamento do caudal de cheia e portanto um melhor amortecimento do caudal de cheia. Para os caudais afluente mais elevados, da ordem dos $200\text{ m}^3/\text{s}$ o caudal descarregado vai ser $160\text{ m}^3/\text{s}$. Podemos observar que para os caudais de pico a cheia é sempre amortecida.

O caudal efluente vai ser importante neste amortecimento também porque impede a cota de atingir o NDO, que obrigaria a descargas mais elevadas, como ocorreu no caudal afluente do percentil 75, analisado de seguida.

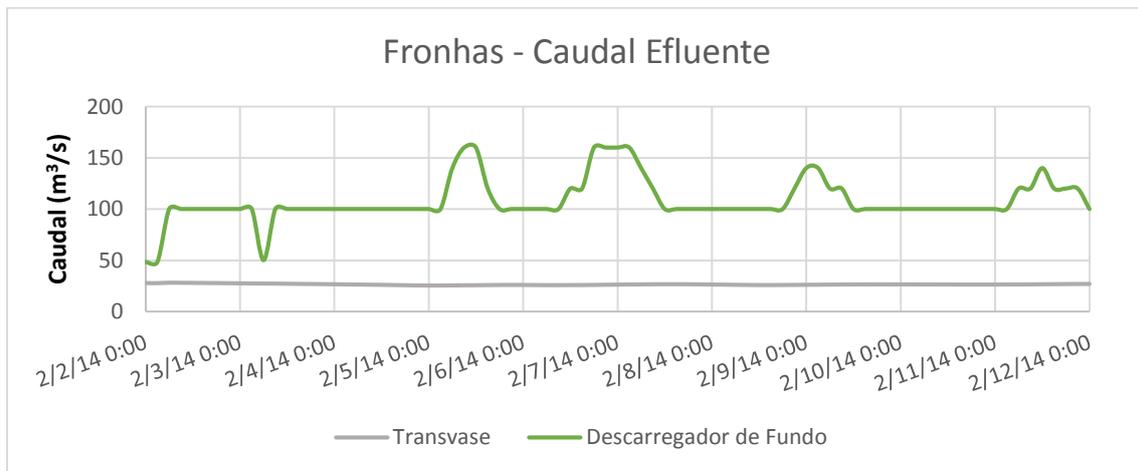


Figura 59 Alternativa 2 (Percentil 50): Distribuição do caudal efluente da albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

6.3.3.4. Caudais Efluentes – Alternativa 3

Nas Figuras 60 e 61 apresentam-se os resultados das simulações para a terceira alternativa estudada, com os caudais afluentes referentes ao percentil 75. Na figura 62 apresentação a discriminação do caudal efluente, dependendo do órgão de descarga que foi utilizado.

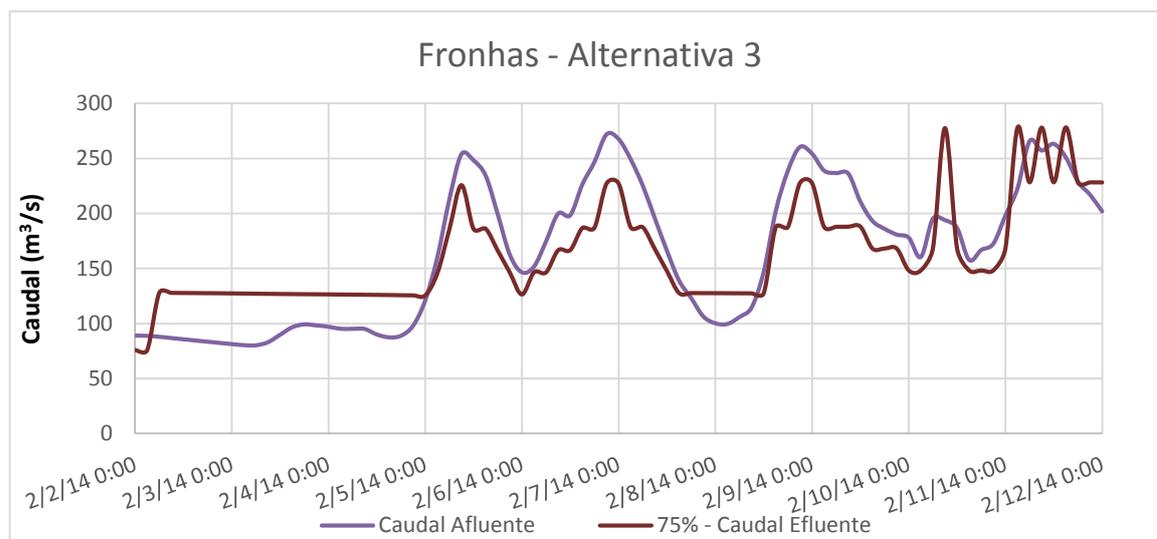


Figura 60 Alternativa 3 (Percentil 75): Caudal afluente e efluente para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

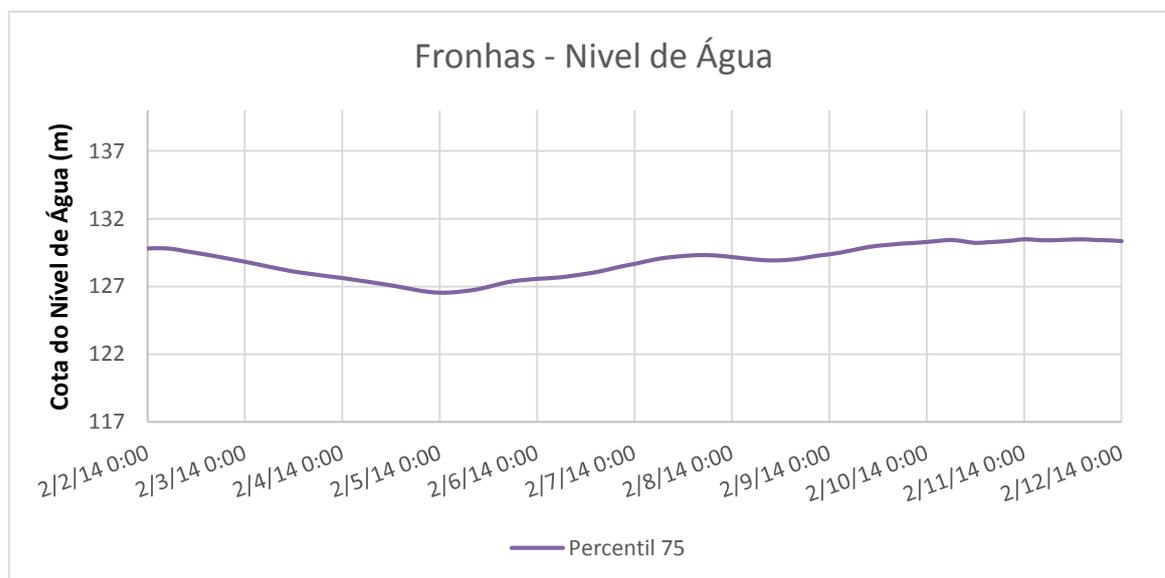


Figura 61 Alternativa 3 (Percentil 75): Nível de água para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

A terceira alternativa, percentil 75, é a alternativa que apresenta o maior caudal afluente à albufeira de Fronhas. Este caudal sendo mais elevado que o obtido pelas precipitações observadas é uma previsão conservativa.

O caudal afluente inicial é superior a $80 \text{ m}^3/\text{s}$ mas inferior a $150 \text{ m}^3/\text{s}$ até ao início do dia 4, portanto o caudal a descarregar pelo descarregador de cheia é igual a $100 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal ao qual se soma o caudal transferido para a albufeira da Aguieira. Durante este período foi possível baixar o nível de água que inicialmente se encontrava nos 129,81 m até à cota 126,55m.

No dia 5 ocorre o primeiro pico de cheia com caudal igual a $254,02 \text{ m}^3/\text{s}$. O aumento do caudal afluente é acompanhado pelo efluente com caudais de $120 \text{ m}^3/\text{s}$, $160 \text{ m}^3/\text{s}$ e atingindo $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Descendo posteriormente o caudal até aos $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

De seguida, no dia 6, até ao início do dia 7 ocorre o segundo caudal de pico efluente, com caudal máximo igual a 271,92 m³/s. O caudal descarregado máximo será igual a 200 m³/s. Os dois picos de caudal afluente iniciais elevaram o nível de água da albufeira até à cota 129,32m.

Após novo decréscimo do caudal afluente o caudal irá ter um período de cerca de 24 horas em que o caudal descarregado será igual a 100 m³/s, sendo mais elevado que o afluente, e permitindo baixar ligeiramente o nível de água da albufeira.

De seguida ocorrem os dois últimos caudais de pico. Devido à elevada cota atingida durante os dois primeiros caudais de pico afluentes, a cota vai atingir o NDO1 após o terceiro caudal de pico, sendo que nessa altura vão ser descarregados caudais máximos associados à abertura total do descarregador de fundo.

Após um decréscimo nos caudais afluentes e efluentes ocorreu o ultimo caudal de pico que voltou a provocar que a cota ultrapassa-se a cota do primeiro NDO. Por esta razão ocorreram três períodos em que o caudal foi da ordem dos 250 m³/s. No final do evento a cota decresceu para 200 m³/s mantendo o nível de água com uma tendência decrescente.

As regras de Fronhas permitem ter um caudal efluente mais elevado que o afluente quando o mesmo é mais reduzido, mas quando este é elevado permite ter um efluente mais baixo, amortecendo a cota. Ao mesmo tempo, devido a cota mais elevada permite ter o transvase sempre aberto, o que reduz o caudal que vai fazer subir o nível da Aguieira. Na alternativa em estudo, como a cota do nível de água nunca é mais baixa que 126 m então o transvase nunca irá ser fechado (126 m é o NMC para a Aguieira).

Por outro lado, ao manter caudais demasiado baixos, o aumento da cota de Fronhas irá ser mais rápido, o que conduzirá a que o NDO seja mais atingido, portante perdendo a capacidade de amortecer caudal afluente. Para caudais mais elevados poderá ser necessário usar outra solução.

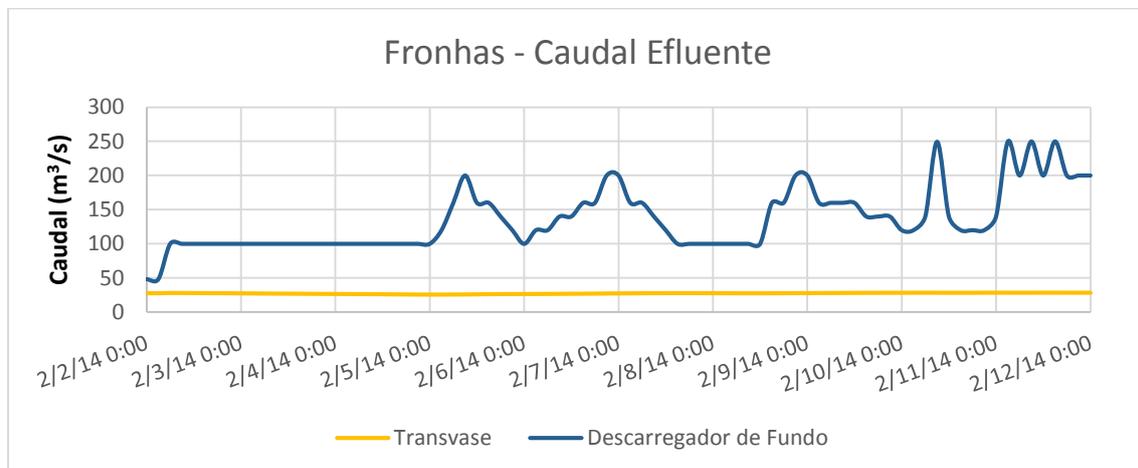


Figura 62 Alternativa 3 (Percentil 75): Distribuição do caudal efluente da albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

6.3.3.5. Caudais Efluentes – Alternativa 4

Nas figuras 63 e 64 apresentam-se os resultados das simulações para a quarta alternativa estudada, com os caudais afluentes referentes ao percentil 50 e aos caudais obtidos através da precipitação observada. Na figura 65 apresenta-se a discriminação do caudal efluente, dependendo do órgão de descarga que foi utilizado.

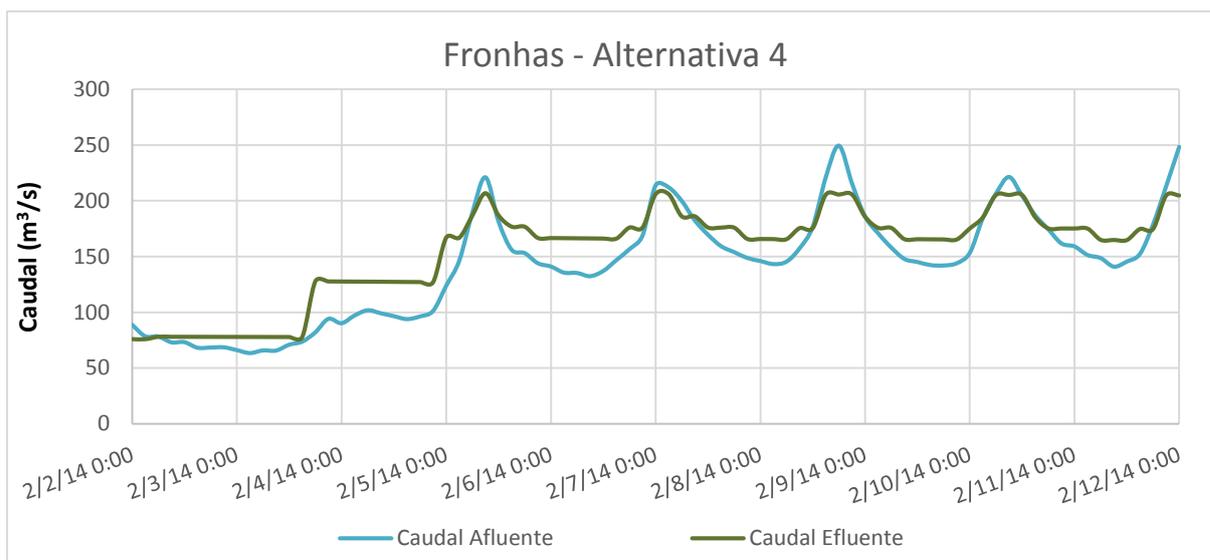


Figura 63 Alternativa 4 (Percentil 50 c/ Obs): Caudal afluente e efluente para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

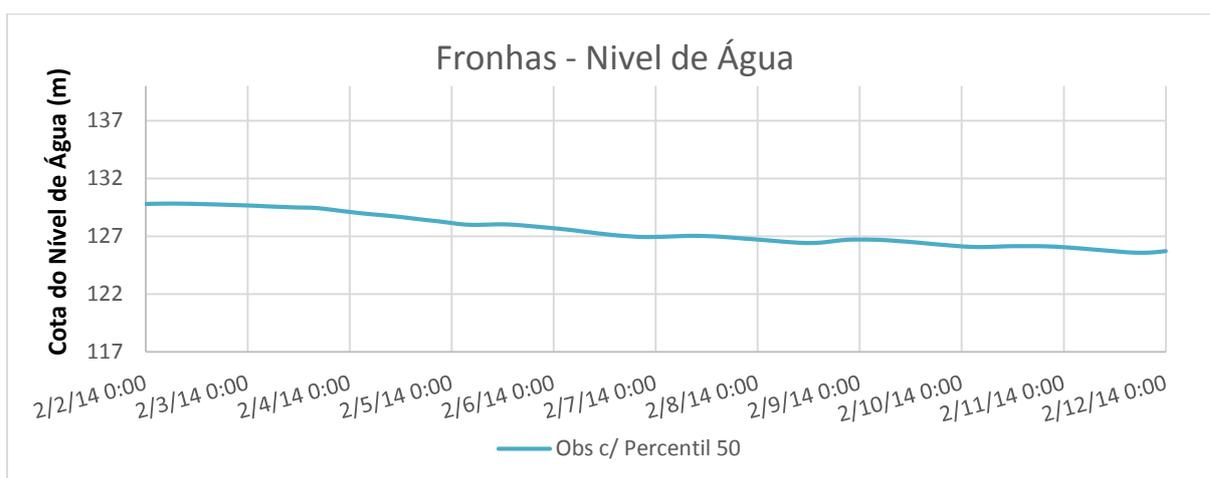


Figura 64 Alternativa 4 (Percentil 50 c/ Obs): Nível de água para a albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

A quarta alternativa em estudo apresenta o caudal obtido através das precipitações observadas. Este caudal é semelhante ao previsto para o percentil 75. Por este motivo, e devido ao facto de se ter atingido o NDO na simulação anterior foram propostas novas regras para Fronhas, alterando somente o caudal efluente em relação as regras usadas nas outras três alternativas, isto de modo a melhorar o seu comportamento para caudais mais elevados. As regras alteradas foram para o caudal efluente para a cota inferior ao primeiro NDO, 130,5 m, e são demonstradas na tabela 8 no subcapítulo 6.2.3..

A alteração ocorreu para os níveis intermédios de caudais, entre os 120 m³/s e os 200 m³/s, aumentando-se o valor dos caudais efluentes. Nos caudais mais elevados e nos mais baixos, mantiveram-se os caudais efluentes. Estas regras permitem aumentar os caudais efluentes a partir dos 120 m³/s afluentes o que evita, em situações de caudais mais elevado, um crescimento rápido do nível de água na albufeira de Fronhas. Isto também permite ter uma capacidade de armazenamento útil mais elevado.

Observando o caudal efluente e o afluente, no início do evento, o caudal afluente, até ao início do dia 5 segue a mesma regra que as simulações anteriores. No início do dia 5 o caudal afluente ultrapassa os 120 m³/s, aumentando o caudal efluente para 140 m³/s. Só quando é atingido o primeiro caudal de pico é que ocorre amortecimento do caudal. Sendo que ao caudal descarregado é necessário somar o caudal transferido. Entre caudais de pico, o caudal descarregado, somado ao transferido, vai ser sempre superior, baixando o nível de água e otimizando a capacidade de armazenamento da albufeira, pois nos picos de caudal o caudal efluente vai ser menor que o afluente. O caudal transferido, através do transvase, vai sofrer ligeiras flutuações da ordem dos 3 m³/s.

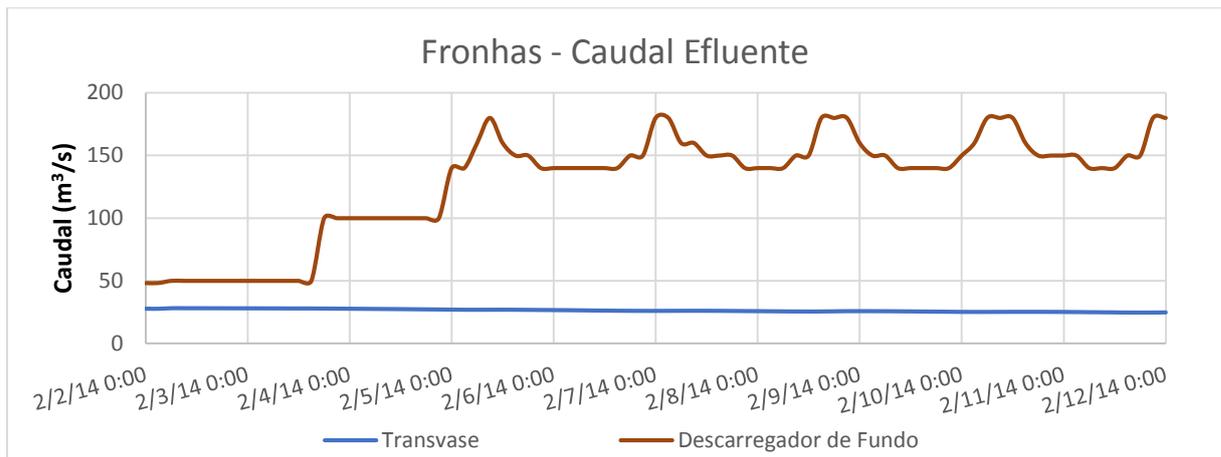


Figura 65 Alternativa 4 (Obs c/ Percentil 50): Distribuição do caudal efluente da albufeira de Fronhas no período de 2 e 12 de Fevereiro

6.3.4. SUB-BACIAS DO CEIRA E DE COIMBRA

Os valores previstos das afluências na foz rio Ceira, no rio Mondego, em Coimbra, para os três diferentes percentis de caudal (25, 50 e 75) considerados, são apresentados na figura 66. Essas afluências correspondem a um escoamento não regularizado, e apresentam valores de caudais relativamente elevados.

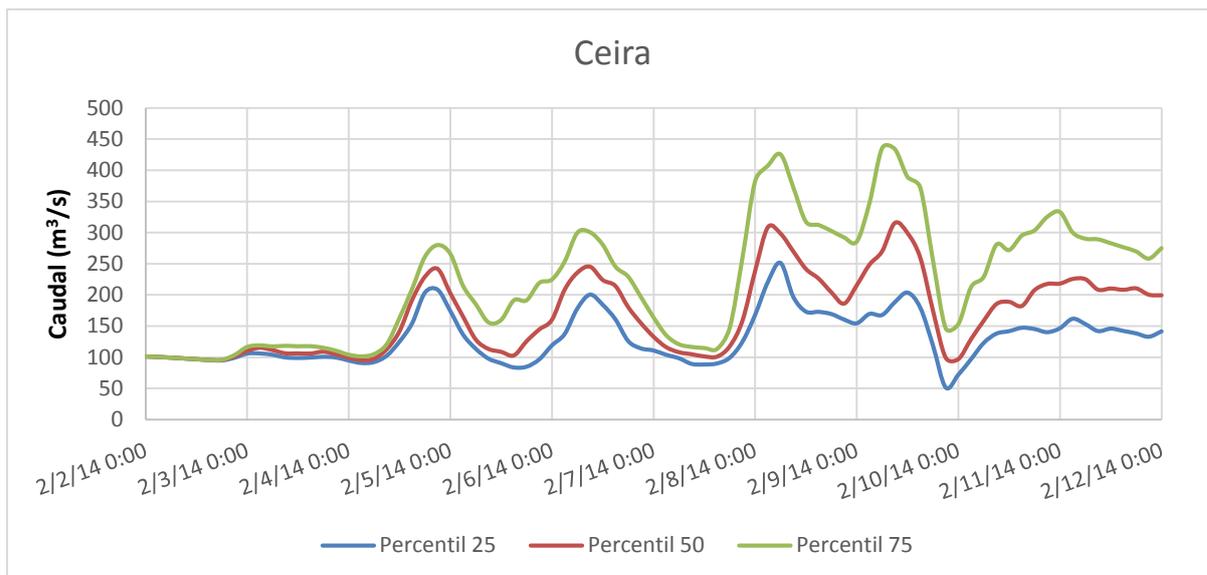


Figura 66 Caudais afluentes à sub-bacia do rio Ceira no período de 2 e 12 de Fevereiro, para diferentes percentis de caudal

No percentil 75, ocorre um caudal de pico de $435,6\text{m}^3/\text{s}$, outro de $425,46\text{m}^3/\text{s}$ e três de valor aproximadamente $300\text{m}^3/\text{s}$. Tendo como limite o caudal máximo afluente entendido como admissível à cidade de Coimbra de $1200\text{m}^3/\text{s}$, valor que se procura e pretende limitar através da gestão operacional do sistema das 3 albufeiras, no período de caudal de ponta (máximo) do Ceira teremos de, nesse caso (percentil 75), limitar o caudal efluente das albufeiras Raiva e Fronhas em $764,4\text{m}^3/\text{s}$.

No percentil 50, encontramos um caudal de pico que apesar de menor, de valor $315,44\text{m}^3/\text{s}$, limita também o caudal efluente do sistema de albufeiras. No percentil 25, encontramos caudais de pico com menor influência, já que o caudal máximo é inferior a $250\text{m}^3/\text{s}$.

Com vista à proteção contra cheias de Coimbra, é importante a consideração da influência do rio Ceira, já que este, como verificamos, é crucial no que ocorre no Mondego, tanto em Coimbra como a jusante. Estes caudais vão ser importantes no cálculo da regra do complemento para Coimbra (ver subcapítulo 6.2.).

Para além do caudal referente ao rio Ceira, também o caudal que aflui a Coimbra correspondente à sub-bacia do rio Mondego a jusante da Raiva (até Coimbra) é um caudal não regularizado que, apesar de não ser muito elevado, apresenta um caudal de ponta de $116,19\text{m}^3/\text{s}$, no percentil 75, e $81,68\text{m}^3/\text{s}$, no percentil 50. Este caudal torna-se mais significativo quando considerado conjuntamente com o caudal afluente do rio Ceira, na confluência deste. O somatório dos caudais vai aumentar o caudal não regularizado com influência em Coimbra. A evolução do referido caudal, para os três diferentes percentis de caudal, no período considerado, é apresentado no gráfico da Figura 67.

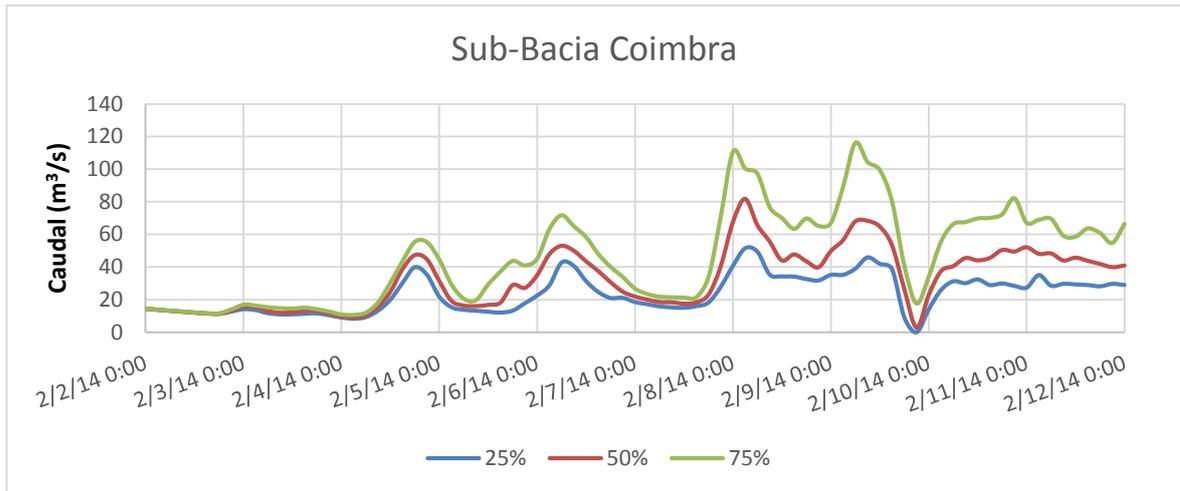


Figura 67 Caudais afluentes à sub-bacia de Coimbra (entre Raiva e Coimbra) no período de 2 e 12 de Fevereiro, para diferentes percentis de caudal

Observando os dois caudais adicionados (Figura 68), ocorre um caudal de pico máximo, não regularizado, em Coimbra, de $551,79 \text{ m}^3/\text{s}$, no percentil 75, juntamente com outros caudais de pico na ordem dos $500 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto no percentil 50 o correspondente caudal de pico máximo não regularizado é de $390,21 \text{ m}^3/\text{s}$, e os restantes caudais de pico são da ordem dos $300 \text{ m}^3/\text{s}$. No percentil 25 ocorre um caudal de pico máximo de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ com os restantes caudais de pico da ordem dos $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

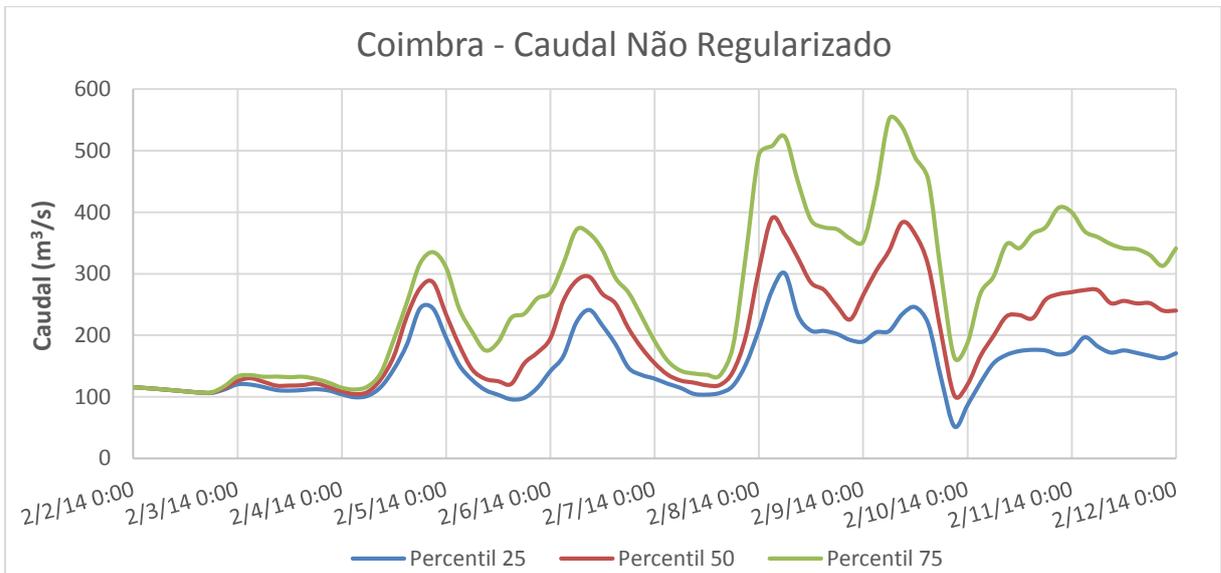


Figura 68 Caudais, não regularizados, afluentes a Coimbra, com proveniência da sub-bacia de Coimbra e do rio Ceira, no período de 2 e 12 de Fevereiro, para diferentes percentis de caudal

A análise específica da regularização dos caudais a garantir em Coimbra, para cada alternativa estudada, será feita na secção seguinte, tendo em atenção os caudais do rio Ceira e da sub-bacia de Coimbra.

6.3.5. ANÁLISE GLOBAL EM COIMBRA

Neste subcapítulo são apresentados e analisados os diferentes caudais afluentes a Coimbra, regularizados e não regularizados (ver 3.5.), para as quatro alternativas simuladas (figuras 69, 70, 71 e 72)

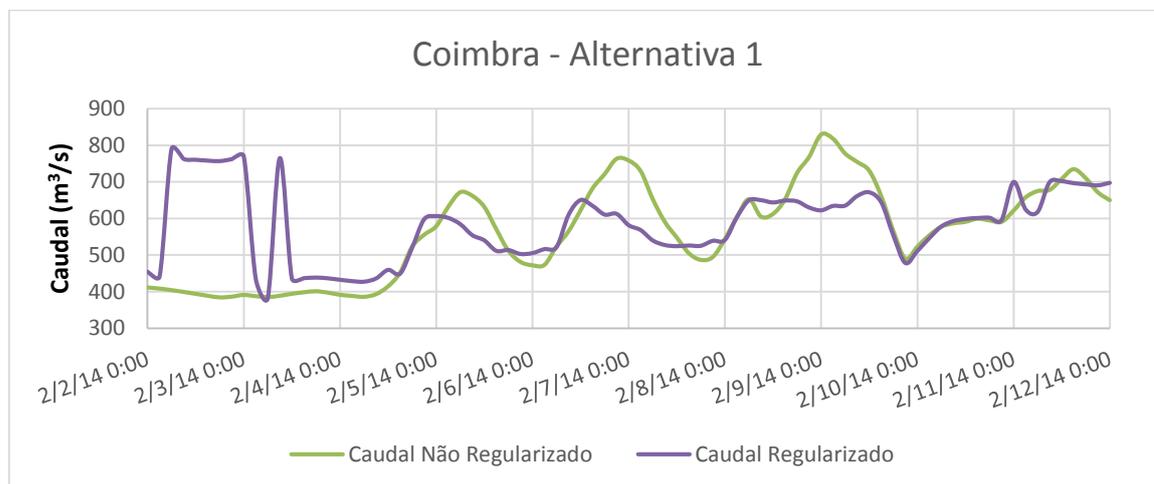


Figura 69 Alternativa 1 (Percentil 25): Caudal regularizado e caudal não regularizado afluentes a Coimbra no período de 2 e 12 de Fevereiro

Na primeira alternativa, usando o percentil 25 dos caudais previstos, o caudal não regularizado tem caudal de ponta de 829,21 m³/s. De modo a evitar cheias em Coimbra temos de evitar caudais superiores a 800 m³/s. Isto é realizado através do cumprimento do complemento para Coimbra de 800 m³/s. Sendo o caudal afluente a todas as bacias relativamente baixo, não foi necessário usar muita capacidade de armazenamento de modo a cumprir o objetivo de evitar cheias em Coimbra, a cota da Aguieira não ultrapassou os 119m, após ocorrido o descarregamento (ver Figura 32).

Observando o caudal regularizado inicial, o caudal máximo nas primeiras 30 horas, em que se realiza o esvaziamento da albufeira da Aguieira até à cota 117,5m, é 789,9 m³/s. Após concretizado o esvaziamento da Aguieira, o caudal regularizado amortece o caudal de cheia. Durante o evento, e durante os caudais de pico, o caudal afluente a Coimbra é amortecido, não ultrapassando os 700 m³/s.

O caudal regularizado nunca ultrapassa os 700 m³/s durante o restante período do evento. Isto permite evitar cheias em Coimbra.

O percentil 25 apresenta um caudal relativamente baixo comparativamente com o caudal observado. Por esta razão, utilizando as regras propostas, observa-se um caudal inicial elevado, devido ao esvaziamento da albufeira, podendo ser superior ao que ocorreria em regime natural.

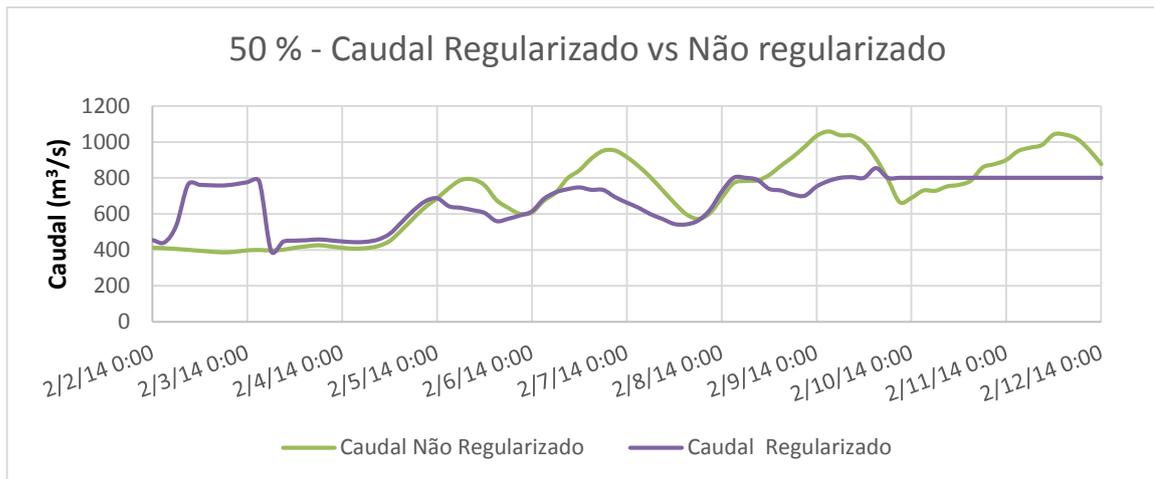


Figura 70 Alternativa 2 (Percentil 50): Caudal regularizado e caudal não regularizado afluentes a Coimbra no período de 2 e 12 de Fevereiro

Na segunda alternativa simulada, com o percentil 50, o caudal não regularizado apresenta risco de cheia em Coimbra. O caudal de pico máximo, de 1057,8 m³/s, ocorre dia 9 de Fevereiro, às 03:00 horas, e é superior ao limite de 800 m³/s. O caudal não regularizado apresenta outros dois caudais de pico que ultrapassam os 800 m³/s. Os restantes dois caudais de pico são de valor igual a 952 m³/s, dia 6 de Fevereiro e 1041,5 m³/s, dia 11 de Fevereiro.

O caudal regularizado apresentar o mesmo comportamento inicial, um caudal elevado, influenciado pelo esvaziamento da albufeira da Agueira para a cota 117,5m, de valor máximo igual a 780,17 m³/s. Após atingida a cota desejada na Agueira, o caudal regularizado desce de valor, continuando a ser superior ao não regularizado.

Quando se inicia um aumento do caudal não regularizado, no início do primeiro pico de cheia, o caudal regularizado começa a decrescer de modo a amortecer o caudal de cheia. No segundo pico de cheia, cujo caudal já é significativo para Coimbra, o caudal é amortecido para o valor máximo de 746,49 m³/s, mantendo o caudal regularizado inferior a 800 m³/s.

No dia 08 de Fevereiro, foi regularizado um caudal que atinge e mantém-se igual a 800 m³/s. A incapacidade de cumprir o limite de 800m³/s para Coimbra foi influenciada pelo aparecimento de um caudal mais elevado por parte das sub-bacias de Raiva e do rio Ceira.

A partir do dia 9, às 6:00 horas, o caudal afluente a Coimbra, regularizado, vai ser sempre igual a 800 m³/s até ao final do evento. Ultrapassado este caudal ligeiramente durante o dia 9, com 853,61 m³/s, sendo esta a única exceção

Concluído, para as previsões do percentil 50 as regras de operação propostas foram capazes de evitar que os caudais afluente a Coimbra ultrapassassem os 800 m³/s, com exceção para o caudal de 853,61 m³/s que ocorre no dia 9. Portanto foi possível evitar cheias na cidade de Coimbra, apesar de ser possível a ocorrência de cheias durante um curto período no evento, associado ao caudal superior a 800 m³/s.

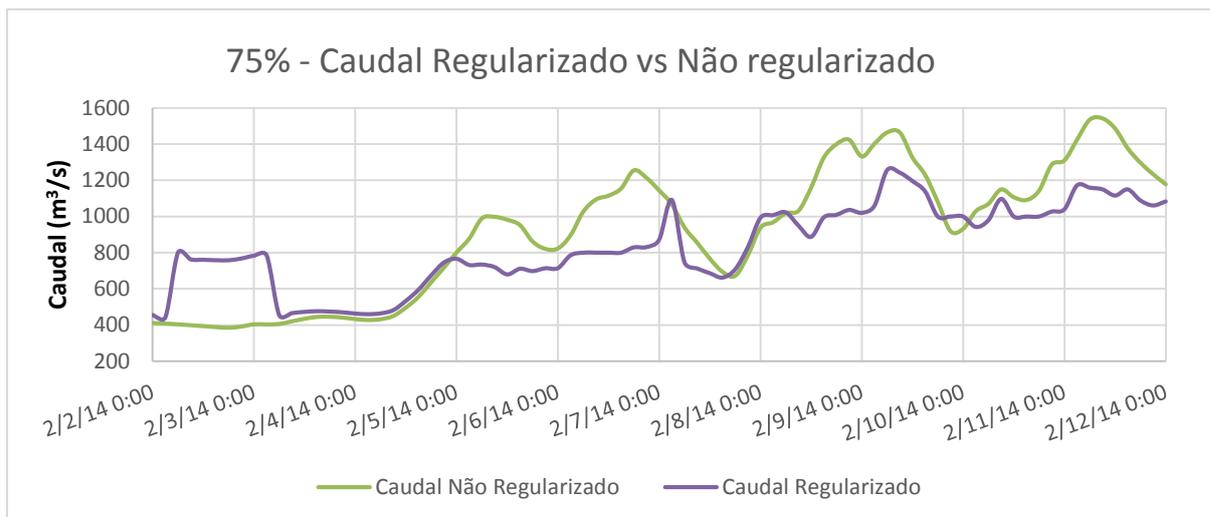


Figura 71 Alternativa 3 (Percentil 75): Caudal regularizado e caudal não regularizado afluentes a Coimbra no período de 2 e 12 de Fevereiro

Na terceira alternativa simulada, com o caudal referente ao percentil 75, o caudal não regularizado, como se pode observar, apresenta risco elevado de originar cheias em Coimbra e a jusante. Isto verifica-se porque o caudal não regularizado apresenta um caudal de pico máximo de 1542,1 m³/s e caudais de pico com os valores de 1254,9 m³/s 1464,3 m³/s. Todos estes caudais são superiores a 1200 m³/s, caudal considerado como caudal de dimensionamento do leito central do Mondego a jusante do açude de Coimbra (Rodrigues et al, 2001) O efeito de caudais superiores foi possível verificar na cheia de Janeiro de 2001.

Analisando o caudal regularizado afluente a Coimbra, tem-se inicialmente um caudal influenciado pelo esvaziamento da albufeira da Aguieira, que não atinge os 800 m³/s, seguindo-se por um caudal afluente semelhante ao não regularizado, até ao dia 4 de Fevereiro às 24:00 horas.

No dia 4, o caudal não regularizado sofre um aumento acompanhado pelo aumento do caudal regularizado. O caudal regularizado mantém-se inferior a 800 m³/s até ao início do dia 5 onde atinge este valor. No início do dia 6 o caudal sofre um aumento até 1091,7 m³/s, devido a descarga efetuada na albufeira de Raiva. De seguida foi possível voltar a baixar o caudal.

Após novo aumento do caudal não regularizado, não foi possível cumprir o complemento para 800 m³/s, mas foi possível manter o caudal abaixo dos 1200 m³/s. O cumprimento do complemento para 1200 m³/s só não foi possível no dia 8 de Fevereiro, em que o caudal regularizado atingiu o valor máximo de 1256,8 m³/s, durante 6 horas. Seguidamente foi possível baixar novamente o caudal que voltou a estar próximo dos 1200 m³/s no início do dia 10 mas não atingindo esse valor.

Concluindo, foi possível limitar o caudal no complemento dos 800 m³/s para Coimbra, evitando cheias na mesma, até ao dia 5, a partir do qual o caudal ultrapassou este valor. O caudal regularizado chegou a atingir e ultrapassar os 1200 m³/s por 6 horas mas por valores reduzidos, criando a possibilidade de pequenas cheias a jusante, mas não evitando cheias em Coimbra. O caudal afluente a Coimbra é elevado devido à influência das sub-bacias não regularizadas, Coimbra e o rio Ceira, que possuem caudais afluentes elevados.

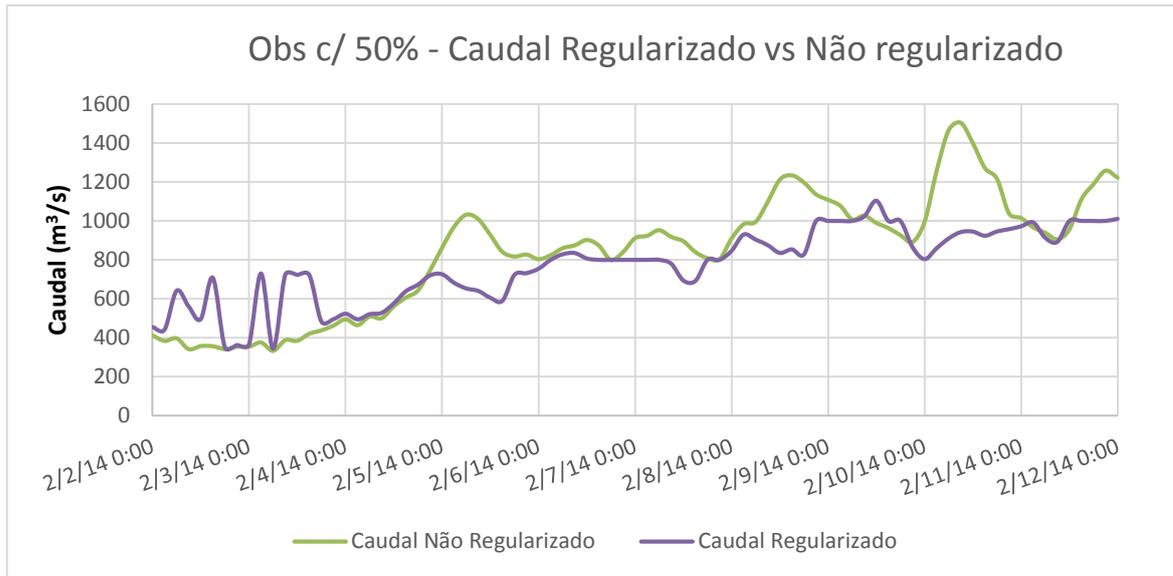


Figura 72 Alternativa 4 (Percentil 50 com caudal observado): Caudal regularizado e caudal não regularizado afluentes a Coimbra no período de 2 e 12 de Fevereiro

A última alternativa em estudo é a referente aos caudais obtidos através precipitação observada para a albufeira da Agueira e de Fronhas e aos caudais previstos para as sub-bacias de Raiva e Coimbra e para o rio Ceira, referentes ao percentil 50.

Observando o caudal afluente não-regularizado, verifica-se que a partir do dia 5 de Fevereiro até ao fim do evento o caudal só é menor que $800 \text{ m}^3/\text{s}$ no fim do dia 6, durante 9 horas, o que impossibilitou evitar possíveis cheias em Coimbra. Tendo sido impossível evitar cheias em Coimbra, os complementos subsequentes, de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, têm como finalidade tentar evitar que o caudal regularizado cause prejuízos a jusante.

O caudal não regularizado possui quatro picos de cheia, sendo o primeiro, dia 5 de Fevereiro, com um caudal de $1031,8 \text{ m}^3/\text{s}$, o segundo, dia 8 de Fevereiro, com um caudal de $1234,0 \text{ m}^3/\text{s}$, o terceiro e o mais elevado, dia 10 de Fevereiro, com um caudal de $1504,0 \text{ m}^3/\text{s}$ e o quarto, no fim do evento, dia 11 de Fevereiro com um caudal de $1258,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como se pode verificar por análise do caudal regularizado, o caudal afluente a Coimbra nunca irá igualar ou ultrapassar os $1200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Inicialmente existe um caudal regularizado mais elevado, não chegando a atingir os $800 \text{ m}^3/\text{s}$, que é influenciado pelo esvaziamento da albufeira da Agueira. Seguindo-se um período em que o caudal regularizado é semelhante ao caudal não regularizado. Quando o caudal não regularizado ultrapassou os $800 \text{ m}^3/\text{s}$, o caudal regularizado diminuiu de modo a evitar que o caudal chegasse ou ultrapassasse os $800 \text{ m}^3/\text{s}$ em Coimbra. Após o primeiro caudal de pico não regularizado, o caudal regularizado atingiu os $800 \text{ m}^3/\text{s}$, coincidente com um caudal de pico do rio Ceira e da sub-bacia de Coimbra. Após atingido o caudal regularizado igual $800 \text{ m}^3/\text{s}$ e durante um período de 9 horas, caudal superado, no máximo, $35,1 \text{ m}^3/\text{s}$, mas continuando constante nesse limite até ao dia 7 de Fevereiro. Nessa data o caudal reduziu, voltando a aumentar e ultrapassando os $800 \text{ m}^3/\text{s}$.

De seguida, ocorreu o segundo caudal de pico que foi amortecido, atingindo-se um caudal de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, dia 8 de Fevereiro.

O caudal regularizado máximo foi atingido no dia 9 de Fevereiro com um caudal de 1103,8 m³/s. Este deveu-se a um ligeiro aumento do caudal efluente da albufeira de Raiva, por motivos de gestão da cota do nível da água da mesma, e devido à coincidência da descarga de Raiva com um segundo caudal de pico do caudal não regularizado proveniente do Ceira e da sub-bacia de Coimbra. Após este caudal máximo ocorreu o maior caudal de pico, amortecido de 1504 m³/s para 942,7 m³/s.

Por fim, o último caudal de pico é amortecido e obriga a um caudal efluente máximo de 1010,9 m³/s, também devido aos efeitos do caudal de pico, que ocorreu anteriormente e obrigou a um aumento da cota do nível de água na Aguieira, que como se viu anteriormente é no fim do evento igual a 123,34m.

Concluindo, neste evento não foi possível evitar possíveis cheias na cidade de Coimbra, limitando o caudal regularizado em 800 m³/s. Por outro lado foi possível, através do amortecimento dos caudais de pico, evitar que ocorressem caudais superiores a 1200 m³/s, evitando portanto que houvesse prejuízos nas áreas a jusante de Coimbra, e minimizando prejuízos em Coimbra.

6.4. EVENTO DE JANEIRO DE 2001

O evento de cheia de Janeiro de 2001, que ocorreu entre os dias 26 e 27, foi um fenómeno de grande magnitude, em que os valores de precipitação, entre as 9 e as 15 horas do dia 26 na zona noroeste da bacia, (zona do Caramulo), teve períodos de retorno bicentenários e, na encosta sudoeste, um período de retorno de 50 anos (Rodrigues et al, 2001).

A magnitude do caudal regularizado afluente a Coimbra levou à rotura dos diques a jusante de Coimbra, e à necessidade de evacuação de centenas de pessoas de várias localidades devido a cheias (Figura 73). Foi cortada a linha ferroviária entre a Figueira da Foz e Coimbra e várias estradas, entre elas a Estrada Nacional 341 (TSF, 2001), tendo também sido provocada a ruína da ponte que liga Montemor e Alfarelos (figura 74) (Publico, 2001).



Figura 73 Efeitos das cheias de Janeiro de 2001 (SNIRH, 2015)



Figura 74 Queda de ponte devido à cheia de Janeiro de 2001 (Lourenço, 2015)

A excecionalidade do evento levou, assim, a graves consequências socioeconómicas. É, portanto, um evento de interesse de estudo para esta bacia, não só por ser relativamente recente mas também porque existem dados de caudais observados, para Coimbra e para as albufeiras de Fronhas e da Aguieira.

A simulação foi realizada usando os dados dos caudais observados afluentes às albufeiras da Aguieira e de Fronhas, recolhidos no relatório da APA sobre a cheia (Rodrigues et al, 2001), e os dados de caudal previsto, referentes ao rio Ceira e às sub-bacias de Coimbra e Raiva, utilizando-se o caudal médio previsto. O único dado em relação ao rio Ceira que se tem conhecimento, através do relatório da APA, é o caudal de ponta, de 660 m³/s no início do dia 27 de Janeiro.

A análise do evento de 2001 é feita através da análise das três albufeiras, da comparação entre o caudal regularizado e o não-regularizado para Coimbra e comparando os caudais efluentes, considerando as regras sugeridas nesta Tese, com os caudais efluentes de acordo com as regras atualmente em vigor e com os caudais observados. Em situações de cheia a APA, Agência Portuguesa do Ambiente, tem o poder de decisão em relação à gestão de operação das Albufeiras, o que justifica o facto de em 2001 não se terem cumprido as regras correntes em vigor, propostas em tempo oportuno pela EDP, concessionária e responsável pela exploração do sistema Aguieira-Raiva-Fronhas.

A falta de dados anteriores ao evento levou à necessidade de fornecer ao modelo dados iniciais propostos por este trabalho, dados escolhidos tendo em consideração os caudais afluentes e os níveis de pleno armazenamento como valores para o início do evento. Para os caudais efluentes, escolheram-se os dados iniciais de acordo com o NPA para cada albufeira. Para a albufeira da Aguieira definiu-se uma cota inicial de 119m, e descarga de 500 m³/s através das turbinas da central hidroelétrica. Na albufeira de Raiva definiu-se uma cota inicial de 60m, e um caudal efluente igual ao efluente da Aguieira, sendo distribuído em 160 m³/s na central hidrelétrica e 340 m³/s no descarregador de cheia. Finalmente, em Fronhas, definiu-se uma cota inicial de 120m, e um caudal descarregado igual a 100 m³/s e transferido igual a 17,36 m³/s, o máximo para a cota escolhida.

6.4.1. CAUDAIS AFLUENTES

Nas Figuras 75 a 79 apresentam-se os caudais afluentes no período analisado. Os caudais afluente à albufeira da Aguieira e de Fronhas correspondem, como foi referido anteriormente, a valores observados, enquanto os restantes correspondem a caudais previstos, utilizando-se os dados de caudal previsto médio.

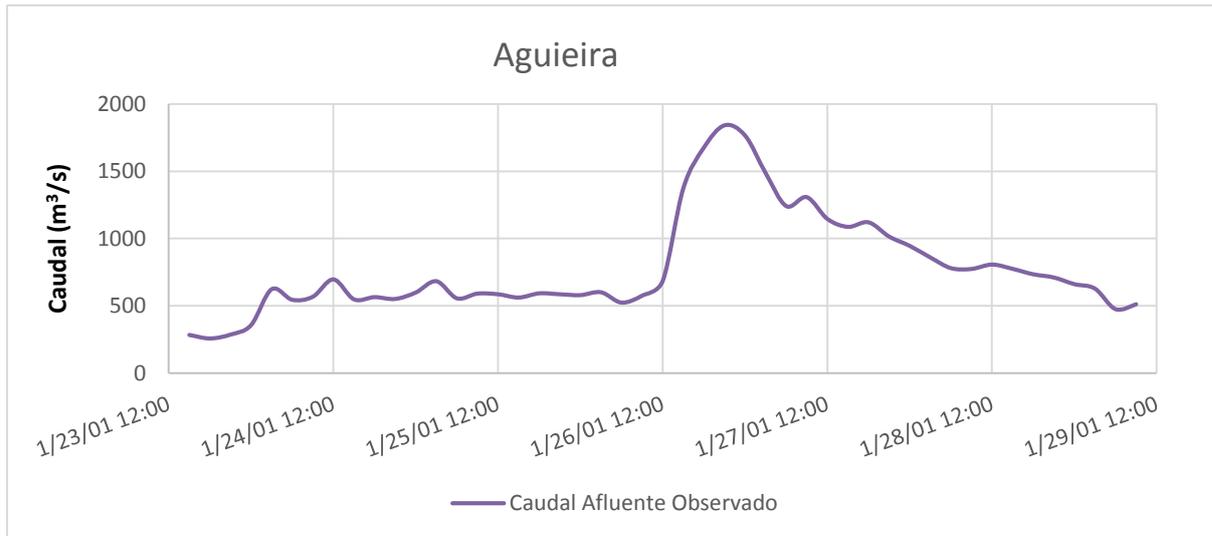


Figura 75 Caudal observado afluente à albufeira da Agueira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

Na Agueira (Figura 75), ocorreu um caudal de ponta de 1840,9 m³/s, havendo um período de aproximadamente 24 horas em que o caudal afluente é superior a 1200 m³/s.

No início, entre o dia 24 de Janeiro, às 03:00 horas, e o dia 26 de Janeiro, às 12:00 horas, observa-se um caudal afluente médio de 590 m³/s, relativamente constante, com um máximo de 682,4 m³/s. Este período leva a caudais efluentes que, adicionados aos restantes caudais afluentes a Coimbra, conduzem a cheias na cidade de Coimbra e podem acarretar consequências a jusante da mesma, como se verá mais adiante.

A partir do dia 26 de Janeiro, às 15:00 horas, o caudal afluente à Agueira sofre um aumento significativo, de 684,5 m³/s para 1373,4 m³/s, e crescendo nas seis horas seguintes até um caudal de pico de 1840,9 m³/s. Até dia 27 às 9:00 horas o caudal afluente é superior a 1200 m³/s.

No fim do evento o caudal afluente à albufeira da Agueira sofre um decréscimo lento, decrescendo de 1014,1 m³/s para 511,1 m³/s em aproximadamente 36 horas.

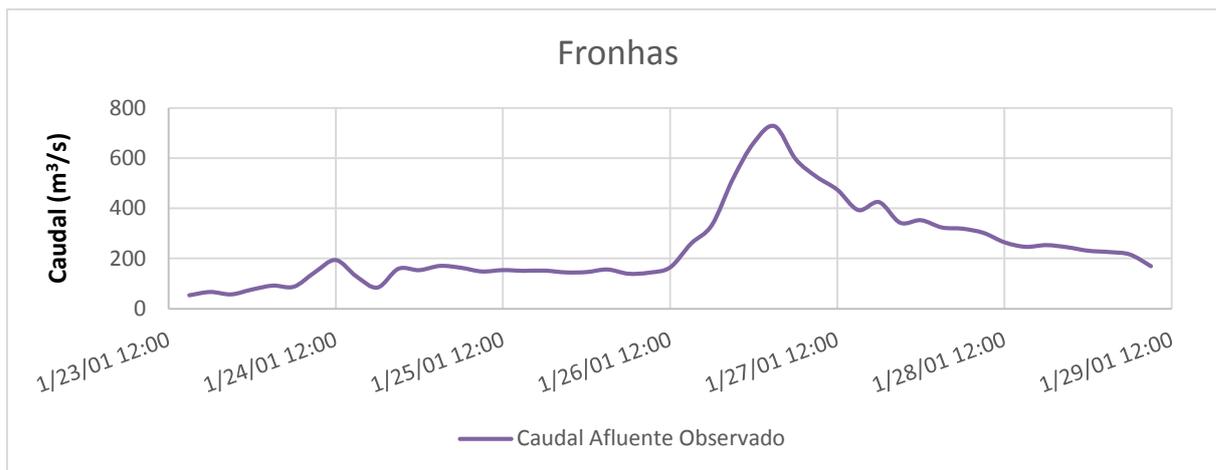


Figura 76 Caudal observado afluente à albufeira de Fronhas no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

Em Fronhas ocorre um caudal de ponta de 727,16 m³/s. O caudal de Fronhas é um caudal elevado, mas que, como se verá na análise de Fronhas, possível de amortecer. O período de maior caudal, de caudal superior a 300 m³/s, dura aproximadamente 21 horas.

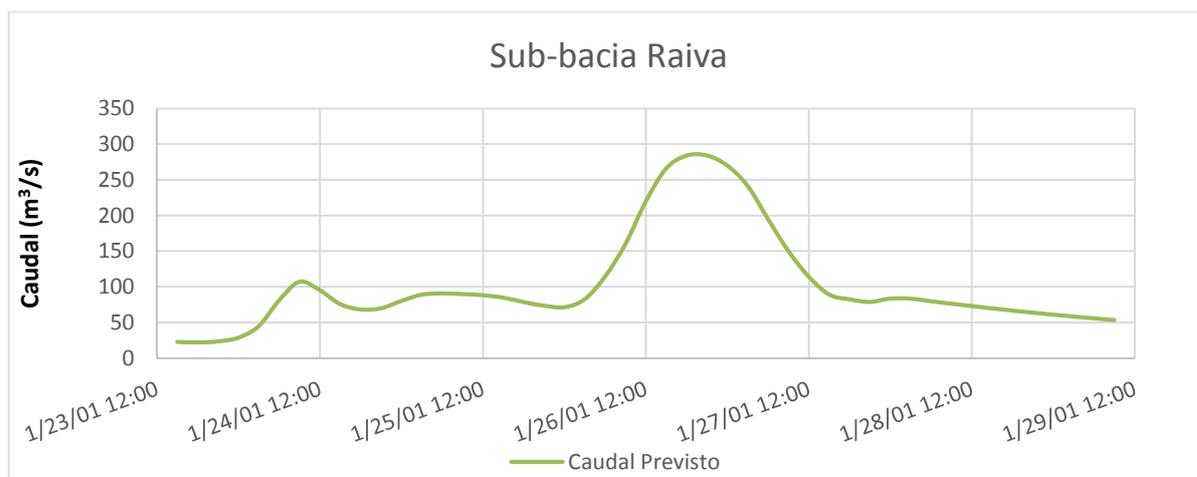


Figura 77 Caudal previsto afluente à sub-bacia da albufeira de Raiva no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

Na sub-bacia da albufeira de Raiva observa-se um caudal, previsto, de ponta de 283,29 m³/s. Este caudal é importante pois, somado ao caudal efluente da albufeira da Agueira vai aumentar significativamente o caudal afluente à albufeira de Raiva, e devido a reduzida capacidade de armazenamento de Raiva, vai obrigar a caudais efluentes mais elevados que os observados na Agueira, como se demonstrará.

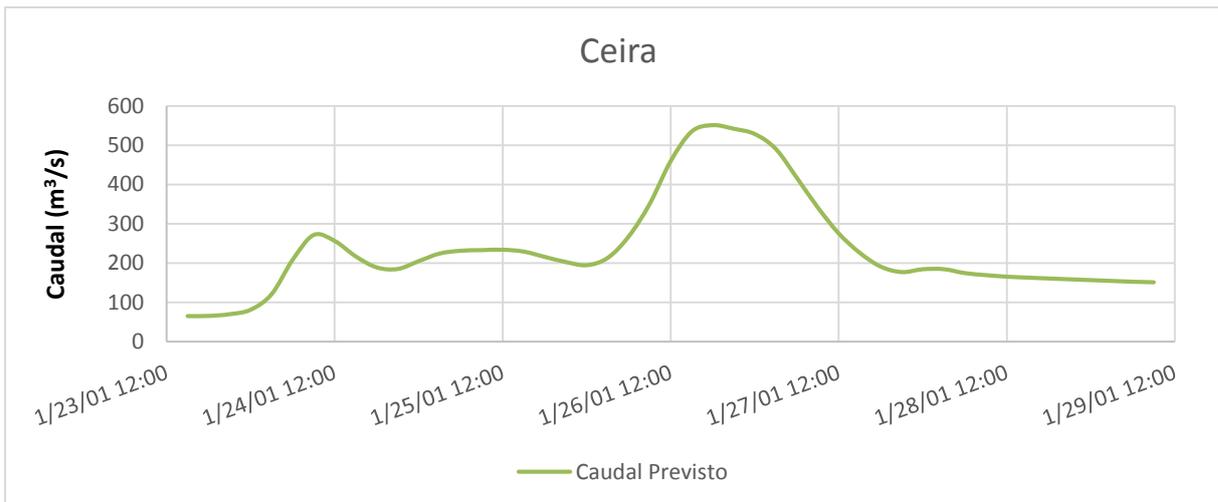


Figura 78 Caudal previsto afluente à sub-bacia do rio Ceira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

O rio Ceira, não sendo regularizado, tem uma grande contribuição para as cheias em Coimbra. Durante o evento de Janeiro de 2001, o caudal de pico na foz do rio Ceira foi de 660 m³/s. Considerando o percentil 50 das previsões de caudais, obteve-se um o caudal de ponta de 554,4 m³/s.

Este caudal é elevado tendo em atenção o caudal igualmente não regularizado referente à sub-bacia de Coimbra. A influência do rio Ceira e da sub-bacia de Coimbra é observada na análise que será feita mais adiante acerca do caudal afluente a Coimbra, regularizado e não regularizado.

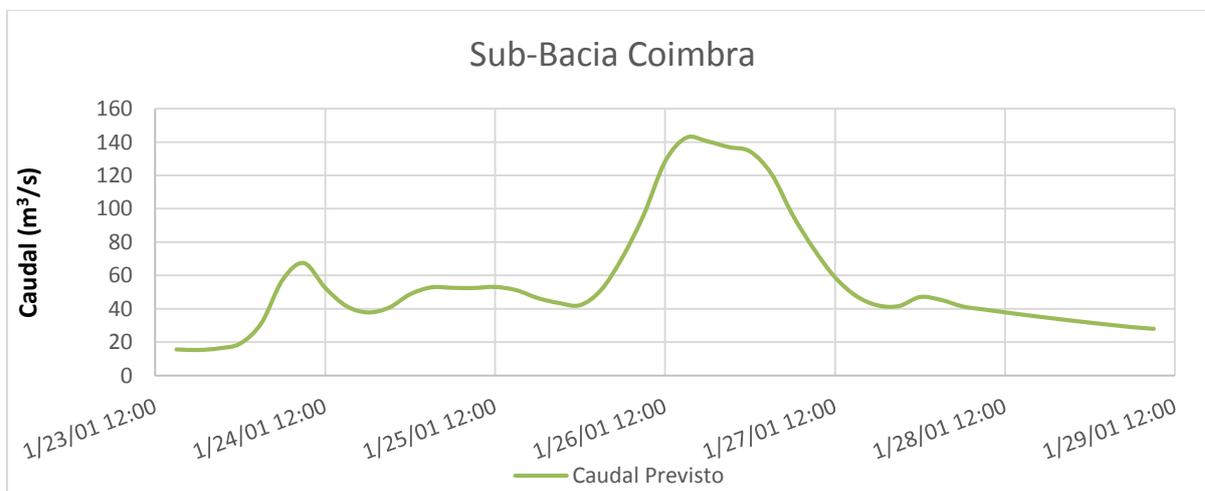


Figura 79 Caudal previsto afluente à sub-bacia de Coimbra no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

O caudal referente à designada sub-bacia de Coimbra não apresenta um caudal elevado mas, como já foi referido, amplifica os efeitos do caudal não regularizado afluente a Coimbra provindo do rio Ceira. O caudal de pico não regularizado (referente à bacia do rio Ceira e à sub-bacia compreendida entre a albufeira de Raiva e Coimbra) afluente a Coimbra, ou seja o caudal da sub-bacia de Coimbra e do rio Ceira, é 696,95 m³/s, ou seja, neste evento, somente este caudal não regularizado impossibilitam, à partida, o cumprimento do complemento para 800 m³/s para Coimbra, pois limita o caudal efluente do

sistema de albufeiras em 103,05 m³/s. Portanto garante no mínimo a ocorrência de cheias na cidade de Coimbra.

6.4.2. CAUDAIS EFLUENTES, CONSIDERANDO AS REGRAS PROPOSTAS

6.4.2.1. Aguieira

As regras de operação que foram usadas na albufeira da Aguieira foram as mesmas que foram apresentadas no subcapítulo 6.2.3..

Os resultados da simulação deste evento na Aguieira são apresentados nas Figuras 80 e 81, onde se representam os hidrogramas dos caudais afluentes e efluentes na albufeira (Figura 80), assim como a evolução do nível de água na albufeira (Figura 81).

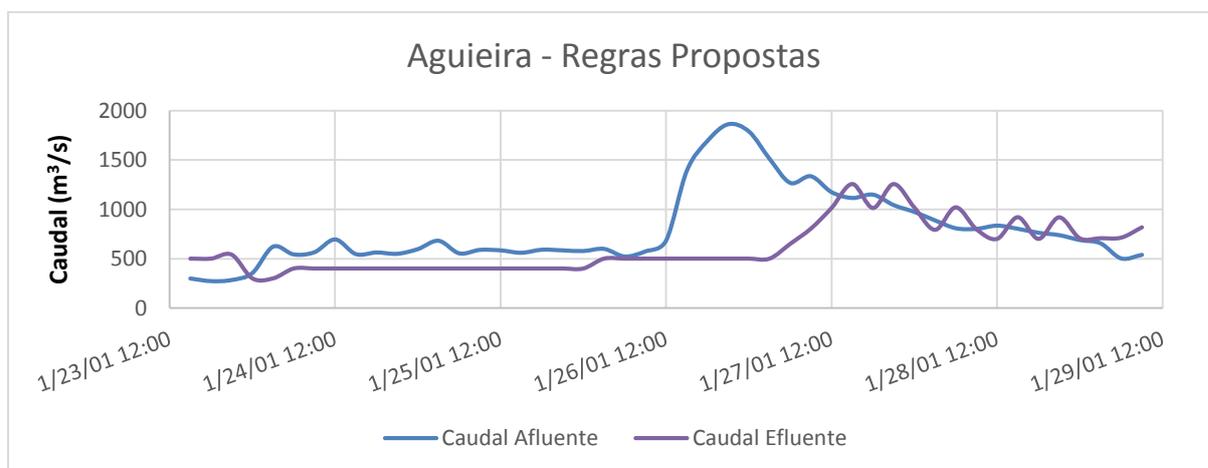


Figura 80 Caudal afluente e efluente à albufeira da Aguieira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001



Figura 81 Nível de água na albufeira da Aguieira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

Inicialmente ocorre uma descarga feita pelas turbinas da central hidroelétrica de 500 m³/s durante duas horas e 540 m³/s durante uma hora, turbinamento ocorrido cumprindo o complemento para 800 m³/s para Coimbra. Este esvaziamento não pôde ser completo até à cota 117,5m devido ao aumento rápido do caudal afluente. A cota inicial, 119m, desce apenas até à 118,81m.

Após o aumento do caudal afluente, para o caudal médio de 590 m³/s, o caudal da efluente da Aguieira passou a ser constante, com o valor de 400 m³/s. Este caudal permitiu que durante 45 horas o caudal médio afluente a Coimbra fosse 875,1 m³/s, até ao início do dia 25 de Janeiro.

No dia 26 de Janeiro, às 06:00 horas, a cota da albufeira ultrapassou os 121m, isto levou à alteração do caudal efluente aumentando para 500 m³/s. Este caudal ocorreu durante 21 horas, durante a altura do caudal de pico afluente.

Após esse período de 21 horas foi ultrapassada a cota 124m o que implicou nova alteração do caudal efluente, devido à alteração das regras de operação em vigor. As regras propostas ditaram o aumento, controlado, do caudal efluente, de modo a evitar um aumento excessivo da cota da albufeira e do valor do caudal efluente. Este aumento, até ao caudal máximo efluente, ocorreu durante 12 horas, aumentando dos 500 m³/s até 1256,9 m³/s. Atingido o máximo efluente foi possível baixar o nível da albufeira da Aguieira, mantendo um caudal efluente o mais reduzido possível. Havendo dois períodos de 3 horas em que o caudal efluente foi da ordem dos 1200 m³/s, mas os restantes períodos tiveram caudais entre os 700 m³/s e os 1000 m³/s.

A cota final da albufeira da Aguieira foi de 124,41m com propensão para baixar devido à tendência do caudal afluente para reduzir e o efluente manter-se constante nos 700 m³/s enquanto a cota do nível de água fosse igual ou superior a 124m, como ditam as regras propostas.

O caudal efluente, enquanto inferior ou igual a 540 m³/s foi descarregado pelas turbinas da central hidroelétrica. Após ultrapassar este valor, a diferença entre o caudal efluente e o descarregado pelas turbinas, foi descarregado pelo descarregador de cheia (Figura 82).

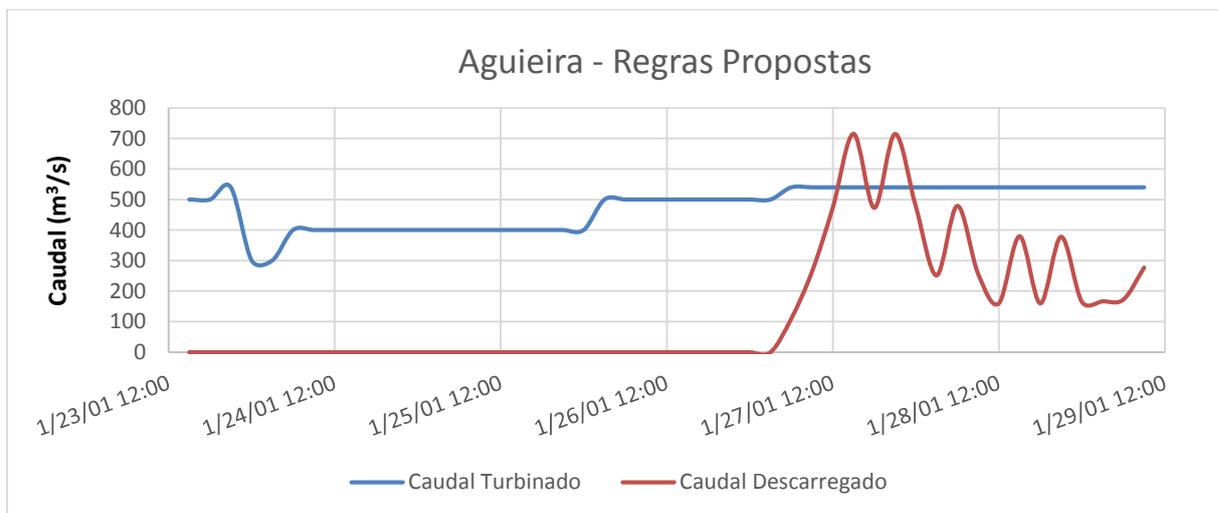


Figura 82 Diferenciação do caudal efluente da albufeira da Aguieira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

6.4.2.2. Raiva

Os resultados da simulação deste evento na Raiva são apresentados nas Figuras 83 e 84, onde se representam os hidrogramas dos caudais afluentes e efluentes na albufeira (Figura 83), assim como a evolução do nível de água (Figura 84).

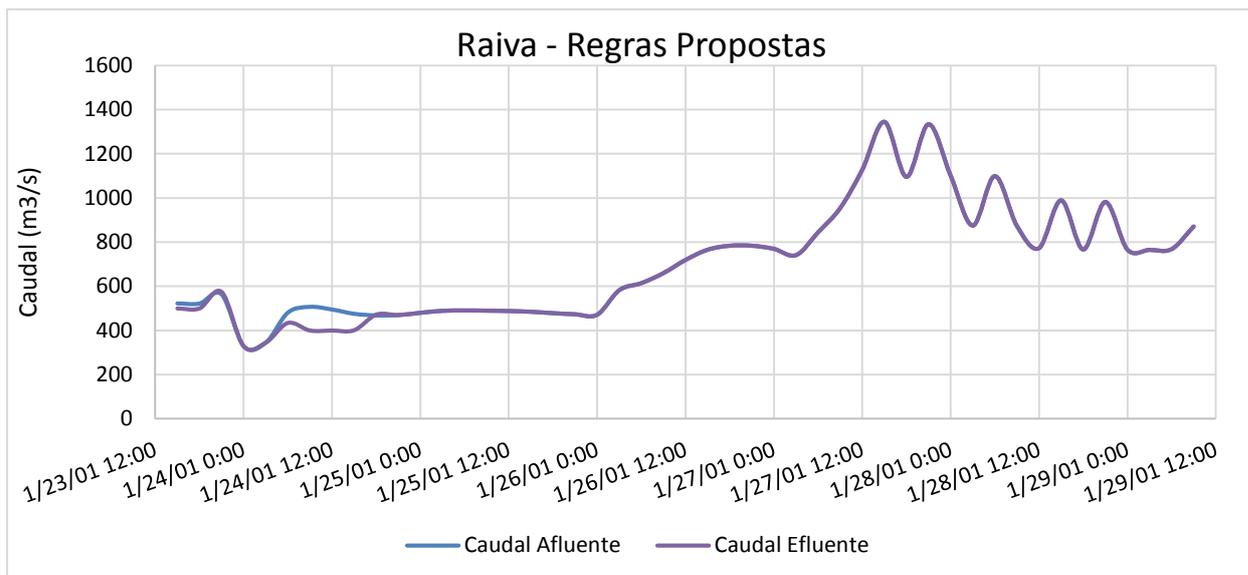


Figura 83 Caudal afluente e efluente à albufeira da Raiva no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

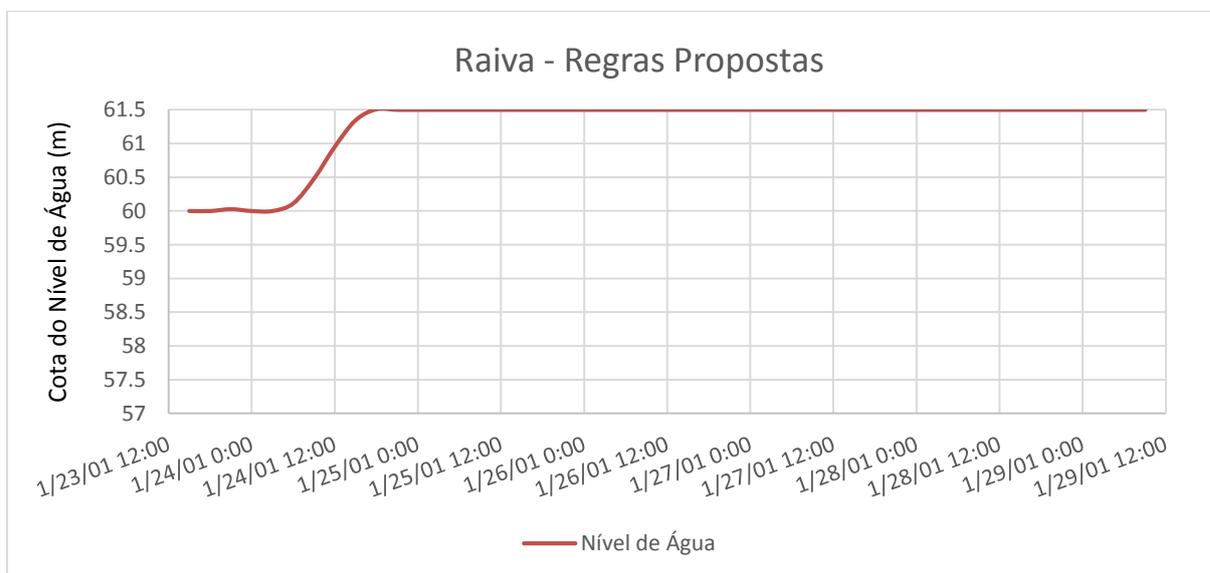


Figura 84 Nível de água na albufeira de Raiva no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

Dado que a albufeira de Raiva tem uma capacidade muito reduzida de armazenamento, então para situações com aumentos de caudal muito rápidos, foi adotado, como se afirma nas regras propostas no subcapítulo 6.2., regras de descarga para estas situações, que implicam que se descarregue todo o caudal afluente à albufeira de Raiva, de modo a evitar que o nível de água ultrapasse a cota 61,5 m.

O caudal afluente a Raiva vai ser o efluente da albufeira da Aguieira, analisado anteriormente, e o referente à sub-bacia entre estas duas albufeiras. Devido ao facto de o caudal ser extremamente elevado o amortecimento do caudal de cheia vai ser efetuado na Aguieira, sem se observar influência na albufeira de Raiva.

Como é possível observar na figura 83, inicialmente a albufeira de Raiva amortece o caudal afluente da Aguieira, caudal referente à sua descarga inicial, mas rapidamente a sua cota atinge os 61,5m, e a partir

desse momento o caudal efluente passa a igualar o afluente. Tendo a cota e a igualdade de caudais efluente e afluente continuado igual até ao final do evento.

Observando o caudal anterior pode-se ver que o caudal efluente foi constante no caudal turbinado, mantendo-se igual ao seu caudal turbinado máximo, 160 m³/s, e o restante caudal a ser descarregado pelo descarregador de cheia (Figura 85).

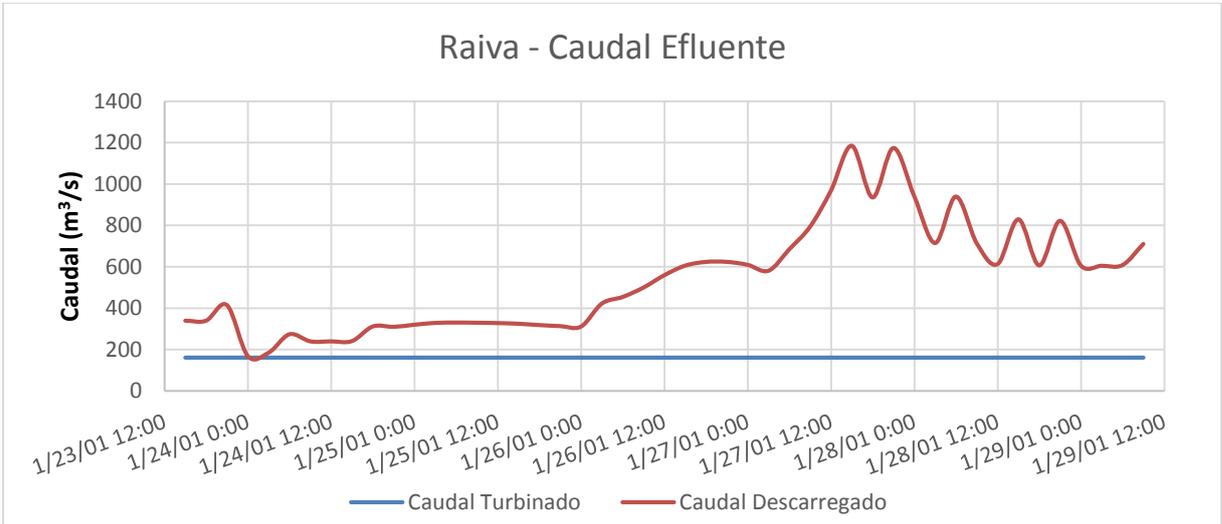


Figura 85 Diferenciação do caudal efluente da albufeira de Raiva no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

6.4.2.3. Fronhas

Os resultados da simulação deste evento em Fronhas são apresentados nas Figuras 86 e 87, onde se representam os hidrogramas dos caudais afluentes e efluentes na albufeira (Figura 86), assim como a evolução do nível de água (Figura 87).

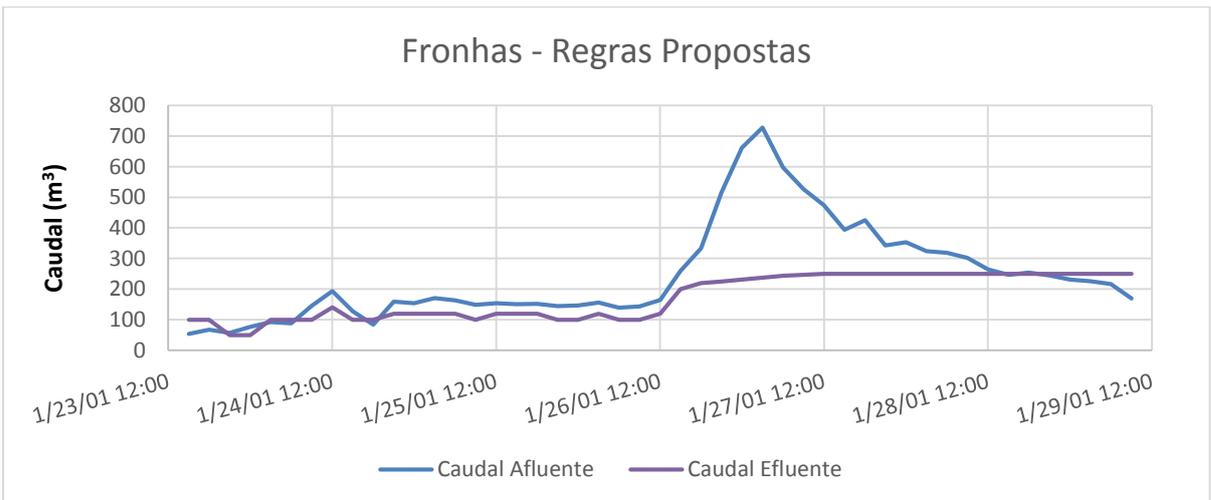


Figura 86 Caudal afluente e efluente à albufeira da Agueira no período de 23 e 29 de Janeiro 2001



Figura 87 Nível de água na albufeira de Fronhas no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

Na albufeira de Fronhas foram usadas as regras propostas no subcapítulo 6.2.3. com as alterações propostas na tabela 8.

Na albufeira de Fronhas, o caudal efluente inicial é um caudal relativamente baixo, inferior a $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Entre o dia 23 de Janeiro às 24:00 horas e o dia 26 de Janeiro, às 12:00 horas, mantém um caudal médio de $140,82 \text{ m}^3/\text{s}$, com um caudal afluente máximo de $194,03 \text{ m}^3/\text{s}$. Neste período, de acordo com as regras definidas no subcapítulo 6.2.3. (utilizando as regras que foram alteradas na tabela 8) o caudal descarregado pela albufeira de Fronhas encontrou-se maioritariamente entre $140 \text{ m}^3/\text{s}$ e $150 \text{ m}^3/\text{s}$. O caudal transferido para a Aguieira, como depende da cota do nível de água da Aguieira na fase inicial do evento, devido a baixa cota de Fronhas, o transvase encontra-se maioritariamente fechado, abrindo em certos períodos, em que a cota do nível de água em Fronhas é superior a cota na Aguieira.

A partir do dia 26 de Janeiro, às 15:00 horas, o caudal afluente começa a apresentar um ligeiro aumento até atingir o caudal de ponta, $727,16 \text{ m}^3/\text{s}$, e de seguida reduziu para um caudal de $342,86 \text{ m}^3/\text{s}$ no dia 27 de Janeiro às 21:00 horas. Durante este período de maior caudal afluente, o caudal efluente foi limitado pelas regras de operação, sendo o caudal descarregado menor que $250 \text{ m}^3/\text{s}$ e o caudal transferido na ordem dos $22 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta operação permitiu amortecer o caudal de cheia.

Neste período, devido à limitação do caudal efluente, ocorre um aumento da cota do nível de água de $120,13\text{m}$ até ultrapassar a cota $130,5\text{m}$, o NDO1. Ultrapassado o primeiro nível de defesa de obra, houve portanto a abertura total do descarregador de fundo, ocorrendo, no período de 27 de Janeiro às 21 horas até 29 de Janeiro às 06:00, um caudal descarregado de aproximadamente $250 \text{ m}^3/\text{s}$ associado a um caudal transferido para a albufeira da Aguieira de, em média, $28,8 \text{ m}^3/\text{s}$. No último período do evento o caudal descarregado diminuiu pois a última cota diminuiu em relação ao primeiro nível de defesa de obra.

A distinção do caudal efluente em caudal descarregado, no descarregador de fundo, e em caudal transferido pelo transvase para a albufeira da Aguieira encontra-se na seguinte Figura 88.

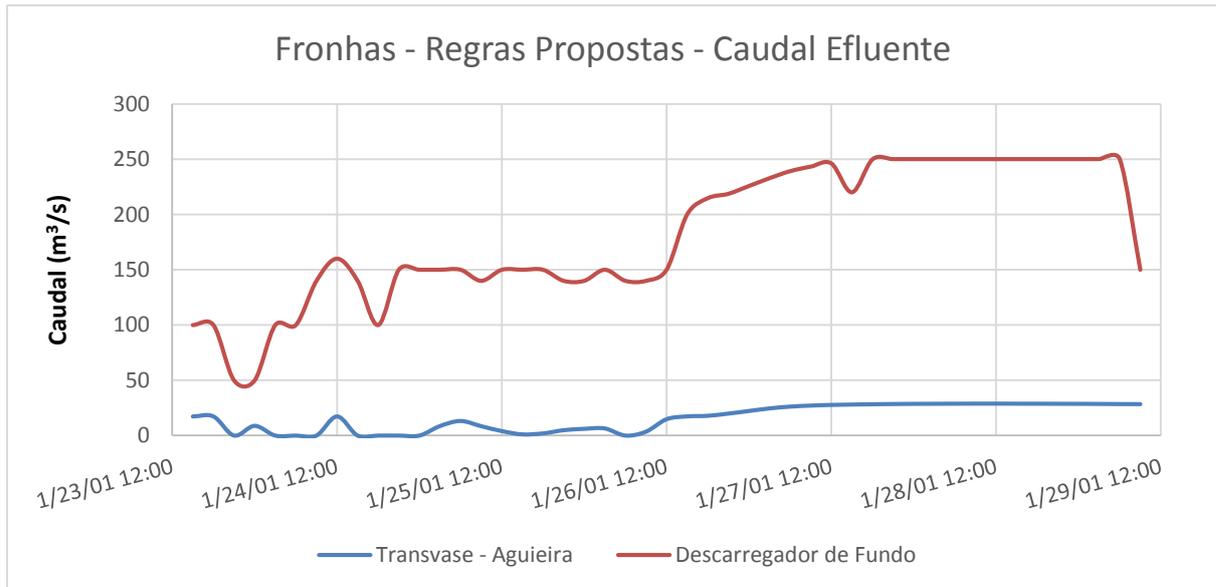


Figura 88 Diferenciação de caudais efluentes à albufeira de Fronhas no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

6.4.2.4. Coimbra

Na Figura 89 observa-se o caudal não regularizado e o caudal regularizado afluente a Coimbra. O caudal não regularizado apresenta um caudal de pico de 3359,20 m³/s e durante um período de 63 horas, entre o dia 26 de Janeiro, às 09:00 horas, e o dia 28 Janeiro, às 21:00 horas, apresenta um caudal afluente superior a 1200 m³/s.

O caudal não regularizado entre os dias 24 de Janeiro, às 03:00 horas, e 26 de Janeiro, às 06:00 horas, é superior a 800 m³/s, podendo provocar cheias em Coimbra, e inferior a 1200 m³/s. Este caudal tem influência significativa do rio Ceira e da sub-bacia de Coimbra porque, neste período, ambos os caudais apresentam valores, reunidos, superior a 200 m³/s e inferior 350 m³/s.

Em relação ao caudal regularizado, nas primeiras 18 horas o caudal é inferior a 800 m³/s, evitando cheias na cidade de Coimbra. Nas seguintes 42 horas, entre os dias 24 de Janeiro, às 09:00 horas, e 26 de Janeiro às, 03:00 horas, não é possível evitar que o caudal regularizado ultrapassa-se os 800 m³/s. Por outro lado, é possível evitar que o caudal ultrapassa-se os 1000 m³/s.

Após este período há um acréscimo significativo do caudal afluente, tanto das albufeiras, como dos caudais não regularizados de Coimbra e do rio Ceira, facto que leva ao aumento do caudal regularizado.

No período em que o caudal não regularizado aumenta de 1116,1 m³/s até ao caudal de ponta, 3359,2 m³/s, o caudal regularizado aumenta de 1093,2 m³/s até 1658,6 m³/s. De seguida, há um rápido decréscimo do caudal não regularizado. O caudal regularizado obtém o seu máximo de 1838,6 m³/s no dia 27 de Janeiro, às 15:00 horas.

Após atingido o máximo caudal regularizado, este tem um decréscimo lento, 30 horas após atingir o caudal regularizado máximo, o caudal regularizado volta a atingir o limite dos 1200 m³/s.

É também possível observar no gráfico o efeito do caudal não regularizado de Coimbra e do Ceira. O caudal máximo foi de 691,73 m³/s e ocorre 6 horas antes do caudal de ponta da cheia. Na altura do caudal de ponta observa-se que o caudal efluente do sistema de albufeiras a montante não é superior a

1000 m³/s, mas por influência deste caudal de pico não regularizado há consequências graves a jusante de Coimbra.

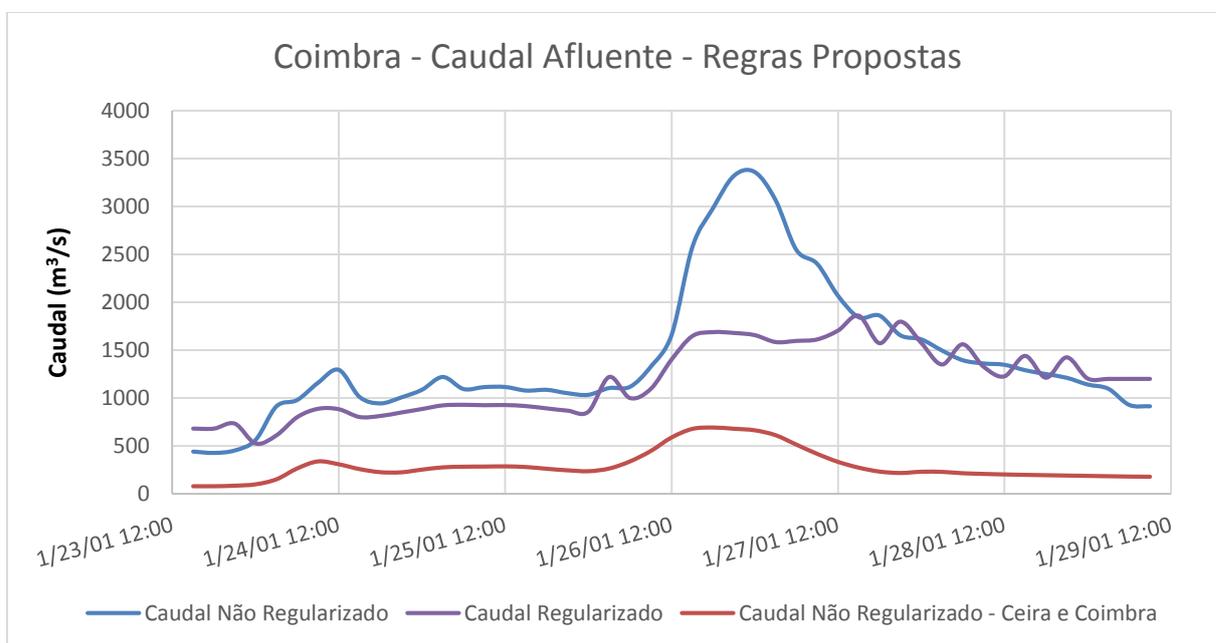


Figura 89 Caudais não-regularizados (total e parcial) e regularizado afluentes a Coimbra no período de 23 e 29 de Janeiro 2001

6.5. ESTUDO COMPARATIVO COM CAUDAIS OBSERVADOS

6.5.1. REGRAS PROPOSTAS VS REGRAS EM VIGOR

6.5.1.1. Evento de Fevereiro de 2014

De modo a comparar as regras propostas neste estudo (apresentadas em 6.2) com as regras em vigor (apresentadas em 3.5) foi usada a simulação com os caudais com que se efetuou o estudo no capítulo 6.3. ao que ocorreu, utilizando-se a quarta alternativa estudada, relativa ao uso dos caudais obtidos através da precipitação observada para a albufeira da Aguieira e de Fronhas e dos caudais previstos relativos ao percentil 50.

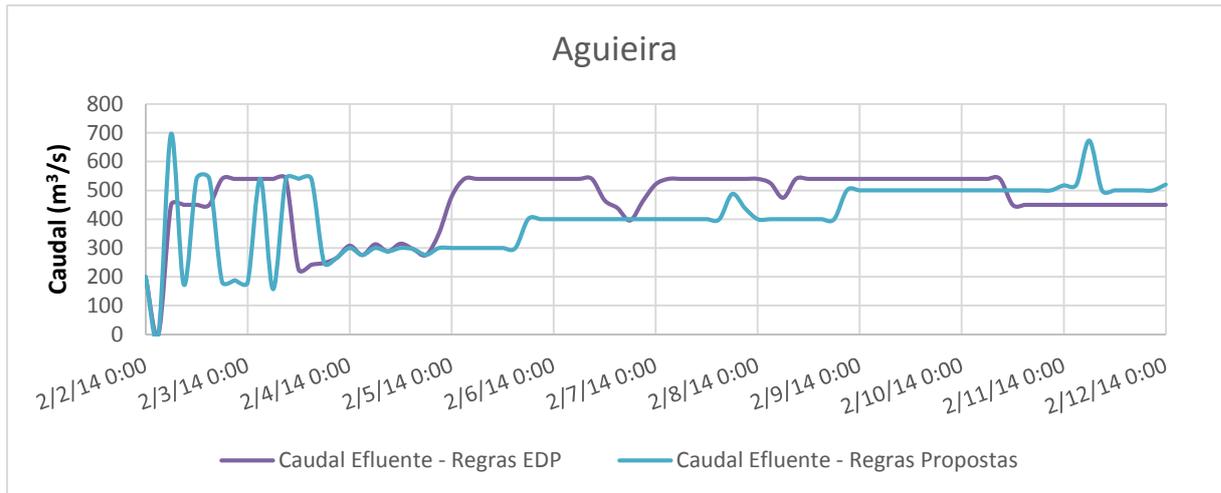


Figura 90 Comparação entre caudais efluentes da Agueira, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, para as regras propostas neste estudo com as regras apresentadas em 3.5

Na Figura 90 é comparando o caudal efluente na Agueira para as regras em vigor com as regras propostas por este trabalho (resultado apresentado no subcapítulo 6.3.1.5.), com dados iniciais idênticos. É possível observar um caudal inicial constante, segundo as regras em vigor, que também irá implicar um descarregamento da albufeira antes do início do evento. Após este descarregamento inicial ambos os caudais mantêm-se semelhantes ao afluente de modo a manter a cota mínima. Quando o caudal afluente sofre um aumento, o caudal das regras propostas mantém-se constante nos 300 m³/s, aumentando gradualmente consoante a cota da albufeira, mas mantendo-se mais baixo que o ocorrido nas regras em vigor, que aumenta até aos 540 m³/s, onde se mantém durante a maior parte do evento.

As regras em vigor cumprem o complemento para 1200 m³/s, usando o caudal máximo turbinável, 540 m³/s, reduzindo em períodos com menor caudal afluente, como se pode observar na figura 89. No final do evento o caudal efluente reduz de modo a evitar caudais mais elevados em Coimbra, sendo a única altura em que o caudal é mais baixo que o efluente segundo as regras propostas.

Na Figura 91 é apresentado o caudal afluente a Raiva, dependente maioritariamente do caudal efluente da Agueira. Como tal verifica-se um maior caudal efluente na albufeira de Raiva segundo as regras em vigor, comparando com as regras propostas neste trabalho. Este caudal foi ultrapassado no final evento, altura em que igualmente o caudal efluente da Agueira segundo as regras em vigor foi maior que as de Raiva.

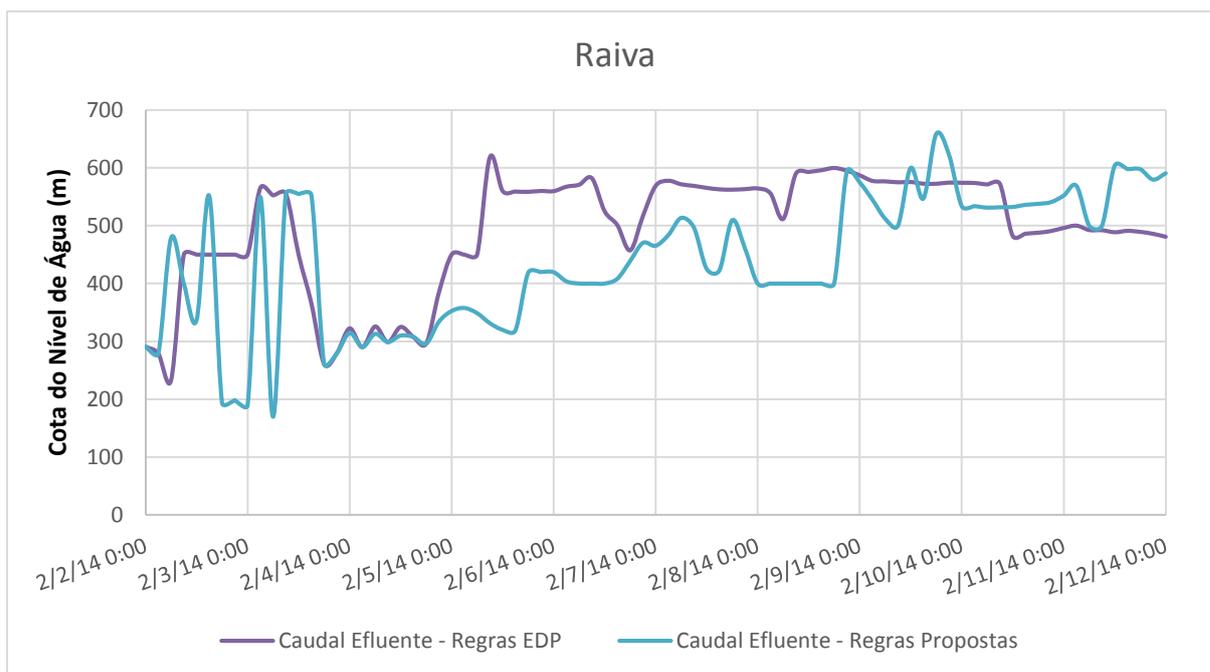


Figura 91 Comparação entre caudais efluentes da Raiva, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, para as regras propostas neste estudo com as regras apresentadas em 3.5

Em Fronhas (Figura 92), o caudal efluente inicial é semelhante nas regras em vigor e nas regras propostas. Após o aumento do caudal afluente, o caudal descarregado pelo descarregador de cheia, segundo as regras em vigor, mantém-se constante, só variando o caudal transferido para a albufeira da Aguieira pelo transvase. Ao contrário das regras propostas em que o caudal descarregado varia consoante o caudal afluente. Esta diferença permite manter um nível de água mais baixo, na albufeira de Fronhas, na simulação em que foram usadas as regras propostas.

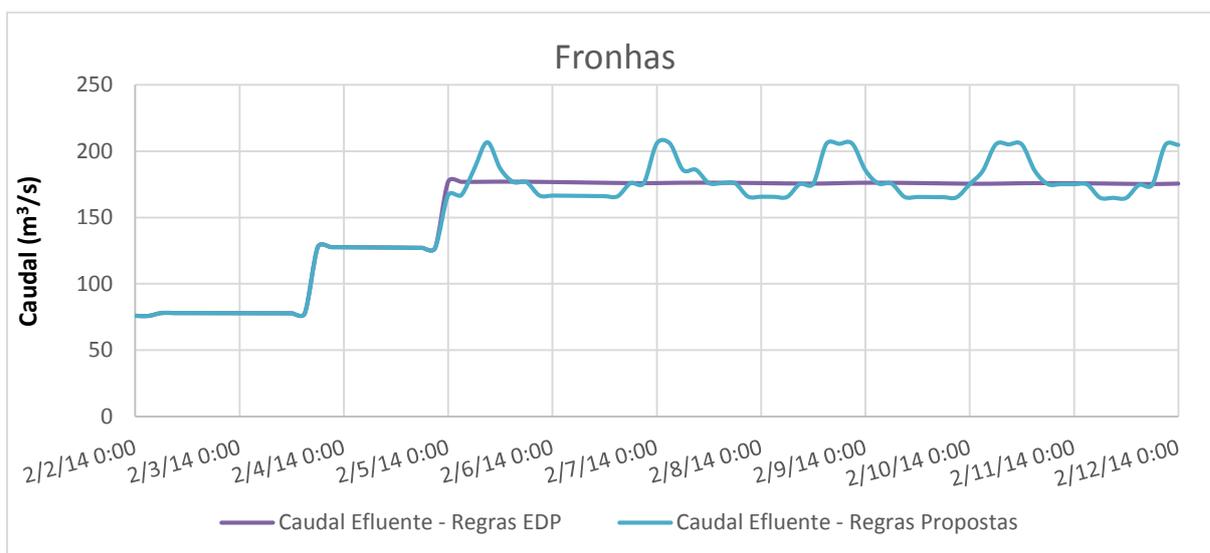


Figura 92 Comparação entre caudais efluentes da Fronhas, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, para as regras propostas neste estudo com as regras apresentadas em 3.5

Na Figura 93 apresenta-se o caudal regularizado afluente a Coimbra para ambas as regras propostas. É em geral mais elevado quando usadas as regras em vigor, propostas pela EDP. Em ambos os casos não

foi possível evitar caudais superiores a 800 m³/s, criando a possibilidade de cheias em Coimbra, mas foi possível evitar caudais superiores a 1200 m³/s, que seriam prejudiciais tanto para Coimbra como para jusante.

No caudal afluente, gerado pelas regras propostas, foi possível evitar caudais superiores a 800 m³/s até ao dia 7, enquanto no caudal afluente gerado pelas regras em vigor, no final do dia 3 o caudal afluente a Coimbra é superior a 800 m³/s. Apesar de o valor máximo de caudal afluente a Coimbra ser semelhante em ambos os casos, o caudal gerado pelas regras em vigor é mais vezes superior a 1000 m³/s, o que no caudal gerado pelas regras propostas, que só ocorre no período do caudal máximo.

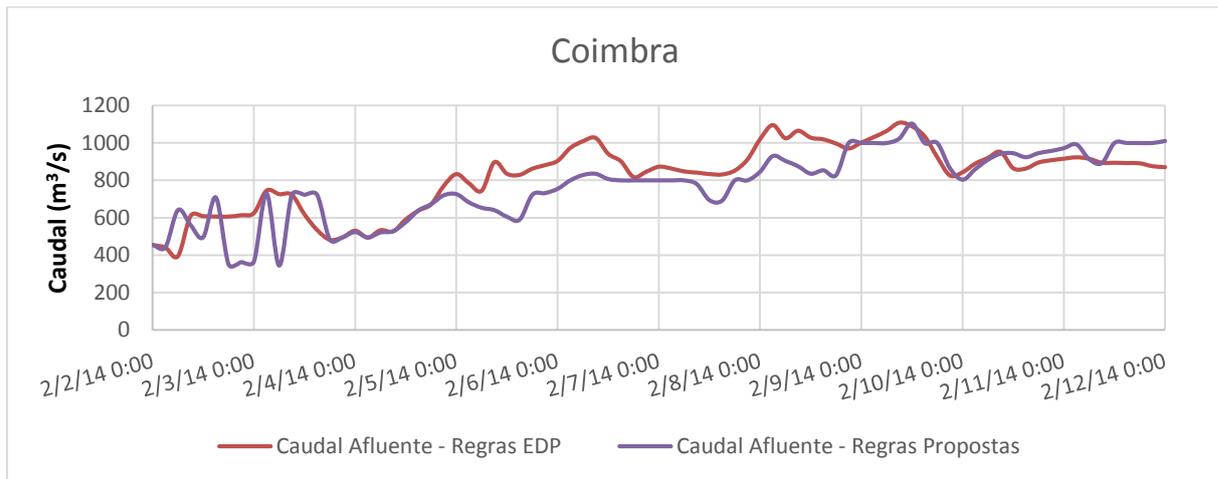


Figura 93 Comparação entre caudais regularizados afluentes a Coimbra, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, para as regras propostas neste estudo com as regras apresentadas em 3.5

Concluindo, na figura 93 é possível observar que as regras propostas permitem melhorar o amortecimento do caudal de cheia, reduzindo o caudal regularizado afluente a Coimbra. Esta redução ocorre durante um longo período de tempo e permite reduzir as cheias ocorridas em Coimbra durante quase 4 dias, quando comparado com o ocorrido de acordo com as regras em vigor, porque nas regras propostas é respeitado o complemento para 800 m³/s que permite exatamente reduzir o caudal afluente em Coimbra. Após ultrapassado este limite, no caudal afluente devido as regras propostas, o caudal afluente em ambas as situações é relativamente semelhante. Em ambas as regras o caudal afluente a Coimbra não é superior a 1200 m³/s, respeitando o complemento para 1200 para Coimbra, utilizado em ambas as regras de exploração.

No caso das regras propostas o caudal armazenado no final do evento é superior. O que permite um maior aproveitamento do caudal de cheia para outros fins, ao contrário do ocorrido no caso das regras de exploração da EDP.

6.5.1.2. Evento de Janeiro de 2001

Para o evento de 2001 foram comparados os valores de caudais para a Agueira e para Coimbra porque são os locais onde existem registos de dados observados, que são apresentados no subcapítulo seguinte.

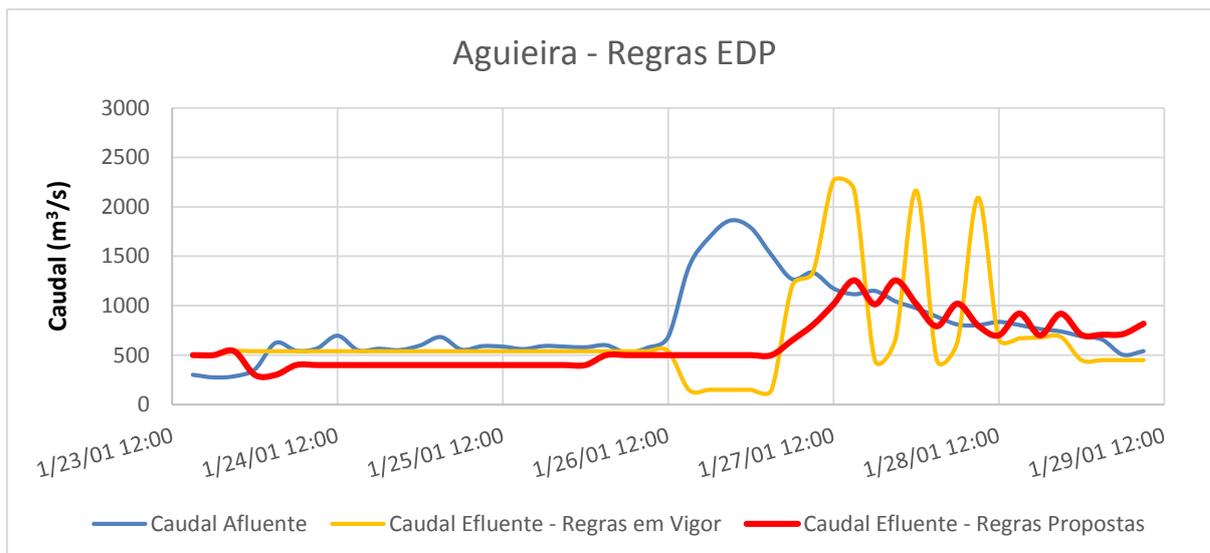


Figura 94 Caudal efluente da Aguieira, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, com as regras apresentadas em vigor e para as regras propostas

Analisando a figura 94, referente aos caudais efluentes da albufeira da Aguieira, o caudal efluente inicial, obtido através das regras em vigor, é bastante semelhante ao afluente. Na altura do caudal de ponta o caudal efluente baixa para um mínimo de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, devido ao complemento para Coimbra de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, o que leva a um aumento muito rápido da cota do nível de água da Aguieira, elevando rapidamente a cota para o nível de defesa de obra, onde o caudal efluente tem tendência para ser extremamente elevado, já que se impõe um aumento horário de $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Isto leva a um caudal efluente máximo de $2168,10 \text{ m}^3/\text{s}$ e a que ocorram mais 2 períodos de 3 horas com um caudal superior a $2000 \text{ m}^3/\text{s}$. Este caudal efluente gera um caudal afluente em Coimbra de grandes dimensões como se pode ver no gráfico seguinte.

Comparativamente com os caudais obtidos para as regras propostas, estas regras permitem que o caudal lançado seja mais elevado em alturas mais críticas, como no período de pico, limitando o caudal que aflui a Coimbra, sem a necessidade de grandes descargas posteriores. Comparativamente, o caudal máximo efluente da Aguieira, segundo as regras propostas é igual a $1255,6 \text{ m}^3/\text{s}$, um valor quase $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ inferior ao obtido com as regras em vigor.

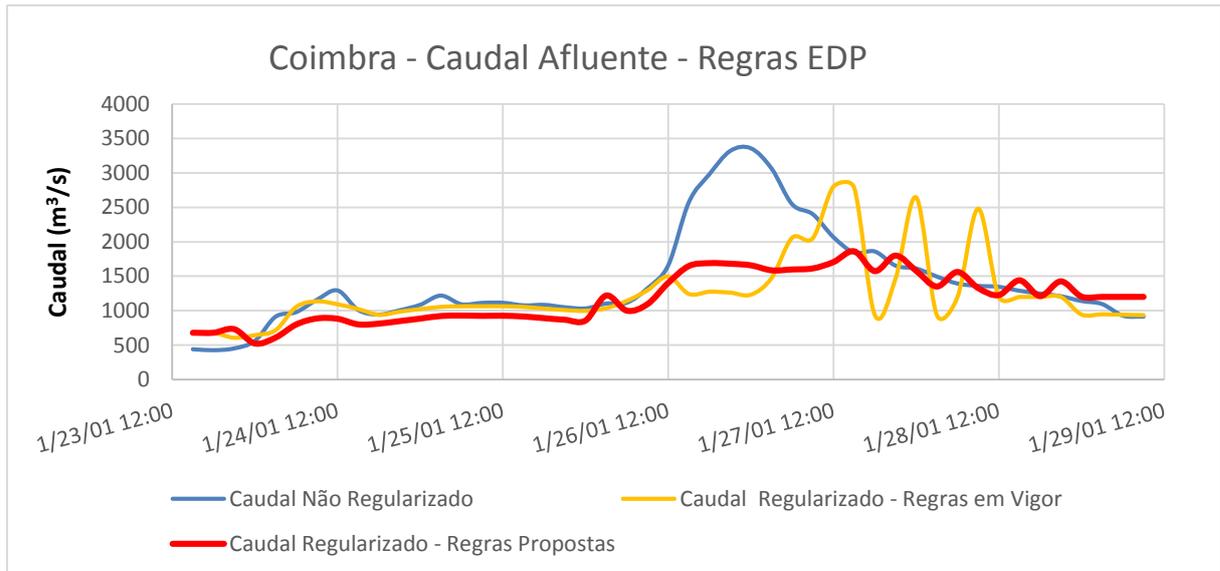


Figura 95 Caudal regularizado afluyente a Coimbra, entre os dias 23 e 29 de Janeiro, para as regras em vigor e para as regras propostas

O caudal regularizado afluyente a Coimbra tem grande influência do caudal efluente da albufeira da Agueira. Observando o hidrograma é possível observar que a sua forma é semelhante ao ocorrido na albufeira da Agueira, ocorrendo os seus caudais de pico quando a Agueira descarrega caudais mais elevados. Os caudais de pico, afluentes a Coimbra são superiores a 2500 m³/s, caudais muito elevados comparativamente com o obtido pelas regras propostas e com o que foi observado. Como se vai observar na análise aos caudais observados no relatório da APA.

6.5.2. REGRAS PROPOSTAS VS OPERAÇÃO REAL

No relatório da APA sobre o evento de cheia de Janeiro de 2001 (Rodrigues et al, 2001) é apresentado um gráfico onde se apresenta o amortecimento do caudal obtido na albufeira da Agueira (Figura 96) e outro gráfico com a comparação entre o caudal afluyente a Coimbra observado e o que teria afluído em regime natural (Figura 97).

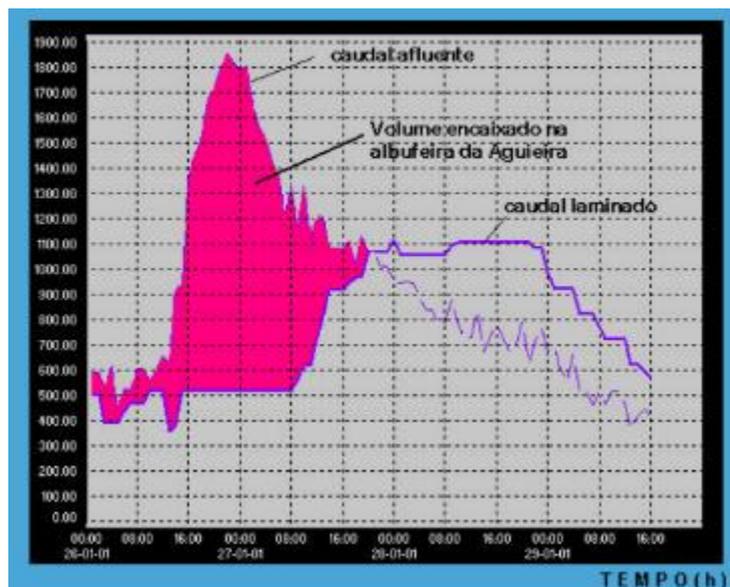


Figura 96 Hidrograma do caudal afluyente e do caudal efluente da Albufeira da Aguieira entre os dias 26 e 29 de Janeiro (Rodrigues et al, 2001)

Observando a linha do caudal laminado, na figura 96, encontra-se alguma semelhança com o comportamento da Aguieira obtido através do uso das regras propostas onde foi também possível amortecer o período em que o caudal afluyente apresentou maiores valores, mas com as regras propostas o caudal efluente da Aguieira, durante o período de caudal de pico, no dia 27, foi superior ao observado mas durante um período de tempo mais reduzido, que podemos observar traduz melhores resultados no caudal afluyente a Coimbra.

Após esse período durante cerca de 28 horas, o caudal efluente da albufeira da Aguieira foi superior a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ e apresentou um pico de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$. O caudal efluente obtido na simulação realizada com as regras propostas apresentou um caudal máximo superior ao efluente observado, igual a $1255,6 \text{ m}^3/\text{s}$ comparativamente com o observado de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$. Por outro lado, quando usadas as regras propostas, o caudal efluente só se mantém superior a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 18 horas, menos 10 horas que o observado.

Em conclusão, há uma semelhança entre o comportamento da albufeira da Aguieira em relação às regras criadas e o ao que aconteceu na realidade.

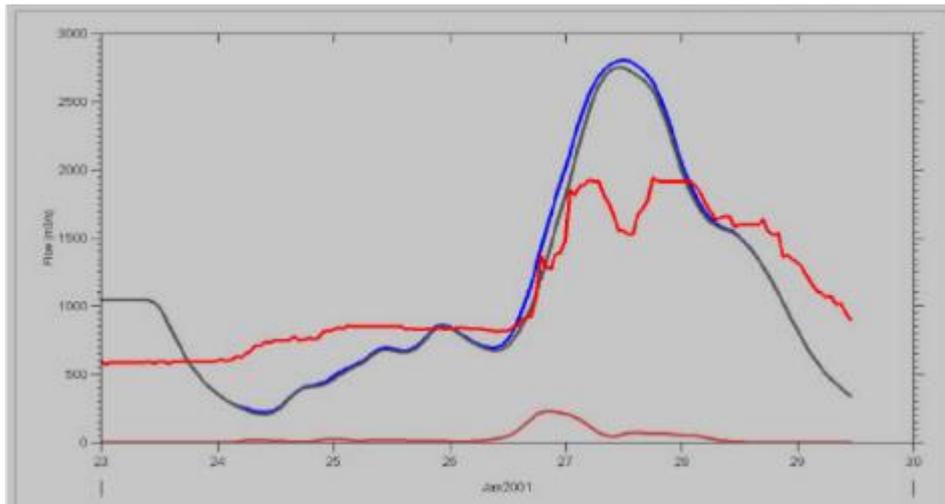


Figura 97 Caudal afluente a Coimbra não regularizado previsto (linha a azul) e caudal observado (linha vermelha) entre os dias 23 e 29 de Janeiro (Rodrigues et al, 2001)

Na Figura 97 está representado o caudal afluente a Coimbra, tanto o previsto em regime natural (linha azul) como o observado (linha vermelha). O caudal observado nos dias 27 e 28 de Janeiro apresentou dois picos, ambos superiores a $1950 \text{ m}^3/\text{s}$. Após a ocorrência do segundo caudal de pico, o caudal em Coimbra demorou cerca de 40 horas a ser reduzido até atingir um valor inferior a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

No caudal obtido através da simulação das regras propostas, os caudais de pico, afluentes a Coimbra, tem como máximo $1688,8 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1860,7 \text{ m}^3/\text{s}$, tendo o primeiro pico ocorrido durante o caudal de pico não regularizado e o segundo quinze horas após a ocorrência do caudal de pico, menor que o observado na figura 97. Por outro lado, a redução do caudal afluente a Coimbra também é lenta devido à necessidade de baixar a cota na albufeira da Aguieira.

Concluindo, as regras propostas, criadas para o evento de 2014 e aperfeiçoadas, no caso de Fronhas para este evento, apresentam um comportamento semelhante ao observado, mas com resultados melhores comparando o caudal não regularizado em ambas as alternativas, que é mais elevado no caudal simulado.

6.6. ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDROELÉTRICA

No seguinte subcapítulo é apresentada a análise das receitas obtidas através da produção de energia hidroelétrica, comparativamente entre as quatro alternativas e o caudal obtido através da quarta alternativa com as regras de exploração em vigor.

Através do conhecimento da potência instalada nas centrais hidroelétricas da Aguieira e da Raiva e considerando uma eficiência teórica de 85%, o HEC-ResSim permitiu calcular, para cada simulação realizada, a energia produzida ao longo do tempo, em ambas as centrais.

Multiplicando a energia produzida pelo preço unitário correspondente, estimaram-se os ganhos, em euros, correspondentes a cada simulação. O preço da energia (por mega watt) considerado correspondeu ao preço médio a cada 3 horas estabelecido pelo mercado ibérico de eletricidade nas datas das simulações (MIBEL, 2015).

Esta análise só foi efetuada para o evento de Fevereiro de 2014 porque, devido à excecionalidade do evento de 2001, o foco das regras de exploração nesse evento foi a limitação de caudal afluente a Coimbra, tentando reduzir os efeitos consequentes. Também, devido à grandeza dos valores descarregados, durante todo o evento é turbinado o máximo possível, 540 m³/s, e devido à falta de valores de custo de energia para as datas do evento.

Na albufeira da Aguieira foram obtidos os preços de venda de eletricidade demonstrados na tabela 9.

Tabela 9 Análise de receita na barragem da Aguieira por motivos de produção de energética

Produção Hidroeletricidade - Aguieira					
	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Caudal Obs. c/ Percentil 50	Caudal Obs. c/ Percentil 50 (Regras em vigor)
Total	€ 135.379,14	€ 140.608,12	€ 149.758,14	€ 155.379,76	€ 171.579,72
Diferença c/ Regras em Vigor	€ - 36.200,57	€ - 30.971,60	€ - 21.821,57	€ - 16.199,96	€ -
Cota Final (m)	118,95	120,72	123,02	123,34	121,29
Volume Útil Final Armazenado (hm ³)	318,82	345,73	389,21	396,07	356,57

Observando a diferença do preço total das regras propostas com as regras em vigor, podemos verificar uma perda de cerca de 10% quando comparadas a 4ª alternativa com as regras sugeridas e as regras em vigor. Por outro lado, temos uma diferença de 39.5 hm³ de volume armazenado, volume que aumenta o potencial hidroelétrico.

Em relação aos restantes eventos, às primeiras três alternativas, podemos observar que as diferentes previsões, quando falhadas, podem potenciar prejuízos elevados a nível de produção de energia.

Concluindo, as regras propostas permitem controlar melhor os caudais de cheia, afluentes a Coimbra, mas obtém uma receita menor por consequência da redução de volume de caudal turbinado. Por outro lado permite obter um maior volume armazenado útil que pode ser turbinado mais tarde e portanto, obter receita semelhante, em situações futuras. Este volume armazenado pode aumentar mais a receita se for tido em conta a capacidade do sistema de geradores reversíveis em bombear caudal da albufeira de Raiva para a albufeira da Agueira em determinados períodos do dia. Neste caso observando os preços da energia nos seguintes dias, no MIBEL (figura 98), vemos que a receita obtida nesses dias seria superior ao obtido turbinando durante o evento. Durante os dias após o dia 12, o fim do evento, o preço da energia tem uma subida que se mantém até pelo menos o dia 20, pelo que teriam de ser analisados os dias seguintes de modo a poder analisar os benefícios de manter um maior volume de água no final do evento.

Efetuada o cálculo médio de energia produzida para as horas seguintes teremos uma ideia da receita obtida para o período a seguir ao evento. Calculando a energia produzida por hora, com um caudal constante de 500 m³/s e altura da queda de água de 60 m, obtemos a energia produzida de 250,155 MWh. Como a capacidade útil final na simulação foi superior em 39,5 hm³, calculamos o tempo necessário para descarregar esse volume a um caudal constante de 500 m³/s, que é igual a 21,94 horas, que podemos arredondar para 22 horas. Nas 22 horas seguintes ao evento a energia teve um custo médio de 22,11€/MWh, portanto o lucro 121.680,4€, bastante superior aos -16.199,96€ que foi a perda de receita no final do evento.

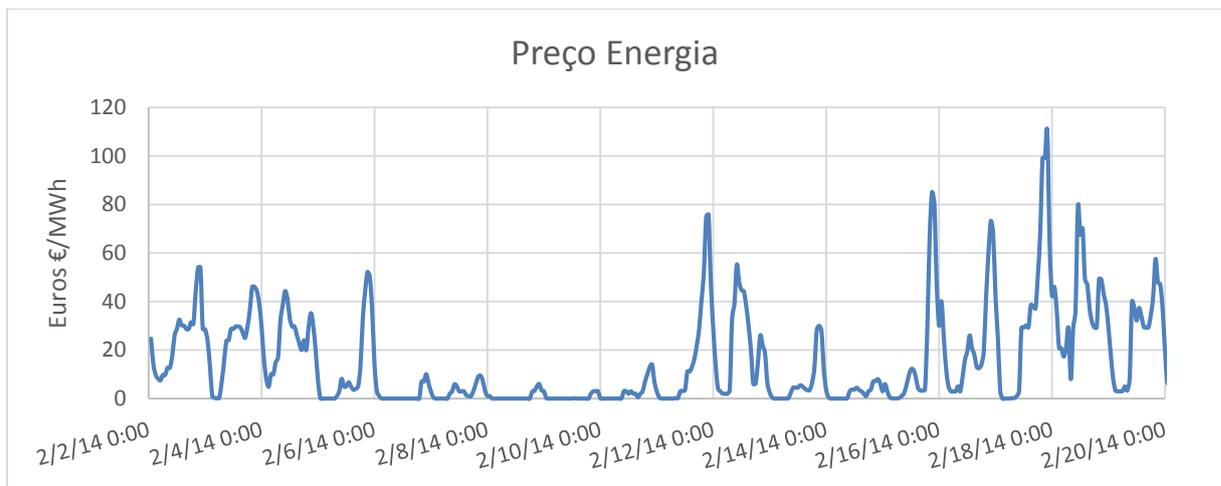


Figura 98 Evolução do preço da energia entre os dias 2 e 21 de Fevereiro

Concluindo, e apesar de no dia início do dia 12 se terem obtidas perdas ao nível do receita através da produção de energia, o volume armazenado pode ter uma utilização mais eficaz através do uso da capacidade do sistema de geradores reversíveis ou, até mesmo, de regras de exploração que turbinem nos períodos de maior receita, durante o dia, e bombem da albufeira de Raiva para a da Agueira durante o período de menor receita, durante a noite. Associado ao aumento do preço da energia nos dias seguintes ao evento e ao preço reduzido com que a energia foi vendida entre os dias 6 e 11 de Fevereiro, é possível concluir que apesar do menor lucro instantâneo, a receita futura, do volume armazenado e não turbinado, pode ser maior.

A central hidroelétrica da albufeira de Raiva possui uma capacidade instalada bastante baixa, 24MW, o que vai levar a uma produção de energia baixa, e portanto o lucro para as diferentes alternativas estudadas não são tão significativas quanto na Agueira. Também no caso de Raiva o armazenamento de caudal não é significativo.

7

CONCLUSÕES

Este trabalho propôs sugerir um conjunto de regras de gestão operacional de albufeiras de fins múltiplos para situações de cheia, tentando minimizar os efeitos destes eventos mantendo níveis de água compatíveis com a satisfação dos restantes fins.

Este estudo foi realizado para a bacia do Mondego, mais propriamente para o médio Mondego, onde o sistema de albufeiras Aguieira-Fronhas-Raiva tem uma importante função de amortecimento de cheia. Devido à sua elevada capacidade de armazenamento, a albufeira da Aguieira é a mais preponderante no amortecimento de cheias. No sistema de albufeiras as regras de operação sugeridas no âmbito deste trabalho são para aplicação no período húmido - entre 15 de Outubro a 31 de Março- e têm um maior foco no controlo de cheia, com vista à proteção de Coimbra e do Baixo Mondego contra a proteção de cheias.

Para a realização deste estudo foram escolhidas duas situações de cheia. Ambas provocaram prejuízos socioeconómicos à região, mas de diferentes dimensões. A cheia estudada mais recente, referente ao início de Fevereiro de 2014, teve menores prejuízos, concentrados essencialmente na cidade de Coimbra, enquanto a cheia de Janeiro de 2001 teve um impacto considerável em toda a zona do baixo Mondego, provocando a evacuação de centenas de pessoas e elevados prejuízos económicos. A comparação dos valores dos caudais correspondentes à simulação dos eventos referidos com os valores dos caudais observados foi dificultada pela falta de dados, principalmente no rio Ceira. O escoamento ocorrido nesse rio tem especial influência no escoamento que ocorre em Coimbra, devido a caudais elevados que por vezes ocorrem na sua sub-bacia e não são regularizados. Devido á falta de dados em eventos de cheia, tanto para o rio Ceira como para a sub-bacia de Coimbra e da albufeira de Raiva, foram usadas previsões de caudal (ver 4.1.).

De modo a estudar uma potencial melhoria na gestão das albufeiras em estudo em situações de cheia, em termos de gestão de volumes armazenados e descarregados, inicialmente foi feito o estudo dos eventos de cheia considerando as correspondentes regras de gestão operacional em vigor, oportunamente propostas pela empresa concessionária (EDP, Energias de Portugal) e aprovadas pela (então) Autoridade da Água (APA). Ao observar o comportamento do sistema segundo estas regras, simuladas com o programa HEC-ResSim, foram consideradas potenciais alterações àquelas regras de operação de modo a melhorar o comportamento das três albufeiras, com base nos dois eventos de cheia referidos.

Também foi feita uma análise aos efeitos das regras ao nível da produção de energia hidroelétrica e às possíveis receitas de acordo com o preço da energia em vigor na altura em que foi produzida. Esta

análise não foi feita para a albufeira de Raiva, devido à sua baixa potencia não vai apresentar uma margem de receitas muito diferentes, ao contrário da Aguieira.

Após a proposta de novas regras de operação procedeu-se à simulação das mesmas para os dois eventos de cheia de modo a proceder à análise dos seus resultados. Inicialmente realizou-se a análise para o evento de 2014. Neste evento obtiveram-se ligeiras melhorias a nível de caudal efluente a todas as albufeiras, melhorando também o efeito destes em Coimbra e a jusante desta cidade. Não sendo possível evitar cheias na cidade de Coimbra, foi possível minimizar as mesmas. Também foi possível obter uma boa margem de receita tendo em conta o volume de cheia encaixado após o fim do evento, aumentando o potencial para a produção de energia hidroelétrica. Apesar de durante evento de cheia, as regras em vigor, obterem maior receita, observando os preços da energia nos dias após o evento, vemos que neste caso se obteria maior receita no armazenamento de água realizado para posterior turbinamento e venda. Verificou-se que se podia obter uma receita, nas 22 horas seguintes, de 121.680,4€, bastante superior ao valor de perda de receita no final do evento, -16.199,96€. Uma alteração, definida para as novas regras de operação, em relação as regras em vigor, foi a possibilidade de aumentar o nível de pleno armazenamento (NPA) quando não ocorrem situações de cheia (para caudais inferiores a 190 m³/s o NPA nas regras em vigor é de 117,85 m ao contrário de nas regras em vigor, 119 m). A realização de um descarregamento antes da ocorrência de eventos com grande volume de cheia, antecipado através da monitorização do aumento do caudal afluente, permite baixar o nível da albufeira para com a finalidade de adequar a capacidade de armazenamento útil antes da ocorrência de qualquer pico de cheia. Por outro lado foi possível terminar o evento de cheia com um nível de água ligeiramente superior ao observado.

No caso do estudo do evento de Janeiro de 2001, evento que apresentou características bastante gravosas para Coimbra e para o baixo Mondego, a simulação conduzida com o cumprimento exato das regras em vigor causaria impactos mais significativos a jusante, uma vez que importaria, na albufeira da Aguieira, uma descarga máxima de cerca de 2550 m³/s (cerca de 40% superiores aos obtidos com as regras propostas e cerca de 100% superiores ao caudal máximo registado), para reduzir e manter o nível de água correspondente ao NDO. Recorde-se que nessa ocasião as regras operacionais foram ditadas pela Autoridade Nacional da Água. Através do relatório divulgado por essa entidade (Rodrigues et al, 2001) sobre esse evento de cheia, pode constatar-se pela análise dos caudais descarregados nesse período, que houve um encaixe significativo na Aguieira, o que permitiu reduzir significativamente o caudal afluente a Coimbra.

Quando simulado o evento de Janeiro de 2001, com as regras propostas por este trabalho, houve um comportamento relativamente similar ao observado. Nesse caso, foi ainda possível observar ligeiras melhorias, principalmente ao nível da redução de caudais de pico e na possibilidade de os retardar, em comparação com o caudal não regularizado simulado, o que permite melhorar o tempo de resposta em possíveis planos de emergência da proteção civil. Estes resultados foram obtidos com os caudais afluentes observados na albufeira da Aguieira e de Fronhas, e nos restantes pontos com os valores dos caudais correspondentes às previsões fornecidas, as quais foram realizadas através de simulação hidrológica com previsão de precipitação. Este nível de incerteza conduziu a um caudal não regularizado afluente a Coimbra maior na simulação de que o previsto pela APA no relatório sobre a cheia (Rodrigues et al, 2001). Portanto o caudal amortecido, em Coimbra, obtido com base nas regras propostas foi mais elevado do que o realmente então observado.

No evento de Janeiro de 2001 não se efetuou uma análise económica porque se considerou que um evento da excecionalidade do ocorrido deve ter como prioridade o controlo de cheia em relação à produção de energia. Também, devido à ordem de grandeza dos caudais afluentes, os caudais efluentes vão ser elevados, logo o caudal descarregado pelas turbinas irá ser semelhante nas simulações e no observado, e à falta de dados do preço da energia para o período do evento, por parte do MIBEL.

Concluindo, e tendo em consideração ambos os eventos de cheia considerados, as regras de operação propostas neste trabalho mostraram-se adequadas às duas situações representativas de eventos de cheia de grau diferente e com consequências bastante díspares. Simultaneamente com o amortecimento de caudais de cheia foi possível manter os níveis de água das albufeiras do sistema a cotas relativamente elevadas, o que se releva em geral importante para o cumprimento dos fins últimos a que se destinam as albufeiras.

BIBLIOGRAFIA

- ARH-Centro (2011). Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis Integradas na Região Hidrográfica 4. Relatório Técnico para Efeitos de Participação Pública, Administração da Região Hidrográfica do Centro, Outubro de 2011.
- CE (2000). *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, Official Journal L 327*, 22/12/2000, página 0001 – 0073.
- Censos (2011). Informação Estatística Sobre a População de Portugal. Sítio da Internet (http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=censos2011_apresentacao&xpid=CENSOS). Acedido em Junho de 2015.
- CNPGB (2015). Sítio da Internet da “Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens” (http://cnpgb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/Lista.htm), consultado em Junho de 2015.
- Cortez, I. (2015) Fotografias Cheia de 6 de Fevereiro de 2014. (<http://umpigodeluz.blogspot.pt/2014/02/cheias-no-rio-mondego-e-praca-da-cancao.html>) acedido em Junho de 2015.
- EDP (2015). Sítio da Internet da “Energia de Portugal”: Informação Técnica das Albufeiras (http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/empreendimento_type.php?e_type=ch), consultado em Junho de 2015.
- Hanbali (2014). HEC-ReSim. Reservoir System Simulation, Outubro de 2014. (https://www2.unece.org/ehlm/platform/download/attachments/31522905/Handbali_HEC-ResSim.pdf?version=1&modificationDate=1415776668068&api=v2) acedido em Junho de 2015.
- ICOLD European Club (2014). *Dam Legislation*, (http://cnpgb.apambiente.pt/IcoldClub/documents/Legislation_2014/ICOLD%20EurClub%20-Dam%20Legislation%20Report%20-%20Dec%202014.pdf) acedido em Junho de 2015.
- INAG (2001). Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Mondego. Relatório do Plano, Instituto da Água, Lisboa, de 29 de Junho de 2001.
- JN (2014a). Jornal de Noticias, Subida do caudal do Mondego é "perfeitamente natural" de 06 de Fevereiro de 2014 (http://www.jn.pt/paginainicial/pais/concelho.aspx?Distrito=Coimbra&Concelho=Coimbra&Option=Interior&content_id=3673594&page=1) acedido em Junho de 2015.
- JN (2014b). Jornal de Noticias, Seis estradas mantêm-se cortadas em Montemor-o-Velho de 12 de Fevereiro de 2014 (http://www.jn.pt/paginainicial/pais/concelho.aspx?Distrito=Coimbra&Concelho=Montemor-o-Velho&Option=Interior&content_id=3683314) acedido em Junho de 2015.
- Lencastre, A. (2010). *Lições de Hidrologia*. Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Lourenço, S. (2015) Fotografia Cheia 2001. (http://pt.worldmapz.com/photo/11152_en.htm) acedido em Junho de 2015.
- Maia, R., Álvares Ribeiro, A. (1998). “As Cheias e a Gestão de Bacias Hidrográficas” in 4º Congresso da Água, Lisboa, 23 – 27 de Março de 1998.
- Mendes, J. (2012). *Previsão e Alerta de Cheias em Bacias Regularizadas. Aplicação ao caso de uma bacia portuguesa*. Projeto de Tese de Investigação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

MIBEL (2015) Mercado Ibérico de Eletricidade. (<http://www.mercado.ren.pt/PT/Electr/InfoMercado/InfOp/MercOmel/Paginas/Precos.aspx>) acessido em Junho de 2015.

Moore, R., Bell, V. (2001). *Comparison of Rainfall-Runoff Models for Flood Forecasting. Part 1: Literature review of models*. R&D Technical Report W241, Environment Agency, Bristol. Disponível online em https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290603/strw241-e-e.pdf) acessido de Julho de 2015.

Pinto, D. (2015a) Fotografia Barragem da Aguieira (<http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt/2011/08/barragem-da-aguieira.html>) acessido em Junho de 2015.

Pinto, D. (2015b) Fotografia Barragem de Fronhas (<http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt/2015/04/barragem-de-fronhas.html>) acessido em Junho de 2015.

Publico (2001). Publico, Rio Mondego desaloja mais de uma centena de pessoas de 28 de Janeiro de 2001. (<http://www.publico.pt/sociedade/noticia/rio-mondego-desaloja-mais-de-uma-centena-de-pessoas-8923>) acessido em Junho de 2015

Quintela, A., Pinheiro, A., Gomes, A., Afonso, J., Almeida, J., Cordeiro, M. (2001). Curso de exploração e segurança de barragens. Instituto da Água, Lisboa, 2001.

Quintela, A., Portela, M. (2002). *A Modelação Hidrológica em Portugal nos Últimos 25 Anos do Século XX, nas Perspetivas Determinística, Probabilística e Estocástica*. Instituto Superior Técnico, Departamento Engenharia Civil, Lisboa. Disponível online (http://www.civil.ist.utl.pt/~mps/Mod_hid/Bibliografia/25%20anos%20Hidrologia%20ACQ%20MP.pdf) acessido em Julho de 2015.

Rodrigues, R., Brandão, C., Costa, J. (2001). Hidrologia das cheias do Mondego de 26 e 27 de Janeiro de 2001. Direção de Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água, Lisboa. Disponível em (http://snirh.pt/snirh/download/relatorios/cheias_mondego_2001.pdf), consultado em março de 2011.

Simonovic (1992). Reservoir Systems Analysis: Closing Gap Between Theory and Practice. International Symposium on Water Research System Application, 12 de Junho de 1990, Winnipeg.

SNIRH (2015). Sítio da Internet do “Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (<http://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=>), consultado em Junho de 2015.

TSF (2001). TSF, Bombeiros evacuam populações nas margens do Mondego de 27 de Janeiro de 2001. (http://www.tsf.pt/PaginaInicial/vida/Interior.aspx?content_id=855211&page=-1) acessido em Junho de 2015.

USACE (2013) US Army Corps of Engineering (2013). HEC-ResSim Reservoir System Simulation. User’s Manual. Versão 3.1. Maio 2013.

WMO (2009). *The Guide to Hydrological Practices Vol. 2 Part 3: Integrated water resources management*. World Meteorological Organization, 2009