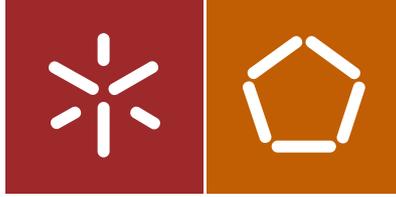




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Domingos Sá Sousa

Análise técnica-económica da produção de energia em sistemas de abastecimento de água. Caso do Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos.



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Domingos Sá Sousa

Análise técnica-económica da produção
de energia em sistemas de abastecimento
de água. Caso do Aproveitamento de Fins
Múltiplos dos Socorridos.

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Júlio F. Ferreira da Silva

AGRADECIMENTOS

Um registo de informação, desta natureza, carece da orientação e colaboração de terceiros para que seja possível a transmissão de novo conhecimento para o orientando e, se possível, para a temática desenvolvida, complementando o saber já existente. Apesar do mérito da realização do documento estar associado ao autor do mesmo, é de valorizar a imprescindível colaboração das pessoas que de seguida se enuncia.

Ao **Prof. Doutor Júlio F. Ferreira da Silva** pelo acompanhamento na orientação.

Um agradecimento sentido ao **Engº José Pinheiro** da Empresa de Eletricidade da Madeira pela sua disponibilidade na vasta explicação e transmissão de informação sobre o caso em estudo; sem a sua colaboração esta dissertação não se ia mostrar tão precisa na informação que transmite. Agradecer, ainda, ao **Engº Agostinho Figueira**, desta mesma empresa, pela rica informação que transmitiu aquando primeira reunião na sede da empresa.

Conclui-se com um agradecimento aos familiares e amigos que colaboraram, de forma indireta, ouvindo e, conseqüentemente, apresentando as suas opiniões; contribuindo como incentivo para a realização contínua desta dissertação.

Página intencionalmente deixada em branco.

RESUMO

O presente trabalho teve por finalidade a determinação das variáveis que integram as funções de custo vs. benefício da produção de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água e, posterior, utilização racional da variável tempo na gestão dos grupos eletromecânicos.

As funções determinadas têm três variáveis principais que as quantificam: potência do elemento eletromecânico, tempo de funcionamento e custo unitário da energia elétrica. Quando analisadas pormenorizadamente incorporam mais variáveis: a potência dos Grupos Geradores (GG) e dos Grupos Eletrobombas (GEB) são em função das características geométricas do sistema; o tempo de funcionamento será dependente das utilizações de água, da pluviosidade (caudal) e do fornecimento elétrico; por fim, o preço unitário é dependente do Decreto-Lei em vigor.

O preço unitário da energia elétrica é a variável que tem maior influência para a função de custo vs. benefício pois a receita será em função da racional ativação e paragem dos GEB e GG. O preço da energia no caso real para as diferentes tarifas é crescente, as regressões que melhor as representam são as polinomiais com o valor do erro (R^2) de apro. 0,99. O valor mínimo, para um determinado consumidor final, verificado no caso prático é de 0,0745 €/kWh e máximo de 0,3056 €/kWh para o ano de 2015.

A contribuição desta dissertação, para o estudo da temática, é a ativação vs. paragem racional dos grupos eletromecânicos em função da precipitação e conseqüente aumento da receita. Tendo em consideração a antecipação da introdução dos dados de entrada nos *software* e *hardware*, que controlam o sistema. Estes dados são relativos à antevisão da «probabilidade de precipitação» para o diurno seguinte. A melhoria percentual é variável, dependendo das condições atmosféricas que contribuem para as bacias hidrográficas do aproveitamento.

Palavras chave: otimização; eficiência energética; sistemas de abastecimento de água; central hidroelétrica; e estação elevatória.

Página intencionalmente deixada em branco.

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the variables that integrate the functions that quantify the cost vs. benefit of electric power production in water supply systems and, later, one of the optimization variables.

Certain functions have three main variables that quantify: electromechanical element power, time and unit cost of electricity. When analysed in detail incorporate more variables: the power of generator groups (Pt: GG) and motor-driven groups (Pt: GEB) are depending on the geometrical characteristics of the system; the operating time will be dependent on the uses of water, rainfall (flow) and electric supply; finally, the unit price is dependent on the decree in force consisting of different tariffs in order to standardize the diagram.

The unit price of electricity is the variable that has greater influence on the function of cost vs. benefit because the recipe will be in function of the differential tariffs for activation and shutdown of GEB and GG. The price of energy in the real case for the different rates are increasing, the regressions which best represent are the polynomial with the value of the error (R^2) of approximately 0.99. The minimum value checked is 0,0745 €/kWh and maximum of 0,3056 €/kWh for the year 2015.

The contribution of this dissertation to the study of the subject is the decrease of the operating time of the electromechanical groups and consequent revenue growth. Taking into account the anticipation of the introduction of the input data in software and hardware, which control the system. These data are relative to the preview of the probability of precipitation for the next day. The percentage improvement is variable, depending on weather conditions in watersheds that contribute to the exploitation.

Keywords: optimization; energy efficiency; water supply systems; hydroelectric plant; and lift station.

Página intencionalmente deixada em branco.

ÍNDICE GERAL

1. CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	2
1.1. OBJETIVO DO TRABALHO	2
1.2. MOTIVAÇÃO	3
1.3. METODOLOGIA	5
1.4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	6
2. CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA	8
2.2. ESTUDO DA TEMÁTICA PELA COMUNIDADE CIENTÍFICA	9
2.3. ESTUDO DA TEMÁTICA POR ENTIDADES GOVERNAMENTAIS	13
2.4. TRABALHOS RECENTES.....	15
3. CAPÍTULO III – DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA EM ADUTORAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA MADEIRA	18
3.1. ENQUADRAMENTO APROVEITAMENTO DE FINS MÚLTIPLOS DOS SOCORRIDOS	18
3.2. CENTRAL HIDROELÉTRICA DA SERRA D’ÁGUA	20
3.2.1. Desenvolvimento e geometria dos canais a céu aberto	21
3.2.2. Enquadramento Central Hidroelétrica da Serra d’Água	22
3.2.3. Regularização de caudais após produção de energia elétrica	23
3.2.4. Ligação da Serra d’Água até a captação na Ameixieira	24
3.3. CAPTAÇÃO NA AMEIXIEIRA	25
3.3.1. Apreciações ao processo de captação e regularização de caudais	26
3.3.2. Gestão da água no reservatório de regularização e/ou acumulação.....	27
3.3.3. Canal de ligação entre os túneis	29
3.3.4. Confluência de túneis na Terra Chã	29
3.4. CAPTAÇÃO DA FAJÃ ESCURA.....	30
3.4.1. Processo de captação da água.....	31
3.4.2. Estruturas de apoio à captação	34
3.5. SINGULARIDADES PRESENTES NO CNLS.....	36
3.5.1. Reservatório do Campanário	37
3.5.1.1. Apreciações ao descarregador de fundo	39
3.5.1.2. Estruturas de apoio ao funcionamento do reservatório.....	41
3.5.2. Mini-hídrica na Fajã-Padres	42
3.6. CÂMARA DE CARGA COVÃO	42
3.7.1. Gestão do volume de água na Câmara de Carga do Covão	44
3.7.2. Apreciações técnicas às singularidades presentes na Câmara de Carga	46
3.7.3. Túnel do Covão	48

3.7.4.	Justificação da construção dos túneis	49
3.8.	CONDUTA FORÇADA/ELEVATÓRIA	49
3.9.	CENTRAL HIDROELÉTRICA DOS SOCORRIDOS	52
3.9.1.	Apreciações técnicas ao sistema de apoio à produção de energia	53
3.10.	ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DOS SOCORRIDOS.....	58
3.10.1.	Apreciação técnica-económica aos equipamentos eletromecânicos	59
3.10.2.	Reservatório de aspiração.....	61
3.10.3.	Galeria acumulativa dos Socorridos	63
3.11.	MINI-HÍDRICA E ETA DE STA. QUITÉRIA	64
3.12.	SISTEMA REVERSÍVEL.....	66
3.12.1.	Enquadramento económico do sistema reversível.....	69
4.	CAPÍTULO IV – ANÁLISE TÉCNICA-ECONÓMICA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA.....	72
4.1.	FUNDAMENTOS.....	72
4.1.1.	Variáveis que integram a formulação da problemática.....	73
4.2.	METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES DE CUSTO VS. BENEFÍCIO	74
4.2.1.	Influência das tarifas.....	74
4.2.2.	Influência do caudal	77
4.2.3.	Remunerações aplicáveis a centrais renováveis (Decreto-Lei n.º168/99)	81
4.2.4.	Funções de custo vs. benefício	84
4.3.	APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO	86
4.3.1.	Preço da energia caso real	86
4.3.2.	Cenários de funcionamento para aplicação das funções	89
4.3.2.1.	Aplicação das funções (cenário 1).....	90
4.3.2.2.	Aplicação das funções (cenário 2).....	92
4.3.2.3.	Aplicação das funções (cenário 3).....	93
4.3.3.	Funcionamento dos grupos no caso prático (verão)	95
5.	CAPÍTULO V – CONCLUSÃO	100
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – EVOLUÇÃO MÉDIA DA EXPLORAÇÃO DOS RECURSOS RENOVÁVEIS NA COMUNIDADE EUROPEIA.	13
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS ALTERNADORES INSTALADOS NAS TURBINAS PELTON NA CHS.	57
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DA BOMBA STERLING (MOTOR-BOMBA Nº 2).	60
TABELA 4 – CUSTO ASSOCIADO À TRANSFORMAÇÃO.	69
TABELA 5 – EVOLUÇÃO DO PREÇO DA ENERGIA NA ILHA DA MADEIRA.	87
TABELA 6 – REGRESSÕES E RESPETIVOS ERROS ASSOCIADOS (HORAS DE PONTA).	87
TABELA 7 – REGRESSÕES E RESPETIVOS ERROS ASSOCIADOS (HORAS DE CHEIA).	88
TABELA 8 – REGRESSÕES E RESPETIVOS ERROS ASSOCIADOS (HORAS DE VAZIO).	88
TABELA 9 – TARIFAS DO PREÇO DA ELETRICIDADE DURANTE UM DIA.	89
TABELA 10 – APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS NA UE.	ix
TABELA 11 – UNIDADES SIMPLES DO SISTEMA INTERNACIONAL.	x
TABELA 12 – UNIDADES DERIVADAS DO SISTEMA INTERNACIONAL.	x
TABELA 13 – OUTRAS UNIDADES USADAS NESTA DISSERTAÇÃO.	x
TABELA 14 – CONSTANTES.	x

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – PRODUÇÃO DE ENERGIA EM MINI-HÍDRICAS AO NÍVEL NACIONAL.	15
GRÁFICO 3 – DIAGRAMA DE CARGAS NO DIA DE MÁXIMO FORNECIMENTO ELÉTRICO.	68
GRÁFICO 4 – EVOLUÇÃO DO PREÇO DA ENERGIA (CASO REAL NA RAM).	86
GRÁFICO 5 – REGRESSÃO POLINOMIAL (HORAS DE PONTA).	87
GRÁFICO 6 – REGRESSÃO POLINOMIAL (HORAS DE CHEIA).	88
GRÁFICO 7 – REGRESSÃO POLINOMIAL (HORAS DE VAZIO).	88
GRÁFICO 8 – TARIFAS DO PREÇO DA ELETRICIDADE DURANTE UM DIA.	89
GRÁFICO 9 – CENÁRIO DE FUNCIONAMENTO 1.	91
GRÁFICO 10 – CENÁRIO DE FUNCIONAMENTO 2.	92
GRÁFICO 11 – CENÁRIO DE FUNCIONAMENTO 3.	95
GRÁFICO 12 – CURVA DE CAUDAL VS. POTÊNCIA GEB.	xii
GRÁFICO 13 – CURVA CARACTERÍSTICAS.	xii
GRÁFICO 14 – CURVA CAUDAL VS. RENDIMENTO GEB.	xii

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – FORMAS DE PRODUZIR ENERGIA ELÉTRICA.....	8
FIGURA 2 – VISTA GERAL DO AFMS.	18
FIGURA 3 – CAPTAÇÕES PARA A CENTRAL NA SERRA D’ÁGUA.	21
FIGURA 4 – CENTRAL HIDROELÉTRICA DA SERRA D’ÁGUA.....	23
FIGURA 5 – FUNCIONAMENTO DA BACIA DE REGULARIZAÇÃO NA SERRA D’ÁGUA.....	23
FIGURA 6 – SEGMENTO SERRA D’ÁGUA ATÉ A AMEIXIEIRA.	24
FIGURA 7 – CAPTAÇÃO DA AMEIXIEIRA.	25
FIGURA 8 – FUNCIONAMENTO DA CAPTAÇÃO NA AMEIXIEIRA.....	26
FIGURA 9 – DESCARREGADOR DE CHEIA.....	27
FIGURA 10 – RESERVATÓRIO DE REGULARIZAÇÃO.	28
FIGURA 11 – CONFLUÊNCIA DE TÚNEIS NA TERRA CHÃ.....	30
FIGURA 12 – CAPTAÇÃO DA FAJÃ ESCURA.	31
FIGURA 13 – LOCAL DE CAPTAÇÃO.....	32
FIGURA 14 – ESTRUTURA DE SEDIMENTAÇÃO.....	32
FIGURA 15 – AÇUDE DE REGULARIZAÇÃO.	33
FIGURA 16 – MONTANTE DO DESCARREGADOR DE CHEIA.....	34
FIGURA 17 – DESCARREGADOR LATERAL.	35
FIGURA 18 – TRAMO CANAL DO NORTE LANÇO SUL.....	37
FIGURA 19 – RESERVATÓRIO DO CAMPANÁRIO.	38
FIGURA 20 – FUNCIONAMENTO DO RESERVATÓRIO DO CAMPANÁRIO E CNLS.....	38
FIGURA 21 – LIGAÇÃO DO RESERVATÓRIO AO CNLS.	41
FIGURA 22 – CÂMARA DE CARGA E ETA DO COVÃO.....	43
FIGURA 23 – FUNCIONAMENTO DA CÂMARA DE CARGA DO COVÃO.	44
FIGURA 24 – DERIVAÇÃO DE CAUDAIS.....	45
FIGURA 25 – CÂMARA DE CARGA DO COVÃO (CCC).	47
FIGURA 26 – GRELHA DE LIGAÇÃO À CONDUTA FORÇADA/ELEVATÓRIA E TÚNEL DO COVÃO.	48
FIGURA 27 – COTAS RELEVANTES NO TÚNEL DO COVÃO.	49
FIGURA 28 – CONDUTAS FORÇADAS/ELEVATÓRIAS.	50
FIGURA 29 – EVOLUÇÃO DO TERRENO E DA CONDUTA EM PLANO VERTICAL.	51
FIGURA 30 – COTAS CONDUTA FORÇADA/ELEVATÓRIA.	52
FIGURA 31 – CENTRAL HIDROELÉTRICA DOS SOCORRIDOS.	53
FIGURA 32 – TURBINA PELTON.....	54
FIGURA 33 – GEOMETRIA DAS PÁS.....	55
FIGURA 34 – MECANISMO DE FECHO DO CAUDAL AOS INJETORES.	56
FIGURA 35 – DESTINO DA ÁGUA APÓS TURBINADA.	57
FIGURA 36 – INTERIOR DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DOS SOCORRIDOS.	58
FIGURA 37 – RESERVATÓRIO DE ASPIRAÇÃO.	62
FIGURA 38 – GALERIA DE ACUMULAÇÃO DOS SOCORRIDOS.	64
FIGURA 39 – MINI-HÍDRICA DE STA. QUITÉRIA.....	64
FIGURA 40 – ESTRUTURAS NOS SOCORRIDOS.	66
FIGURA 41 – ALGORITMO PARA A FORMULAÇÃO DA PROBLEMÁTICA.	73
FIGURA 42 – CENÁRIO DE FUNCIONAMENTO 1.....	90
FIGURA 43 – CENÁRIO DE FUNCIONAMENTO 2.....	92
FIGURA 44 – CENÁRIO DE FUNCIONAMENTO 3.....	94
FIGURA 45 – SISTEMA REVERSÍVEL SOCORRIDOS.	XI

LISTA DE ABREVIATURAS

SIGLAS

- AFMS** – Aproveitamento de **Fins Múltiplos dos Socorridos**
- AREAM** – Associação **R**egional da **E**nergia e **A**mbiente da **M**adeira
- ARM** – **Á**gua e **R**esíduos da **M**adeira
- CCC** – Câmara de **C**arga do **C**ovão
- CE** – **C**omunidade **E**uropeia
- CNLN** – Canal do **N**orte **L**aço **N**orte
- CNLS** – Canal do **N**orte **L**aço **S**ul
- DGEG** – **D**ireção-**G**eral de **E**nergia e **G**eologia
- DN** – **D**iâmetro **N**ominal
- EE** – **E**stação **E**levatória
- EEM** – **E**mpresa de **E**letricidade da **M**adeira
- ESHA** – *European Small Hydropower Association*
- ETA** – **E**stação de **T**ratamento de **Á**gua
- FFD** – **F**erro **F**undido **D**úctil
- GEE** – **G**ases de **E**feito de **E**stufa
- GG** – **G**rupos **G**eradores
- HAP** – *Hydropower Advancement Project*
- IPMA** – **I**nstituto **P**ortuguês do **M**ar e da **A**tmosfera
- LNEC** – **L**aboratório **N**acional de **E**ngenharia **C**ivil
- NOAA** – *National Oceanic and Atmospheric Administration*
- RAM** – **R**egião **A**utónoma da **M**adeira
- SA** – **S**ociedade **A**nónima
- SI** – **S**istema **I**nternacional
- UE** – **U**nião **E**uropeia

LISTA DE ABREVIATURAS

ACRÓNIMOS

Ad. – **adaptado**

Apro. – **Aproximadamente**

Cap. – **Capítulo**

Eng^o. – **Engenheiro**

Ex. – **Exemplo**

GEB – **Grupo Eletrobomba**

Hab. – **Habitantes**

Mg – **Megagrama**

n.^o – **Número**

Pág. – **Página**

Séc. – **Século**

Sta. – **Santa**

Vs. – **Verso**

CAPÍTULO

I

INTRODUÇÃO

“Deixe o futuro dizer a verdade, e avaliar cada um de acordo com os seus trabalhos e as suas conquistas.”

(Nikola Tesla)

1. CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

A realização deste registo de informação, para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade do Minho, tem como tema a análise técnica-económica da produção de energia num sistema misto de abastecimento de água; caso do Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos (AFMS) localizado na Região Autónoma da Madeira (RAM).

1.1. OBJETIVO DO TRABALHO

A investigação atual da produção de energia elétrica tem por objetivo a obtenção de energia elétrica de forma mais económica e sustentável, motivando a existência de vários estudos científicos que têm por objetivo melhorar a eficiência da obtenção de energia elétrica com uma gestão racional das variáveis que permitem a sua quantificação.

Esta dissertação tem por objetivo estudar as variáveis e, conseqüentemente, as funções de produção de energia que influenciam a utilização racional de um sistema de abastecimento de água, (preferencialmente) sem intervenção nas estruturas civis que o dão forma. A melhoria da eficiência deve ser conseguida com um melhor controlo das variáveis determinadas (ou previstas) em tempo real e/ou com antecipação; permitindo que depois sejam introduzidas, na forma de dados de entrada, nos *software* e *hardware* que servem para controlar o funcionamento dos elementos eletromecânicos.

Os resultados finais esperados consistem na formulação de um conjunto de funções que permitam a determinação vs. quantificação da energia produzida, segundo cenários pré-estabelecidos (baseados num caso de estudo real) e melhoria da utilização de uma das variáveis. Esta análise pretende comprovar que a eficiência do sistema em tempo real e com base em previsões pluviométricas é melhor, comparativamente a uma gestão somente com dados pré-estabelecidos. A determinação das variáveis pode ser implementada na criação de um algoritmo que otimize (melhore) o aproveitamento e disponibilize um conjunto de dados de saída; que podem consistir em saber os custos vs. benefícios associados à exploração da energia segundo uma gestão racional; permitindo, igualmente, uma escolha dos **melhores tempos de funcionamento** e **número de elementos eletromecânicos** necessários de forma a minimizar o custo e maximizar o lucro da exploração elétrica em sistemas de abastecimento de água.

1.2. MOTIVAÇÃO

A aptidão de entender o funcionamento do empreendimento Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos (AFMS) e, conseqüente, «otimização» das variáveis (por ex.: tempo de funcionamento) que condicionam a produção de energia elétrica foram motivadas por diferentes fatores, tomando relevância: a elevada importância que a água tem no ecossistema e nas atividades económicas que desta dependem. O AFMS tem na sua constituição atividades económicas relacionadas com a produção de energia elétrica, abastecimento para consumo público e para irrigação. As infraestruturas que permitem a criação destas atividades são avultadas, levando a um grande impacto ambiental; incumbindo aos engenheiros a tarefa de minimizar o impacto no ato do projeto, com recurso à experiência adquirida, e ao longo da vida útil do projeto, adaptando o funcionamento às variáveis que o condicionam. O entendimento da racionalização vs. impacto tem por objetivo a minimização do conflito de interesses, entre o equilíbrio do ecossistema e a forte dependência atual de energia elétrica e utilização da água.

A utilização de água para produzir trabalho na Região Autónoma da Madeira (RAM) iniciou aquando a criação de azenhas para moer trigo, cevada e milho; perdurando em funcionamento até o início do séc. XX. Mais recentemente, por parte do governo, foi utilizado este mesmo recurso para criação de aproveitamentos hidroelétricos; os aproveitamentos principia-ram, na região, com a iniciativa intitulada “Missão Técnica de 1939”. A iluminação elétrica teve início no dia 19 de julho de 1897 sobre a concessão da firma Inglesa *The Madeira Electric Lighting Company Limited*, dez anos depois do seu início em Cascais. Esta iniciativa ocorreu a iluminação das ruas de maior comércio da cidade do Funchal; surgindo um constante crescimento deste então, depois de ter-se espalhado, ao uso, por «toda» a sociedade [Associação Regional da Energia e Ambiente da Madeira (AREAM), 2008].

Com intuito de diminuir a poluição atmosférica, foi criado em 1990 o protocolo de Quioto (atualmente em vigor a Agenda 21, 2014), que, de forma sucinta, teve dois objetivos principais na sua origem concetual: a diminuição dos Gases de Efeito de Estufa (GEE), dos países mais desenvolvidos e “criação de programas nacionais sobre inventários de emissões e conseqüentes medidas” de atenuação dessas emissões, tendo sido um acordo internacional muito ambicioso. Destaque-se os principais gases incluídos no protocolo e as suas fontes poluidoras: dióxido de carbono (CO₂), onde a principal fonte poluidora é verificada na queima de combustíveis fósseis;

metano (CH_4) que resulta da **decomposição anaeróbia**¹ de matéria orgânica (ex. resultante da pecuária) e o óxido nitroso (N_2O) emitido no processo químico de **desnitrificação**² e **nitrificação**³.

Merecendo destaque o CO_2 , responsável por «acelerar» o efeito de estufa do planeta Terra. Escreve-se acelerar, intencionalmente, pois alguns cientistas e historiadores defendem que o aquecimento vs. arrefecimento global é cíclico, tendo intervalos de tempo muito superiores aos estimados atualmente. O Aquecimento Global, de forma sucinta, tem como principal ocasionador a crescente percentagem de radiação infravermelha, emitida pela superfície da Terra, impedida de passar pela camada dos GEE, para o espaço sideral. Sendo refletida novamente, em menor intensidade que a difundida, para a superfície da Terra.

A procura de novos meios de obtenção de energia elétrica, ao nível Mundial, conquistou maior importância após as crises do petróleo sucedidas depois da Segunda Guerra Mundial. Anteriormente, a esta data, a exploração era abundante em relação à procura existente, verificando-se posteriormente um acréscimo do seu consumo. O custo associado a esta matéria-prima em bruto era, relativamente barata, porém os produtos resultantes do **crude**⁴ eram muito mais caros, levando a criação da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) em 1960 com o intuito de “reivindicar perante uma política de achatamento de preços praticados pelo cartel das grandes empresas ocidentais”. A estabilização da troca comercial desta matéria-prima, não se tem verificado mundialmente, sucedendo periódicas crises (conflitos). Destaca-se, entre outras crises decorridas na segunda metade do séc. XX, a de 1973.

O crescente aumento do fornecimento de energia elétrica advém fundamentalmente da revolução tecnológica (revolução industrial), verificada nas últimas décadas (depois do séc. XVIII). Esta deveu-se, principalmente, à descoberta e maior domínio da utilização de energia elétrica por cientistas e engenheiros; destacando-se: Michael Faraday que formou a base da tecnologia dos motores elétricos; Nicola Tesla responsável pelo aparecimento da corrente alternada e, entre outros, o inventor da primeira lâmpada incandescente (protótipo) em 1879, Thomas Edison.

ⁱ- Todos os vocábulos que estiverem acompanhados de um valor expoente o significado, do mesmo, no contexto do respetivo texto, encontram-se no glossário (elemento pós-textual).

As crises associadas à exploração do petróleo correspondem apenas a uma das razões pelas quais se deve apostar nas energias alternativas (ex. hidráulicas), que complementem o uso do fluido viscoso de cor preta (crude) ou, até mesmo, o substituam. Acrescido a este motivo, destaque-se a poluição resultante da queima dos derivados deste recurso fóssil.

Certos países na união europeia estão dependente de combustíveis fósseis de outros países (ex. pertencentes à OPEP), outros têm mas em «pequenas» quantidades. As reservas provadas de petróleo bruto em **barril**⁵ dos dois países com mais reservas na União Europeia são 2.858 bilhões de barril no caso do Reino Unido e 1.164 bilhões de barril no caso da Dinamarca. Segundo o artigo em estudo estes valores foram obtidos através de ensaios geológicos. Porém nove desse grupo de países, incluindo Portugal, apresentam-se como países sem reservas de petróleo, provadas [CIA WORLD FACTBOOK, 2012].

Portugal é muito dependente de recursos fósseis. Os valores importados de carvão em 2014 foram de 3 467 795 Mg ficando superior em aproximadamente 21 vezes comparativamente ao valor exportado de 168 707 Mg. A importação de crude em 2013, para Portugal, foi cerca de 12 208 572 Mg (megagramas), sendo os principais países exportadores Angola, Camarões e Arábia Saudita, nesse ano. Porém em produtos do petróleo e biocombustível, Portugal em 2013 exportou mais que importou, esta diferença correspondeu aproximadamente ao dobro. Em suma, Portugal tem uma dependência de energia elétrica do exterior de 79,4%, sendo a restante colmatada com as energias renováveis. Correspondendo as energias renováveis (hídrica, biomassa, eólica, geotérmica e fotovoltaica) a 20 655 GWh [Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), 2012].

1.3. METODOLOGIA

Para a criação das funções de custo vs. benefício que permitem quantificar o tempo de funcionamento dos grupos eletromecânicos, mais precisamente os grupos geradores (GG) e os grupos eletrobombas (GEB), é necessário saber-se quais as variáveis que o condicionam de forma direta e indireta. Desta forma as etapas a seguir para a sua determinação serão: 1) fazer uma consolidação de conhecimentos sobre a temática em artigos científicos, dissertações e Decretos-Leis da especialidade; 2) complementar este conhecimento com um estudo pormenori-

zado do funcionamento e constituição das diferentes obras que dão forma ao caso prático (Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos). Esta etapa permitirá perceber e consolidar o conhecimento relativo às variáveis que, de certo modo, influenciam a eficiência e uso racional do tempo de funcionamento num caso real; 3) após esta aquisição e registo de saber proceder-se-á à criação de cenários de funcionamento que permitirão a formulação das diferentes funções da produção de energia em sistemas de abastecimento de água.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em três partes principais: introdução, desenvolvimento e conclusão. Relativo ao desenvolvimento pode-se verificar a existência de três capítulos, que se descreve de seguida, de forma sintetizada, o conteúdo abordado nestes.

O primeiro capítulo é relativo à **revisão bibliográfica** onde é possível ler o que está a ser desenvolvido pela comunidade científica e organizações governamentais em relação à temática da eficiência e otimização da produção de energia em sistemas de abastecimento (“distribuição”) de água.

O segundo capítulo é relativo à perceção do uso racional de um caso real, fazendo-se apreciações em relação ao seu funcionamento e gestão para melhor consolidar o conhecimento das variáveis. Este capítulo apresenta um levantamento «pormenorizado» de todas as obras, relevantes, que dão forma ao aproveitamento. Utilizando, para este efeito, várias ferramentas informáticas que permitem ilustrar o seu desenvolvimento na Ilha da Madeira e perceber o seu funcionamento. É possível, também, observar «todas» as obras que dão forma ao AFMS, com dimensões reais resultantes duma vasta pesquisa *in situ* e bibliográfica com colaboração de representantes da empresa gestora do sistema. Em suma, termina-se este capítulo com a perceção do sistema reversível onde é possível ler os objetivos da sua criação e perceber a problemática da eficiência, do caso real, da produção de energia.

No capítulo três, após perceção e consolidação do conhecimento, proceder-se-á a formulação das funções segundo as diferentes leis que permitem determinar a produção de energia segundo vários cenários de precipitação.

CAPÍTULO

II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“Quanto mais treino, mais sorte tenho.”

(Tiger Woods)

2. CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado várias referências bibliográficas sobre o que já existe e o que está a ser desenvolvido cientificamente e ao nível governamental sobre o estudo deste tema, merecendo destaque a eficiência e otimização da produção de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água, mais precisamente sobre o funcionamento dos Grupos Eletrobomba (GEB) e Grupos Geradores (GG).

2.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

A investigação atual, da produção de energia elétrica, tem por objetivo a obtenção e comercialização de energias cada vez mais económicas e de forma sustentável. No fluxograma da **Figura 1** é possível observar algumas das formas de obter energia elétrica.

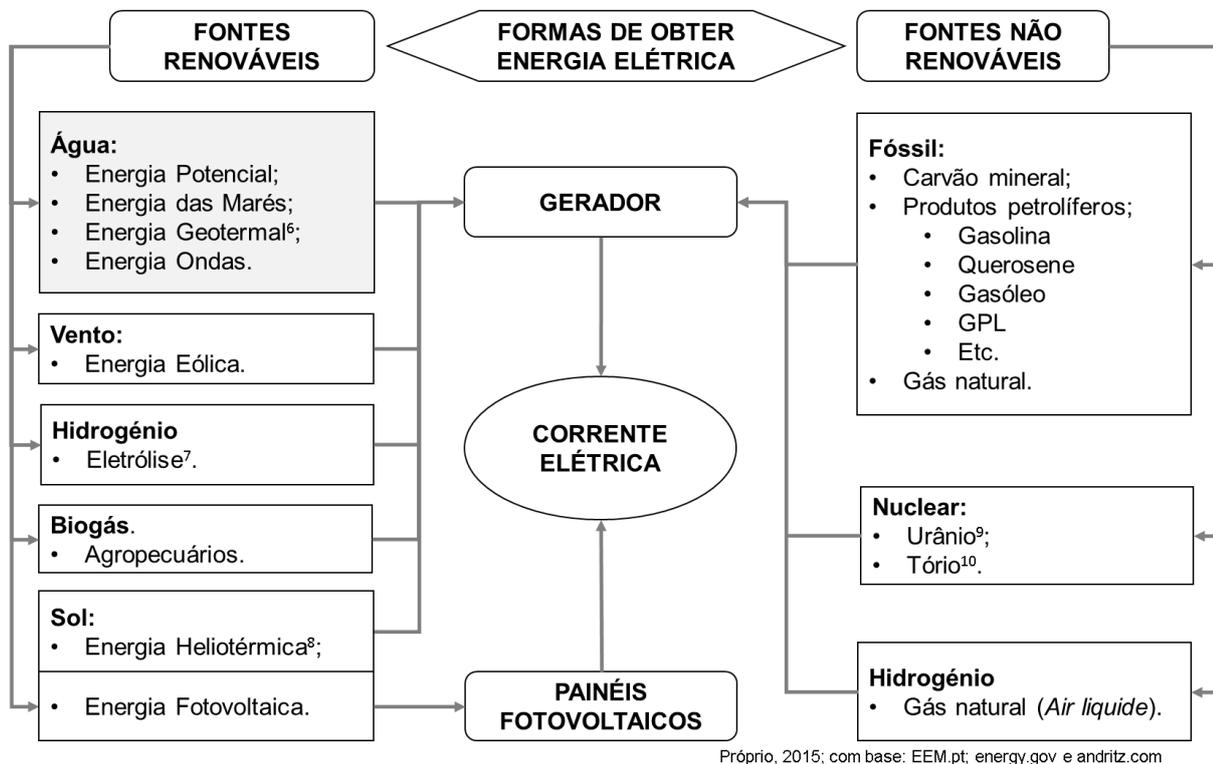


Figura 1 – Formas de produzir energia elétrica.

Com a representação deste fluxograma pretende-se abordar as «tecnologias» existentes para produção de energia mais divulgados cientificamente, pois existem mais que as esquematizadas. Frise-se que apesar da grande gama de diferentes formas de obtenção da energia, o objetivo final é a criação de uma **corrente elétrica**¹. Ou seja, deslocação de eletrões num material condutor (por ex.: no cobre), segundo um sentido. Existindo dois processos físicos principais, conhecidos, para produzi-la: o primeiro corresponde à rotação de um veio e conseqüente produção de energia no **gerador**² (que pode ser **alternador**³ ou **dinamo**⁴) acoplado ao mesmo veio, e o segundo corresponde a um processo físico aquando a radiação solar (**fotões**⁵) nos painéis fotovoltaicos.

2.2. ESTUDO DA TEMÁTICA PELA COMUNIDADE CIENTÍFICA

A água e a energia elétrica são essenciais para a sobrevivência e realização de atividades comerciais de uma sociedade. A energia consumida ao nível mundial em hidroelétricas é cerca de 7% da energia produzida. Atualmente, devido ao aumento da distância entre a população e os locais de captação de água, houve a necessidade de criar-se novas obras para corresponder ao novo volume de água consumido pela população em crescimento. Ao mesmo tempo o consumo *per capita* (por indivíduo) quadruplicou nos últimos 50 anos e é previsível que este valor continue a aumentar nos próximos anos. Com as preocupações reais sobre o desenvolvimento sustentável, a melhoria de eficiência energética em sistemas de abastecimento de água deve ser de grande importância [Coelho e Andrade, 2014].

A água e os recursos energéticos são fundamentais para a existência Humana, tendo sido criado regulamentos que incidem sobre a economia, as tecnologias e as utilizações, para que estas funcionem de forma sustentável. É estimado que 2 a 3% de todo o consumo de eletricidade seja usado em GEB inseridos em sistemas de abastecimento de água, cerca de 80-90% deste consumo é absorvido pelos GEB. Este custo representa o maior custo no funcionamento dos sistemas de abastecimento de água [Vilanova, 2014].

O bom funcionamento de uma Estação Elevatória (EE) é importante para possibilitar atingir os diversos objetivos motivadores da sua construção. A tarefa principal da EE é manter um volume adequado de água no reservatório (mais elevado) para permitir as várias utilizações associadas a este quando necessárias; a utilização racional em função do tempo permite um

menor custo, possibilitando uma redução das dimensões das infraestruturas civis a construir para corresponder às utilizações. É objetivo da formulação na sua gestão: minimizar o custo da operação em função de diferentes variáveis que contribuem para o funcionamento do sistema [Xiangtao Zhuan e Xiaohua Xia, 2013]. O custo do funcionamento da EE está relacionado com o preço da energia elétrica e a manutenção eletromecânica, por sua vez, o gasto para a manutenção é função do número de GEB; e o custo da energia elétrica utilizada é em função da potência dos motores e da tarifa em vigor [Savic *et al.* 1997].

A implementação de Grupos Geradores, que funcionam através da energia potencial, quer-se dizer, transforma a energia da água em energia elétrica. Permitindo uma diminuição do custo relacionado com o investimento inicial da construção dos sistemas de abastecimento. Este tipo de solução é aplicável sempre que existe uma orografia que possibilite a existência de valores para a energia potencial «aceitáveis», minimizando custos na instalação de válvulas para reduzir a pressão e permitindo a obtenção de receita na venda da energia elétrica fornecida [Ramos *et al.* 2007].

Existem vários parâmetros que influenciam a eficiência na produção de energia, merecendo destaque: as perdas de água e o consequente não redirecionar desta para a produção de energia elétrica; este parâmetro, aquando otimizado, possibilita um aumento da receita na exploração do empreendimento. Estas perdas são normalmente verificadas nas captações, no transporte e na retenção da água (câmaras de carga). A distribuição da água deve estar em conformidade com as necessidades do consumo doméstico, com uma boa qualidade e em quantidade proporcional às utilizações [Vilanova, 2014].

O termo “eficiência” está relacionado com o melhor uso do recurso disponível (material no estado natural, recursos financeiros, etc.), expressando uma interligação entre o desempenho do processo físico e das diversas utilizações do recurso [Franceschini *et al.*, 2007]. “Genericamente a eficiência é expressa pelo rácio entre o efeito útil que sai e os recursos necessários na produção” [Castro, 2007]. A redução da necessidade de manutenção pode ser conseguida com uma redução no número de vezes que se liga vs. desliga os Grupos Eletrobomba (GEB). Porém se estes acionamentos forem bem controlados podem representar uma eficiência energética de 10-20% da energia total utilizada [Coelho, 2014]. As melhorias na eficiência energética em

sistemas de abastecimento (e conseqüente distribuição) podem ser melhoradas através de motorização das fugas no transporte da água, da gestão dos GEB e da gestão dos Grupos Geradores (GG). Com um controlo do armazenamento e produção (respetivamente) em **tempo real**. Porém é de notar que estes sistemas de abastecimento já podem satisfazer estes requisitos, respondendo à otimização dos caudais para as diferentes utilizações. Por esta razão, a modelação computadorizada é uma ferramenta auxiliar importante para os estudos de **eficiência energética** em sistemas de abastecimento de água [Coelho, 2014].

Produção de energia e eficiência no abastecimento hidráulico são parâmetros importantes para garantir um desenvolvimento sustentável de sistemas de abastecimento de água. O sistema tem por objetivo garantir água com boa qualidade para a população [Ramos, 1999]. Porém para garantir um correto funcionamento é necessário existir GEB, para elevar a água necessária, correspondendo ao maior custo da exploração dum sistema desta natureza, variando o custo com o volume de água elevada e a **tarifa utilizada** [Sousa, 2007]. A eficiência do sistema pode ser obtida: com melhorias nos equipamentos ineficientes existentes; escolha das tarifas mais baratas para ativação das bombas; utilização de energia renovável; e otimização do tempo de funcionamento dos grupos [Coelho e Andrade, 2014].

As melhorias na eficiência energética (segundo Feldman, 2009) podem ser obtidas através das seguintes etapas: **etapa 1** – melhorias nas estações elevatórias; **etapa 2** – melhoria na geometria do sistema; **etapa 3** – controlo da velocidade do caudal no sistema; e, por fim, **etapa 4** – diminuição da pressão para existir menos fugas (ex.: ligações condutas forçadas).

A otimização do uso racional da energia pode ser desenvolvida em vários estágios de intervenção (segundo Dias, 1999): **nível 1** – eliminação dos desperdícios (perdas e/ou não aproveitamento) - correspondendo ao principal nível de intervenção (ex.: água perdida em juntas de dilatação térmicas e/ou de união); **nível 2** – aumentar a eficiência da energia consumida nos diversos elementos eletromecânicos (ex.: GEB). **nível 3** – aumento da eficiência dos GG (ex.: turbinas *Pelton*); **nível 4** – criação de sistemas reversíveis que permitam a otimização do recurso várias vezes em função das utilizações; **nível 5** – estudo do meio envolvente, podendo descentralizar as utilizações aproveitando, assim, possíveis novas captações que não são economicamente viáveis de serem direcionadas para o sistema principal; **nível 6** – alterar comportamentos de consumo na população.

A substituição de um equipamento ineficiente (ex.: rotores das bombas ou motores) pode diminuir a energia de elevação em cerca de 10-30% [Gellings, 2009]. Eficiência do sistema está fortemente relacionado com o tipo de **turbina**¹¹, podendo obter-se um aumento na eficiência entre 30-60%, com a escolha otimizada desta em função do caudal e da energia potencial.

A otimização da operação dos sistemas de consumo e/ou produção de energia têm vindo a ser investigados durante várias décadas [Ramos, 2014]. O interesse desta temática não está somente relacionado com a complexidade do sistema mas, está relacionada, também, com o benefício económico resultante das soluções escolhidas no ato de projeto e na exploração. O problema de otimização do modelo matemático tem por objetivo a minimização ou maximização do custo no uso da eletricidade ou energia gerada, respetivamente, com base nas funções objetivo [Vieira *et al.* 2007]. Os modelos de otimização têm aumentado em número e eficiência, resultante da melhor capacidade computacional [Firmino *et al.* 2006]. No artigo científico (Xiangtao Zhuan e Xiaohua Xia, 2013) é possível visualizar uma formulação para um modelo matemático que tem por objetivo a gestão otimizada de uma Estação Elevatória (EE) com múltiplos GEB.

Atualmente, a modelação matemática é um recurso muito utilizado para criação de cenários que permitam a otimização dos sistemas. Tendo como variáveis de quantificação: a pressão, velocidades, caudal e nível da água [Manual do usuário *EPANET*, 1997]. Vários *softwares* podem ser usados para modelação de sistemas de abastecimento, estando estes com o algoritmo de quantificação já criado (ex.: *EPANET*) ou carecendo que o investigador crie o seu próprio algoritmo em função das variáveis a estudar (ex.: aplicação de *Visual Basic do Excel*, *MATLAB*, etc.). Os algoritmos criados têm por objetivo a otimização em tempo real, segundo dados de entrada mais precisos e próximos das ocorrências reais. A otimização de um sistema de abastecimento tem por objetivo minimizar os custos associados aos GEB e maximizar a produção de energia pelos GG [Vilanova, 2014].

A utilização de energia renovável para funcionamento dos Grupos Eletrobomba (GEB) é uma prática corrente, entre outras, as turbinas eólicas permitem energia direta para estes grupos. Já é utilizado a energia do vento, em pequena escala há algum tempo, mais precisamente em locais agrícolas e em áreas remotas para produção de energia [Kumar *et al.*, 2007]. Os resultados dos estudos de Vilanova identificam, preferencialmente, o uso da energia proveniente do vento

para suprimir a necessidade da utilização de energia pelos GEB conjugado com as horas a que estes funcionam. A melhor forma de tornar um sistema de abastecimento de água sustentável é introduzir sempre que necessário energia renovável para ativação dos diferentes elementos eletromecânicos que consomem energia, por exemplo a proveniente da eólica. Porém já é possível verificar a implementação das energias num grande número de sistemas de abastecimento, existindo um número significativo de estudos nesta área [B. Coelho e A. Andrade, 2014].

2.3. ESTUDO DA TEMÁTICA POR ENTIDADES GOVERNAMENTAIS

A dependência de petróleo, acrescida ao que foi anteriormente escrito, motiva a Comunidade Europeia (CE) a apostar na sustentabilidade energética através de recursos renováveis. Representa-se na **Tabela 1** a evolução e estimação da energia produzida nas diferentes fontes renováveis nesta União de 28 países membros (2014).

Tabela 1 – Evolução média da exploração dos recursos renováveis na Comunidade Europeia.

	2005	2010	2015	2020	Unidades
Biomassa	12,7	16,3	18,8	19,1	GWh/ano
Pequenas hidroelétricas	8,9	7,8	6,1	4,9	
Grandes hidroelétricas	62,2	45,7	33,2	25,4	
Solar	0,2	3,3	6,8	8,5	
Geotermal	1,1	0,9	0,8	0,9	
Ondas	0,2	0,2	0,1	0,6	
Vento	14,8	25,8	34,3	40,7	

A evolução da exploração dos recursos renováveis em pequenas hidroelétricas têm vindo a sofrer uma diminuição percentual, em comparação às outras fontes de obtenção de **energia endógena**¹², ao nível da CE.

Após a adaptação e análise dos valores (**Apêndice 1**) foi possível verificar, de forma sintetizada: que o país com maior energia total produzida em pequenas hidroelétricas é a Itália com 9, 553 GWh/ano, mais 8, 588 GWh/ano que Portugal; para a energia produzida em grandes hidroelétricas é a Suécia com 72, 959 GWh/ano, mais 62, 109 GWh/ano que Portugal. O valor médio da produção é de 2, 1992 GWh/ano para as pequenas hidroelétricas e 13, 3813 GWh/ano para grandes hidroelétricas [*European Small Hydropower Association (ESHA)*, 2010].

Em consequência à dependência anteriormente indicada, foi criado um conjunto de regulamentos para aumentar a produção de energia elétrica com recurso a fontes renováveis ao nível nacional. Considerou-se relevante narrar dois deles, devido à sua importância para a temática desenvolvida nesta dissertação.

Segundo o Decreto-Lei n.º 34/2011 de 8 de março “estabelece que um dos objetivos para Portugal deve ser «liderar a revolução energética» através de diversas metas, entre as quais «afirmar Portugal na liderança global na fileira industrial das energias renováveis, de forte capacidade exportadora», e apostando na produção descentralizada de energia, simplificando os processos e procedimentos, facilitando a adesão dos cidadãos, empresas e outras entidades.” Estabelecendo “o regime jurídico aplicável à produção de eletricidade, a partir de recursos renováveis, por intermédio de unidades de miniprodução.” Descrevendo que «unidade de miniprodução» é a instalação de produção de eletricidade, a partir de energias renováveis, baseada numa só tecnologia de produção cuja potência de ligação à rede seja igual ou inferior a 250 kW (quilowatt). Neste Decreto-Lei, também, é aludido os direitos e deveres do produtor, remuneração e faturação [Decreto-Lei n.º 34/2011].

O Decreto-Lei n.º 168/99 de 18 de maio regula a atividade de produção de energia elétrica, mediante utilização de recursos renováveis. Destacando que “quando se trate de aproveitamentos hidroelétricos, as disposições do presente diploma só se aplicam desde que a potência instalada seja, no seu conjunto, limitada a 10 MW.” Este documento, ainda, apresenta a formulação para o cálculo do valor a debitar pela energia elétrica renovável; sendo possível a sua consulta no **Cap. IV** [Decreto-Lei n.º 168/99].

O arquipélago da Madeira devido a sua singularidade resultante de ilhas volcânicas, assim como o arquipélago dos Açores, apresentam adaptações nos regulamentos, estando estes presentes em artigos integrados nos mesmos Decretos-Leis.

Os resultados da aplicação dos Decretos-Leis são visíveis. No que concerne à energia produzida em centrais mini-hídricas os Decretos e incentivos estão a permitir uma evolução positiva, verificando-se um crescimento na produção de energia gerada de 396 GWh em 2005 para 1 098 GWh em 2014 (**Gráfico 1**). A sua obtenção está fortemente dependente da precipi-

tação, nas bacias hidrográficas, e do número de centrais hidroelétricas. Interpreta-se este acréscimo pela maior aposta no número de centrais, e por, possível, acréscimo da precipitação no intervalo de tempo estudado [DGEG, 2015].

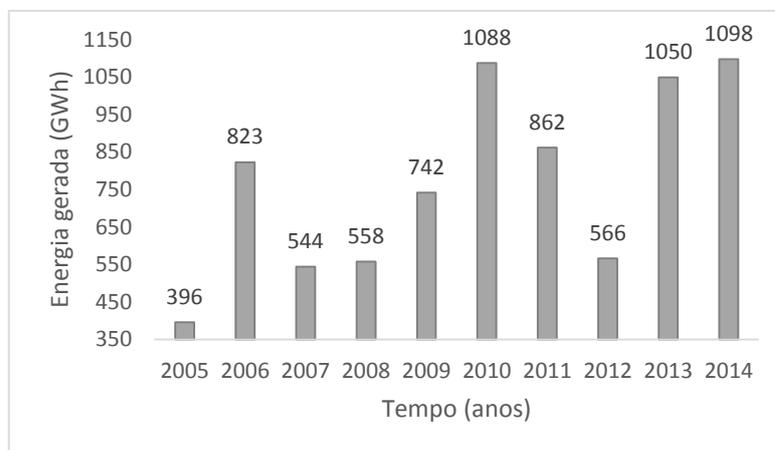


Gráfico 1 – Produção de energia em mini-hídricas ao nível Nacional.

2.4. TRABALHOS RECENTES

Vilanova e Balesteri (2015) avaliam a possibilidade de melhorar métodos de eficiência energética hídrica em sistemas de abastecimento de água.

Modelos de simulação computadorizados representam e/ou reproduzem comportamentos do funcionamento dos sistemas reais [Walski *et al*, 2014]. Diversos tipos de modelos já foram criados e estão a ser criados com base nas equações hidráulicas, modelos de balanço de massa e modelos de regressão. Tendo sido iniciado o seu estudo com poucas variáveis, e em consequência da melhoria das capacidades computacionais, tem-se verificado um aumento das variáveis de entrada, minimizando, assim, o erro final [B. Coelho e A. Andrade, 2014].

Atualmente existe inúmeros programas que permitem a criação destes modelos. Estando engenheiros a trabalhar em atualizações do algoritmo para otimização destes programas; destacando-se, por exemplo, a ferramenta informática: *EPANET* desenvolvida pela *Environmental Protection Agency (EPA U.S.)*

Página intencionalmente deixada em branco.

CAPÍTULO

III

DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA EM ADUTORAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA MADEIRA

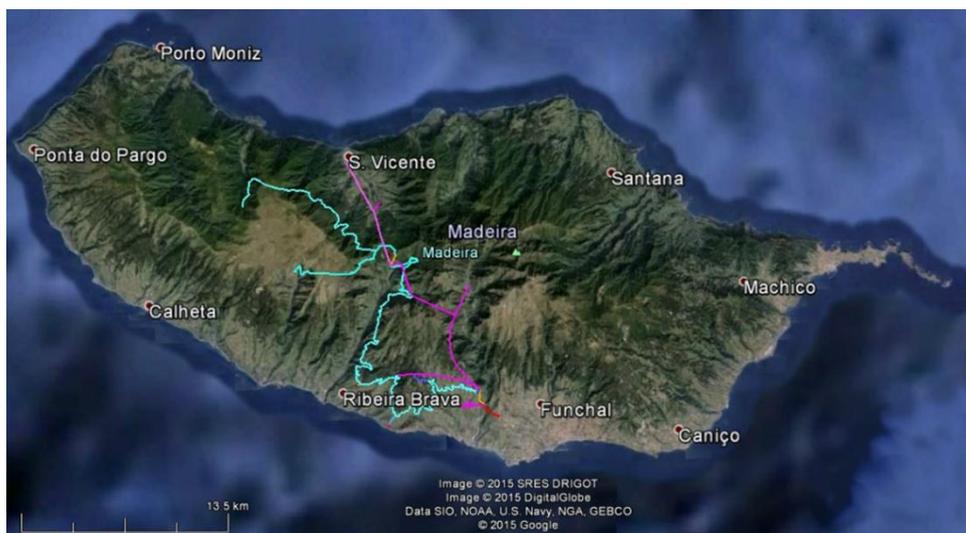
“Viajante, não há caminho, o caminho faz-se andando.”

(António Machado)

3. CAPÍTULO III – DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ENERGIA EM ADUTORAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA MADEIRA

Neste capítulo é possível verificar o funcionamento de um caso real de um aproveitamento de abastecimento de água. Ou seja, foi feita uma análise das principais obras que dão forma ao aproveitamento, tendo por objetivo registar e perceber (por parte do autor do documento) todas as variáveis que influenciam a produção de energia elétrica. No final deste capítulo é possível verificar o funcionamento e gestão do sistema reversível, servindo de base para a formulação das funções e cenários de funcionamento racional no capítulo subsequente.

3.1. ENQUADRAMENTO APROVEITAMENTO DE FINS MÚLTIPLOS DOS SOCORRIDOS



[Ad. no Google Earth]

Figura 2 – Vista geral do AFMS.

O caso do AFMS é o empreendimento de abastecimento público de maior importância na RAM, devido a sua localização, dimensão e diversidade de utilizações da água. Este aproveitamento estende-se por quatro concelhos (S. Vicente, Ribeira Brava, Câmara de Lobos e Funchal). Tem na sua formação o maior canal a céu aberto da região, denominado Canal do Norte, e um «vasto» conjunto de túneis. Os diversos túneis permitem um encurtamento do direcionar

da água, garantindo uma maior fiabilidade do abastecimento. Este empreendimento abastece três Estações de Tratamento de Água (ETA) localizadas nos últimos três concelhos aludidos, assegura um fiável abastecimento de água para irrigação à cota inferior a 550 e, tomando maior relevância neste registo de informação, é constituído por duas centrais hidroelétricas (dos Socorridos e da Serra d'Água) e duas mini-hídricas (Fajã dos Padres e Sta. Quitéria); estando estas inseridas no desenvolvimento do aproveitamento.

A criação dos diferentes empreendimentos que constituem o Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos (AFMS) (**Figura 2**) são justificados pelo “facto de na Madeira existir recursos hídricos mais abundantes a cotas mais elevadas, na encosta norte, e pela necessidade do abastecimento de água ser superior a cotas mais baixas”. Estando instalado no desenvolvimento do sistema centrais hidroelétricos que usam a energia potencial, resultantes dos desníveis, para produzir energia elétrica, antes do abastecimento público. Constando, na data de pesquisa (2014), dez centrais de produção de energia (hidroelétricas e mini-hídricas) com um potencial total, de cerca, de 50 MW na Região Autónoma da Madeira. “Durante mais de um **decénio**¹, desde a inauguração das primeiras centrais hidroelétricas, o abastecimento de energia elétrica na Madeira foi quase totalmente assegurado por via hídrica” [AREAM, 2008 e EEM, 2014]. A gestão destes aproveitamentos hídricos é feita por duas empresas. Geridas pela Empresa de Eletricidade da Madeira (EEM), fazem parte sete centrais hidroelétricas e uma mini-hídrica. As centrais hidroelétricas estão localizadas: na Ribeira da Janela, duas na Calheta, Serra d'Água, Fajã Nogueira, Lombo Brasil e Socorridos; e a mini-hídrica localiza-se na Fajã dos Padres. Merecendo maior análise, neste documento, a central dos Socorridos, pela sua capacidade produtora e por estar inserida no sistema reversível, permitindo, desta forma, uma maior perceção das variáveis. Geridas pela sociedade anónima “Águas e Resíduos da Madeira” (ARM) existem duas mini-hídricas. Estas estão localizadas na Terça e em Sta. Quitéria. Denote-se que a empresa ARM resultou da fusão de várias empresas na RAM, incluindo a anterior gestora destes aproveitamentos hidroelétricos, a empresa denominada “Investigação e Gestão da Água, S.A.”. Menciona-se esta fusão por dois motivos: ter ocorrido recentemente, mais precisamente a 30 de dezembro de 2014 e, pelo facto de, algumas das informações, nesta dissertação, terem sido adquiridas do contacto com esta empresa (IGA, S.A.).

A construção dos canais e túneis teve como objetivo principal a transferência dos recursos hídricos excedentários da zona norte para áreas habitadas de Câmara de Lobos, da Ribeira

Brava e do Funchal, por **ação gravítica**. Permitindo a substituição de vários canais que estavam com dimensões aquém das que a sociedade carecia. O segundo objetivo foi a irrigação dos terrenos agrícolas presentes, predominantemente, nos concelhos Ribeira Brava e Câmara de Lobos, garantindo um caudal constante ao longo de todo o dia nas diferentes estações do ano. O último objetivo foi a instalação de aproveitamentos hidroelétricos, merecendo menos prioridade (na gestão), em comparação aos dois anteriormente mencionados, servindo para cobrir alturas de pico de energia elétrica.

O AFMS foi construído em diferentes etapas. Primeiramente foi feito canais a céu aberto, mais precisamente o Canal do Norte Lanço Norte (CNLN) e o Canal do Norte Lanço Sul (CNLS). Tendo como data de inauguração o dia 1 de junho de 1952. Posteriormente foi construído um conjunto de túneis, durante seis anos, tendo-se iniciado em 1990. Mais recentemente, inaugurado em 2004, foi acrescido infraestruturas que permitem à central hidroelétrica dos Socorridos funcionar durante todo o ano, integrada num sistema reversível.

3.2. CENTRAL HIDROELÉTRICA DA SERRA D'ÁGUA

A perceção das diversas variáveis iniciar-se-á no local mais a montante do Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos (AFMS), com a localização dos canais que contribuem para o funcionamento da primeira Central na Serra d'Água. Na **Figura 3** é possível visualizar com pormenor os dois locais de captação, principais, e o desenvolvimento dos canais a céu aberto e em túneis, que permitem o transporte da água para a câmara de carga desta central.

A determinação das linhas de água, artificiais, do AFMS (ex. ilustrados na **Figura 3**) foram feitas com recurso a ferramenta de caminho presente no *software Google Earth*. Na criação destas linhas sobre o mapa, procurou-se que coincidissem, o máximo possível, com os canais. Porém não é possível visualizar (de satélite) o canal em toda a sua extensão, devido a presença de vegetação alta. Nestes locais a **metodologia utilizada** para a determinação dos pontos que delimitam os segmentos que dão forma aos canais, foram obtidos através dum processo de aproximação, ou seja, sabendo-se a localização de dois pontos (coordenadas), o segmento seguiu o relevo da montanha, tendo-se em consideração a inclinação do canal e, conseqüentemente, incrementação progressiva a altura, no prolongamento da linha, até chegar ao outro ponto de referência. Acrescente-se que esta metodologia foi usada após uma pesquisa

sobre os diversos túneis que estão presentes nesta linha de água artificial. Isto é, estas linhas não acompanham, na sua totalidade, as curvas de nível; este não acompanhamento ocorre sempre que existe uma passagem subterrânea ou passagem superior (ex.: ponte e/ou viaduto).

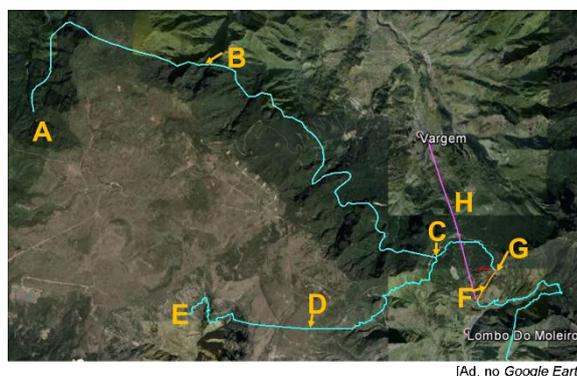


Figura 3 – Captações para a Central na Serra d'Água.

- | | |
|------------------------------------|---|
| A - Fonte da Hortelã; | B - Canal do Norte Lanço Norte; |
| C - Confluência de levadas; | D - Levada das Rabaças; |
| E - Fontes das Rabaças; | F - Condução forçada Serra d'Água; |
| G - Câmara de Carga; | H - Túnel da Encumeada. |

3.2.1. Desenvolvimento e geometria dos canais a céu aberto

Relativo à escolha da cota média para a criação dos canais foi apurada segundo duas condicionantes principais: não ser excessivamente «alta» que não possibilitasse a concentração suficiente de água, e não ser demasiada reduzida, para permitir direcionar a água de forma gravítica para os locais das diferentes utilizações. Este equilíbrio permite a otimização do caudal transportado e garante um abastecimento sem custos, utilizando a **energia de transporte resultante da ação gravítica**.

A jusante do túnel existe uma **confluência de levadas** (Rabaças e Canal do Norte Lanço Norte (CNLN)) ilustradas na **Figura 3** pela letra C. Após esta junção o transporte da água é feito por um canal comum compreendido entre jusante do dito túnel até a câmara de carga. Este troço comum tem uma extensão de 1 800 metros. A altitude inferior do túnel é de 993 metros. No que concerne à levada das Rabaças, a sua primeira captação é feita no sítio do Cascalho (Fontes das Rabaças), aos 1 029 metros de altitude. Desenvolvendo-se ao longo de 7000 metros de jusante do túnel referido até o sítio do Cascalho e “transporta toda a água disponível das

bacias da Ribeira da Ponta do Sol e da Ribeira Brava” [EEM.pt, 2015]. A levada denominada CNLN tem como local da primeira captação, o sítio da Fonte da Hortelã à altitude de 1 025 metros. O desenvolvimento, desta, prolonga-se ao longo de 14 000 metros até jusante do citado túnel. Em relação à extensão em túneis, a Levada das Rabaças apresenta 2 659 metros em passagens subterrâneas, e o CNLN a extensão em túneis é 7 135 metros, acomodando mais de metade do desenvolvimento total.

A **geometria e dimensionamento** dos canais, e dos diferentes elementos a jusante, foram calculados em função do volume de água a transportar no ano de projeto e no ano horizonte. Foi possívelocular, da visita ao local, que a secção transversal do canal aumenta de montante para jusante. Quer-se dizer, sempre que existe uma nova captação ou confluência de canais, que seja significativa, a secção é ajustada ao caudal que será transportado. Esta adaptação permite a otimização do custo no ato de construção, minimizando o transporte e materiais para a construção. As **secções** são, na sua maioria, retangulares (menor caudal), sendo adaptadas para a geometria trapezoidal sempre que o terreno, no qual está inserida, apresenta qualidades inferiores (ex.: quando passa sobre argila) e/ou a altura da superfície da água levada é superior.

3.2.2. Enquadramento Central Hidroelétrica da Serra d’Água

A Central da Serra d’Água foi inaugurada em 1953, dando forma à primeira fase dos aproveitamentos **hidroagrícolas** realizados na década de cinquenta. Funcionou durante 27 anos como uma central de compensação, regulando vários parâmetros importantes, nomeadamente a frequência da rede elétrica da Ilha. Hoje, essas funções são executadas pela Central Térmica da Vitória (inaugurada a 2 de outubro de 1980). Esta central hidroelétrica funciona como central de base hidroelétrica, contribuindo normalmente com a sua potência máxima nas horas de ponta e nos regimes hidráulicos de inverno. Desde 1994, as águas turbinadas nesta central e que não são necessárias no abastecimento público nem na irrigação (períodos de maior pluviosidade), são direcionados para a Central Hidroelétrica dos Socorridos (CHS), onde são turbinadas em segunda queda, aumentando assim a quantidade de **energia produzida** para os caudais disponíveis [ad. EEM.pt e Diário de Notícias: 3 de outubro de 1980]. Acrescente-se que em relação à produção de energia: a contribuição média anual de energia gerada desta central é de cerca de 15 GWh; a “central está dotada de dois Grupos Geradores (GG) com turbinas de fabrico *Neyrpic* do tipo *Pelton* de eixo horizontal” [EEM.pt, 2015].

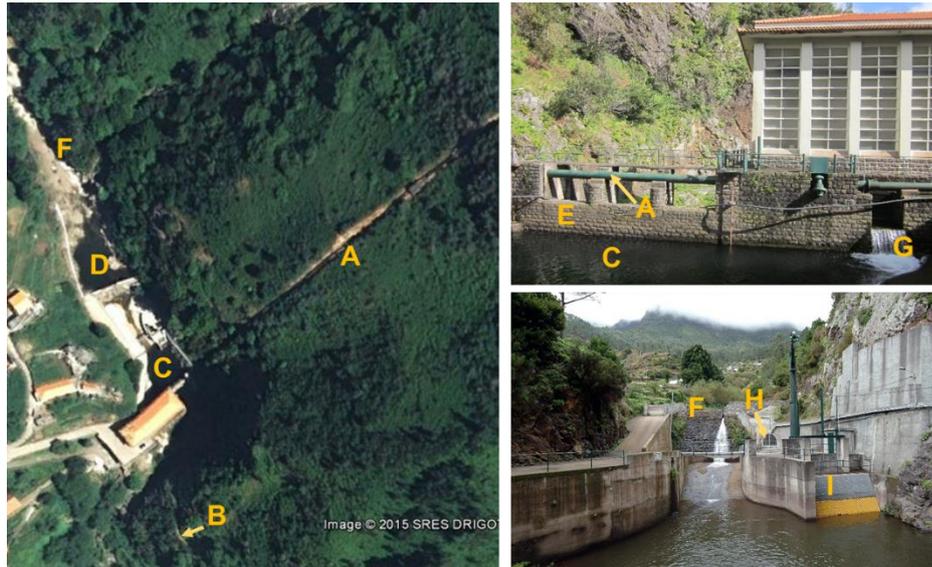


Figura 4 – Central Hidroelétrica da Serra d'Água.

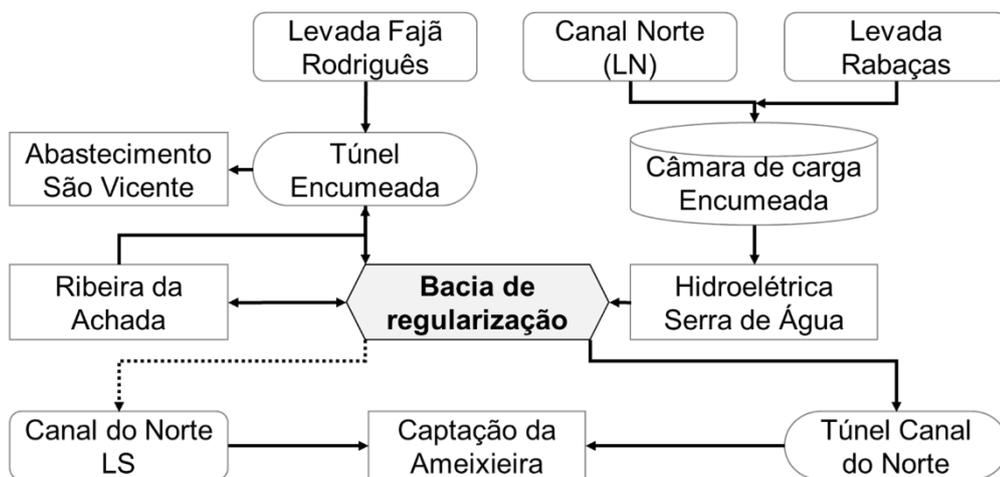
Foto lado esquerdo: vista de satélite [ad. no *Google Earth*, 2010];

Foto lado direito superior: vista para jusante da bacia de regularização;

Foto lado direito inferior: vista para montante da bacia de regularização [arquivo EEM].

- | | |
|--|--|
| A - Conduita forçada; | B - Início do Canal do Norte Lanço Sul; |
| C - Bacia de regularização; | D - Bacia de regularização; |
| E - Descarregador de cheia; | F - Ribeira da Achada; |
| G - Restituição da água turbinada; | H - Túnel da Encumeada; |
| I - Grelha para o Túnel Canal do Norte. | |

3.2.3. Regularização de caudais após produção de energia elétrica



Próprio, 2015

Figura 5 – Funcionamento da bacia de regularização na Serra d'Água.

Devido a complexidade de caudais que convergem para a bacia de regularização presente junto à Central Hidroelétrica da Serra d'Água, considerou-se pertinente esquematizar esta relação num fluxograma (**Figura 5**). A criação da bacia de regularização tem por objetivo a uniformização do caudal dos diferentes locais de captação para posterior redirecionar para a Central Hidroelétrica dos Socorridos.

3.2.4. Ligação da Serra d'Água até a captação na Ameixieira

O sentido do escoamento (**Figura 6**) é da Serra de Água para a Ameixieira. Acrescenta-se que parte do Canal do Norte Lanço Sul (CNLS) inativo desenvolve-se dentro de túneis e a céu aberto. A representação no programa informático é esquemática, tendo-se exposto o traçado deste a acompanhar o relevo por simplificação, pois o objetivo é ter uma referência espacial do desenvolvimento do canal na Ilha. Na obra de captação, na Ameixieira, o Canal do Norte não é interrompido, desenvolvendo-se paralelamente à obra de captação, existindo uma derivação para acréscimo de caudal para o dito canal.

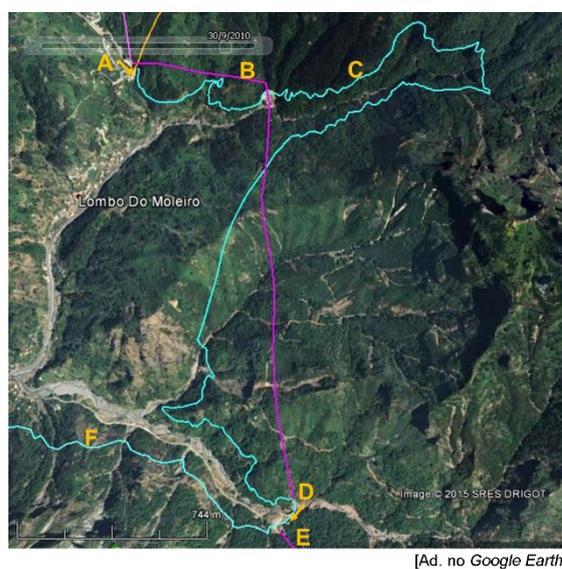


Figura 6 – Segmento Serra d'Água até a Ameixieira.

- | | |
|--|--|
| A - Central Serra d'Água; | B - Túnel Canal do Norte; |
| C - Canal do Norte Lanço Sul (inativo); | D - Montante da captação na Ameixieira; |
| E - Túnel do Pico Grande; | F - Canal Norte Lanço Sul (ativo). |

3.3. CAPTAÇÃO NA AMEIXIEIRA

Esta obra desenvolve-se ao longo de uma depressão entre duas montanhas, localizada no sítio da Ameixieira no concelho da Ribeira Brava. Este empreendimento foi criado com diferentes propósitos, frise-se os seguintes: permitir o acréscimo de caudal que vem do Túnel do Canal do Norte; desviar a água deste mesmo canal, para contribuir para o abastecimento público à zona da Ribeira Brava; armazenar água utilizando a **reservatório de regularização** combinada com parte do túnel e, por fim, regularização do volume de água a jusante aquando precipitações de água no estado líquido mais intensas.



Figura 7 – Captação da Ameixieira.

Foto lado superior: vista de satélite [ad. no *Google Earth*, 2010];

Foto inferior lado direito: vista geral;

Foto inferior lado esquerdo: descarregador lateral de cheia.

- | | |
|---|--|
| A - Bacia de regularização; | B - Reservatório de regularização; |
| C - Descarregador para o Canal do Norte; | D - Descarregador lateral de cheia; |
| E - Reservatório de equalização; | F - Entrada canal no Túnel Pico Grande; |
| G - Hidrociclone (inativo no momento da captação). | |

3.3.1. Apreciações ao processo de captação e regularização de caudais

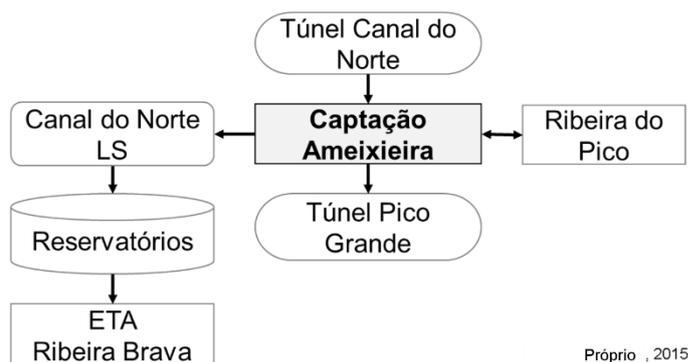


Figura 8 – Funcionamento da captação na Ameixeira.

O fluxograma da **Figura 8** tem por objetivo da sua criação, ilustrar o funcionamento deste empreendimento no Aproveitamento Fins Múltiplos Socorridos (AFMS). As setas representam o sentido do escoamento, permitindo intender para onde é direcionado vs. recebido água nesta obra. Destaque-se que para a Ribeira do Pico esta obra capta água e, quando existe quantidade de água excedentária no AFMS, restitui parte da mesma à linha de água, otimizando assim, o caudal presente no aproveitamento.

O ato de captar a água é feito na **bacia de regularização** localizada na Ribeira do Pico (**Figura 7**). Dispondo-se de dois locais, imediatamente a montante e a jusante do descarregador de cheia. A de montante é semelhante à verificada na captação da Fajã Escura, não merecendo redundância neste subcapítulo. Destaque-se a captação de água a jusante que é feita através da presença de um canal com uma grelha na sua face mais elevada. Esta grelha apresenta uma pendente perpendicular ao descarregador de cheia, fazendo um ângulo, com a horizontal, de aproximadamente dez graus; permitindo a entrada da água por entre a malha na chapa. O objetivo da criação deste canal, a jusante, é permitir o acréscimo de caudal no canal de ligação (**Figura 9** letra I) quando existe o galgamento do açude e/ou quando existe a colmatagem da captação antes do açude. Este tipo de captação tem como vantagem a menor probabilidade de colmatagem da grelha, pois a energia potencial da água ao atingi-la favorece a remoção, de parte, do material depositado. Contudo tem como desvantagem, comparativamente ao posteriormente verificado na Fajã Escura, a passagem de grande percentagem de materiais sólidos.

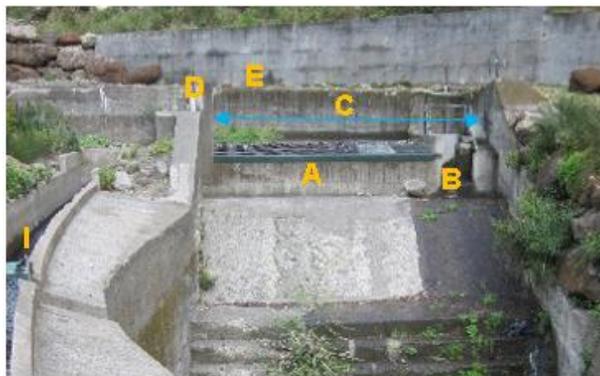


Figura 9 – Descarregador de cheia.

- | | |
|--|---------------------------------------|
| A - Canal captação jusante; | B - Descarregador de fundo; |
| C - Descarregador de cheia; | D - Comporta de regularização; |
| E - Crista do descarregador de cheia; | I - Canal de ligação. |

A água aproveitada nesta ribeira é direcionada diretamente para o Túnel do Pico Grande através de um **canal de ligação**. Devido à importância deste acréscimo em períodos de pouca pluviosidade seria melhor prática direcionar a água do canal (**Figura 9** letra I), para montante da captação do Canal do Norte ou adicionar mais um descarregador para o Canal do Norte a jusante. Garantindo, assim, mais caudal em situações de pouca precipitação maximizando a produção de energia nas centrais a jusante.

3.3.2. Gestão da água no reservatório de regularização e/ou acumulação

O **reservatório de regularização** está no “prolongamento do Túnel do Canal do Norte, estando equipada a jusante (**Figura 10**) com duas comportas hidráulicas, a pequena do tipo TBS-PRA (dimensão 0,5 por 0,5 metros) e a grande de aço-inox (dimensão 2,7 por 2,7 metros), que servem para controlar os caudais que efluem da câmara. As comportas estão dotadas de um sistema automático que funciona por telecomando.” A comporta de maior dimensão tem como finalidade a regularização do caudal debitado e armazenado nesta reservatório de regularização. O fecho das comportas garante uma acumulação de água que posteriormente é distribuída de forma constante, para o Canal do Norte e para dois reservatório circulares a cota inferior pertencentes à empresa Investigação Gestão da Água. Os reservatórios são usados para armazenamento e/ou abastecimento público (Ribeira Brava) nos picos de maior consumo, quer-se dizer, normalmente é utilizado no verão, para armazenamento, quando existe a presença de menor caudal nas linhas de água, na restante altura do ano é suficiente a água que escoar no canal para

abastecimento. A comporta de ligação ao Canal do Norte (menor dimensão) é controlada de forma automática por telecomando. [ad. memória descritiva: Túnel Canal do Norte].



Figura 10 – Reservatório de regularização.

Foto lado esquerdo: jusante reservatório de regularização;

Foto lado direito: sistema de fecho vs. abertura das comportas.

- | | |
|--|--|
| A - Emboquilhamento Túnel Canal do Norte; | B - Descarregador de cheia lateral; |
| C - Volante de controlo manual; | D - Comportas elétricas; |
| E - Desareador; | F - Escadas para manutenção; |
| G - Comando de controlo eletromecânico das comportas e do desareador. | |

A ativação das comportas é feita de forma elétrica. Correspondendo a uma solução (elétrica) que não é a melhor se única solução de abertura, devendo ser combinada com um sistema mecânica (pressão de ar ou manual) que permita o acionamento quando houver falhas elétricas. Normalmente esta ativação é feita por telecomando, na central de controlo. Esta ativação manual é feita no interior da casinhota através de um sistema de pressão. A ativação de forma manual verifica-se apenas quando existe falhas do sistema de controlo elétrico.

O “reservatório aberto superiormente tem de comprimento 15 metros, largura útil de 2,8 metros e altura de 6,75 metros. A altitude do topo dos **hasteais**² é de 566,5 metros localizada imediatamente a jusante do Túnel Canal do Norte.” Permitindo armazenar um volume significativo, pois o reservatório tem uma capacidade aproximada de 280 m³ complementada com mais um volume «considerável» que fica a montante deste no interior do túnel. O fundo do reservatório está rebaixado relativamente ao do canal existente, para permitir a deposição de material sólido que será removido por intermédio de uma comporta mural do tipo TSB. O **desareador** é acionada manualmente; permitindo direcionar a água para uma conduta em FFD DN500 (Ferro Fundido Dúctil de Diâmetro Nominal de 500 milímetros) com descarga para a

Ribeira do Pico. Este tanque de deposição de material sólido está coberto por uma grade metálica constituída por vários painéis com um sistema de abertura e fecho manual. A presença deste melhora a eficiência do sistema de remoção de areias, uma vez que, impede que a turbulência do escoamento remova o material depositado no fundo.

3.3.3. Canal de ligação entre os túneis

Na data de criação deste projeto, existia menos precisão no cálculo da quantidade de água **descarregada lateralmente no canal**, comparativamente a atual, porém já aceitavelmente precisa. O volume de água descarregado podia ser feito com recurso aos mínimos quadrados, existindo algum empirismo na sua aplicação, ou através de *software*. Com o intuito de aumentar a segurança da obra a jusante, é possível verificar um conjunto de descarregadores de cheia na lateral, em ambos os lados do canal de ligação com um «grande» desenvolvimento (cerca de 50 metros em cada um dos lados). O localizado no lado norte (montante captação) a água vai ter a um canal que restitui diretamente à ribeira. Este canal de ligação do caudal descarregado tem uma secção significativa (largura máxima 2,5 metros e cerca de um metro de altura). No lado sul é direcionado para um **reservatório de equalização**, que posteriormente através de um descarregador de fundo de secção circular (diâmetro igual a um metro) restitui a água para a dita ribeira.

A geometria dos descarregadores laterais, em ambos os lados do canal, são justificados como medida de precaução, relativa a possibilidade de parte do **túnel do Pico Grande** colapsar. Pois está escavado num material rochoso com grande heterogeneidade, apresentando várias falhas geológicas; o conhecimento sobre o tipo de material ainda era «pouco», baseando-se em conhecimento empírico adquirido com a experiência de obras em condições semelhantes. Esta preocupação (colapso) era significativa, pois nesta **bacia hidrográfica**⁶ a concentração da água ocorre em regime rápido.

3.3.4. Confluência de túneis na Terra Chã

Esta interceção localiza-se na freguesia do Curral das Freiras numa linha de água que desagua na Ribeira dos Socorridos. A obra de interceção foi concebida com o objetivo inicial de captar água, porém devido a problemas relacionados com a escolha do local, atualmente esta

obra serve apenas para confluência dos túneis. Esta confluência permite a ligação pelo exterior, podendo ser utilizada para remoção de material sólido após momentos de enxurradas (manutenção túneis).

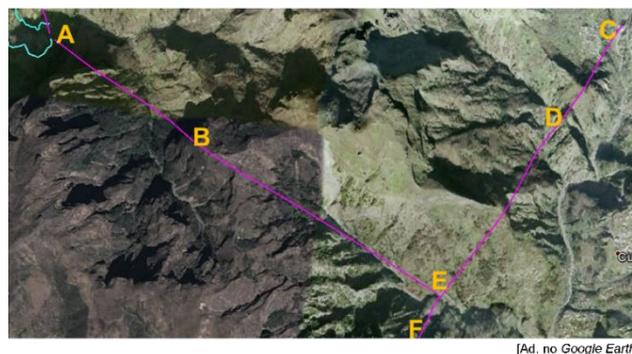


Figura 11 – Confluência de túneis na Terra Chã.

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| A - Captação na Ameixieira; | B - Túnel Pico Grande; |
| C - Captação na Fajã Escura; | D - Túnel Fajã Escura; |
| E - Confluência na Terra Chã; | F - Túnel dos Socorridos. |

3.4. CAPTAÇÃO DA FAJÃ ESCURA

O processo de captação numa linha de água, com as características de uma ribeira torrencial, tem como principal condicionante a presença de «caudal sólido» (arrastamento de pedras) com uma granulometria muito variável. Tendo uma gama considerável, por ordem crescente de tamanho verificou-se a existência de seixo, calhau, pedregulhos e rochas. Denominação de pedras utilizada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil [LNEC, 1968]. O estudo para a escolha do local, da captação, teve duas variáveis principais condicionantes na base do projeto: a variação de caudal na linha de água, que é função das bacias hidrográficas que para esta afluem a montante da captação; e permitir um transporte por ação gravítica para as diferentes utilizações a jusante. Esta obra de captação foi implementada à cota de 562, garantindo as duas condicionantes indicadas.



Figura 12 – Captação da Fajã Escura.

Foto lado esquerdo: vista de satélite [ad. *Google Earth*, 2010];

Foto lado direito superior: vista geral da captação;

Foto lado direito inferior: vista geral canal de transporte a entrar na montanha.

- | | |
|---|---|
| A - Bacia de regularização; | B - Açude para regularização; |
| C - Descarregador <i>sutro</i> ; | D - Descarregador de cheia na lateral; |
| E - Entrada túnel Pico Grande; | F - Comportas hidráulicas; |
| G - Descarregador de cheia; | H - Rampa de acesso à captação; |
| I - Descarregador <i>krieger</i> ; | J - Local do choque hidráulico; |
| K - Hidrociclone; | L - Casinhota; |
| M - Maciço de proteção. | |

3.4.1. Processo de captação da água

O desvio da água nesta linha de água inicia-se pela criação de pequenos «açudes permeáveis» com a aglomeração das diferentes granulometrias das pedras enumeradas, originando pequenas **bacias de retenção** provisórias (**Figura 16** da pág. **34** lado direito). O objetivo desta aglomeração de rocha é funcionar como primeiro processo físico de filtração, retendo o material de maior dimensão que flutua. A presença destes «açudes» vão limitar a capacidade volúmica da bacia de retenção, que quando «limpa» é de 2000 m³. [EEM.pt, 2015]



Figura 13 – Local de captação.

A - Passagem superior;

B - Grelha.

A entrada da água no sistema de aproveitamento é feito através da passagem deste fluido por uma grelha, sendo de seguida direcionada para o hidrociclone. A passagem da água pela grelha não é suficiente para remover todos os materiais sólidos que é arrastado. Desta forma os engenheiros confrontaram-se com a necessidade de utilizar uma estrutura denominada **hidrociclone**, isto é, elemento de geometria circular, em plano horizontal, que diminui de raio no sentido descendente (ex. «tronco de cone»), sendo máximo à superfície (15 metros diâmetro, presente caso) e mínimo no descarregador de fundo. A água é direcionada para este elemento, de sedimentação, tangencialmente às suas paredes laterais, permitindo aos materiais de peso específico superior ao da água concentrarem-se no centro deste à cota inferior, devido a sua rotação circular descendente. Complemente-se que a **sedimentação** depende, da resultante entre a velocidade que diverge do centro (centrífuga) e a velocidade que converge para o centro (centrípetas) da partícula que sedimenta.



Figura 14 – Estrutura de sedimentação.

Lado esquerdo: hidrociclone;

Lado direito: sistema de comportas.

A - Comporta para entrada da água;

B - Comporta para entrada da água;

C - Comporta para passagem lateral;

D - Superfície da água no hidrociclone.

A remoção do material sedimentado é feito com auxílio a um “temporizador de frequência e tempo de abertura”, responsável por ativar um mecanismo que abre a descarga de fundo, permitindo ao aglomerado que sedimentou e alguma água a restituição à linha de água. A água é reencaminhada para o canal, de transporte principal, por outra abertura a cota superior (**Figura 14 letra B**), após ter sido «obrigada» a contornar o «sedimentador circular».



Figura 15 – Açude de regularização.

A água já com uma menor percentagem de material sólido, antes de chegar ao canal onde será direcionada para as diversas utilizações a jusante, passa por um **açude para regularização** do caudal ecológico (**Figura 15**). No caso em estudo esta quantidade de água (caudal ecológico) é cumprida, existindo um local de controlo localizado imediatamente a montante do açude (casca). O caudal ecológico, “em sentido lato, pode ser definido como o caudal que permite assegurar a conservação e manutenção dos ecossistemas aquáticos naturais, a produção das espécies com interesse desportivo ou comercial, assim como, a conservação e manutenção dos **ecossistemas ripícolas**³ e os aspetos estéticos da paisagem ou outros de interesse científico ou cultural” [Wesche & Rechard, 1980 e Gordon et al., 1992].

As variáveis que permitem controlar o caudal que é lançado num descarregador de fundo, são dependentes da altura da coluna de água, do tipo de abertura e respetiva secção do descarregador. A presença do açude é justificada para existir controlo sobre as variáveis da **Fórmula 1**, mais especificamente, variação da secção do descarregador, ficando sempre em secção cheia, e carga estática que será aproximadamente contante, correspondendo, de forma aproximada, a altura do açude. Saliente-se que o objetivo, presença do açude, é garantir uma carga estática mínima que assegure uma quantidade de água ecológica; se o nível da superfície da água for superior este será superior ao mínimo, garantindo-se um volume de água em função do tempo mínimo; raciocínio válido quando existe escoamento na linha de água. Desta forma o caudal

ecológico será aproximadamente constante. No presente caso a fórmula que melhor se ajusta ao descarregador de fundo é:

$$Q = C \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (1)$$

Onde: Q – caudal descarregado [m^3/s]; C – coeficiente (entre 0 e 1) relativo a geometria das paredes do descarregador [-]; S – secção da abertura [m^2]; h – Carga estática (altura do centro da secção até à superfície) [m] e g – **Aceleração da gravidade**⁴ [m/s^2].

3.4.2. Estruturas de apoio à captação



Figura 16 – Montante do descarregador de cheia.

O processo de captação descrito é complementado com um conjunto de estruturas que permitem o correto funcionamento da captação no seu global. Estas intervenções podem ser divididas em obras: de proteção e de manutenção. No que concerne às obras de proteção para a captação. A foto do lado esquerdo **Figura 16** foi retirada para ilustrar a confluência da ribeira secundária com a dos Socorridos, apresentando, ainda, uma rampa de acesso à bacia de regularização; esta rampa «temporária» serve para manutenção, isto é, remoção do material retido na bacia.

A localização das estruturas de betão (hidrociclone, canal e comportas) estão engenhosamente localizadas, pois existe uma confluência imediatamente a montante da captação. A verificação da existência das linhas de água foi feita com recurso a uma carta topográfica. Se a estrutura fosse colocada na margem oposta, a que está, estaria mais exposta ao material deslo-

cado nas enxurradas da ribeira secundária. A segurança das estruturas de betão foi complementada com a construção de um **maciço de proteção** (**Figura 12** pág. 31 letra M) com intuito de minimizar os estragos, protegendo a estrutura da linha de água de maior capacidade de transporte.



Figura 17 – Descarregador lateral.

- A** - Passagem superior de betão; **B** - Crista do descarregador de lateral;
C - Proteção de juntas de dilatação térmica.

A existência de dois **descarregadores de cheia na lateral**, antes do túnel, são justificados pela necessidade de, em situação de cheia, garantir a correta operacionalidade do aproveitamento. Os descarregadores laterais apresentam alguma complexidade na determinação do caudal descarregado, pois este depende, sobretudo: da inclinação do canal e do desenvolvimento longitudinal do descarregador. No que diz respeito à inclinação; esta influencia a velocidade do escoamento e consequentemente o regime do escoamento. Se for regime lento a descarga é superior no início do descarregador, por outro lado se o regime for rápido descarrega mais a jusante. A altura da água que fica acima da crista varia de forma parabólica em função do regime (número de *Froude*), no desenvolvimento do descarregador.

O intuito da criação do descarregador lateral é limitar o volume de água que chega a jusante, desta forma, existe algumas geometrias e locais que o otimizam (maximizam o caudal descarregado em caso de cheias). No caso em estudo (**Figura 17**) é possível verificar a construção de uma «viga» (letra A) transversal ao sentido do escoamento que limita o volume de água que passa, isto é, obriga parte deste fluido a passar por uma secção fechada. Variando a altura da viga e da secção do escoamento consegue-se quantificar o caudal que passa, sendo o excedentário descarregado lateralmente. Em relação ao local do descarregador, se se localizar numa curva (lado de raio maior) o volume de água em função do tempo descarregado será

superior do que em reta pois a altura da água em curva é superior no lado de raio maior comparativamente ao do lado oposto (facto justificado com a energia cinética presente no escoamento). Em suma, relativo aos descarregadores, quando o descarregador a montante fica inoperacional o de jusante, por estar a uma cota superior em relação à ribeira, exerce a função para o qual foi projetado diminuindo a probabilidade de danificação do sistema à jusante com caudais excessivos. O descarregador de cheia na lateral que está a jusante apresenta um desenvolvimento de 15 metros.

É possível observar a presença de **juntas de dilatação térmicas** estrategicamente colocadas para expansão e retração do betão aquando sujeito a variações térmicas. A proteção metálica nas juntas (**Figura 17**) é justificada por causa de possíveis atos de vandalismos, protegendo a borracha que dilata e contrai em «sincronia» com o betão. Não permitindo a passagem da água para o exterior do canal, que facilmente poderiam danificar a estrutura e meio envolvente ao canal, contribuindo para uma perda de água e conseqüente não aproveitamento da mesma a jusante.

3.5. SINGULARIDADES PRESENTES NO CNLS

O CNLS apresenta várias singularidades no seu desenvolvimento, merecendo destaque algumas destas para melhor perceção das variáveis que influenciam a produção de energia no caso prático. A inclinação do canal, em média, é de 1%. Por outras palavras, depois de cada cem metros (em plano horizontal) este varia em altitude um metro. Este declive é suficiente para existir transporte de forma gravítica e não é demasiado grande que provoque erosão significativa nos planos que dão forma ao canal.

A água proveniente da derivação na captação da Ameixieira é direcionada, na sua totalidade, para abastecimento público ao concelho da Ribeira Brava. Existindo duas derivações ao longo deste segmento do Canal Norte Lanço Sul (CNLS): a primeira localiza-se próximo à captação da Ameixieira e a segunda no sítio das Covas. Esta água é direcionada para reservatórios que posteriormente abastecem as Estações de Tratamento de Água do concelho aludido. Complemente-se que a capacidade dos reservatórios no sítio das Covas é 1000 m³ cada, sendo dois no total. Têm uma geometria cilíndrica com um raio igual a 12,5 metros e 2 metros de altura. [IGA.pt, 2014]

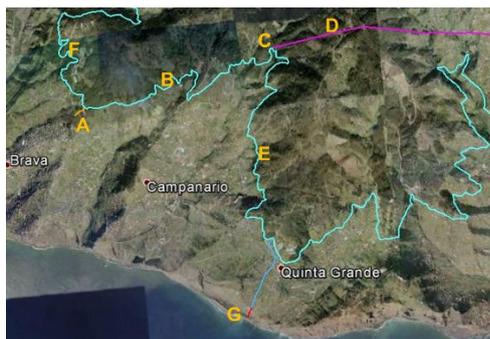


Figura 18 – Tramo Canal do Norte Lanço Sul.

- | | |
|--|--|
| A - Derivação nas Covas; | B - CNLS ligação Covas-RC (inativo); |
| C - Reservatório Campanário (RC); | D - Túnel Covão; |
| E - CNLS ligação RC-Covão; | F - CNLS ligação Ameixeira-Covas (ativo); |
| G - Mini-hídrica Fajã dos Padres. | |

3.5.1. Reservatório do Campanário

Confrontados com a necessidade de assegurar um correto fornecimento de água, independentemente da estação do ano, aos concelhos da Ribeira Brava e Câmara de Lobos, foi criado um reservatório no **emboquilhamento**⁵ do Túnel do Covão no concelho da Ribeira Brava, mais precisamente na freguesia do Campanário.

Na **Figura 20** pág. **38**, ilustra-se um fluxograma que reproduz o funcionamento deste Reservatório do Campanário (RC), onde é possível visualizar que este obtém água através: da elevação da água no interior do Túnel do Covão e pelo caudal escoado na Ribeira do Campanário. A contribuição deste último ocorre apenas quando existe precipitação. Quase a totalidade da água armazenada, neste reservatório, é elevada pela Estação Elevatória (EE) presente nos Socorridos e pelo caudal que vai para a Câmara de Carga do Covão (CCC), através dos túneis referidos anteriormente. A contribuição de água subterrânea no Túnel do Covão é «inexistente», pois o túnel é formado por betão projetado com fibras. A escolha deste material é justificada, pela necessidade de minimizar a perda de água, pois este túnel funciona em carga.



Figura 19 – Reservatório do Campanário.

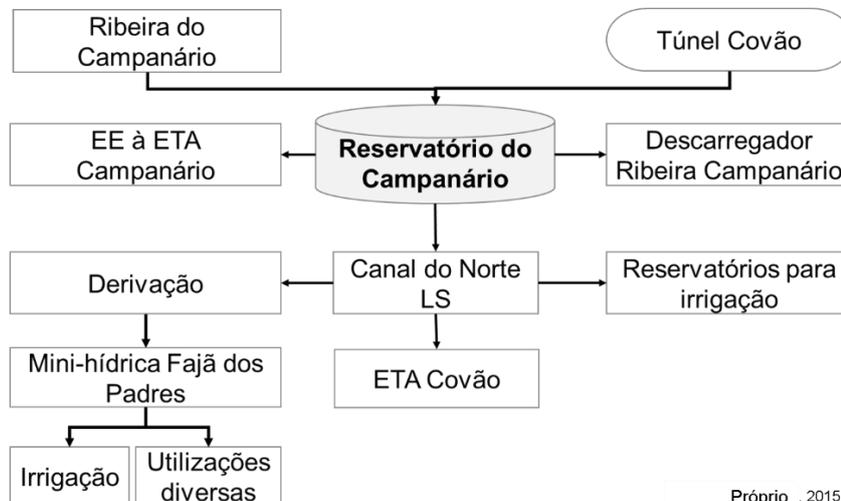
Esquerda: vista geral reservatório;

Direita superior: emboquilhamento Túnel do Covão;

Direita inferior: descarregadores de fundo.

- | | |
|---|--|
| A - Descarregador Canal do Norte; | B - Descarregadores para Estação Elevatória; |
| C - Descarregador de fundo; | D - Escadas de acesso; |
| E - Linha de água; | F - Casinhota para componentes elétricas; |
| G - Medidor eletrónico nível d'água; | H - Extremo Túnel do Covão (emboquilhamento). |

A criação deste reservatório é justificado pela necessidade de garantir um caudal descarregado constante ao longo das 24 horas no Canal do Norte Lanço Sul (CNLS). Tenha-se em reparo que o volume descarregado, durante um dia, pode ser superior ao volume total de armazenamento do reservatório, pois o descarregador funciona em simultâneo com a adução proveniente do Covão, garantindo, assim, um volume de água usada durante um dia superior ao volume do reservatório combinado com o tramo no túnel (emboquilhamento até a válvula antir-retorno presente sobre a Ribeira da Caixa).



Próprio, 2015

Figura 20 – Funcionamento do reservatório do Campanário e Canal do Norte.

A utilização da água para irrigação é feita durante o período diurno, ficando armazenada durante a noite em reservatórios distribuídos ao longo do canal. A não interrupção do abastecimento durante a noite é justificada pela capacidade máxima de transporte no canal. Ou seja, ao armazenar a água durante a noite em reservatórios distribuídos próximos aos terrenos a irrigar, possibilita: um maior volume de água usado durante o dia; maior área de terrenos irrigáveis; maximização da receita proveniente da irrigação (valor irrisório no presente caso) e possibilidade de utilização do excedentário para produção de energia. Mantendo uma geometria do canal «pequena». Se houvesse interrupção durante a noite a secção do canal deveria ser aumentada para cumprir os caudais das diversas utilizações, atuais.

O reservatório tem um volume de armazenamento, após a válvula de antirretorno, de aproximadamente 6 000 m³, sendo este volume dividido no trama compreendido entre esta válvula e o emboquilhamento combinado com o reservatório a céu aberto (**Figura 19** na pág. 38). Um reservatório desta natureza permite a sedimentação de todo o material que tenha massa volumica superior à da água no seu fundo (ex.: areias e materiais provenientes da linha de água). Em consequência deste facto existe a necessidade de remove-la, periodicamente, para garantir um correto funcionamento de todo o sistema. Tendo sido criado um **descarregador de fundo** (**Figura 19** letra C) numa cota inferior aos restantes que restitui o material sedimentado para a linha de água da Ribeira do Campanário através de uma conduta do “tipo FFD DN 500” [memória descritiva: Túnel Covão].

3.5.1.1. Apreciações ao descarregador de fundo

Os três descarregadores foram criados para posterior instalação de uma Estação Elevatória (EE) para abastecimento público a cotas superiores na freguesia do Campanário. A escolha de três descarregadores é justificada pela necessidade de ajustar o caudal elevado com as utilizações. Ou seja, em momentos de pouco consumo (ano de projeto) é ativada somente uma bomba e para o ano horizonte, onde previu-se acréscimo nas utilizações, é acionado a segunda bomba. A terceira é justificada como reserva para o ano horizonte, sendo acionada em alternado com as restantes, podendo-se garantir uma quantidade de água constante mesmo com avarias ou necessidade de manutenção dos Grupos Eletrobomba (GEB). Para a colocação das bombas na EE é possível dividir em duas fases temporais: a primeira etapa diz respeito ao ano de projeto, com instalação de duas bombas, ficando uma de reserva; e para as utilizações do ano horizonte

instalação de mais uma, totalizando três bombas. Esta instalação espaçada, por exemplo 20 anos, é justificada pela previsão do acréscimo populacional, exigindo a elevação dum maior caudal. Desta forma, otimizam o consumo energético para funcionamento das bombas ao longo do tempo. As bombas poderiam ser instaladas todas ao mesmo tempo, porém, a EE estaria sobredimensionada. Sendo necessária a substituição do terceiro Grupo Eletrobomba mais rápido comparativamente a sua colocação apenas em função das utilizações.

A necessidade da presença de um **descarregador de cheia** é «inexistente» pois a crista deste reservatório está a cota superior comparativamente ao descarregador de cheia na parede lateral da Câmara de Carga do Covão (CCC), garantindo, desta forma, o não galgamento aquando enchimento deste pela EE. É possível verificar a existência duma margem de segurança para o enchimento do reservatório. Esta margem, de aproximadamente 50 centímetros, é justificada por causa da presença da Ribeira do Campanário que se prolonga para montante do reservatório. O galgamento do reservatório poderia verificar-se se e somente se a quantidade de água da linha de água fosse superior à descarregada nos diferentes descarregadores de fundo, durante um determinado intervalo de tempo. Esta situação não está contabilizada pois: o nível da água é controlado através de medição em tempo real por telecomando (mecanismo assinalado com a letra G **Figura 19**); a bacia hidrográfica a montante do reservatório é pequena, não permitindo direccionar um caudal significativo ao reservatório, acrescente-se que apresenta um solo permeável e, conclui-se que, em momentos de precipitações intensas, a margem de segurança deixada pelo técnico responsável pela gestão é maior, pois o volume de água utilizado (irrigação e consumo) é menor que em períodos secos.

O caudal **descarregado para o** Canal Norte Lanço Sul (troço compreendido entre o Campanário e Covão) é feito por um descarregador de abertura variável (comporta), controlada por telecomando (Erro! A origem da referência não foi encontrada. **19** letra A). Este constante controlo da abertura do descarregador é justificado pela variação do nível da água no reservatório garantindo, assim, uma quantidade de água constante independentemente da coluna de água imediatamente a montante do descarregador.

O acesso manual á “comporta mural do tipo TBS de secção **0,4** por **0,4** metros” [memória descritiva: Túnel Covão] que secciona o caudal para o Canal do Norte é feito pela estrutura representada com a letra D na **Figura 21**, quando existe falhas de energia elétrica.

3.5.1.2. Estruturas de apoio ao funcionamento do reservatório

A necessidade de transmitir as cargas provocadas pela conduta ao solo é feito através da construção de **estrutura de apoio à conduta** (ex. **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**21 letra C). Este apoio em questão tem também como função permitir uma correta união entre os tubos, minimizando a possibilidade de haver fugas por deslocamentos das condutas quando existe diferença de cargas (presença vs. ausência de água) maximizando, desta forma, a quantidade de água transportada.



Figura 21 – Ligação do reservatório ao CNLS.

Foto lado esquerdo: sensor de distância ultrassónico;

Foto lado direito: vista geral ligação reservatório ao CNLS.

- | | |
|--|--|
| A - Sensor ultrassónico; | B - Estrutura gradada de proteção; |
| C - Estrutura de “apoio” à conduta; | D - Estrutura de acesso à comporta; |
| E - Descarregador de cheia lateral no CNLS; | F - Conduta de ligação reservatório CNLS; |
| G - Canal do Norte Lanço Sul (CNLS); | Q - Sentido do escoamento. |

A gestão do volume de água no reservatório vs. caudal descarregado auxilia-se de dois sensores. O primeiro consiste num **medidor eletrónico do nível da água**. Este elemento de medição da altura da superfície da água em tempo real e consequente envio dos dados para a central de controlo, permite o ajuste dos descarregadores de fundo em momentos de precipitação anormais, possibilitando controlar a paragem vs. arranque dos GEB. O sensor de distância ultrassónico, instalado no Canal do Norte, permite saber qual é a altura de água no Canal do Norte, para consequente aplicação da fórmula de *Manning-Strickler*, adaptada ao algoritmo do *software e hardware*, para determinação do caudal que escoar. Note-se que para aplicar a fórmula referida é necessário saber: o declive do canal (1%), a geometria do canal para determinação do raio hidráulico e a área da secção transversal (largura é 0,4 metros por 0,5 metros altura), nível da água no canal e, finalizando com a, natureza do material nas paredes do canal

(betão liso corresponde a $80 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$) [apontamentos hidráulica II, 2014]. Note-se que no **Cap. IV** abordar-se esta fórmula mais detalhadamente.

3.5.2. Mini-hídrica na Fajã-Padres

A criação desta mini-hídrica é justificada pelo crescente fornecimento de energia elétrica, verificado nas últimas décadas, combinado com o facto de na Ilha da Madeira existir grandes acidentes orográficos da superfície terrestre (relevo). A mini-hídrica localiza-se depois de uma escarpa, com um desnível de cerca de 300 metros em conduta forçada na direção quase vertical, terminando na forma de injetores sobre as pás do rotor *Pelton*. Está instalada com um único GG de 1 700 kW. Funciona com o caudal excedentário do CNLS, desviado na freguesia da Quinta Grande. Funciona “em modo automático e não acompanhado, arrancando quando há água disponível e suspendendo a sua atividade quando aquela falta.” A água turbinada é posteriormente utilizada para abastecimento público e irrigação da zona a jusante da central [EEM.pt, 2015].

3.6. CÂMARA DE CARGA COVÃO

Neste subcapítulo será analisado as variáveis que influenciam a variação do volume de água no local que antecede a conduta forçada, para, posterior, produção de energia elétrica na Central Hidroelétrica dos Socorridos (CHS). A Câmara de Carga a «estudar» localiza-se na freguesia do Covão, no concelho de Câmara de Lobos. Esta parte do Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos (AFMS) foi realizado em diferentes etapas, sendo possível verificar através das fotografias apresentadas neste documento algumas fotografias «desatualizadas». Acrescenta-se que todas as fotos que não citam data de captação e fonte são recentes, isto é, foram captadas pelo autor deste documento em março de 2015, resultantes das diversas visitas aos locais que dão forma ao AFMS.



Figura 22 – Câmara de Carga e ETA do Covão.

Foto lado esquerdo: vista de satélite [ad. no *Google Earth*, 2010];

Foto lado direito: vista geral [arquivo EEM, 2003].

- | | |
|---|---|
| A - Túnel dos Socorridos; | B - Túnel do Covão; |
| C - Conduto para irrigação vs. ETA; | D - Conduto forçada/elevatória do Covão; |
| E - Canal para o descarregador de cheia; | F - Descarregador de cheia; |
| G - Regularização jusante do CNLS. | |

A realização da Câmara de Carga teve dois objetivos principais que deram origem ao seu projeto. O armazenamento de água para abastecimento público aos moradores dos concelhos de Câmara de Lobos e aos do Funchal, mais precisamente aos abastecidos pela Estação de tratamento de Água (ETA) do Covão e ETA de Sta. Quitéria, respetivamente. Assegurando um abastecimento contínuo, fiável e de boa qualidade em períodos de menor precipitação, mesmo na estação de verão. O segundo objetivo justificativo da sua construção foi a regularização de caudal para produção de energia elétrica na Central Hidroelétrica dos Socorridos (CHS), e mini-hídrica de Sta. Quitéria. Este local de armazenamento de água apresenta alguma complexidade em relação às diferentes derivações de caudais. Desta forma criou-se a ilustração da **Figura 23**, para ser inequívoca a sua explicação, e consequentemente perceção das **diversas variáveis**. É possível visualizar através da representação das setas o sentido do escoamento que entra e sai da CCC. Refira-se a existência da singularidade de o Túnel do Covão e a conduto forçada/elevatória que apresentam dois sentidos no escoamento.

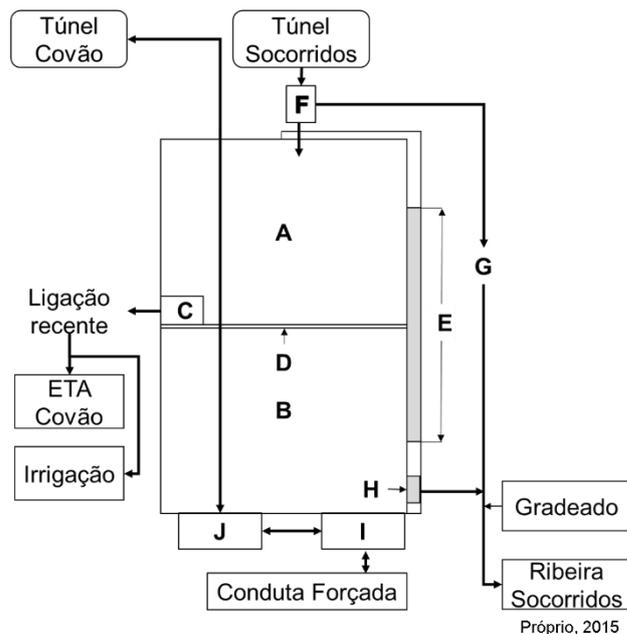


Figura 23 – Funcionamento da Câmara de Carga do Covão.

- | | |
|---|--|
| A - Câmara de Carga de montante; | B - Câmara de Carga de jusante; |
| C - Tamisador vertical; | D - Barreira betão (açude); |
| E - Descarregador de cheia; | F - Derivação de caudais; |
| G - Canal lateral para descargas (fundo e cheias); | H - Descarregador de fundo; |
| I - Grelha conduta forçada/elevatória; | J - Janela Túnel do Covão. |

3.7.1. Gestão do volume de água na Câmara de Carga do Covão

Uma das entradas de água para a câmara é feita através da **derivação de caudais** (**Figura 23** letra F) proveniente do Túnel dos Socorridos (que tem início na interceção da Terra Chã); apresentando uma extensão de 4 991 metros, entre estes dois locais. O caudal proveniente neste túnel é variável em função das condições atmosféricas. Em consequência deste facto, foi criado uma derivação imediatamente a jusante deste túnel com o objetivo de, contribuir para, controlar o volume de água em função do tempo que chega à Câmara de Carga, em momentos de maior intensidade de precipitação das diferentes bacias hidrográficas que contribuem para este aproveitamento. É possível observar na **Figura 24** a presença de um açude de ligação à Câmara de Carga com as dimensões de 3 metros por 0,5 metros, largura e altura, respetivamente. Esta interceção no canal de ligação à Câmara de Carga é justificado pela necessidade de reter parte dos sedimentos provenientes do Túnel dos Socorridos. A remoção do material acumulado nesta interceção é feita, maioritariamente, através da abertura da comporta assinalada com a letra A (nesta mesma foto), que o direciona para o descarregador de cheia. Sempre que é justificável é

utilizado operários para remoção do material acumulado nas diferentes zonas do aproveitamento.



Figura 24 – Derivação de caudais.

- A** - Comporta para o descarregador lateral de cheia;
- B** - Açude de ligação à Câmara de Carga do Covão.

No que concerne ao **canal lateral** para transporte da água que se desenvolve lateralmente à camara de carga (**Figura 23** letra G); tem como objetivo, da sua construção, permitir a descarga do caudal excedente pela comporta A, pelo descarregador de cheia e pelo descarregador de fundo para a Ribeira dos Socorridos. O descarregador de cheia (letra E) foi concebido como medida de segurança para a eventualidade de existir uma falha no controlo das comportas na derivação. Este descarregador tem um desenvolvimento de 20 metros, permitindo descarregar o caudal excedentário proveniente, principalmente, do Túnel dos Socorridos para a ribeira de mesmo nome. O nível da água quando excede a crista do descarregador lateral referido vai para um canal que tem parede comum à Câmara de Carga.

O descarregador de cheia (**Figura 22** pág. 43 letra F) tem uma capacidade máxima de 13 m³/s. A capacidade do descarregar de cheia está limitado pela presença de um pequeno túnel de ligação entre o canal lateral e o descarregador de cheia. A capacidade de descarga foi majorado, garantindo o não galgamento da Câmara de Carga pelos restantes paredes laterais. Frise-se que o caudal que chega à Câmara de Carga é limitado pelas secções em que ocorre o escoamento, existindo um conjunto de descarregadores distribuídos por todo o sistema a montante deste empreendimento que limitam a quantidade de água transportada.

Na parte jusante da Câmara de Carga, mais precisamente, na parede do descarregador de cheia existe um **descarregador de fundo** que permite esvaziar a câmara totalmente. Normalmente é utilizado para atividades de manutenção (ex. reparações). Esta abertura encontra-se no local de menor cota da laje que forma a base da Câmara de Carga, permitindo o escoamento gravítico da água armazenada para o canal lateral. A localização do descarregador de fundo, assim como verificado noutras análises, está a uma cota inferior comparativamente a da captação para a conduta forçada/elevatória; minimizando a possibilidade de acumulação de materiais sedimentados na conduta e, conseqüentemente, nas turbinas a jusante (diminuindo a manutenção dos grupos geradores). A construção desta descarga de fundo foi justificada aquando a inexistência do aspirador de areias, principalmente.

3.7.2. Apreciações técnicas às singularidades presentes na Câmara de Carga

Esta câmara de carga apresenta uma barreira de betão no seu interior, ou seja, exatamente ao meio desta foi criado uma divisão perpendicular às paredes laterais, **Figura 25** letra G, de comprimento igual à sua largura. Dividindo-a até uma altura de **dois** metros; acima desta crista a câmara de carga é comum não existindo distinção entre montante e jusante. O intuito da criação da divisão foi limitar a água usada pela Central Hidroelétrica dos Socorridos, garantindo um reservatório com um volume de armazenamento (**Figura 23** letra A) de 720 m^3 para irrigação e abastecimento público (valor obtido do produto da largura 20 metros pelo comprimento 18 metros e pela altura). A criação desta divisão foi aquando a “transformação do sistema de inverno para funcionamento reversível”. A capacidade da câmara de carga até ao descarregador de cheia lateral é de $2\,870 \text{ m}^3$, quando contabilizado com o volume dentro do Túnel dos Socorridos aumenta a sua capacidade útil para cerca de $7\,500 \text{ m}^3$ [EEM, 2014].

O reservatório criado pela presença do açude é abastecido pelo Túnel dos Socorridos, verificando-se o seu galgamento só depois do reservatório (de montante, letra A) estar cheio. O volume máximo de água utilizado num determinado intervalo de tempo será em função: do caudal que chega, proveniente do Túnel dos Socorridos; da quantidade de água utilizada para irrigação; da **capitação de água**⁷ pela população abastecida pela Estação de Tratamento de Água (ETA); e do volume máximo de armazenamento (720 m^3). Quer-se com isto dizer, esta divisão permite utilizar um volume de água, num determinado intervalo de tempo, superior ao

volume criado pela geometria do reservatório, pois o caudal é função do tempo. A água que não é usada no desenvolvimento do Canal do Norte tem como destino último contribuir para o abastecimento da ETA do Covão. A restante quantidade de água necessária para a população abastecida por esta ETA é feita através do desvio aludido na Câmara de Carga.



Figura 25 – Câmara de Carga do Covão (CCC).

Foto lado esquerdo: vista para jusante da CCC;

Foto lado direito: vista para montante da CCC.

- | | |
|--|---|
| A - Descarregador de cheia lateral; | B - Abertura descarregador de fundo; |
| C - Grelha conduta forçada e Túnel Covão; | D - Comporta Túnel Covão; |
| E - Tamisador vertical; | F - Derivação de caudais; |
| G - Parede divisória (açude); | H - Ponte rolante. |

A presença da divisão no interior da Câmara de Carga apresenta uma desvantagem relacionada com a acumulação de areias no lado montante desta. Desta forma, para assegurar um bom funcionamento do abastecimento à ETA do Covão foi colocado um **tamisador vertical**, que tem por função retirar as areias, quando ocorre a passagem da água pela grelha, que o forma. Para um correto funcionamento do tamisador o material sólido na água deve ficar retido nos poros que estão presentes na malha rotativa, para conseqüente elevação deste material sólido, para a parte superior através da rotação da grelha. Este material acoplado aos «poros» é retirado na parte superior do tamisador por um sistema de injetores de água que limpam a grelha. O sentido dos injetores é do interior para exterior permitindo remover o material fixado, direcionando-o para um sistema que o capta e direciona para a linha de água.

Na **Figura 26** é possível observar no lado esquerdo uma vista geral da grelha de ligação à conduta forçada/elevatória e Túnel do Covão. O mecanismo que permite a limpeza da grelha tem a particularidade de ser acionado automaticamente, sempre que o desnível associado à

perda de carga montante vs. jusante, da grelha, chega a um valor pré-definido pelos técnicos. No lado direito está a caleira para remoção do material retido na grelha. O material retirado biodegradável é restituído à linha de água por esta caleira localizada na parte superior da grelha; e o não biodegradável é recolhido e reencaminhado para aterro ou reciclagem, em função da sua constituição. A restituição à linha de água, após separação dos materiais, é feito através do acionamento de uma válvula que permite descarregar água para a caleira, possibilitando o arastamento do material de forma gravítica.



Figura 26 – Grelha de ligação à conduta forçada/elevatória e Túnel do Covão.

Em suma, relativo à CCC. A comporta de ligação ao Túnel Covão tem como função reter a água dentro do Túnel do Covão para posterior produção de energia, nos momentos de pico(s) de fornecimento elétrico. A abertura e fecho desta comporta é feita de forma automática existindo um sistema manual para momentos de falha elétrica.

3.7.3. Túnel do Covão

O Túnel do Covão foi criado aquando as obras de conversão do sistema de inverno em sistema reversível dos Socorridos. Esta galeria subterrânea tem como função armazenar a água para posterior reutilização para produção de energia elétrica, principalmente.

A ilustração da **Figura 27** tem por objetivo representar as cotas dos diferentes pontos singulares do Túnel do Covão, mais precisamente entradas vs. saídas de ar e desenvolvimento dos traineis. Justifica-se a representação das cotas, ao longo do túnel, pela sua relevância na evolução da coluna de água para produção de energia elétrica. No desenho não foi tido em consideração a escala (distância entre as janelas, diâmetro túnel, etc.). Apesar de não se ter

ilustrado de forma perceptível, o túnel é formado por dois traneis, sendo o ponto de inflexão junto à válvula antirretorno. O **tranel**⁸ da esquerda apresenta uma inclinação próxima da horizontal.

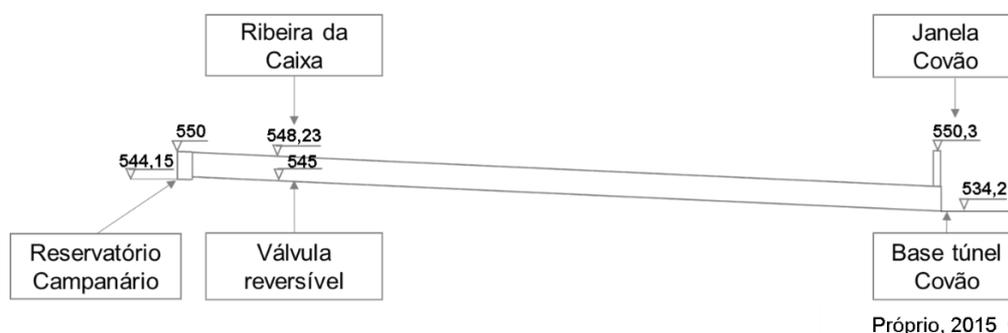


Figura 27 – Cotas relevantes no Túnel do Covão.

3.7.4. Justificação da construção dos túneis

É possível observar que existe dois «caminhos» que vão dar ao Covão; um em canal maioritariamente a céu aberto e outro em túneis. A opção de criação de túneis, em solução aos já existentes canais a céu aberto, teve dois motivos na sua base justificativa: armazenar água para garantir um abastecimento constante (na irrigação e no consumo Humano), independentemente das condições climatéricas, e criação de uma “autoestrada de água” [Eng.º Agostinho Figueira, 2015] que serve de resolução ao incorreto funcionamento das levadas quando existe a ocorrência de **enxurradas** e, para além disso, possibilita um maior volume de água transportado, num intervalo de tempo menor, comparativamente. Possibilitando respostas mais rápidas do aproveitamento aos comandos, ou seja, com o tempo de escoamento menor é mais rápido a chegada ou interrupção da água em função dos comandos dados de abertura vs. fecho das comportas.

3.8. CONDOTA FORÇADA/ELEVATÓRIA

A **conduta forçada/elevatória do Covão** foi criada com dois objetivos: permitir a adução da CCC aos grupos geradores na CHS e, o segundo objetivo foi quando ocorreu a transformação do “sistema de inverno em funcionamento reversível”, permitir restituir a água armazenada na galeria dos Socorridos à Câmara de Carga e ao Túnel do Covão para posterior reutilização de «parte» do caudal para produção de energia elétrica. Escreve-se «parte», propositadamente, pois sobre este volume elevado uma percentagem será utilizada pela população na irrigação e

no consumo, sendo compensado (situação mais comum) por uma percentagem «superior», que a anteriormente descrita, proveniente das captações.

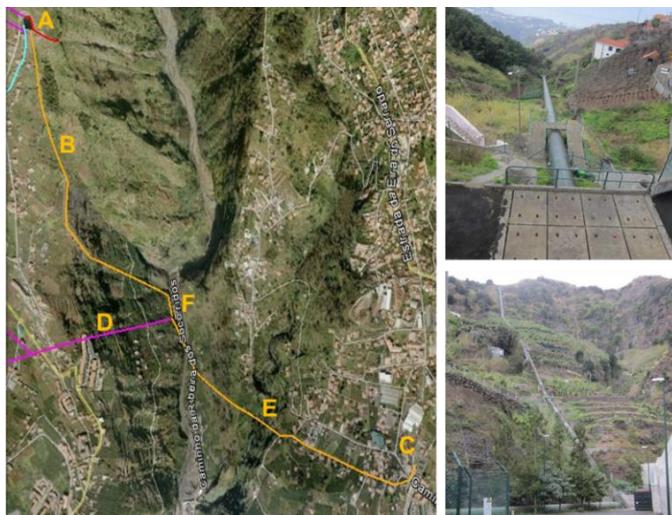


Figura 28 – Conduitas forçadas/elevatórias.

Foto lado esquerdo: vista geral de satélite [ad. no *Google Earth*, 2010];

Foto lado direito superior: vista da conduta forçada/elevatória a partir da CCC;

Foto lado direito inferior: vista da conduta forçada/elevatória a partir dos Socorridos.

- | | |
|--|---|
| A - Câmara de Carga Covão; | B - Conduto forçada/elevatória do Covão; |
| C - Mini-hídrica de Sta. Quitéria; | D - Galeria acumulativa dos Socorridos; |
| E - Conduto forçada/elevatória de Sta. Quitéria; | |
| F - Central Hidroelétrica, EE e entrada galeria acumulativa nos Socorridos. | |

Existe um conjunto de **maciços de fixação** do tubo (conduta) ao solo sempre que existe uma mudança de direção (plano horizontal e/ou vertical), nas uniões dos tubos e, de menor dimensão, ao longo da conduta para evitar **fluência**⁹ do tubo. A colocação de maciços é justificada a sua colocação nas mudanças de direção: estes maciços são dimensionados em função do impulso provocado pela energia da água no tubo, resultante do escoamento descendente e/ou ascendente no interior do tubo, neste caso concreto. Isto é, a ação sobre o maciço deve ser igual ou inferior à capacidade de reação provocada pela presença do maciço, só cumprindo esta lei da física existe equilíbrio entre os corpos [ad. terceira Lei Newton]. A força que o fluido exerce sobre as paredes da conduta tem como principais variáveis, na sua determinação, o ângulo da mudança de direção (curva), a massa volúmica do fluido, diâmetro da conduta, a aceleração do fluido e a velocidade com que este se desloca. Esta transmissão de esforços, no caso presente, é feito através da amarração do tubo por braçadeiras que estão ligadas ao maciço por parafusos

e, para minimizar a possibilidade da conduta mexer-se, parte da secção transversal está embuda no betão do maciço de fixação sempre que as ações são elevadas, comparativamente.

É possível visualizar a evolução da conduta (Covão à esquerda e Sta. Quitéria à direita) comparativamente à evolução do relevo na **Figura 29**. O objetivo da criação desta ilustração é ser claro na descrição do desenvolvimento desta conduta em plano vertical.

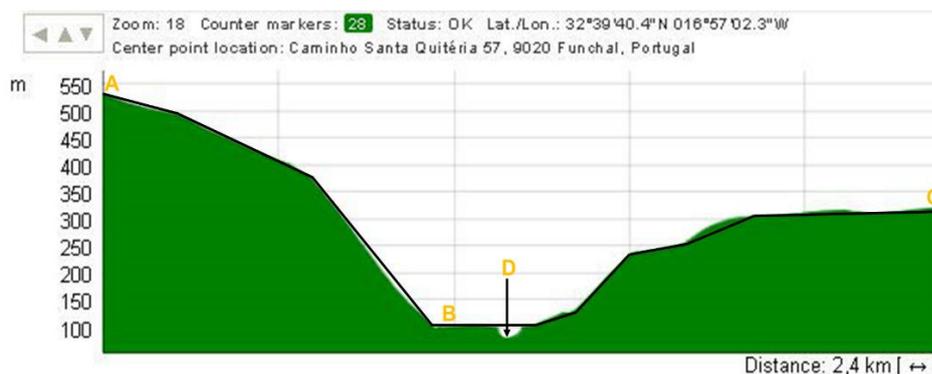


Figura 29 – Evolução do terreno e da conduta em plano vertical.

- | | | | |
|---|---------------------------------|---|---|
| A | - Câmara de Carga Covão; | B | - Central Hidroelétrica dos Socorridos; |
| C | - Mini-hídrica e Sta. Quitéria; | D | - Ribeira dos Socorridos. |

A geometria da secção da conduta forçada/elevatória do Covão é circular, com um diâmetro interno a montante de 1,5 metros e próximo à central dos Socorridos de 1,2 metros. Esta evolução no diâmetro está relacionado com a necessidade de as condutas encaixarem-se. Desenvolve-se sobre o terreno ao longo de, aproximadamente, 1175 metros. A inclinação da conduta em relação ao plano horizontal é crescente no sentido da CCC para a Central Hidroelétrica dos Socorridos. Esta crescente inclinação contribui para o aumento da velocidade da água na conduta.

A **conduta forçada de Sta. Quitéria** inicia-se após as derivações, para as três turbinas. O diâmetro da conduta do Covão para a de Sta. Quitéria passa de 1,2 metros para 0,5 metros, de forma progressiva, nas diferentes derivações para as turbinas. Desenvolve-se por 1300 metros entre Central Hidroelétrica dos Socorridos (CHS) até mini-hídrica Sta. Quitéria. É possível visualizar na **Figura 29** o desenvolvimento desta em relação ao terreno, destacando-se que a conduta está submersa, em parte do percurso. A justificação, a esta observação, é a possibilidade de reduzir o comprimento da conduta e minimização do seu impacte sobre a zona cidadina.

A distância que está nesta figura de 2400 metros corresponde à distância total do terreno por onde a conduta passa. Denote-se que a extensão da conduta é menor pois não acompanha, na sua totalidade, o relevo do terreno, existindo uma variação de 50 metros.

A produção de energia será dependente, entre outras variáveis, das cotas em plano vertical da conduta forçada no sistema. Desta forma, note-se que a adução da Central Hidroelétrica dos Socorridos à mini-hídrica de Sta. Quitéria é feito por ação gravítica. Pois a mini-hídrica de Sta. Quitéria está a uma cota inferior à CCC, utilizando a energia potencial, restante, para produzir energia elétrica. A adução gravítica a esta mini-hídrica tem por objetivo assegurar a contribuição de um determinado volume de água em função do tempo para o abastecimento da cidade do Funchal sem depender da energia elétrica. Por outras palavras, em caso de falha elétrica é assegurado o abastecimento de água de forma gravítica.

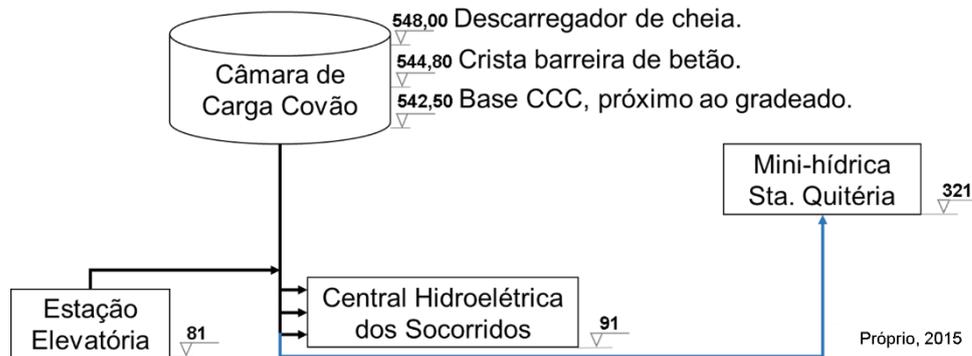


Figura 30 – Cotas conduta forçada/elevatória.

3.9. CENTRAL HIDROELÉTRICA DOS SOCORRIDOS

A Central Hidroelétrica dos Socorridos (CHS) localiza-se no sítio do Engenho Velho no concelho de Câmara de Lobos. A escolha deste local teve como principais variáveis: a ausência de edificações na sua envolvente, maximização da altura de queda de água e, por fim, ser construída perto de estradas já existentes. A escolha segundo estas variáveis condicionantes permitem minimizar os custos do empreendimento com a construção de estradas para acessos, minimizar os custos associados à proteção sonora, necessário devido ao ruído provocado pelos Grupos Geradores (GG) nas habitações na sua envolvente, e maximização da capacidade produtora. A justificação, principal, da edificação desta central foi a crescente utilização de energia

elétrica verificada, nas últimas décadas, na Ilha da Madeira e atenuação da problemática relacionada com as utilizações de materiais de origem fóssil redigidas no **Cap. I** e **Cap. II**, deste documento.



Figura 31 – Central Hidroelétrica dos Socorridos.

Foto lado esquerdo: vista do exterior (traseiras) [EEM, 2003];

Foto lado direito: vista do interior (GG).

- | | |
|---|--|
| A - Tubo para o jato vertical; | B - Grupos Geradores; |
| C - Tubo para o jato horizontal; | D - Envolvente de proteção ao rotor <i>Pelton</i> ; |
| E - Ponte rolante; | F - Caminho de rolamento para a ponte rolante; |
| G - Braço mecânico; | H - Transformador (do tipo trifásico). |

A gestão da produção de energia neste aproveitamento dividiu-se em duas fases temporais. Numa primeira, na sua inauguração em 1994, funcionou como sistema de inverno e mais recentemente (entre 2004 até 2006) foi atualizada a sua envolvente, para poder funcionar integrada no sistema reversível do Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos (AFMS).

3.9.1. Apreciações técnicas ao sistema de apoio à produção de energia

A presença da **ponte rolante** é justificada para o manuseamento de objetos aquando manutenção dos mesmos, pois a massa destes mecanismos é da ordem dos **megagramas**¹⁰, sendo impraticável o seu manuseamento com recurso a força Humana. A presença dos caminhos de rolamentos, instalados em ambos os lados da ponte rolante, permitem a transferência de material na horizontal (e vertical) sem interferir na integridade da maquinaria no solo. Normalmente, é utilizado para a substituição de peças do Grupo Gerador (GG) e para auxílio nas tarefas de manutenção, que ocorrem periodicamente.

A ilustração tridimensional da **Figura 32** (lado direito) consiste numa representação computadorizada que teve por objetivo o estudo geométrica das pás e espaçamento entre estas ao longo do perímetro do rotor [Jaxon, 2003]. Na foto do lado esquerdo é possível ver um dos GG da central. Destaque-se a abertura lateral presente para possibilitar a manutenção do rotor, minimizando os trabalhos de montagem vs. desmontagem da «carcaça» do GG.



Figura 32 – Turbina *Pelton*.

A **turbina *Pelton*** foi inventada em 1870 por Lester Allan Pelton. Desde a sua invenção tem sido atualizada, nos materiais que a constituem, de forma a otimizar o seu rendimento. Caracteriza-se por usar a energia potencial gravitacional e a energia cinética para converter em energia mecânica. Isto é, a energia resultante da coluna de água a montante (pressão) associada à velocidade da água (quando em funcionamento) possibilitam a realização de trabalho com o acionamento da rotação do veio, comum à turbina e ao gerador.

A altura da queda bruta, quer-se dizer, distância em plano vertical que vai das turbinas até ao descarregador de cheia, presente na parede lateral da Câmara de Carga Covão (CCC), é de 457 metros. A altura de queda útil é 450 metros, este valor corresponde à distância entre o início da conduta forçada/elevatória do Covão (extremo de maior cota) e a derivação nas turbinas, em plano vertical. Esta «coluna de água» permite uma potência nominal de 8 MW, por turbina, totalizando uma potência total líquida de 24 MW.

Com o intuito de ser inequívoca na perceção do funcionamento da turbina, de seguida, descreve-se o funcionamento destes GG com recurso a ilustrações que minimizam a possibilidade de erro na descrição da mesma. No que concerne às diferentes orientações para aplicação da turbina *Pelton*, esta pode ser posicionada na horizontal ou vertical, sendo mais comum a

direção do eixo de rotação na horizontal para pequenos caudais (igual ao caso em estudo). O número de injetores que a impulsionam variam de um a seis injetores (valores mais comuns). No caso prático em estudo verifica-se a existência de dois injetores impulsionadores. Esta variação, no número de injetores, está associada ao caudal disponível, quanto maior o volume disponível mais injetores justifica-se colocar. O volume de água é controlado por duas válvulas em agulha; no caso de estudo, a abertura desta é normalmente de 12,5% da sua capacidade total, para cada injetor. Este valor corresponde ao valor mínimo técnico para funcionamento dos dois injetores, se for só um este deve ser aberto no mínimo 25% [dado obtido verbalmente na visita]. Esta abertura permite melhorar o funcionamento da rotação do rotor; depende, fundamentalmente, do caudal disponível.

O funcionamento da turbina de impulso em estudo, também conhecida por turbina de pressão, consiste na projeção de um par de injetores, estrategicamente colocados, sobre um conjunto de 19 pás uniformemente distribuídas ao longo de todo o perímetro do rotor, de diâmetro igual a 1,12 metros (caso estudo). Estas pás têm uma geometria em concha dupla **Figura 33**; a escolha desta geometria está associada a menores perdas de energia enquanto ocorre o impacto da água nas pás e a diminuição da abrasão, no local onde incide o «vetor» injetor [Hydropower Advancement Project (HAP), 2011]. Nesta mesma figura é possível verificar numa cor mais escura (cinzento) a zona circular onde ocorre o impacto da água na pá.

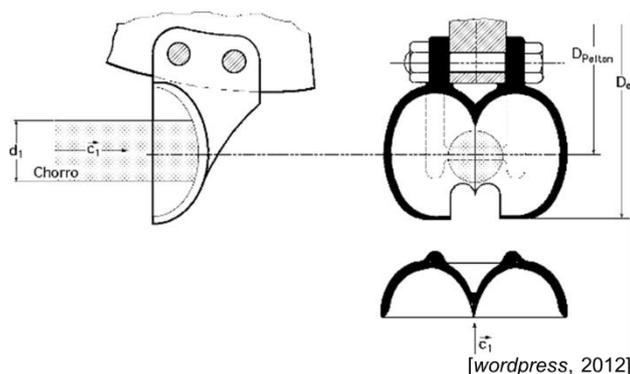


Figura 33 – Geometria das pás.

Para um correto funcionamento deste tipo de GG, existe vários elementos de segurança eletromecânicos que são ativados em atividade normal e outros que só são ativados em caso de não funcionamento dos primeiros referidos. Neste documento merecerá destaque o fecho do caudal aos injetores impulsionadores.

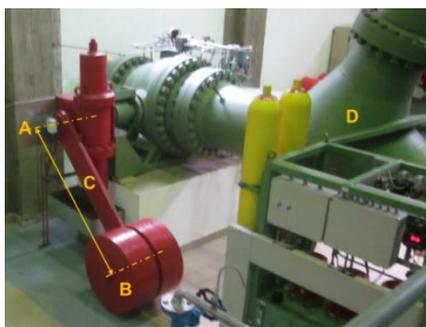


Figura 34 – Mecanismo de fecho do caudal aos injetores.

- | | |
|--|---|
| A - Eixo de rotação da válvula; | B - Cilindros; |
| C - Braço mecânico; | D - Derivação para os injetores. |

As condutas que direcionam a água às turbinas têm, imediatamente antes da derivação para os injetores, uma válvula de isolamento do tipo esférica. O fecho desta válvula é justificado quando é interrompido a produção de energia, permitindo que: a Estação Elevatória (EE) (neste caso prático) ascenda a água sem se perder água por estas derivações e, evidentemente, para permitir a acumulação de água a montante. Pois esta central não funcionam de forma contínua. O fecho destas válvulas é feito de forma eletrónica com a ativação de um **braço mecânico (Figura 34)** que utiliza a força gravítica para rodar a válvula, no ato do comando de fecho dessas válvulas. Nesta mesma foto é possível observar que este mecanismo está em baixo, quer isto dizer, o GG está inativo neste momento. Acrescente-se que o caudal turbinado é, em média, de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada grupo, totalizando $6 \text{ m}^3/\text{s}$ para os três Grupos Geradores (GG).

A determinação da força de fecho da válvula é obtida, de forma simplificada, do cálculo do momento provocado pela atração gravítica no cilindro metálico sobre o **eixo de rotação da válvula**. Ou seja, o peso volúmico do cilindro é obtido da multiplicação do volume deste pela densidade do material e pela aceleração gravítica, conseqüentemente, a determinação do momento, é multiplicado este valor (peso volúmico) pela distância (em plano horizontal) entre o centro de massa do cilindro e o eixo de rotação da válvula, obtendo-se, desta forma, uma força de fecho mecânica.

A presença destes elementos eletromecânicos (Grupos Geradores) têm por objetivo a troca de energia. Merecendo destaque a energia potencial elétrica, isto é, “grandeza física cujo

valor é o do cociente da energia absorvida por um sistema, pelo tempo que demorou a troca de energia” [dicionário: Porto editora].

Tabela 2 – Características dos alternadores instalados nas turbinas *Pelton* na CHS.

Construtora: VEM		
Tipo grupo gerador	DRFGX 2522-8W	
	Unidades	
Tensão Elétrica	6600	V
Corrente elétrica	875	A
Frequência	50	Hz
Velocidade recomendada	750	rpm
Velocidade máxima	1400	rpm
Temperatura ambiente	40	°C

As unidades presentes na **Tabela 2** estão descritas nos elementos pós e pré-textuais presentes nesta dissertação. Estes dados foram obtidos no local através da captação da informação presente numa «gravura» fixada num dos GG.

A produção da energia elétrica irá decorrer no gerador, neste caso em concreto, é produzido corrente elétrica alternada. O transformador (**Figura 31** pág. 53 letra H) permite a indução de corrente de acordo com os princípios do eletromagnetismo. Este transformador em concreto é do tipo trifásico e tem por função passar a **tensão elétrica**¹¹ de 6,6 KV para 60 KV [EEM.pt].

Depois da produção de energia na central dos Socorridos, a água excedente é direcionada para um canal que está submerso. Este canal faz a ligação entre a Central Hidroelétrica dos Socorridos, o reservatório presente sob os GEB e a Ribeira dos Socorridos. É possível verificar esta relação no fluxograma da **Figura 35**.

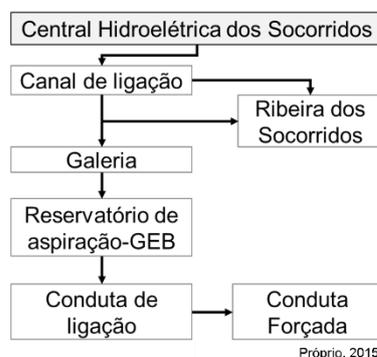


Figura 35 – Destino da água após turbinada.

No canal de ligação existe uma derivação que tem por função direcionar o caudal excedente para a Ribeira dos Socorridos, sempre que este no AFMS seja suficiente; normalmente em momentos de precipitação mais frequentes. A restante água é direcionada para a galeria de acumulação (dentro da montanha), até esta atingir a sua capacidade máxima (volume de aproximadamente 40 000 m³). Esta galeria serve para armazenar a água que será reencaminhada para montante pelos Grupos Eletrobomba (GEB).

3.10. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DOS SOCORRIDOS

A EE localiza-se a poucos metros (aproximadamente 30 metros) da Central Hidroelétrica dos Socorridos. O principal motivo condicionante para a Estação Elevatória (EE) estar neste local, inserida na montanha, é a inexistência de área suficiente a céu aberto, para a sua construção próxima à Central Hidroelétrica, mencionada. Acrescida a esta condicionante a implementação da EE teve em consideração: a integração no sistema global por forma a minimizar os custos; estudo dos condicionamentos urbanísticos e, por fim, a análise da presença do nível freático. Este último estudo afetou a escolha da classe de betão para as fundações e, respetivo processo construtivo. Denote-se que a EE está próxima (10 metros) à linha de água dos Socorridos.



Figura 36 – Interior da estação elevatória dos Socorridos.

- | | |
|---|---|
| A - Caleira de ventilação; | B - Reóstato(s) de arranque; |
| C - Chumaceira axial; | D - Caminho de rolamento para a ponte rolante; |
| E - Motor elétrico (<i>Siemens</i>); | F - Sala de comando; |
| G - Ponte rolante; | H - Acesso ao local de aspiração. |

O objetivo principal da construção da EE é permitir introduzir energia no escoamento possibilitando reverter a água para a Câmara de Carga e Túnel do Covão a partir do reservatório

de acumulação. Quer-se dizer, permitir forçar a água na conduta do Covão para uma cota superior, dando origem a mais um ciclo no sistema reversível.

É possível observar na entrada que o nome designado a este empreendimento é “estação de bombagem”, porém o nome EE, utilizado nesta dissertação, é uma subcategoria que resulta da forma como é feita a aspiração pelos GEB. Estação Elevatória deve ser usado sempre que “a aspiração realiza-se a partir de um reservatório em superfície livre”, adequando ao caso prático. Todavia ambos os nomes são corretos. [Hidráulica Urbana, 2014].

A **Figura 36** ilustra o interior da Estação Elevatória (EE) que está inserida numa galeria subterrânea com as dimensões: 26 metros de altura, 12 metros de largura e 39 metros de comprimento. A partir destas dimensões é possível ter uma perceção da dimensão dos elementos no interior da EE. A altura de 26 metros inclui a parte do reservatório de acumulação.

3.10.1. Apreciação técnica-económica aos equipamentos eletromecânicos

A presença dos elementos eletromecânicos, que posteriormente serão descritos, permitem entender a «complexidade» na determinação das variáveis, aquando criação de uma EE, para que apresente um correto funcionamento. A presença de quatro **reóstatos de arranque Gino/Siemens** de doze passos de arranque são justificados pela necessidade de permitir um arranque progressivo dos quatro motores. “Este arranque contínuo está relacionado com a intensidade da corrente elétrica, pois no momento do arranque a corrente elétrica, para o motor, tende a atingir valores muito elevados que podem por em causa a integridade da máquina” [Guedes, 2010]. O arranque progressivo das bombas também minimiza a possibilidade da existência do fenómeno de **cavitação**¹².

Um dos motores está assinalado na **Figura 36** com a letra E, correspondendo ao elemento superior de cor cinzenta. Este constituinte é ligado à chumaceira axial através dum acoplamento com recurso a parafusos e porcas, uniformemente distribuídos ao longo de todo o anel de união. A presença deste motor permite a rotação de um veio que é comum à **bomba (Sterling)**, localizada no prolongamento vertical da chumaceira axial; este conjunto atinge 16 metros de altura (neste caso). Depois do estudo técnico, no ato da realização do projeto, foram instalados três

GEB em paralelo para garantir o bom funcionamento do sistema; onde o quarto GEB é de reserva. É possível observar nesta foto que o Grupo Eletrobomba (GEB) inativo no momento da captação da imagem foi o da extremidade, próximo à entrada. O GEB inativo varia consoante a necessidade de manutenção destes. Procurando, desta forma, uniformizar o desgaste dos diferentes grupos.

A **Tabela 3** tem por objetivo apresentar alguns dados técnicos que caracterizam os GEB. Note-se apenas desta tabela, que quanto maior for o valor do volume de água elevado menor será a altura a que este pode ser elevado. Os valores presentes na tabela relativos a quantidade de água e à altura de elevação para cada bomba, são valores médios, isto é, o caudal elevado resultante das três bombas em paralelo é cerca de $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Expresso noutras unidades, o grupo em conjunto é **capaz de elevar 40 000 m³** em aproximadamente **seis horas**.

Tabela 3 – Características da bomba *Sterling* (motor-bomba nº 2).

	Variável	Unidades
Caudal	2335	m ³ /h
Altura de elevação	468	m
Temperatura da água	20	°C
Massa volúmica da água	1000	kg/m ³
Potência elétrica	3448	kW
Velocidade rotação	1490	rpm

A bomba é do tipo “centrífuga disposta na vertical com cinco andares de elevação” [memória descritiva: EE]. Complemente-se que uma bomba centrífuga é composta essencialmente por dois elementos principais: o injetor (rotor ou roda) e o corpo.

Na conduta forçada/elevatória, logo após as bombas, é possível observar a presença de uma **válvula de segurança esférica**. Quando o Grupo Eletrobomba **não** está em funcionamento é possível visualizar no **nanómetro**¹³, instalado imediatamente depois da bomba e antes da válvula aludida, a pressão de $0,4 \text{ bars}$ ¹⁴, inferior à pressão atmosférica. Justifica-se este valor pela ação gravítica sobre o fluido que preenchia este espaço. Quer-se dizer, após a paragem dos GEB a válvula de seccionamento imediatamente a jusante do nanómetro é fechada, impossibilitando a reversão da água na conduta, porém a água que está a montante da válvula «tenderá»

retroceder (voltar para o reservatório) por ação gravítica, originando a pressão indicada. De-note-se que para um correto funcionamento das condutas hidráulicas a pressão da água nestas, deve estar numa determinada gama regulamentar.

A presença de **caleiras de ventilação** é justificada por diferentes razões, merecendo destaque: minimizar a possibilidade de existir condensação nos componentes elétricos do motor e permitir arrefecer o motor em funcionamento com a libertação do calor. Respeitante à primeira razão, complementa-se que, os GEB estão localizados numa zona com elevada **humidade atmosférica**¹⁵, o valor médio é de 80%. A circulação de ar permite minimizar a variação térmica numa gama estipulada pelos fabricantes dos GEB. A presença da EE na montanha contribui, pela positiva, para a uniformização da temperatura, do ar, no interior da estação. A secção transversal por onde é deslocado o ar para a ventilação, vai diminuindo consoante afasta-se do seu ponto de captação, na chaminé presente no exterior da EE, até às diferentes saídas a jusante, nos motores. Este facto pode ser fundamentado pela equação da quantidade de movimento, que tem por objetivo da sua formulação (aplicado a este caso) garantir uma determinada quantidade de ar num definido intervalo de tempo, para todos os motores. Se a secção fosse igual em todo o seu desenvolvimento, a quantidade de ar, num determinado intervalo de tempo, para cada motor seria diferente, não se justificando pois os motores apresentam características de funcionamento iguais entre eles.

O funcionamento dos GEB é controlado através de uma **sala de comando** que está estrategicamente colocada à cota superior (**Figura 36** pág. **58** letra F), comparativamente ao local dos GEB, para minimizar a possibilidade de contacto com água, resultante, dum possível, estrago dalguma conduta. A informação aqui monitorizada é enviada para uma sala de comando comum a todos os aproveitamentos desta natureza na Região Autónoma da Madeira (RAM), localizada na cidade do Funchal. É possível o seu controlo por telecomando, minimizando-se, assim, gastos relacionados com transporte das equipas técnicas.

3.10.2. Reservatório de aspiração

O reservatório de aspiração encontra-se num nível inferior ao dos elementos eletromecânicos, existindo uma ligação (**Figura 37** letra H) para entrada de funcionários para, por exem-

plo, acionar o mecanismo de aspiração. O reservatório de aspiração é complementado em relação à capacidade volúmica, pela galeria acumulativa na montanha posteriormente mencionada (abaixo).



Figura 37 – Reservatório de aspiração.

Foto lado esquerdo: bomba de aspiração de um Grupo Eletrobomba;

Foto lado direito: equipamento de aspiração de areis.

A - Canal para material sedimentado;

B - Galeria lateral de sedimentação;

C - Mecanismo de aspiração.

O fundo do reservatório de aspiração é constituído por dois níveis, um na zona das bombas de aspiração da água (cota 79,5) e dois nas extremidades do reservatório à cota 78, aspiração de material sedimentado. As valas nas extremidades permitem a acumulação do material sólido sedimentado. Estes canais desareadores apresentam 33 metros de desenvolvimento e 2 metros de largura, permitindo acumular uma grande quantidade de sedimentos antes destes serem aspirados pelo mecanismo de aspiração. O **mecanismo de aspiração** de material sedimento é utilizado para remoção do material ao longo do desenvolvimento destes canais laterais, direcionando a água com material sedimentado para a Ribeira dos Socorridos através do “canal para material sedimentado”; minimizando, desta forma, a possibilidade de ser sugado areias para os GEB.

A entrada e saída do ar quando os GEB estão em funcionamento é possível pelo túnel auxiliar que serve de ligação à galeria acumulativa. Esta condicionante, deslocação de ar, foi uma das tidas em consideração na escolha do tipo de portão que seria implementado para restringir o acesso à galeria. Tendo sido escolhido um portão com uma grelha que permite a passagem abundante do ar em ambos os sentidos.

3.10.3. Galeria acumulativa dos Socorridos

A construção da galeria acumulativa dos Socorridos foi concluída em 2004. Esta galeria teve por objetivo permitir a acumulação de água para posterior utilização na produção de energia elétrica em momentos de menor precipitação, normalmente na estação de verão. O local da criação desta galeria foi condicionado pela presença da Central Hidroelétrica dos Socorridos e da Estação Elevatória.

A **Figura 38**, do lado direito, corresponde à rampa de acesso que dá início à galeria acumulativa. O túnel de acesso à galeria tem de secção transversal dimensões iguais correspondendo a 5 metros de largura e altura. Desenvolve-se por aproximadamente 70 metros, deste o portão até ao local com água e apresenta uma inclinação de 11,7%. Nesta mesma foto, lado esquerdo, corresponde a uma visualização de satélite adaptada no *Google Earth* (2010). A linha cor-de-rosa ilustra uma «aproximação» do desenvolvimento da galeria acumulativa no interior da montanha. Escreve-se «aproximação» pois a ferramenta utilizada e a fonte de informação não possibilitaram um maior rigor para a sua representação. As dimensões que permitiram a sua ilustração serão posteriormente indicadas. As diferentes ramificações, na construção, permitiram a criação de várias frentes de obras, acelerando, desta forma, o processo construtivo. A galeria de acumulação permite o armazenamento de aproximadamente 40 000 m³, ao longo dos 1 250 metros de extensão. A secção transversal apresenta uma secção média de 7 por 5 metros, largura e altura, respetivamente. Frise-se que as paredes são irregulares, e existe uma margem de segurança, na parte superior da secção transversal para o ar poder deslocar-se sem restrições. Ou seja, da multiplicação dos valores anteriores obtém-se um volume superior aos 40 000 m³, porém, devido às singularidades descritas, este valor de água acumulada apresenta uma variação menor.



Figura 38 – Galeria de acumulação dos Socorridos.

3.11. MINI-HÍDRICA E ETA DE STA. QUITÉRIA

Esta obra teve dois objetivos justificativos para a sua construção: de maior importância, o tratamento da água para “contribuir” para o sistema de abastecimento público do concelho do Funchal. Escreve-se contribuir intencionalmente, pois esta ETA não é única no abastecimento a este concelho.



Figura 39 – Mini-hídrica de Sta. Quitéria.

Foto lado esquerdo: vista interior (GG);

Foto lado direito: vista exterior mini-hídrica.

A -Reservatório de ar comprimido (bloqueador); **B** - Maciço em betão na curva da conduta.

No que diz respeito à **Figura 39**, é possível observar dois elementos relevantes, um «bloqueador» e um maciço em betão. O mecanismo designado por **bloqueador** antecede o Grupo Gerador (GG). Foi adicionado no final da conduta forçada/elevatória para permitir atenuar o choque hidráulico. Este fenómeno físico (choque hidráulico) consiste num “regime variável que ocorre na transição de dois regimes permanentes durante os quais os valores da pressão e da

velocidade da água, numa secção qualquer, são função do tempo. Esse regime transitório designa-se, por **golpe de aríete**. Da sua ocorrência resulta o aparecimento de cenários de aumento (sobrepensões) e diminuição (depressões) dos valores das pressões ao longo da conduta, valores esses que podem pôr em causa o bom funcionamento do circuito hidráulico” [Streeter e Wylie, 1967]. O choque hidráulico pode ocorrer da paragem brusca dos GEB, devido ao corte súbito da energia elétrica, por exemplo.

No que concerne ao funcionamento deste empreendimento, iniciar-se-á o registo deste subcapítulo pela conduta forçada/elevatória proveniente da Central Hidroelétrica dos Socorridos (CHS). Em relação ao desenvolvimento final desta conduta, antes de chegar à mini-hídrica é constituída por uma derivação que possibilita o desvio de água para a ETA e/ou para a mini-hídrica. Em funcionamento de inverno (maiores caudais $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$) a água é direcionada para o GG, de seguida a água é processada na ETA para ulterior abastecimento público. Em funcionamento de verão (menores caudais inferior a $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$) a derivação para o Grupo Gerador (GG) é interdita (fecho da válvula) e a água vai diretamente para a ETA. Esta opção é justificada pelo menor rendimento energético do GG.

Sempre que as necessidades de água para irrigação o justificam é desviado caudal, numa segunda derivação, presente antes do processo de tratamento na ETA e depois da derivação referida anteriormente. O controlo deste volume de água é feito com base na experiência empírica, com um ajuste em função da monitorização da pluviosidade e das necessidades dos campos agrícolas.

A opção de **produzir energia** a esta cota, e não na sua totalidade nos Socorridos, tem como principal motivo justificativo a garantia do abastecimento público por ação gravítica. Produzir energia elétrica a cota inferior garantiria uma maior potência elétrica, porém teria como desvantagem, a necessidade de ter-se os GEB em funcionamento durante mais tempo, comparativamente ao existente. Em suma para a produção de energia elétrica nesta mini-hídrica é de narrar os seguintes dados técnicos: existe um GG que utiliza a diferença de energia potencial referida no subcapítulo da conduta forçada, como energia para rotação do rotor da turbina *Pelton*. A potência do GG é de 2 MW [IGA, 2010], para um caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. O valor verificado no local é de 1MW, diferença justificada pelo valor do caudal, quer-se com isto dizer, para garantir esta potência é necessário existir um caudal de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma altura piezométrica de

aproximadamente 220 m.c.a. (metro-coluna-de-água). O valor do caudal é limitado devido a geometria do descarregador de cheia da central.

3.12. SISTEMA REVERSÍVEL

O estudo deste subcapítulo torna-se relevante pois a ativação racional dos Grupos Eletrobomba e Grupos Geradores é maximizada pela possibilidade de reverter a água. Um sistema reversível tem como função possibilitar o deslocamento da água de forma cíclica, permitindo a existência de diferentes utilizações repetidamente. Quer-se com isto dizer, possibilitar a utilização do «mesmo» volume de água várias vezes num determinado intervalo de tempo para o mesmo uso; não comprometendo, significativamente, a qualidade física e química da água, nas várias repetições (ex. caso prático de produção de energia elétrica).

O interesse deste sistema, em particular, é justificado por apresentar características singulares quando comparado com os sistemas reversíveis inseridos em barragens. As principais diferenças incidem nos caudais a restituir para montante (consequentemente nos equipamentos dos GEB), **no tempo de concentração da água** e nas obras de intervenção necessárias para possibilitar o correto armazenamento da água a montante e, neste caso prático, a jusante dos GG.



[arquivo EEM, 2007]

Figura 40 – Estruturas nos Socorridos.

- | | | | |
|---|--|---|--|
| A | - Conduta forçada/elevatória; | B | - Estação Elevatória; |
| C | - Acesso derivação de caudais; | D | - Descarregador de cheia (derivação); |
| E | - Descarregador de cheia na Ribeira da CHS; | F | - Central Hidroelétrica Socorrido (CHS); |
| G | - Entrada túnel auxiliar para a galeria acumulativa. | | |

O sistema reversível presente na zona dos Socorridos é possível devido, principalmente, a presença: de uma câmara de carga (complementada com o Túnel do Covão), uma galeria de acumulação, e uma estação elevatória. A EE dos Socorridos permite a criação de um ciclo «fechado» no sistema de aproveitamento, minimizando as perdas de água em alturas de pouca precipitação e maximizando a produção de energia em momentos de ponta no consumo elétrico.

De seguida enumera-se as condicionantes justificativas na criação do sistema reversível para melhor consolidar a necessidade de melhorar o sistema desta natureza. Na **Figura 40** é possível observar uma vista geral da distribuição das diferentes infraestruturas, pertencentes no Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos (AFMS), construídas no sítio do Engenho Venho nos Socorridos. Consentindo uma perceção do tamanho e do impacte destas no meio envolvente, sendo possível complementar a sua perceção com o **Anexo 1**.

A diminuição da hidraulicidade média que se tem verificando nos últimos anos, associada a um incremento no consumo de água (efeito do aumento da população residente combinado com um acréscimo na capitação), fez notar que, embora durante as épocas de chuva, a abundância de água permitia ao projeto desempenhar as três tarefas pelas quais fora projetado; durante as épocas mais secas, a menor disponibilidade de água superficial determinava a progressiva diminuição das atividades electroprodutoras da Central Hidroelétrica dos Socorridos. O volume de água que chegava à câmara de carga era apenas suficientes para assegurar o consumo público e a irrigação, nos períodos de menor pluviosidade. A pretensão por parte dos representantes da Empresa de Eletricidade da Madeira (EEM) de rentabilizar, durante todo o ano, o potencial electroprodutor da CHS, também foi um dos objetivos presentes na base justificativa da proposta de transformação.

Tecnicamente os representantes da empresa justificam, a necessidade da transformação do sistema com auxílio ao diagrama de cargas presente no **Gráfico 2**. Este gráfico ilustra a variação máxima da potência elétrica durante as 24 horas do dia de maior fornecimento elétrico. O objetivo da transposição deste gráfico para este registo de informação, tem por finalidade ilustrar a variação da potência elétrica no diagrama de cargas com a introdução do sistema reversível. Ou seja, no momento de menor consumo elétrico, existe um preenchimento do «vazio» do diagrama com o funcionamento das bombas, e nos momentos de maior consumo existe uma participação hídrica (Grupos Geradores) na cobertura de ponta(s). O objetivo ótimo de um

sistema de fornecimento de energia elétrica é obter um diagrama de cargas o mais próximo possível de uma «linha horizontal», isto é, um consumo com poucas variações, constante.

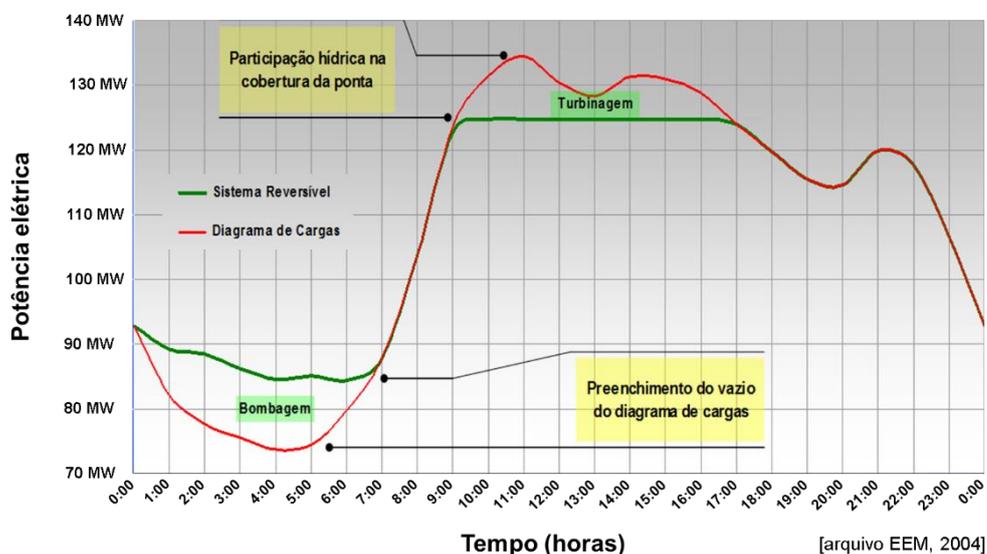


Gráfico 2 – Diagrama de cargas no dia de máximo fornecimento elétrico.

A introdução do sistema reversível permitiu a diminuição do diferencial de cargas do parque electroprodutor térmico, no momento de maior consumo, e um aproveitamento da energia eólica excedentária produzida durante a noite [EEM, 2015].

Confrontados com a problemática aludida, os membros do departamento de construção desta empresa, criaram uma proposta de transformação que consistiu em desenvolver um projeto para permitir converter a CHS, com características de inverno, dependente dos períodos de chuva, numa central disponível em qualquer época do ano, independentemente da ocorrência de pluviosidade.

O dimensionamento do sistema foi feito com base no número de habitantes, nos registos de pluviosidade e, com maior peso, na experiência adquirida pelos engenheiros em empreendimentos de natureza semelhante. A transformação do sistema exigiu a criação: de uma galeria subterrânea de 40 000 m³ a jusante da central hidroelétrica permitindo a recolha e armazenamento depois da produção hidroelétrica; duma expansão da CCC de 7 500 m³ para 40 000 m³ conseguida através da construção de um túnel de 5250 metros entre o Covão e o Campanário; e, por fim, completando-o com a construção de uma EE. Este sistema reversível foi concluído

em 2004, garantindo um abastecimento constante ao longo de todo o ano aos concelhos com maior densidade populacional na Região Autónoma da Madeira (RAM) [EEM, 2015].

Acrescido ao que já foi redigido a transformação da Central dos Socorridos de uma central de inverno para uma central reversível, permite: 1) maximizar a capacidade produtora; 2) otimizar o funcionamento do parque electroprodutor térmico instalado próximo à foz da Ribeira dos Socorridos. Ou seja, trabalha normalmente abaixo dos 60% da sua capacidade máxima, garantindo 40 % de acréscimo para cobrir picos de consumo quando existem; 3) explorar a Central Hidroelétrica dos Socorridos independentemente da época do ano e da ocorrência de pluviosidade, garantindo 24 MW de potência hídrica na cobertura das pontas do diagrama de cargas; 4) Uniformizar o caudal em circulação no Canal do Norte Lanço Sul (CNLS). permitindo otimizar o sistema de abastecimento para irrigação, atenuando conflitos relativos ao uso da água.

3.12.1. Enquadramento económico do sistema reversível

Os custos associados à criação do sistema reversível em estudo foram financiados pela União Europeia através do **Fundo Europeu para o Desenvolvimento Regional (FEDER)**, até cinquenta por cento, sendo o remanescente integralmente assumido pela Empresa de Eletricidade da Madeira. É possível a consulta dos diferentes montantes na **Tabela 4**.

Tabela 4 – Custo associado à transformação.

	Empreitadas	Imp. Técnicos e Revisão Preços	Total Elegível
Túnel do Covão	14 326 317,24 €	2 865 263,45 €	17 191 580,69 €
Galeria dos Socorridos	6 698 000,00 €	2 344 300,00 €	9 042 300,00 €
Equipamento de bombagem	4 251 617,06 €	212 580,85 €	4 464 197,91 €
Túneis da encumeada e do canal do Norte	2 790 000,00 €	976 500,00 €	3 766 500,00 €
Total construção	28 065 934,30 €	6 398 644,30 €	34 464 578,60 €
Terrenos			210 000,00 €
Total elegível aprovado			34 674 578,60 €

[EEM, 2004]

Estes valores permitem aperceber-se dos montantes, «avultados», que estão envolvidos na criação e/ou **otimização de um sistema de abastecimento de água** e de produção de energia elétrica, que vá ao encontro das necessidades de uma população.

Note-se que a legislação existente na RAM para gestão da água tem a seguinte ordem de prioridades para o uso da água: abastecimento público, irrigação e, por fim, produção de energia. As receitas associadas à exploração do aproveitamento são relativas. No caso em concreto o sistema permite obter receita de forma direta: **Produção de energia elétrica:** O valor do custo da eletricidade é variável durante as horas do dia existindo diferentes tarifas para atenuar os picos de consumo. Apresentando alguma complexidade a sua estimação, devido à variação das tarifas e clientes finais; **Consumo público de água:** A receita proveniente do abastecimento de água engloba um conjunto de utilizadores distintas, destacando-se: utilizações domésticas; comerciais; industriais; públicas e consumidores importantes. **Irrigação:** O pagamento por parte dos agricultores em relação à utilização da água do Canal do Norte é simbólico não chegando para a manutenção das instalações que o permitem direccionar.

Para além do investimento inicial que se mostrou na **Tabela 5**, a exploração do sistema apresenta atividades que acarretam custos ao longo da vida útil desta. De seguida escreve-se algumas das atividades que trazem custo na exploração de um aproveitamento desta natureza: manutenção dos diferentes canais e captações que permitem direccionar a água para os diferentes usos; funcionamento da Estação Elevatória (EE), Grupos Eletrobomba (GEB); ordenado da equipa gestora, e na manutenção de equipamentos eletromecânicos.

CAPÍTULO

IV

ANÁLISE TÉCNICA-ECONÓMICA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA

“Mede o que é mensurável e torna mensurável o que não o é.”

(Galileu Galilei)

4. CAPÍTULO IV – ANÁLISE TÉCNICA-ECONÓMICA DA PRODUÇÃO DE ENERGIA

Após o levantamento e perceção das diversas variáveis que condicionam a eficiência do funcionamento do aproveitamento de abastecimento de água, complementa-se com este capítulo: os **fundamentos** da necessidade da criação das funções de custo vs. benefício; a **metodologia** a usar para a sua determinação, com base no Decreto-Lei n.º 168/99 que quantifica o custo da energia renovável e em teoremas que caracterizam o comportamento da água no sistema de abastecimento; e, para concluir o capítulo, determinação das funções aplicadas ao caso prático segundo cenários de funcionamento.

A produção de energia elétrica é conseguida em consequência do correto funcionamento de todo o sistema que integra o Aproveitamento. Ou seja, carece da criação: de captações que assegurem o máximo caudal captado (restituindo o ecológico à respetiva linha de água); de canais de transporte que exijam pouca manutenção e que minimizem as perdas de água; de reservatórios para armazenamento e retenção da água em instantes de não necessidade e, por fim, de introdução das centrais em locais estratégicos para que seja maximizada a energia potencial da água, antes das utilizações pela população.

4.1. FUNDAMENTOS

A gestão em tempo real da produção de energia, em sistemas desta natureza, tem por objetivo a **diminuição do preço da energia** no consumidor e aumento da eficiente na produção. Por outras palavras, o estudo do tempo de arranque vs. paragem dos grupos eletromecânicos em função: dos dados de entrada, formulação matemática e dos dados de saída permitem melhorar a eficiência do sistema no ato de exploração minimizando os custos da eletricidade.

Os dados de entrada para melhorar a eficiência do sistema são diversos, entre outros: consumo elétrico, utilizações de água, tarifas, ocorrência de precipitação e a intensidade (ocorrência) do vento. Destaque-se os dois últimos inumerados: a probabilidade na antevisão da precipitação permite antecipar os valores para os dados de entrada nos comandos introduzidos para o correto funcionamento dos sistemas eletromecânicos, e a ocorrência de vento permite fazer uma “poupança na ativação” (e funcionamento) dos Grupos Eletrobomba (GEB) durante as

horas de menor fornecimento elétrico, com recurso a energia proveniente dos Grupos Aerogeradores nas torres eólicas. Note-se que “poupança na ativação” está relacionada com a possibilidade de vender maiores cargas de energia ao consumidor final nas horas de maior consumo. Se a ativação dos GEB fossem realizados durante o dia a energia seria utilizada pelos grupos e não no consumidor final, minimizando a receita na venda da energia.

4.1.1. Variáveis que integram a formulação da problemática

Para que exista uma gestão otimizada do sistema deve-se ter em consideração na criação do algoritmo:

- Número de GEB que são necessários para elevar um estimado volume de água;
- Preço da energia associada à tarifa elétrica;
- Caudais para as diversas utilizações da população;
- Potência elétrica fornecida;
- A ocorrência de precipitação;
- **Probabilidade de ocorrer precipitação** para o diurno seguinte;
- Características mecânicas do funcionamento dos GEB e Grupos Geradores (GG);
- Geometria dos elementos (ex.: condutas, reservatórios, canais, etc.);
- Intensidade do vento (ativação GEB durante a noite).

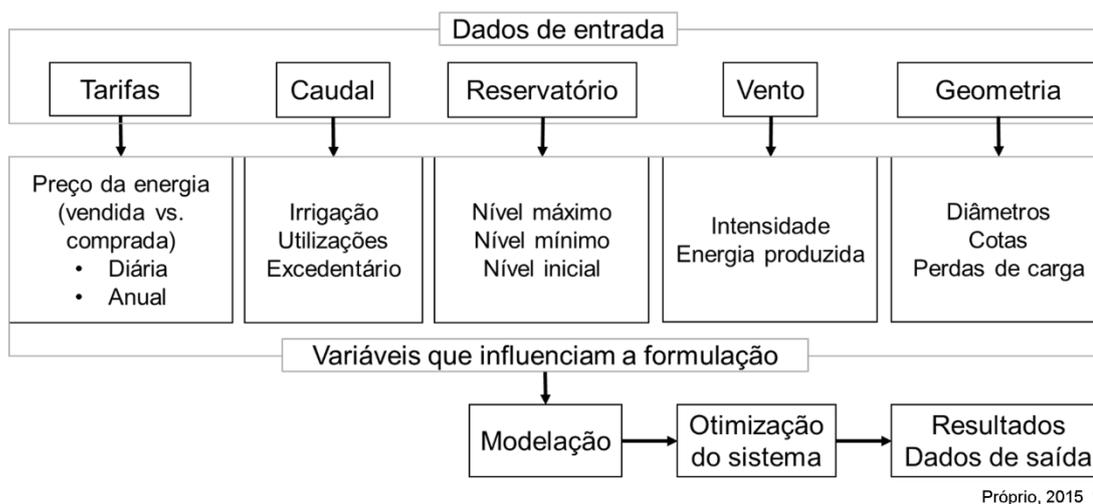


Figura 41 – Algoritmo para a formulação da problemática.

De forma mais ilustrativa, o algoritmo deve seguir um conjunto de passos que podem ser observados no fluxograma da **Figura 41**. Note-se que não se foi exaustivo na numeração das variáveis, tendo-se escrito as que têm mais influência para a produção de energia.

4.2. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES DE CUSTO VS. BENEFÍCIO

A problemática associada à determinação das funções para quantificação da energia produzida num sistema de abastecimento de água pode ser resolvida com base em dois modelos interligados.

- **Modelos determinísticos:** que permitem a realização dos cálculos com base em variáveis que assumem valores constantes, previamente estabelecidos. Ou seja, os valores de entrada são conhecidos em cada chamada ou simulação (ex.: custo da eletricidade num determinado momento, consumo de eletricidade por elemento eletromecânico, energia produzida pelos GG segundo determinadas condições, geometria das componentes do sistema, etc.);
- **Modelos estocásticos:** integram na definição dos custos elementos de natureza aleatória, ou seja, são função da probabilidade destes ocorrerem (ex.: ocorrência e intensidade do vento e da precipitação).

A variável que tem maior influência para a melhoria da eficiência do sistema, em análise, é a ocorrência da precipitação e respetiva intensidade; existindo uma imprecisão na sua quantificação e previsão atualmente. Porém, saliente-se que o conhecimento e tecnologia associado a estas previsões têm vindo a aumentar, motivando o interesse da comunidade científica na «otimização» (melhoramento) do funcionamento dos GEB em função destes dados.

4.2.1. Influência das tarifas

As tarifas no preço da eletricidade são cruciais para a diminuição dos custos de «exploração», pois é objetivo do gestor do aproveitamento ligar os Grupos Eletrobombas (GEB) em tarifas de menor valor monetário, permitindo criar condições para ligar os Grupos Geradores (GG) em momentos de maior fornecimento de energia elétrica; obtendo uma receita associada

ao aproveitamento da energia excedente durante a noite (por ex.: eólica) e a capacidade de assegurar maior fornecimento elétrico em momentos de maior consumo (tarifas mais elevadas).

A metodologia para previsão da determinação do custo de energia por uma empresa gestora pode ser determinada, no ato do projeto, pelo seguinte conjunto de funções [Silva, 2014].

$$VACE_i = \frac{E_i \cdot (p_E)_i}{(1+r)^i} \quad (2)$$

Onde: $VACE_i$ – valor atual do custo de energia relativo ao ano i [€]; E_i – energia consumida no ano i [kWh]; $(p_E)_i$ – preço da energia no ano i [€/kWh]; r – valor do dinheiro [-].

$$(p_E)_i = (p_E)_0 \cdot (1+\beta)^i \quad (3)$$

$$VACE_i = \frac{Pot \cdot (tb_{mda})_i \cdot 365 \cdot (p_E)_0 \cdot (1+\beta)^i}{(1+r)^i} \quad (4)$$

Onde: Pot – potência do(s) GEB [kW]; $(tb_{mda})_i$ – tempo de bombagem médio diário anual no ano i [h]; $(p_E)_0$ – preço atual de energia [€/kWh]; β – taxa de atualização do preço da energia [-].

$$VACE_i = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H \cdot (tb_{mda})_i \cdot (p_E)_0 \cdot (1+\beta)^i}{\eta \cdot (1+r)^i} \quad (5)$$

Onde: γ – peso específico da água [kN/m³]; Q – caudal [m³/s]; H – altura de elevação [m.c.a.]; η – rendimento do(s) GEB [-].

$$(tb_{mda})_i = \frac{(C_{mda})_i}{Q \cdot 3600} \quad (6)$$

Onde: $(C_{mda})_i$ – consumo médio diário anual no ano i [m³/dia].

$$(C_{mda})_i = (C_{mda})_0 \cdot (1+\alpha \cdot i) \quad (7)$$

Onde: $(C_{mda})_0$ – consumo médio diário anual no ano zero [m³/dia]; α – taxa de crescimento linear dos consumos [-].

$$VACE_i = \frac{Pot \cdot (p_E)_0 \cdot 365 \cdot (C_{mda})_0}{Q \cdot 3600} \cdot \frac{(1+\alpha \cdot i) \cdot (1+\beta)^i}{(1+r)^i} \quad (8)$$

Ou,

$$VACE_i = \frac{\gamma \cdot H \cdot (p_E)_0 \cdot 365 \cdot (C_{mda})_0}{\eta \cdot 3600} \cdot \frac{(1 + \alpha \cdot i) \cdot (1 + \beta)^i}{(1 + r)^i} \quad (9)$$

Agrupando os valores constantes ao longo dos anos.

$$K = \frac{(p_E)_0 \cdot 365 \cdot (C_{mda})_0}{Q \cdot 3600} \quad (10)$$

$$\sum_{i=m}^n Pot \cdot K \cdot \frac{(1 + \alpha \cdot i) \cdot (1 + \beta)^i}{(1 + r)^i} \quad (11)$$

Ou sendo:

$$K' = \frac{\gamma \cdot H \cdot (p_E)_0 \cdot 365 \cdot (C_{mda})_0}{\eta \cdot 3600} \Leftrightarrow K' = K \cdot Pot \quad (12)$$

Então:

$$\sum_{i=m}^n VACE_i = K' \cdot \sum_{i=m}^n \frac{(1 + \alpha \cdot i) \cdot (1 + \beta)^i}{(1 + r)^i} \quad (13)$$

Se admitirmos uma análise baseada em preços correntes, ou seja: $\beta = 0$

$$\sum_{i=1}^n \frac{(1 + \alpha \cdot i)}{(1 + r)^i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1 + r)^i} + \sum_{i=1}^n \frac{\alpha \cdot i}{(1 + r)^i} \quad (14)$$

Como:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{(1 + r)^i} = \frac{r - r^{n+1}}{(1 - r)} \quad (15)$$

e

$$\sum_{i=1}^n \frac{i}{(1 + r)^i} = \frac{(1 + r)^{n+1} - 1 - r \cdot (n + 1)}{(1 + r)^n \cdot r^2} \quad (16)$$

Então:

$$\sum_{i=1}^n \frac{(1 + \alpha \cdot i)}{(1 + r)^i} = \frac{(1 - r)^{n+1}}{(1 - r)} + \alpha \frac{(1 + r)^{n+1} - 1 - r(n + 1)}{(1 + r)^n \cdot r^2} \quad (17)$$

e

$$\sum_{i=1}^n VACE_i = Pot \cdot K \cdot \left[\frac{(1-r)^{n+1}}{(1-r)} + \alpha \frac{(1+r)^{n+1} - 1 - r(n+1)}{(1+r)^n \cdot r^2} \right] \quad (18)$$

Com o preço do kWh em função do tempo de bombagem.

4.2.2. Influência da água (caudal)

Neste subcapítulo representa-se as fórmulas que influenciam a produção de energia, resultantes das diferentes leis e teoremas que quantificam o comportamento da água perante o meio sólido que a envolve.

O estudo do nível da água no reservatório a montante é fundamental para a correta gestão do aproveitamento; pois não é economicamente viável armazenar grandes quantidades de energia elétrica porém é possível reter a água para produzir energia quando necessário, fazendo uma gestão em função das diversas utilizações redigidas no **Cap. III**. A evolução vertical do nível da água no reservatório de montante, no caso prático em estudo, é «relevante» para o valor final da produção de energia, porém a sua influência é pequena. O volume de água, por exemplo na Câmara de Carga do Covão, é obtido simplificadamente pela relação entre os caudais que chegam subtraídos dos caudais que saem em função do tempo, representado na **Fórmula 19**.

$$V_T = (Q_e - Q_s) \cdot \Delta T_i \quad (19)$$

$$V_T = Q_{cap.} \cdot T_1 + Q_{GEB} \cdot T_2 - Q_{ETA} \cdot T_3 - Q_I \cdot T_4 - Q_{PE} \cdot T_4 \quad (20)$$

Onde: V_T – volume total [m³]; Q_e – caudal que entra [m³/s]; Q_s – caudal que sai [m³/s]; $Q_{cap.}$ – caudal proveniente das captações [m³/s]; Q_{GEB} – caudal elevado pelos GEB [m³/s]; Q_{ETA} – caudal descarregado para a ETA [m³/s]; Q_I – caudal descarregado para irrigação [m³/s]; Q_{PE} – caudal descarregado produção de energia [m³/s] e ΔT_i – tempo de entrada ou saída do caudal no intervalo i [s].

A **Fórmula 21** permite a determinação da evolução da altura da superfície de água na câmara de carga para, posterior, determinação da coluna de água que antecede os Grupos Geradores e, assim, controlar a abertura da comporta do descarregador de fundo para a conduta

forçada. Para determinação desta fórmula, com base empírica, foi considerado que o reservatório é de paredes verticais e não apresenta singularidades no seu interior. O valor da “altura da coluna de água” está limitado à altura do descarregador de cheia.

$$h_{sa} = \frac{Q_{cap} \cdot T_1 + Q_{GEB} \cdot T_2 - Q_{ETA} \cdot T_3 - Q_I \cdot T_4 - Q_{PE} \cdot T_4}{A_b} \quad (21)$$

Onde: h_{sa} – altura da coluna de água no reservatório [m]; A_b – área da base [m²] e T_i – intervalo de tempo da entrada/saída da água para as diversas utilizações e captações [s].

A quantidade de água proveniente das n captações, num determinado intervalo de tempo, pode ser calculada pela **Fórmula 22**:

$$Q_{cap} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot C_i \quad (22)$$

Onde: Q_i – caudal proveniente da captação i [m³/s] e C_p – coeficiente relativo ao caudal perdido nos canais de transporte i [-].

Na **Fórmula 23** (*Manning-Strickler*) está representada a equação que permite determinar o caudal escoado num canal a céu aberto (sem singularidades no seu desenvolvimento), e a **Fórmula 24** complementa-a permitindo o cálculo do raio hidráulico. A importância desta fórmula está relacionada com a pertinência em saber o tempo que uma «partícula imaginária» leva da captação à câmara de carga para possíveis ajustes na abertura ou fecho das comportas e, conseqüentemente, volume de água que chega à câmara de carga.

$$Q = K \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2} \cdot S \quad (23)$$

$$R = S/\chi \quad (24)$$

Onde: Q – caudal [m³/s]; K – coeficiente de *Manning-Strickler* (por ex.: betão liso assume o valor de 80) [m^{1/3}s⁻¹]; R – raio hidráulico [m]; χ – perímetro molhado [m]; S – seção transversal do canal submerso [m²] e i – declive do canal [m/m].

A determinação do caudal que chega à câmara de carga por elevação é em função da geometria da conduta elevatória e da altura geométrica que os distancia (central até à câmara). Relativo à altura geométrica denote-se que esta distância está compreendida entre a cota do

plano de referência da bomba até a cota do nível da água a montante, na direção vertical. A altura manométrica de elevação é determinada pela **Fórmula 25** tendo em consideração a simplificação de que: “quando é sabido a velocidade da água, despreza-se o termo cinético” [Zhuan, 2013].

$$H_t = H_a + H_e \quad (25)$$

Onde: H_t – altura total [m]; H_a – altura geométrica [m] e H_e – perdas de carga [m].

As perdas de energia são em função: das curvas na conduta, rugosidade da conduta, ligação entre condutas, geometria das comportas e tipo e número de válvulas presentes no sistema.

O **Fórmula 26** (Teorema de *Bernoulli*) é útil para a determinação de algumas das variáveis das funções de custo vs. benefício na produção de energia. Assumindo relevância a energia potencial pois é uma das principais condicionantes da velocidade de rotação dos GG do tipo *Pelton* e consequente geração de energia elétrica.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \pm \Delta B \quad (26)$$

Onde: z_1 – distância entre o plano horizontal de referência e a lâmina água [m]; $\frac{p_1}{\gamma}$ – energia potencial de pressão [m]; p_1 – carga sobre a lâmina de água 1 [N/m²]; γ – peso específica da água [apro. 9,81 N/m³]; $\frac{v_1^2}{2g}$ – altura cinética da partícula [m]; v – velocidade da partícula [m/s]; ΔH – perda de carga (escoamento subpressão); $(-\Delta B)$ – fornecimento de energia (ex.: bomba); $(+\Delta B)$ – cedência de energia (ex.: turbina).

A **Fórmula 27** (lei da continuidade de movimento) permite, neste caso, subdividir a **Fórmula 26** para que seja possível quantificar mais parâmetros na determinação das funções.

$$Q = US \Leftrightarrow U = \frac{Q}{S} \quad (27)$$

Onde: Q – caudal [m³/s]; U – velocidade escoamento [m/s] e S – área da seção do escoamento [m²].

Interligando a **Fórmula 1**, **Fórmula 26** e a **Fórmula 27**, é possível estimar o caudal que chega à turbina **Fórmula 30**.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\left(\frac{Q}{S}\right)_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\left(\frac{Q}{S}\right)_2^2}{2g} + \Delta H \pm \Delta B \quad (28)$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\left(\frac{C \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}{S}\right)_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\left(\frac{Q}{S}\right)_2^2}{2g} + \Delta H \pm \Delta B \quad (29)$$

$$Q_2 = S_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{(C \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h})_1^2}{2g} - z_2 - \frac{p_2}{\gamma} - \Delta H \pm \Delta B \right)} \quad (30)$$

A determinação da **potência** nos Grupos Geradores (GG) pode ser quantificada segundo a **Função 31** [ESHA, 2014].

$$P_{GG} = \rho_w \cdot g \cdot Q \cdot [H_b - (h_{hidr} + h_{cheia})] \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{trans} \cdot (1 - p_{div}) \quad (31)$$

Onde: P_{GG} – potência elétrica [W]; H_b – altura da queda útil da água [m]; h_{hidr} – altura de perda equivalente no circuito hidráulico [m]; h_{cheia} – perdas associadas ao nível da água no reservatório à montante [m]; η_t – rendimento da turbina [-]; η_g – rendimento do gerador [-]; η_{trans} – rendimento do transformador [-]; p_{div} – perdas elétricas diversas [-].

A determinação da **potência** nos Grupos Eletrobomba pode ser quantificada segundo a **Fórmula 32** [Vilanova, 2015].

$$P_{GEB} = \frac{\rho_w \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_B \cdot \eta_M} = \frac{\rho_w \cdot g \cdot Q \cdot \left(H_G + \sum \left(\frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \right) + \sum \left(k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \right)}{\eta_B \cdot \eta_M} \quad (32)$$

Onde: P_{GEB} – potência consumida por cada grupo eletrobomba [W]; ρ_w – massa específica [kgm^{-3}]; g – aceleração da gravidade [ms^{-2}]; Q – caudal elevado [m^3s^{-1}]; H – altura total de caudal elevado [m]; η_B e η_M – bomba e motor coeficientes, respetivamente [%]; H_G – altura geométrica de elevação [m]; f – coeficiente de atrito [0-1]; L – comprimento da conduta [m]; v – velocidade [ms^{-1}]; D – diâmetro interno [m] e k – coeficiente de perda de carga [0-1].

Para a determinação da **Função 32** é importante (imprescindível) saber-se algumas características (coeficientes) do grupo eletrobomba. No **Anexo 2** é possível observar três gráficos

que ilustram as características técnicas de funcionamento resultantes de um ensaio do grupo motor-bomba num caso prático (EE dos Socorridos).

Após esta formulação acrescenta-se mais duas (**Função 33 e 34**) que possibilitam a determinação do **tempo de funcionamento** (se se resolver em ordem a T_i) de cada um dos elementos eletromecânicos (GG e GEB) em função do caudal (volume de água a montante vs. jusante) que turbinam e elevam, respetivamente.

$$V_t = \sum_{i=1}^n (GG_i \cdot T_i) \quad (33)$$

Onde: V_t – volume turbinado [m^3]; GG_i – caudal turbinado pelo GG i , n número de GG [m^3/s] e T_i – tempo de funcionamento do GG i [s].

O volume de água elevado pelos GEB, instalados em paralelo, pode ser estimado pela **Função 34**.

$$V_e = \sum_{i=1}^n (GEB_i \cdot T_i) \quad (34)$$

Onde: V_e – volume elevado [m^3]; GEB_i – caudal elevado pelo Grupo Eletrobomba i , n número de GEB [m^3/s] e T_i – tempo de funcionamento do GEB i [s].

4.2.3. Remunerações aplicáveis a centrais renováveis (Decreto-Lei n.º168/99)

Neste subcapítulo será transcrito a formulação do tarifário aplicável à venda de energia elétrica produzida a partir de recursos renováveis presente neste Decreto-Lei. Esta formulação é aplicável desde que a potência instalada seja, no seu conjunto, limitada a 10 MW, para aproveitamentos hidroelétricos.

As **instalações licenciadas ao abrigo** do Decreto-Lei n.º 189/88 de 27 de maio, são remuneradas pelo fornecimento da energia entregue à rede, através da fórmula seguinte:

$$VRD_m = KMHO_m \cdot [PF(VRD)_m + PV(VRD)_m + PA(VRD)_m] \cdot \frac{IPC_{m-1}}{IPC_{ref}} \cdot \frac{1}{(1 - LEV)} \quad (35)$$

Onde: VRD_m — é a remuneração aplicável a centrais renováveis, no mês m ; $KMHO_m$ — é um coeficiente facultativo, que modula os valores de $PF(VRD)_m$ e de $PV(VRD)_m$ em função do posto horário em que a energia tenha sido fornecida; $PF(VRD)_m$ — é a parcela fixa da remuneração, no mês m ; $PV(VRD)_m$ — é a parcela variável da remuneração, no mês m ; $PA(VRD)_m$ — é a parcela ambiental, no mês m ; IPC_{m-1} — é o índice de preço no consumidor, sem habitação, no continente, referente ao mês $m-1$; IPC_{ref} — é o índice de preços no consumidor, sem habitação, no continente, referente ao mês de dezembro de 1998 e LEV — representa as perdas, nas redes de transporte e distribuição, evitadas pela central renovável.

Determinação do coeficiente $KMHO_m$:

$$KMHO_m = \frac{KMHO_{pc} \cdot ECR_{pc,m} + KMHO_v \cdot ECR_{v,m}}{ECR_m} \quad (36)$$

Onde: $KMHO_{pc}$ — é um fator que representa a modulação correspondente a horas cheias e de ponta, o qual, para efeitos do presente Decreto-Lei, toma o valor 1,25; $ECR_{pc,m}$ — é a energia produzida pela central renovável nas horas cheias e de ponta do mês m [kWh]; $KMHO_v$ — é um factor que representa a modelação correspondente a horas de vazio, o qual, para efeitos do presente decreto, toma o valor 0,65; $ECR_{v,m}$ — é a energia produzida pela central renovável nas horas de vazio do mês m [kWh] e ECR_m — é a energia produzida pela central renovável no mês m [kWh].

Determinação do valor de $PF(VRD)_m$:

$$PF(VRD)_m = PF(U)_{ref} \cdot COEF_{pot,m} \cdot POT_{med,m} \quad (37)$$

Onde: $PF(U)_{ref}$ — é o valor unitário para $PF(VRD)_m$ o qual: i) deve corresponder à “mensuaização” (relativo a mensal) do custo unitário de investimento nos novos meios de produção cuja construção é evitada por uma central renovável que assegure o mesmo nível de garantia de potência que seria proporcionado por esses novos meios de produção; ii) toma o valor de 1090 PTE/kW por mês; iii) será utilizado, em cada central, durante todo o período em que a remuneração definida por VRD seja aplicável; $COEF_{pot,m}$ — é um coeficiente adimensional que traduz a contribuição da central renovável, no mês m , para a garantia de potência proporcionada pela rede pública; $POT_{med,m}$ — é a potência média disponibilizada pela central renovável à rede pública no mês m [kW].

O valor de $COEF_{pot,m}$ é calculado através da fórmula seguinte:

$$COEF_{pot,m} = \frac{NHP_{ref,m}}{NHO_{ref,m}} = \frac{ECR_m/POT_{dec}}{0,8 \cdot 24 \cdot NDM_m} = \frac{ECR_m}{576 \cdot Pot_{dec}} \quad (38)$$

Onde: $NHP_{ref,m}$ — é o número de horas que a central renovável funcionou à potência de referência no mês m , o qual é avaliado pelo quociente ECR_m/POT_{dec} ; $NHO_{ref,m}$ — é o número de horas que servem de referência para o cálculo, no mês m , de $COEF_{pot,m}$, o qual é avaliado pelo produto $0,8 \cdot 24 \cdot NDM_m$; POT_{dec} — é a potência da central, declarada pelo produtor no ato de licenciamento [kW]; NDM_m — é o número de dias do mês m , toma o valor 30.

O valor de $POT_{med,m}$ é calculado através da fórmula seguinte:

$$POT_{med,m} = \min \left(POT_{dec}; \frac{ECR_m}{24 \cdot NDM_m} \right) \quad (39)$$

O valor de $PV(VRD)_m$ é calculado através da fórmula seguinte:

$$PV(VRD)_m = PV(U)_{ref} \cdot ECR_m \quad (40)$$

Onde: $PV(U)_{ref}$ — valor unitário de referência para $PV(VRD)_m$ o qual: a) Deve corresponder aos custos de operação e manutenção que seriam necessários à exploração dos novos meios de produção cuja construção é evitada pela central renovável; b) toma o valor de 5,00 PTE/kWh; c) Será utilizado, em cada central, durante todo o período em que a remuneração definida por VRD seja aplicável.

O valor de $PA(VRD)_m$ é calculado através da fórmula seguinte:

$$PA(VRD)_m = ECE(U)_{ref} \cdot CCR_{ref} \cdot ECR_m \quad (41)$$

Onde: $ECE(U)_{ref}$ — é o valor unitário de referência para as emissões de dióxido de carbono evitadas pela central renovável, o qual: i) deve corresponder a uma valorização unitária do dióxido de carbono que seria emitido pelos novos meios de produção cuja construção é evitada pela central renovável; ii) toma o valor de $15 \cdot 10^{-3}$ PTE/g; iii) será utilizado, em cada central,

durante todo o período em que a remuneração definida por VRD seja aplicável; CCR_{ref} — é o montante unitário das emissões de dióxido de carbono da central de referência, o qual toma o valor de 370 g/kWh e será utilizado, em cada central, durante todo o período em que a remuneração definida por VRD seja aplicável.

O parâmetro LEV toma os seguintes valores: a) 0,015, no caso de centrais com potência maior ou igual a 5 MW; b) 0,035, no caso de centrais com potência menor que 5 MW.

O montante de remuneração definido por VRD é aplicável durante os primeiros 144 meses de exploração da central renovável. Após o período aplicável a VRD e até ao fim do período de vigência do licenciamento concedido, as centrais renováveis serão remuneradas, pelo fornecimento da energia entregue à rede, através da fórmula seguinte:

$$VRD_{r,m} = KMHO_m \cdot \left\{ \frac{IPC_{m-1}}{IPC_{ref}} \cdot [PF(VRD)_m + PV(VRD)_m] + PA(VRD)_{r,m} \right\} \cdot \frac{1}{(1 - LEV)} \quad (42)$$

O valor $PA(VRD)_{r,m}$ é calculado segundo a fórmula seguinte:

$$(VRD)_{r,m} = \frac{ECE(U)_{re,m} \cdot CCR_{ref,m}}{4} \cdot ECR_m \quad (43)$$

Onde: $ECE(U)_{re,m}$ e $CCR_{ref,m}$ são, à data do mês m , os valores mais recentes descritos anteriormente.

4.2.4. Funções de custo vs. benefício

Note-se que funções de custo (neste documento) estão relacionadas com o funcionamento dos GEB, que precisam de energia para o seu funcionamento impossibilitando a venda dessa energia à população, quer-se com isto dizer, quantificar a energia não vendida ao consumidor final utilizada para os grupos eletrobombas. O conceito de benefício (neste documento) **está associado à receita que a empresa gestora obterá na venda ao consumidor final** com base na melhor escolha dos tempos de funcionamento dos grupos eletromecânicos.

Até ao momento apresentou-se as fórmulas que condicionam a obtenção do valor da potência dos GG e GEB e estimação do tempo de funcionamento em função das diferentes estruturas que constituem um aproveitamento de abastecimento de água. A determinação da **função de energia** associada ao funcionamento destes pode ser obtida «simplificadamente» pela **Função 15**.

$$E_T = P_e \cdot \Delta t \cdot E_{(a/p)T} \quad (44)$$

Onde: E_t – energia gerada ou «consumida» no intervalo de tempo T [kWh]; P_e – potência elétrica [kW]; $E_{a/p}$ – coeficiente relativo a energia gasta no arranque e paragem dos grupos e Δt – intervalo de tempo de referência do funcionamento Grupo Gerador ou GEB [hora].

A energia gasta por cada Grupo Eletrobomba (GEB) depende se este está a arrancar, em funcionamento pleno ou se está a parar. Ou seja, a energia apresenta um crescimento progressivo no arranque, «estabiliza» em funcionamento pleno depois diminui. O coeficiente $E_{(a/p)T}$ tem por objetivo a uniformização desta variação. Porém, deste ponto em diante, este coeficiente será omitido. Pois a sua quantificação sai do âmbito dos objetivos deste documento. Obtendo-se, assim, a função de energia pelo produto da potência elétrica e o intervalo de tempo.

A determinação da função de custo pode ser obtida, “simplificadamente”, através da **Fórmula 45**. Ou, por outras palavras, quantificação do valor que não será cobrado (num determinado consumidor final) por esta ser utilizada nos Grupos Eletrobomba (GEB).

$$C = \sum_{i=1}^n (V_u \cdot E_{GEB_i}) \cdot N_{GEB} \quad (45)$$

Onde: C – custo [€]; V_u – valor unitário de energia na tarifa i [€/kWh]; E_{GEB_i} – energia gasta no intervalo de tempo correspondente à tarifa i [kWh]; n – corresponde ao número de tarifas em que os GEB estão a funcionar [-] e N_{GEB} – relativo ao número de GEB em funcionamento [-].

Determinação da função de custo segundo Elbatran *et al.* em 2015. Estes investigadores criaram uma fórmula que tem por objetivo quantificar o custo da energia elétrica a cobrar quando esta é produzida num GG do tipo *Pelton*, quantificando a energia produzida à saída da central hidroelétrica.

$$C_{cada} = 17,693 \cdot P^{-0,3644725} \cdot H^{-0,281735} \quad (46)$$

Onde: C_{cada} – custo [€/kW]; P – potência elétrica [kW] e H – coluna de água a montante da turbina [m.c.a.].

4.3. APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO

Neste capítulo será aplicado as funções de custo vs. benefício para diferentes cenários de funcionamento da produção de energia no AFMS. O objetivo desta formulação é comprovar, de forma empírica, que a sua gestão deve ser feita com dados de entrada em tempo real e/ou através de probabilidade de ocorrência.

4.3.1. Preço da energia caso real

Em **4.2.1.** apresentou-se uma formulação teórica para determinação do valor do custo da energia elétrica e em **4.2.3** o valor a cobrar quando esta é proveniente de energia renováveis. Apesar da formulação demonstrada é compreensível que exista um erro (diminuído com os coeficientes) associado à previsão do preço da energia (4.2.1) pois as entidades gestoras são confrontados por vezes com condicionantes (por ex.: crises económicas, aumento preço combustível, ativação de sistemas renováveis, etc.) que não são possíveis de formular. Desta forma, considerou-se pertinente a demonstração no **Gráfico 3** e na **Tabela 5** a evolução do custo da energia num caso real para uma tarifa de venda a “clientes finais em Baixa Tensão Normal (BTN) com potências contratadas maior que 20700 VA” (*volt-ampere*), não existindo individualização da origem da energia.

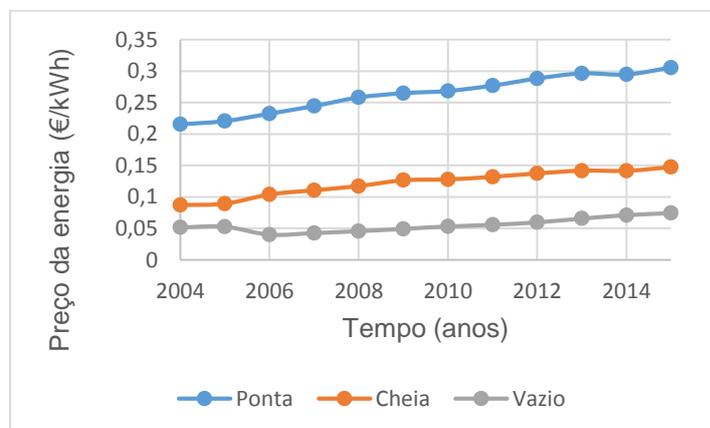


Gráfico 3 – Evolução do preço da energia (caso real na RAM).

Com o intuito de ser inequívoco na perceção dos valores do **Gráfico 3** representa-se a **Tabela 5** com os valores que deram origem ao gráfico, minimizando, desta forma, o erro associado à consulta do gráfico. Estes dados foram obtidos da consulta do registo histórico nos **relatórios de contas** da EEM dos últimos doze anos.

Tabela 5 – Evolução do preço da energia na Ilha da Madeira.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	unidade
Horas de ponta	0,2156	0,2208	0,2325	0,2446	0,2582	0,265	
Horas de Cheia	0,0874	0,0895	0,1041	0,1108	0,1174	0,1266	€/kWh
Horas de vazio	0,0517	0,053	0,0402	0,0428	0,0458	0,0494	
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	unidade
Horas de ponta	0,2685	0,2769	0,2882	0,2964	0,2946	0,3056	
Horas de Cheia	0,1279	0,1321	0,1375	0,1418	0,1416	0,1474	€/kWh
Horas de vazio	0,0533	0,0559	0,0598	0,0658	0,0712	0,0745	

Em sucessão ao que foi redigido, pode-se comprovar que o preço da eletricidade não assume um comportamento previsível (com base nesta gama de valores). De seguida apresenta-se as regressões e respetivos erros comparativamente ao valor real praticado. Sendo, sim possível, estimar uma linha de tendência (regressão) para as tarifas.

Tabela 6 – Regressões e respetivos erros associados (horas de ponta).

Horas de ponta		
Tipo de regressão:	Equação	Erro
Linear	$P = 0,0083T - 16,452$	$R^2=0,9796$
Polinomial	$P = -0,0003T^2 + 1,1808T - 1194,5$	$R^2=0,9909$

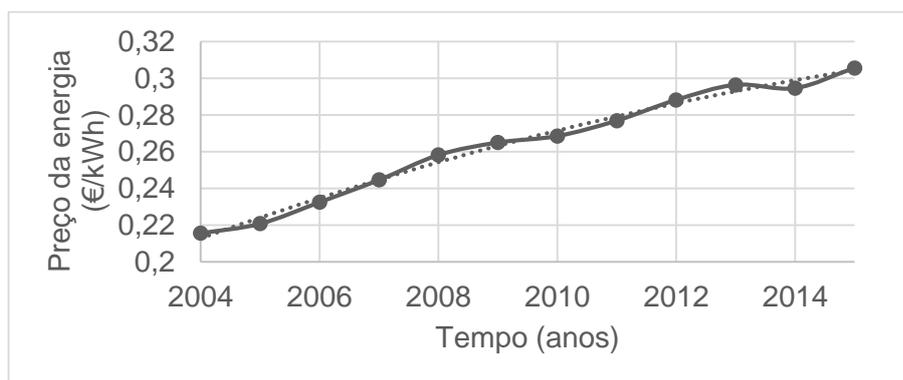


Gráfico 4 – Regressão polinomial (horas de ponta).

Tabela 7 – Regressões e respetivos erros associados (horas de cheia).

Horas de cheia		
Tipo de regressão:	Equação	Erro
Linear	$P = 0,0055T - 10,921$	$R^2=0,9512$
Polinomial	$P = -0,0004T^2 + 1,4375T - 1449,8$	$R^2=0,9886$

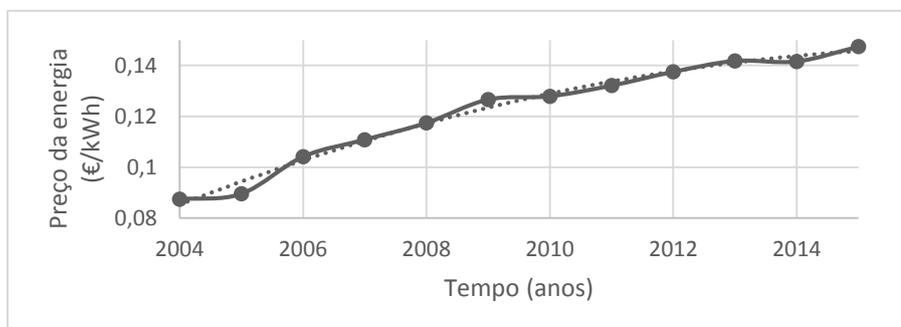


Gráfico 5 – Regressão polinomial (horas de cheia).

Tabela 8 – Regressões e respetivos erros associados (horas de vazio).

Horas de vazio		
Tipo de regressão:	Equação	Erro
Linear	$P = 0,0025T - 4,9544$	$R^2=0,6922$
Polinomial	$P = -0,0005T^2 - 1,8685T + 1874,9$	$R^2=0,9886$

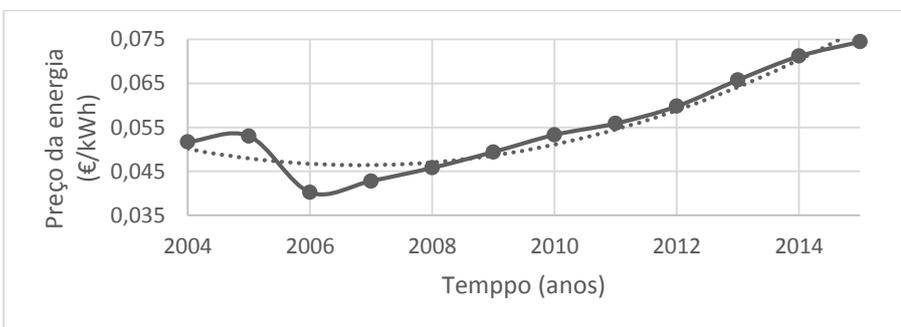


Gráfico 6 – Regressão polinomial (horas de vazio).

Da interpretação dos valores é possível verificar que no intervalo de 12 anos (em estudo) a regressão que melhor se ajusta é a polinomial, pois o erro (valor de R^2) está mais próximo da unidade, porém uma regressão linear, também reproduz uma boa tendência, pois é previsível que o valor da energia continue a aumentar. Para **horas de ponta** a variação é cerca de 42%, neste intervalo de tempo de 12 anos, para as **horas de vazio** a variação foi de 44%; o valor mínimo praticado foi 0,0402€ em 2006 e máximo 0,0745€ em 2015. A maior variação é verificada para a tarifa de **horas de cheia** com um aumento de cerca de 68%.

O preço da eletricidade no consumidor final varia em função do ano (hora de verão vs. hora de inverno) e durante o dia (para o presente caso existe três tarifas diárias). A **Tabela 9** e o **Gráfico 7** reproduzem um exemplo real do valor de energia elétrica para o ano de 2015 ao longo de um dia na RAM para diferentes estações do ano.

Tabela 9 – Tarifas do preço da eletricidade durante um dia.

Ciclo horário	Outono e Inverno	Primavera e Verão	Custo eletricidade
Ponta	10:30 até 12:00h	10:30 até 13:00h	0,3056
	18:30 até 21:00h	20:30 até 22:00h	0,3056
Cheias	9:00 até 10:30h	9:00 até 10:30h	0,1474
	12:00 até 18:30h	13:00 até 20:30h	0,1474
	21:00 até 23:00h	22:00 até 23:00h	0,1474
Vazio normal	6:00 até 9:00 h	6:00 até 9:00 h	0,0745
	23:00 até 2:00 h	23:00 até 2:00 h	0,0745

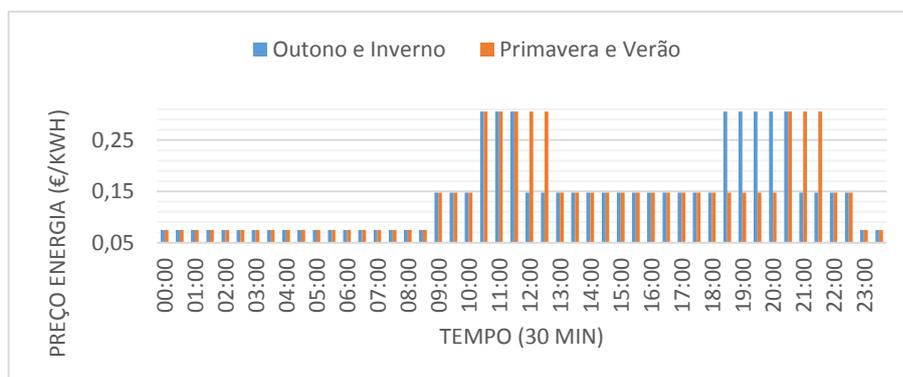


Gráfico 7 – Tarifas do preço da eletricidade durante um dia.

A importância da representação destes valores está associado à melhor escolha do tempo de funcionamento dos diversos elementos eletromecânicos nos cenários posteriormente representados.

4.3.2. Cenários de funcionamento para aplicação das funções

Após a determinação das funções de custo vs. benefício para produção de energia; está-se em condições de aplica-las na criação dos cenários. Com a criação dos cenários pretende demonstrar que a gestão de um aproveitamento deste género apresenta, obviamente, variações nas funções consoante a ocorrência da precipitação, relacionadas com o tempo de funcionamento e número de elementos eletromecânicos.

Saliente-se que os valores da potência elétrica de cada grupo gerador (caso prático) foi escrita no **Capítulo III**. Porém para que seja inequívoca o entendimento dos gráficos que se segue: a potência elétrica na Fajã dos Padres corresponde a 1,7 MW e em Sta. Quitéria corresponde a 1MW e nos Socorridos a 8MW, cada. Os GEB correspondem a 3,448 MW.

4.3.2.1. Aplicação das funções (cenário 1)

O **primeiro cenário** corresponde a um dia comum de inverno. Nesta situação a ativação dos GEB é inexistente. Pois a produção de energia elétrica é assegurada com a água proveniente das captações acumulada a montante.

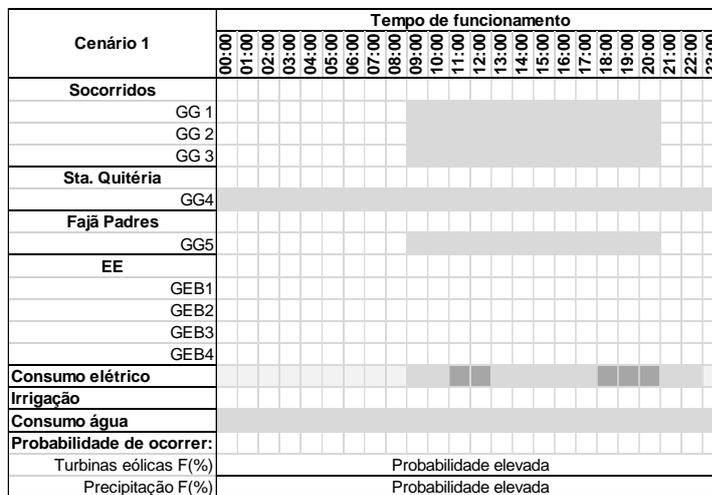


Figura 42 – Cenário de funcionamento 1.

A **Figura 42** foi criada para ilustrar o funcionamento dos diferentes elementos eletromecânicos (GG e GEB) e os diferentes consumos. Estando diferenciado a «intensidade» de consumo pela cor da quadrícula, isto é, a cor mais clara corresponde a menor consumo comparativamente à de cor mais escura. Note-se que a escolha dos diferentes cenários e cores das quadrículas está em concordância com o levantamento presente neste documento **Cap. III e Cap. IV**. No **Gráfico 8** é possível perceber de forma quantificada a potência elétrica dos respetivos locais de produção de energia no Aproveitamento de Fins Múltiplos dos Socorridos.

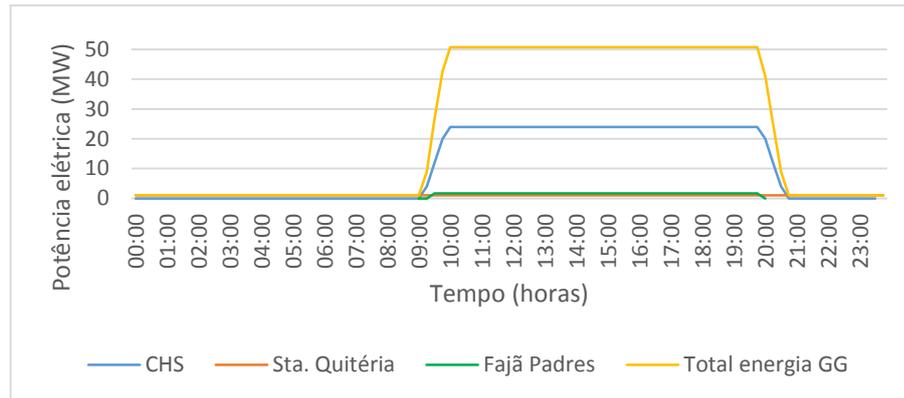


Gráfico 8 – Cenário de funcionamento 1.

Para que a exploração dos Grupos Geradores (GG) permitam máxima receita, estes devem funcionar, preferencialmente, nas duas tarifas mais elevadas, na mais baixa a água pode ser retida nos diversos locais a montante para assegurar uma cobertura elétrica no ciclo seguinte.

É possível verificar que em condições de inverno o aproveitamento tem os GG a funcionar com máxima eficiência (tempo), garantindo desta forma a máxima receita na produção de energia para este aproveitamento. Os GG funcionam em função do diferencial de caudal que chega à câmara de carga e o que é turbinado. Se este diferencial for positivo, ou seja, o volume de água turbinado inferior ao que chega das captações, o funcionamento dos GG pode ser prolongado durante mais tempo existindo capacidade de assegurar as restantes utilizações.

Função custo:

Nestas condições de funcionamento não existe custos associados à energia para funcionamento dos GEB. Correspondendo a um momento propício para manutenção dos mecanismos. A energia gasta está unicamente relacionada com o funcionamento do sistema da sala de comando e iluminação das diversas instalações.

Função benefício (energia produzida):

$$E_T = \sum_{i=1}^5 (P_{GG_i} \cdot T_n) \quad (47)$$

Onde: E_T – energia produzida no intervalo de tempo t [kWh]; P_{GG_i} – potência de cada GG i [kW] e T_n – tempo de funcionamento n do grupo i [h].

4.3.2.2. Aplicação das funções (cenário 2)

O **segundo cenário** equivale a um dia comum de verão. Neste momento os GEB serão ativados o tempo suficiente para restituir a «totalidade» da água na galeria de acumulação para a cota superior, considerando que o caudal das captações é apenas suficiente para a irrigação e consumo público.

Cenário 2	Tempo de funcionamento																							
	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Socorridos																								
GG 1																								
GG 2																								
GG 3																								
Sta. Quitéria																								
GG4																								
Fajã Padres																								
GG5																								
EE																								
GEB1																								
GEB2																								
GEB3																								
GEB4																								
Consumo elétrico																								
Irrigação																								
Consumo água																								
Probabilidade de ocorrer:																								
Turbinas eólicas F(%)																								
Precipitação F(%)																								

Figura 43 – Cenário de funcionamento 2.

Neste caso a função de energia gasta pelos Grupos Eletrobomba (GEB) pode funcionar com o auxílio à energia produzida nas eólicas ou, se não for suficiente, auxiliar-se à energia produzida numa central térmica para restituir apenas o caudal suficiente para consumo e irrigação pois não é economicamente viável gastar combustível fóssil para ativação dos GEB, podendo aumentar a capacidade da central térmica apenas nas horas de maior fornecimento elétrico durante o dia.

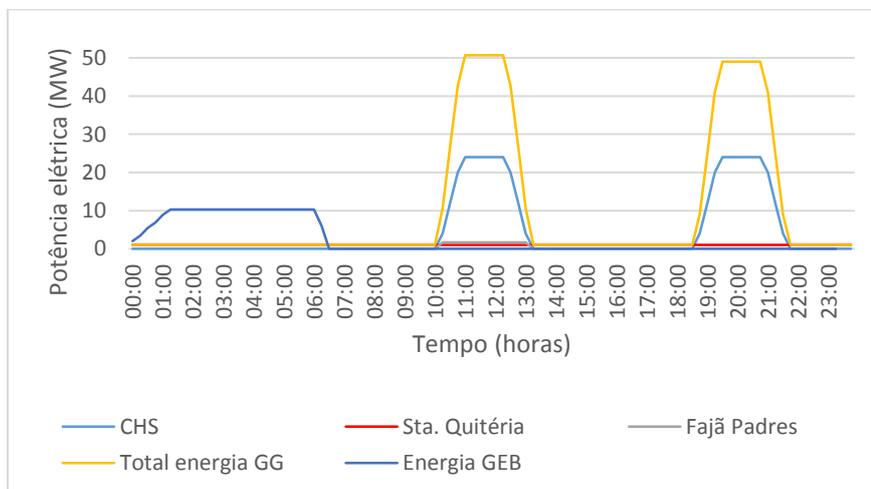


Gráfico 9 – Cenário de funcionamento 2.

Função energia gasta:

$$E_T = \left(\sum_{i=1}^3 Pot_{GEB(i)} \cdot T_n \right) + E_{ter} + E_e \quad (48)$$

Onde: E_T – energia total utilizada nos GEB [kWh]; $Pot_{GEB(i)} \cdot T_i$ – energia consumida pelo GEB i no intervalo de tempo n [kWh]; E_{ter} – energia para ativação dos GEB (central térmica) [kWh] e E_e – energia para ativação dos GEB (eólicas) [kWh].

Função energia produzida:

Esta função é semelhante a do cenário anterior, com a variação do tempo de funcionamento e número de elementos, dependendo das diversas variáveis já referidas.

Função custo vs. benefício:

A receita (benefício) corresponde ao diferencial entre o custo da energia gasta para reverter a água e a energia produzida. A poupança económica, neste caso, é obtida principalmente pela diferença entre o **valor da energia** para o funcionamento dos GEB (**durante a noite**) e o ganho ao gerar energia (**horas de ponta**). A diferença de tarifas gasta vs. ganha para a energia é de aproximadamente 410%. Sendo previsível que mesmo que os GG estejam a funcionar menos tempo que os GEB existe elevada probabilidade de a receita ser positiva.

$$R = \sum_{i=1}^n (V_u \cdot E_{GG_i}) - \sum_{i=1}^3 (V_u \cdot E_{GEB_i}) - V_u \cdot E_t - V_u \cdot E_e \quad (49)$$

Onde: R – custo ou benefício [€]; V_u – Valor unitário da energia elétrica [€/kWh]; E_{GG_i} – energia gerada pelos cinco GG [kWh] e E_{GEB_i} – energia consumida pelos GEB [kWh].

Este é o cenário mais desfavorável, pois para além dos GG estarem ativos durante mais tempo, existe a possibilidade de ser necessário a utilização de combustíveis fósseis para ativação dos GEB se a energia dos grupos aerogeradores não for suficiente.

4.3.2.3. Aplicação das funções (cenário 3)

O **terceiro cenário** correlaciona os dois cenários anteriores. Isto é, uma imprecisão do estado do tempo atmosférico para o diurno seguinte. Estimar de forma empírica que o volume

resultante das captações será inferior ao volume necessário para a produção de energia elétrica no ciclo seguinte pode não ser uma boa prática. Perante o panorama de ter-se um volume inferior ao necessário, seria previsível a ativação dos GEB num intervalo de tempo que permitisse colmatar a diferença de volume necessário para ativação dos GG, no intervalo de tempo de maior consumo de energia elétrica. Porém a sua ativação não deve ser só com base empírica, também é previsível que seja em função da antevisão do tempo fornecida, por exemplo, pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), para o diurno seguinte. Dependendo da previsão os GEB poderão ser ativados ou não, pois as previsões pelo IPMA podem antever que ocorra pluviosidade que seja suficiente para a produção de energia elétrica durante o intervalo de tempo necessário para colmatar os picos de consumo, durante o dia seguinte. Em suma, apesar de durante a noite não se prever a existência de caudal suficiente este pode ocorrer no momento em que é necessário produzir as coberturas de energia, sendo desnecessária a restituição deste volume de água para montante, durante a noite.

O contributo desta dissertação incide maioritariamente sobre esta consideração, pois durante um dia pode-se verificar uma eficiência no sistema muito significativa. Após uma pesquisa do número de vezes que este fenómeno ocorre, durante um ano, a melhoria não é muito significativa.

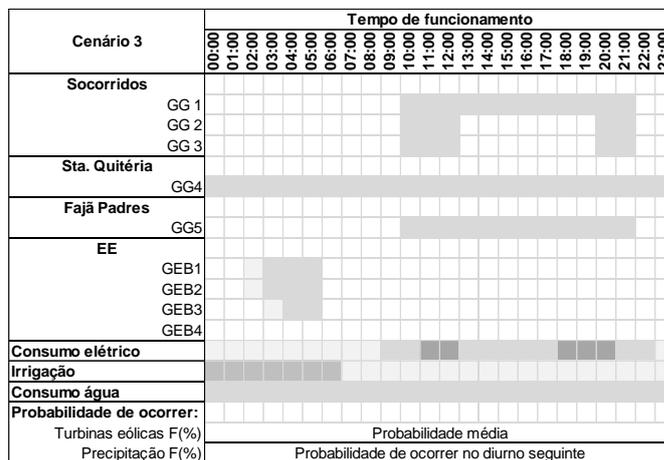


Figura 44 – Cenário de funcionamento 3.

Este cenário é o que apresenta maior dificuldade para determinação do tempo de funcionamento dos GEB pois tem em consideração uma **probabilidade** associada à previsão. Se esta probabilidade for baixa é preferível colocar os GEB em funcionamento o tempo suficiente para

e elevar um caudal que permita as utilizações da população, existindo a possibilidade de descarregar um volume considerável de água se se verificar a precipitação.

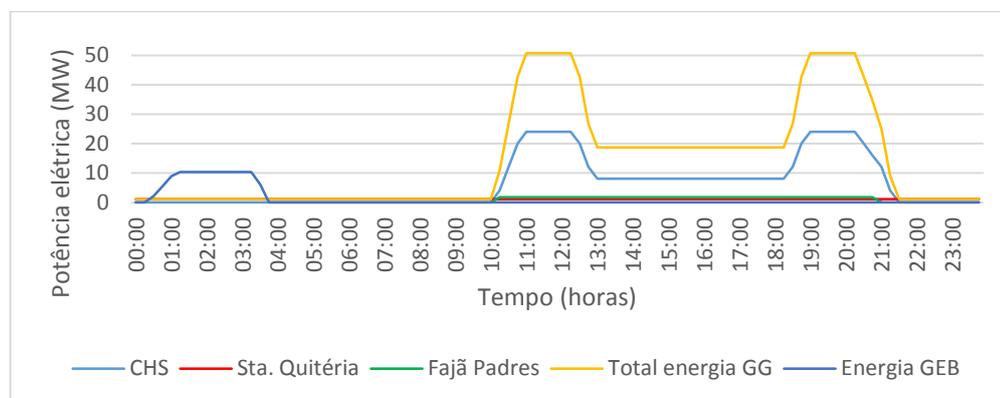


Gráfico 10 – Cenário de funcionamento 3.

As funções neste cenário são semelhantes as formuladas no cenário 1 e cenário 2. Da sua análise é possível entender que existe um ganho intermédio em relação aos dois anteriores, pois se for previsto precipitação atempadamente para o diurno seguinte o volume de água elevado será inferior ao verificado no verão porém ao existir mais água (das captações) o tempo de funcionamento dos GG é superior que num dia padrão de verão mas inferior ao de inverno.

4.3.3. Funcionamento dos grupos no caso prático (verão)

De forma sintetizada, o funcionamento do sistema reversível de verão pode ser descrita: nas “horas de ponta, com maior consumo elétrico, a água acumulada na Câmara de Carga e no Túnel do Covão é conduzida, através da conduta forçada/elevatória, à Central Hidroelétrica dos Socorridos para produção de energia elétrica. A água turbinada é retida na galeria de acumulação onde fica até ser restituída nas horas de menor consumo elétrico para montante (cota superior), para que na hora de ponta seguinte seja repetido o novo ciclo de produção hidroelétrica e irrigação.”

De forma mais pormenorizada, pode-se dividir o seu funcionamento pelos diferentes empreendimentos que dão forma ao sistema reversível. Os valores posteriormente escritos são valores médios de referência; registasse-os para que seja possível ter uma linha temporal.

Iniciar-se-á o ciclo, no momento em que a **galeria de acumulação** está com a capacidade máxima (aproximadamente 40 000 m³). Após este instante a água é restituída ao Túnel e CCC, nas horas de menor consumo de energia elétrica, normalmente no período noturno compreendido entre as 0:00 e as 7:00 horas através da ativação dos Grupos Eletrobomba (GEB) presentes na Estação Elevatória (EE). O arranque dos GEB é feito de forma progressiva e com um intervalo de tempo entre cada grupo. Este intervalo é normalmente inferior a 30 minutos, devido aos motivos descritos no **Capítulo III** correspondente à EE, presente neste registo de informação. A paragem das bombas é feita com intervalos de tempo menores, comparativamente aos de arranque. Este momento de paragem das bombas é gerido de forma a existir pouca variação no diagrama de carga (**Gráfico 2 na pág. 68**).

A energia utilizada para assegurar o funcionamento das bombas é a produzida através das turbinas eólicas, maioritariamente. Existe uma central térmica que assegura o correto funcionamento do sistema reversível nos momentos em que a movimentação do ar sobre as pás das torres eólicas é insuficiente para a rotação do rotor.

Depois da restituição da água aos locais anteriormente escritos, o sistema está em condições de assegurar a produção de energia e irrigação durante um determinado tempo, nos diferentes locais que estão equipados com os GG e ao longo do Canal do Norte, respetivamente. Quer-se dizer, a produção de energia elétrica existirá em três locais nos «intervalos de tempo» posteriormente escritos e o abastecimento para irrigação decorre ao longo de todo o dia.

No que diz respeito ao funcionamento da Central Hidroelétrica dos Socorridos (CHS). O arranque dos diferentes GG é em função da coluna de água a montante e do consumo de energia por parte da população. Isto é, o arranque dos grupos é progressivo e com um intervalo de tempo entre cada um dos dois grupos, que normalmente estão em funcionamento (verão). O tempo de andamento, normalmente verificado, é das 9:00 horas até às 17:00 horas, momento de maior consumo energético. A gestão da paragem dos GG também é de forma progressiva.

Em relação à gestão da produção de energia na mini-hídrica de Sta. Quitéria. Devido a «elevada» concentração, de habitantes na cidade do Funchal, o abastecimento à mini-hídrica e, conseqüentemente, à ETA de Sta. Quitéria é constante durante as 24 horas do dia, em atividade normal. Ou seja, esta central produz energia ao longo de todo o dia; com exceção quando existe

avarias e/ou o caudal é inferior a $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ [IGA, 2015]. Nestas situações existe uma conduta alternativa que direciona a água diretamente para a ETA e para os canais de irrigação sem passar no GG. Esta solução permite cessar o funcionamento do Grupo Gerador e manter o normal abastecimento público e irrigação.

Por fim, para a mini-hídrica da Fajã dos Padres. A produção de energia nesta central é em função das utilizações no CNLS, tramo compreendido entre o reservatório do Campanário até ao Covão e, também, da quantidade de chuva caída na região (pluviosidade). Funciona apenas quando existe mais abundância de água, estando automatizada; arranca quando o caudal é maior e para quando este é menor.

Página intencionalmente deixada em branco.

CAPÍTULO

V

CONCLUSÃO

“Nós almejamos por novas sensações, mas logo nos tornamos indiferentes a elas. As maravilhas de ontem são coisas comuns hoje em dia.”

(Nikola Tesla)

5. CAPÍTULO V – CONCLUSÃO

Após a análise técnica-económica da produção de energia no caso de estudo AFMS é possível concluir que as melhorias da eficiência advêm, principalmente, da construção de estruturas civis que possibilitam acréscimos, significativos, nos caudais; porém a gestão em tempo real aumenta a eficiência permitindo um «ligeiro» aumento da sua capacidade electroprodutora sem gastos em investimentos avultados. Acrescente-se que garantir os diferentes propósitos do aproveitamento para o qual são projetados de forma contínuo e fiável ao longo de todo o ano é motivo e justificação mais que suficiente para estudos desta natureza.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um sistema com estas características permite a obtenção de receitas superiores ao investimento inicial; obtidas diretamente e indiretamente. Quer-se com isto dizer, de forma direta são os valores cobrados sobre a utilização da água e consumo elétrico, pelas entidades gestoras; de forma indireta é adquirido ao nível de toda a sociedade, pois com a presença de um abastecimento misto público é minimizada a propagação de doenças (falta de higiene), minimizando, naturalmente, os custos relacionados com a saúde; um fiável abastecimento para a irrigação permite minimizar conflitos de interesses na utilização da água, reduzindo gastos da administração jurídica para resolução dos mesmos, e ainda um autossustento e/ou aquisição de receita por várias famílias que de outra forma em momentos de menor precipitação teriam colheitas menores, ou até mesmo, vê-las secarem, garantindo, assim, postos de trabalho; para além do redigido, permite contribuir para o crescimento económico da região, pois o constante e fiável sistema de fornecimento de eletricidade é fundamental para a indústria nos dias que decorrem, estando na base da economia.

O principal objetivo da gestão e racionalização deste aproveitamento é assegurar que os objetivos descritos ao longo dos **Cap. III** sejam cumpridos adequadamente; de menor relevância, e só se possível, um segundo objetivo é gerar lucro da sua gestão, por exemplo, com a ativação racional do tempo de funcionamento dos mecanismos eletromecânicos. A gestão de um funcionamento desta natureza carece de algum empirismo e de um acompanhamento contínuo (manual e/ou computadorizado), pois é muito dependente da pluviosidade. O acompanhamento contínuo é conseqüente da impossibilidade de criar uma formulação matemática que

anteveja, com 100 por cento de certeza, a ocorrência de precipitação e intensidade da mesma. Porém decorrente da sua monitorização, já é possível adaptar esses valores aos dados de entrada nos *softwares* na gestão do funcionamento do aproveitamento.

A determinação das funções permite concluir que o tempo de funcionamento dos diferentes elementos eletromecânicos permitem diferenças de receita distintas. O acréscimo de receita racionando o seu uso é impreciso pois este está dependente das características pluviométricas. Porém é possível admitir, com base empírica, que uma gestão contínua em tempo real contribui para um acréscimo das receitas no presente caso. Destacando-se o mérito deste documento que contribui para um aumento da receita não comprometendo as restantes utilizações de água.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros recomenda-se a utilização de outras técnicas (não empíricas) para determinação e quantificação das funções de custo vs. benefício baseadas em técnicas de investigação operacionais e técnicas de interligação de sistemas de monitorização que incluam um alargado conjunto de variáveis de forma a minimizar os valores dos erros (por ex.: da previsão da precipitação).

Estudo das bacias hidrográficas com o objetivo de melhorar a antevisão do comportamento da água no sistema utilizando ferramentas de investigação operacional e programas de simulação (por ex.: SOBEK).

Estudo da monitorização de todo o sistema para melhorar a eficiência do sistema. Possibilitando um maior controlo do sistema, pois ao fim de algum tempo com base nos valores monitorizados a montante (ex.: captações, udómetro, etc.) pretende-se saber se é possível **antever o comportamento a jusante** do sistema, para que exista um maior tempo de resposta, comparativamente ao atual). Este estudo pode incidir sobre controlo da velocidade da água, alarmes de controlo conjugado com ferramentas informáticas para previsão.

Página intencionalmente deixada em branco.

BIBLIOGRAFIA

Artigos científicos²:

Coelho, B. e Andrade, A. *Efficiency achievement in water supply systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 30*. (2014) P.59-84. ScienceDirect. Disponível na internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006692>

VILANOVA, M. R. N. e BALESTIERI, J. A. P. *Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 30*. (2014) P.701-714 ScienceDirect. Disponível na internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113007739>

ZHUAN, X. e XIA, X. *Optimal operation scheduling of a pumping station with multiple pumps. Applied Energy 104* (2013) P. 250-257. ScienceDirect. Disponível na internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912007349>

VIEIRA, F. e RAMOS, H. M. *Optimization of the energy management in water supply systems Water Science & technology: Vol 9, Nº 1, (2009) P. 59-65. Lisboa; Portugal. Disponível na internet: <http://www.iwaponline.com/ws/00901/ws009010059.htm> ISSN: 1606-9749*

VIEIRA, F. e RAMOS, H. M. *Optimization of operational planning for wind/hydro hybrid water supply systems. Renewable Energy 34* (2009) P. 928-936. Elsevier. Disponível na internet: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779574049389/Class3%20%20OptimizationWindHydroWaterSupply_LP.pdf

ELBATRAN, A. H. *et al. Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote áreas. Renewable and Sustainable Energy Reviews 43*. (2015) P. 40-50. ScienceDirect. Disponível na internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114009769>

² -Regulamento de referência ISO 690

CHEUNG, C. T. *et al.* . *Energy efficiency of elevated water supply tanks for high-rise buildings* *Applied Energy* 103, (2013), P. 685-691. Disponível na *internet*: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191200760X>

Portais na rede de alcance global (WWW):

Barril in Dicionário da Língua Portuguesa com Acordo Ortográfico. Porto: Porto Editora, 2003-2015. [consultado em abril 2015]. Disponível WWW: <URL: <http://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/Barril>

Empresa de Eletricidade da Madeira: abas de acesso: sistema elétrico – centrais hidroelétricas; EEM – a nossa história [consultado entre fevereiro e abril de 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.eem.pt/pt/inicio/>

Agência Regional da Energia e Ambiente da Madeira: abas de acesso: informação técnica – documentação. [consultado em março 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.arem.pt/>

Associação Portuguesa de Energias Renováveis: abas de acesso: energias renováveis – hídrica. [consultado em março 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.apren.pt/pt/>

Investimento e Gestão da Água: abas de acesso: a empresa – documentação; Madeira – recursos hídricos. [consultado entre fevereiro e março 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.iga.pt/>

Direção Geral de Energia e Geologia: abas de acesso: informação – centro de documentação. [consultado em fevereiro de 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.dgeg.pt/>

The European Small Hydropower Association: abas de acesso: *hydropower database – hydi database*. [consultado em fevereiro de 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.esha.be/>

GrabCAD: abas de acesso: *community – library – pelton turbine*. [consultado em março de 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <https://grabcad.com/>>

Faeitch2012: abas de acesso: hidroelétricas – turbina *Pelton*. [consultado em março de 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <https://faeitch2012.wordpress.com/>>

Index mundi: abas de acesso: economia – petróleo – produção. [consultado em fevereiro de 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.indexmundi.com/>>

Nacional Climatic Data Center: abas de acesso: *data acess – model data – model datasets – global forecast system*. [consultado em fevereiro de 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <http://www.ncdc.noaa.gov/>>

Energy.gov, Office of Energy Efficiency & Renewable energy: abas de acesso: *Home – Research development – hydropower research development*. [consultado em fevereiro de 2015]. Disponível em: WWW: <URL: <http://energy.gov/>>

GLOSSÁRIO DE TERMOS

CAPÍTULO I

- [1] – **Decomposição anaeróbia:** transformação de compostos orgânicos complexos em ácidos orgânicos voláteis por bactérias formadoras de ácidos; decorre na ausência de oxigénio.
[ad. Sampaio Duarte: Processos Biológicos, 2015]
- [2] – **Desnitrificação:** na química corresponde ao “processo químico provocado por uma bactéria que utiliza nitratos como fonte de energia”.
[infopédia.pt, 2015]
- [3] – **Nitrificação:** na química corresponde a “transformação do amoníaco ou dos sais amoniacais em nitratos.”
[infopédia.pt, 2015]
- [4] – **Crude:** “atribui-se a designação de crude ao petróleo em bruto, antes de ser refinado. É denominado crude húmido o petróleo que contém uma percentagem de água.”
[infopédia.pt, 2015]
- [5] – **Barril:** unidade de medição de capacidade (americana), usada para o petróleo bruto, aproximadamente 158 litros ($0,158 \text{ m}^3$ no SI).
[ad. infopédia.pt, 2015]

CAPÍTULO II

- [1] – **Corrente elétrica:** “a corrente elétrica consiste no deslocamento de cargas elétricas, sob a forma de eletrões (carregados negativamente), através dos metais e no vácuo, ou de iões nos fluidos e nos gases. A unidade de medição é o ampere.”
[infopédia.pt, 2015]
- [2] – **Gerador:** mecanismo que permite a transformação de energia mecânica (por ex.: rotação turbina) em energia elétrica.
[ad. infopédia.pt, 2015]
- [3] – **Alternador:** gerador síncrono de **corrente alternada**.
[Dicionário Porto Editora, 2015]
- [4] – **Dínamo:** “máquina geradora de **corrente contínua** que transforma a energia mecânica em energia elétrica.”
[infopédia.pt, 2015]

-
- [5] – **Fotões:** “quantum de radiação cujo energia é igual ao produto da frequência da radiação pela constante de *Planck*.” Isto é, “partícula elementar de energia luminosa, na teoria dos quanta.”
[infopédia.pt e priberam.pt, 2015]
-
- [6] – **Energia geotermal:** produção de energia elétrica através do “calor proveniente do interior da Terra” (Geo.: Terra; termal: calor). Aproveitamento da deslocação do vapor de água do interior da Terra para rotação de um Grupo (s) Gerador (es).
[ad. Brown, D.W.; Duchane, D.V. 1999]
-
- [7] – **Eletrólise:** processo químico de separação da partícula água (H₂O) em HHO por introdução de uma corrente elétrica na água. O hidrogénio (H) é obtido no polo negativo e o oxigénio (O) no polo positivo.
[ad. Ricardo Feltre, “Físico Química” 2010]
-
- [8] – **Energia Heliotérmica:** também designado por **energia solar térmica**. Resulta da concentração da radiação solar num fluido com recurso a um conjunto de espelhos devidamente expostos para concentrar o calor numa determinada área de um tubo que contem o fluido. Este fluido normalmente é água, devido a sua abundância e relativa baixa temperatura de vaporização (100 °C).
[ad. pt.wikipedia.org, 2015]
-
- [9] – **Urânio:** elemento químico de símbolo U e número atómico igual a 92. À temperatura ambiente é um material metálico radioativo.
[ad. tabela periódica, 2015]
-
- [10] – **Tório:** elemento químico de símbolo Th e número atómico igual a 90. À temperatura ambiente é um material sólido radioativo.
[ad. tabela periódica, 2015]
-
- [11] – **Turbina:** é um mecanismo rotativo que extrai energia do fluxo de um fluido (ex. água, vapor e gás) e converte-o em trabalho útil.
[ad. infopédia.pt, 2015]
-
- [12] – **Energia endógena:** realização de trabalho com recurso a uma substância que tem como origem, da sua «produção», o interior da Terra. Serve como exemplo o carvão e o crude.
[ad. Infopédia.pt, 2015]
-

CAPÍTULO III

-
- [1] – **Decénio:** referente a tempo; acomoda um período de dez anos.
[ad. infopédia.pt, 2015]
-

-
- [2] – **Hasteais:** “paredes laterais interiores de um túnel, desde a soleira até à «nascença» da abóbada.” Isto é, planos verticais num túnel.
[refer.pt, 2015]
- [3] – **Ecosistemas ripícolas:** termo atribuído à vegetação verdejante que se desenvolve sob a influência da água de uma linha de água (rio).
[ad. ripicurable.eu, 2015]
- [4] – **Aceleração da gravidade:** “aceleração, sem a resistência do ar, de um corpo em queda livre em direção ao centro de um planeta”. Este valor varia com a latitude, altitude e massa do planeta.
[infopédia.pt, 2015]
- [5] – **Emboquilhamento:** termo utilizado para designar a “zona de entrada e saída de um túnel.”
[Infopédia.pt, 2015]
- [6] – **Bacia hidrográfica:** “área que contribui, através da precipitação aí caída, para alimentação do referido curso de água.”
[Álvares Ribeiro: Hidrologia, 1987]
- [7] – **Capitação de água:** corresponde ao consumo de água *per capita* (por indivíduo). Ou seja, valor médio de água utilizado por indivíduo num grupo populacional.
[Correia, 1985]
- [8] – **Trainel:** secção de uma “estrada” (túnel) com a mesma inclinação.
[ad. Jorge Pais: Vias de Comunicação I, 2013]
- [9] – **Fluência:** deslocamento de um material (viga) ao longo da vida do material devido a ação gravítica; isto é, deslocamento resultante duma ação constante ao longo da vida da estrutura.
[Resistência dos Materiais, 2014]
- [10] – **Megagramas:** unidade de medição do Sistema Internacional para quantificar a massa de um corpo. Corresponde a 1 000 000 gramas.
[Unidades do Sistema Internacional, 1960]
- [11] – **Tensão elétrica:** diferença de energia elétrica potencial por unidade de carga elétrica entre dois pontos.
[ad. pt.wikipedia.org, 2015]
-

-
- [12] – **Cavitação:** “a cavitação é um fenómeno originado em quedas repentinas de pressão, geralmente observado em sistemas hidráulicos. A combinação entre a pressão, temperatura e velocidade resulta na liberação de ondas de choque e «micro injetores» altamente energéticos, causando a aparição de altas tensões mecânicas e elevação da temperatura, provocando danos na superfície atingida.”
- [LNEC, 1974]
-
- [13] – **Nanómetro:** é um instrumento utilizado para medir a pressão de fluidos contidos em recipientes fechados. A unidade de medição do SI, normalmente usada, é o nanómetro (1×10^{-9} metros).
- [ad. pt.wikipédia.org, 2015]
-
- [14] – **Bar:** no contexto deste texto, o *bar* é uma unidade de medida de pressão (símbolo: bar) e equivale a 100 000 Pascal (10^5 Pa).
- [ad. Infopédia.pt, 2015]
-
- [15] – **Humidade atmosférica:** “quantidade de vapor de água por metro cúbico de ar atmosférico.”
- [Álvares Ribeiro: Hidrologia, 1987]

CAPÍTULO V

-
- [1] – **Udómetro:** “este instrumento, também designado por sensor da precipitação ou pluviómetro é o instrumento destinado a medir a precipitação na forma líquida, acumulada num intervalo de tempo pré-estabelecido. Consiste num funil com área de 200 cm² de abertura que recolhe a precipitação e a encaminha para um sistema de báscula constituído por haste apoiada no seu centro, formando uma espécie de balanceiro.”
- [área educativa IPMA.pt, 2015]
-

LISTA DE APÊNDICES E ANEXOS

APÊNDICES:

Apêndice 1: tabela resumo da análise das centrais hidroelétricas na União Europeia.

Apêndice 2: unidades do sistema internacional referenciadas neste documento.

ANEXOS:

Anexo 1: vista da distribuição das infraestruturas do sistema reversível [autor: EEM].

Anexo 2: curvas características do ensaio do GEB 2 dos Socorridos [autor: EEM].

APÊNDICE 1:**Tabela 10 – Aproveitamentos hidroelétricos na UE.**

País	Ano (último dado disponibilizado)	Número de estações Hidroelétricas		Potência total instalada (MW)		Energia total produzida (GWh/ano)	
		Hidroelétricas ≤ 10	Hidroelétricas > 10	Hidroelétricas ≤ 10	Hidroelétricas > 10	Hidroelétricas ≤ 10	Hidroelétricas > 10
Áustria	2012	2871	0	1321	N/A	5943	N/A
Bélgica	2011	232	3	62	55	182	130
Bulgária	2009	155	24	285	2734	620	3280
República Checa	2014	1583	11	342	1278	N/A	N/A
Dinamarca	2011	37	0	9	0	17	0
Estónia	2013	46	0	8	N/A	26	N/A
Finlândia	2013	151	58	308	2917	1077	11760
França	2010	1935	290	2110	23440	6920	59869
Alemanha	2012	N/A	0	1780	3827	7205	14549
Grécia	2013	105	15	220	3017	771	5447
Hungria	2012	26	2	14	40,9	39,5	173,4
Irlanda	2009	55	13	45	196	178	610
Itália	2012	2667	303	2986	15245	9553	32322
Letónia	2012	145	3	26	1550	74	3602
Lituânia	2013	96	1	27	101	92	429
Luxemburgo	2012	33	0	34	0	58	58
Países Baixos	2012	17	3	3	35	N/A	N/A
Polónia	2013	759	9	289	672	997	1442
Portugal	2011	157	38	453	5039	965	10850
Roménia	2012	314	107	450	6074	706	14314
Eslováquia	2014	N/A	0	N/A	1713	N/A	282
Eslovénia	2011	471	21	118	1095	413	3361
Espanha	2011	N/A	N/A	1926	11354	4648	27402
Suécia	2012	1869	201	1284	15561	5041	72959
Reino Unido	2011	183	49	218	1374	697	4959

[ad. de uma base de dados descarregada em www.esha.be, 2015]

Notas relativas à **Tabela 10**: nesta tabela não foram contabilizados todos os 28 países pertencentes à UE. No levantamento não foram tidos em consideração a Croácia e Malta; representa-se por N/A os valores não disponibilizados por esta fonte bibliográfica; e foi considerado a estabilização dos dados aquando a não identificação destes até 2014, para as comparações feitas. Acrescido ao que já foi redigido na referência a este apêndice. Em relação ao número de estações hidroelétricas: o país com maior número de pequenas hidroelétricas é a Áustria com 2 871, mais 2 714 que Portugal; o país com maior número de grandes hidroelétricas é a Itália com 303, mais 265 que Portugal; e o valor médio é 632 para pequenas hidroelétricas e 58 para grandes hidroelétricas. No que diz respeito a potência instalada: o país com maior potencial instalado em pequenas hidroelétricas é a Itália com 2 986 MW, mais 2 533 MW que Portugal; o país com maior potencial instalado em grandes hidroelétricas é França com 23 400 MW, mais 10 206 MW que Portugal; e o valor médio de pequenas hidroelétricas é de 596,58 MW e de grandes hidroelétricas é 4 421,68 MW.

APÊNDICE 2:

Com o intuito de ser claro na referência às diversas unidades, apresenta-se neste apêndice, todas as unidades mencionadas nesta dissertação, não presentes na lista de abreviaturas.

Tabela 11 – Unidades simples do sistema internacional.

GRANDEZA	Unidade	Símbolo
Comprimento	Metro	m
Massa	Quilograma	kg
Tempo	Segundo	s
Corrente elétrica	Ampere	A
Temperatura termodinâmica	Kelvin	K
Temperatura celsius	Grau celsius	°C

Tabela 12 – Unidades derivadas do sistema internacional.

GRANDEZA	Unidade	Símbolo	Dimensional	
			Analítico	Sintético
Energia	joule	J	$kg \times m^2/s^2$	Nm
Potência elétrica	watt	J/s	$kg \times m^2/s^3$	W
Energia gerada	Watt-hora	Jh	$kg \times m^2 \times h/s^2$	Wh
Tensão elétrica	volt	V	$kg \times m^2/(s^3 \times A)$	W/A
Velocidade angular	Radiano por segundo	rad/s	1/s	Hz (Hertz)
Pressão	Pascal	Pa	$kg/(m \times s^2)$	N/m^2

Tabela 13 – Outras unidades usadas nesta dissertação.

GRANDEZA	Unidade	Designação
Caudal	m ³ /s	Metro cúbico por segundo
Pressão	m.c.a.	Metro de coluna de água
Velocidade angular	rpm	Rotações por minuto

Tabela 14 – Constantes.

CONSTANTE	Designação	Valor	Unidades (SI)
g	Aceleração da gravidade no planeta Terra	$\cong 9,81$	m/s^2
ρ_w	Massa volúmica da água (4°C)	1000	kg/m^3

ANEXO 1:



Figura 45 – Sistema reversível Socorridos.

ANEXO 2:

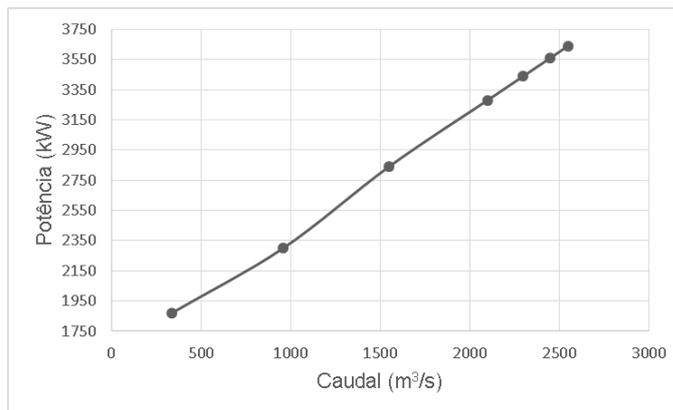


Gráfico 11 – Curva de caudal vs. Potência GEB.

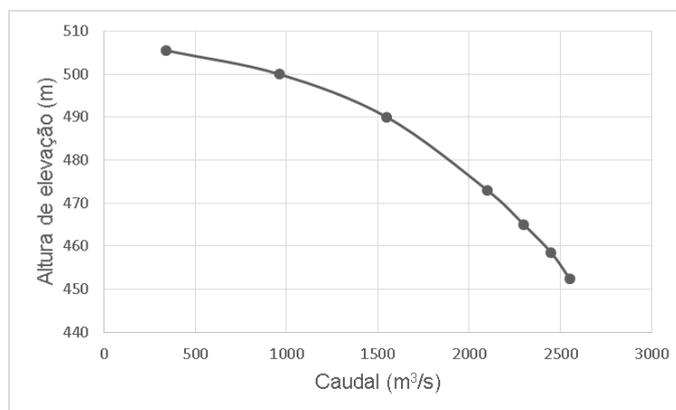


Gráfico 12 – Curva características.

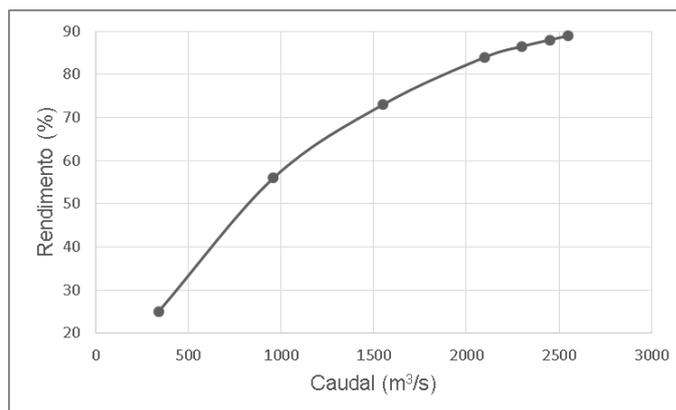


Gráfico 13 – Curva caudal vs. rendimento GEB.