



**Valter Filipe
Cunha Rodrigues**

**MODELAÇÃO DO USO DE ENERGIAS EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**



**Valter Filipe
Cunha Rodrigues**

**MODELAÇÃO DO USO DE ENERGIAS EM
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico esta dissertação aos meus pais

o júri

presidente

Prof. Doutor Nélon Amadeu Dias Martins
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Armando Baptista da Silva Afonso
Professor Associado Convidado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero dedicar esta dissertação aos meus pais, que sempre me apoiaram e fizeram tudo para tirar um curso superior. Quero agradecer à minha irmã por toda a paciência que teve comigo e por fazer parte da minha vida. Dedico esta dissertação à Silvana por ser a pessoa importante que é na minha vida, por todo o apoio que me deu e por conseguir sempre pôr-me um sorriso nos lábios, mesmo nos piores dias. Agradeço aos meus tios Vendeira por tudo o que têm feito por mim e pela minha irmã, por toda a preocupação que têm com a nossa vida. Quero deixar um agradecimento especial ao Eng^o Miguel Barbedo por me orientar na minha vida profissional, pela enorme paciência que tem, por partilhar comigo toda a sua capacidade intelectual. O agradecimento mais sincero vai para o meu orientador Gil Campos, que me apoiou incondicionalmente em toda esta fase, com uma disponibilidade inextinguível e uma compreensão digna de um excelente orientador.

palavras-chave

aerogerador, estação de bombagem, estação hidroelétrica, otimização, sistema de abastecimento de água

resumo

Atualmente, as preocupações com o consumo de água têm vindo a ser cada vez maiores. Em Portugal ainda não é dada a devida atenção à eficiência dos sistemas de abastecimento de água. O modelo atual de funcionamento dos sistemas de abastecimento de água está baseado no nível do reservatório de acumulação, que liga quando o nível baixa e desliga quando o nível máximo é atingido. Este modelo não tem em consideração a variação do custo de energia nem o aproveitamento de recursos renováveis. Nesta dissertação criou-se um modelo matemático que encontra padrões de funcionamento otimizados com o objetivo de reduzir o consumo energético dos sistemas de abastecimento de água. Foi também avaliado, sempre que as características topográficas do terreno assim o permitam, a introdução de uma estação hidroelétrica. Foram analisadas as vantagens financeiras e energéticas desta aplicação. A combinação de energias renováveis a este modelo permite obter elevados benefícios, passando este modelo a ser denominado de sistema de fins-múltiplos.

Foram realizadas diversas simulações utilizando a metodologia aplicada, de forma a avaliar a flexibilidade do modelo e sempre com o objetivo de minimizar o custo de exploração de funcionamento destes sistemas e maximizar os lucros da venda de energia à rede elétrica.

Neste trabalho, os resultados apresentados permitem concluir que o recurso a esta metodologia permite obter elevados benefícios económicos e financeiros.

keywords

hydroelectric station, optimization, pump station, water supply system, wind turbine.

abstract

Nowadays, the concerns about energy and water consumption have been increasing. In Portugal, there is little attention given concerning the efficiency of water supply. The current model of water supply systems operation is based on the levels of the reservoir, which switch on when the level is low and switch off when the high level is reached. This model doesn't take into account the variation of the energy cost throughout the day nor the use of renewable resources. In this thesis a mathematical model which is an optimized operating standards to reduce energy consumption for water supply systems is created. It's was also analysed the introduction of a hydroelectric station everytime the topographic features of the land permitted. The financial and energy benefits of this application is also analysed. The combination of renewable energy in this model allows to obtain higher benefits, which is called a multi-purpose system. With the goal of minimizing the cost of running these operating systems and maximize the profits from the sale of energy to the grid, several simulation analyses were performed by using the applied methodology in order to assess the flexibility of the model. In this thesis, the results lead to the conclusion that the use of this methodology allows to obtain a high economic and energy benefits.

CONTEÚDO

CONTEÚDO	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	VI
1 INTRODUÇÃO	8
1.1 ÁGUA E ENERGIA: ENQUADRAMENTO	8
1.2 OTIMIZAÇÃO.....	9
1.3 OBJETIVOS.....	10
1.4 GUIA DE LEITURA	10
2 ESTADO DA ARTE	12
2.1 ÁGUA E ENERGIA: PANORAMA NACIONAL E MUNDIAL	12
2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, ENERGIAS RENOVÁVEIS E POLÍTICA ENERGÉTICA EM PORTUGAL.....	14
2.3 ENERGIAS RENOVÁVEIS	15
2.4 REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	16
2.4.1 Funcionamento das Redes de Abastecimento de Água.....	16
3 MODELAÇÃO MATEMÁTICA	21
3.1 INTRODUÇÃO	21
3.2 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO NÃO-LINEAR.....	22
3.2.1 MÉTODO DO GRADIENTE REDUZIDO.....	22
3.2.2 MÉTODO DO GRADIENTE REDUZIDO GENERALIZADO (GRG)	23
3.3 MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE SAA.....	24
3.4 FORMULAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO DOS SAA.....	35
4 CASO DE ESTUDO	37
4.1 INTRODUÇÃO	37
4.2 CARATERIZAÇÃO DO PROBLEMA	37
4.2.1 Reservatórios	37
4.2.2 Conduas	38
4.2.3 Estação de bombagem.....	39
4.2.4 Perdas de carga	41
4.2.5 Estação Hidroelétrica.....	46
4.2.6 Fração de Tempo de Bombagem e Turbinagem	48

4.2.7 Energia Renovável: Aerogerador	49
4.2.8 Curva Típica de Ventos	50
4.2.9 Tarifa Elétrica e Consumo de Água	51
4.2.10 Formulação do Problema de Otimização do Caso de Estudo	52
4.3 APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	54
4.3.1 Situação Inicial	54
4.3.2 Sistema Otimizado Sem Recurso a Energias Renováveis	56
4.3.3 Sistema Otimizado com Recurso a Energias Renováveis – Caso Verão	59
4.3.5 Sistema Otimizado com Recurso a Energias Renováveis – Caso Inverno	62
4.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	65
4.4.1 Variação da Capacidade Reservatório	65
4.4.2 Alteração do Nível Inicial	67
4.4.3 Situação 1: Nível Inicial e Final Diferentes	68
4.4.4 Situação 2: Nível Inicial e Final Iguais	70
4.4.5 Alteração da Curva de Ventos	72
4.4.6 Diminuição da Diferença de Cota	76
4.4.7 Alteração da Tarifa	78
4.4.8 Diminuição do Número de Bombas	81
4.4.9 Diminuição do Número de Turbinas	85
4.4.10 Diminuição do Número de Aerogeradores	88
4.5 COMPARAÇÃO COM OUTROS RESULTADOS	91
5 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS	93
5.1 CONCLUSÕES	93
5.2 PERSPETIVAS FUTURAS	94
ANEXOS	95
LISTA DE ABREVIATURAS	95
6 REFERÊNCIAS	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Potencial hidroelétrico utilizado na Europa [5]	13
Figura 2: Etapas do sistema de abastecimento água.....	16
Figura 3: Esquema Redes Ramificadas [11]	17
Figura 4: Esquema Redes Malhadas [11]	17
Figura 5: Esquema de Funcionamento da Turbina Pelton [12]	19
Figura 6: Esquema de Funcionamento da Turbina Francis [14].....	19
Figura 7: Diagrama de Moody [15].....	27
Figura 8: Curva típica de uma estação de bombagem.....	28
Figura 9: Curva Típica da Eficiência da Estação Bombagem [2].....	28
Figura 10: Esquema explicativo do nível de água do depósito	29
Figura 11: Avaliação do comportamento de uma estação de bombagem.....	30
Figura 12: Curva típica de uma estação hidroelétrica [2]	32
Figura 13: Curva de eficiência de uma estação hidroelétrica [2].....	32
Figura 14: Avaliação do comportamento de uma estação hidroelétrica	33
Figura 15: Exemplo de uma curva típica de velocidade do vento	34
Figura 16: Esquema ilustrativo das condutas [2].....	38
Figura 17: Curva característica da estação de bombagem.....	39
Figura 18: Equação da potência da estação de bombagem	40
Figura 19: Eficiência da estação de bombagem.....	40
Figura 20: Energia mínima da estação de bombagem.....	46
Figura 21: Curva característica da estação de hidroelétrica	47
Figura 22: Equação da potência da estação hidroelétrica.....	47
Figura 23: Eficiência da Estação Hidroelétrica	48
Figura 24: Curva de Potência do Aerogerador [2].....	50
Figura 25: Curva da Velocidade média do vento para o Inverno [2].....	51
Figura 26: Curva da Velocidade média do vento para o Verão [2].....	51
Figura 27: Tarifa aplicada [2].....	52
Figura 28: Consumo da População de Câmara de Lobos [2].....	52
Figura 29: Comportamento do sistema na situação inicial	54
Figura 30: Comportamento da estação de bombagem na situação inicial	55
Figura 31: Comportamento do sistema na situação otimizada sem energias renováveis	56
Figura 32: Comportamento da estação de bombagem na situação otimizada sem recurso a energias renováveis	57
Figura 33: Comportamento da estação hidroelétrica na situação otimizada sem recurso a energias renováveis	58
Figura 34: Comportamento do sistema com recurso a aerogeradores na situação de verão	59
Figura 35: Comportamento da estação de bombagem com recurso a aerogeradores na situação de verão.....	60
Figura 36: Comportamento da estação hidroelétrica com recurso a aerogeradores na situação de verão	61

Figura 37: Comportamento do sistema com recurso a aerogeradores na situação de Inverno	63
Figura 38: Comportamento da estação de bombagem com recurso a aerogeradores na situação de Inverno	63
Figura 39: Comportamento da estação hidroelétrica com recurso a aerogeradores na situação de Inverno	64
Figura 40: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à capacidade do reservatório	65
Figura 41: comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à capacidade do reservatório	66
Figura 42: comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à capacidade do reservatório	66
Figura 43: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração do nível inicial: nível final diferente do nível inicial	68
Figura 44: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração do nível inicial: nível final diferente do nível inicial.....	69
Figura 45: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração do nível inicial: nível final diferente do nível inicial.....	69
Figura 46: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração do nível inicial: nível final igual ao nível inicial.....	70
Figura 47: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração do nível inicial: nível final igual ao nível inicial	71
Figura 48: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade ao nível final igual ao nível inicial	71
Figura 49: Curva de ventos típica para a região de Aveiro para o dia 22 de Julho de 2011 [19]	73
Figura 50: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração da curva de ventos.....	73
Figura 51: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração da curva de ventos	74
Figura 52: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração da curva de ventos	74
Figura 53: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração da diferença de cotas.....	76
Figura 54: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração da diferença de cotas	77
Figura 55: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade da alteração da diferença de cotas	77
Figura 56: Tarifa adoptada para a análise de sensibilidade a este caso de estudo	79
Figura 57: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração da tarifa	79
Figura 58: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração da tarifa	80
Figura 59: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração da tarifa	80
Figura 60: Curva de potência da estação de bombagem para a análise de sensibilidade à alteração do número de bombas para o caso de estudo.....	82

Figura 61: Energia mínima a vencer na análise de sensibilidade ao número de bombas	82
Figura 62: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração do número de bombas	83
Figura 63: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração do número de bombas.....	83
Figura 64: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração do número de bombas.....	84
Figura 65: Potência da estação hidroelétrica na análise de sensibilidade à alteração do número de turbinas.....	85
Figura 66: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração do número de turbinas	86
Figura 67: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração do número de turbinas.....	87
Figura 68: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração do número de turbinas.....	87
Figura 69: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração do número de aerogeradores.....	89
Figura 70: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração ao número de aerogeradores	89
Figura 71: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração ao número de aerogeradores	90
Figura 72: Comparação da variação do nível de água no depósito com o caso de estudo de [2]	92
Figura 73: Comparação da fração de funcionamento da estação de bombagem e estação hidroelétrica com outro caso de estudo [2]	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das diferentes turbinas [15]	20
Tabela 2: Rugosidade Absoluta Equivalente [15].....	26
Tabela 3: Caraterísticas do reservatório do Covão	38
Tabela 4: Caraterísticas das Conduas	39
Tabela 5: Caraterísticas da estação bombagem [2]	41
Tabela 6: Propriedades utilizadas para o cálculo perdas carga	41
Tabela 7: Perda de Carga para o caudal de 1080 m ³ /h	42
Tabela 8: Altura mínima para o caudal de 1080 m ³ /h	43
Tabela 9: Perda de Carga para o caudal de 2160 m ³ /h	43
Tabela 10: Altura mínima para o caudal de 2160 m ³ /h.....	43
Tabela 11: Perda de Carga para o caudal de 3240 m ³ /h	43
Tabela 12: Altura mínima para o caudal de 3240 m ³ /h.....	44
Tabela 13: Perda de Carga para o caudal de 4320 m ³ /h	44
Tabela 14: Altura mínima para o caudal de 4320 m ³ /h.....	44
Tabela 15: Perda de Carga para o caudal de 5400 m ³ /h	44
Tabela 16: Altura mínima para o caudal de 5400 m ³ /h.....	45
Tabela 17: Perda de Carga para o caudal de 6480 m ³ /h	45
Tabela 18: Altura mínima para o caudal de 6480 m ³ /h.....	45
Tabela 19: Perda de Carga para o caudal de 7560 m ³ /h	45
Tabela 20: Altura mínima para o caudal de 7560 m ³ /h.....	46
Tabela 21: Caraterísticas da estação hidroelétrica [2]	48
Tabela 22: Resultados do sistema na situação inicial	56
Tabela 23: Resultados do sistema otimizado. Comparação com a situação inicial	58
Tabela 24: Resultados do sistema otimizado com recurso a aerogeradores na situação de verão.....	61
Tabela 25: Resultados do sistema otimizado com recurso a aerogeradores na situação de Inverno.....	64
Tabela 26: Resultados da análise de sensibilidade à capacidade do reservatório para o caso de estudo.....	67
Tabela 27: Resultados da análise de sensibilidade à alteração do nível inicial para o caso de estudo.....	70
Tabela 28: Resultados da análise de sensibilidade à alteração do nível inicial para o caso.....	72
Tabela 29: Resultados da análise de sensibilidade à alteração da curva de ventos para o caso de estudo.....	75
Tabela 30: Caraterísticas das conduas à análise de sensibilidade à alteração da diferença de cotas.....	76
Tabela 31: Resultados da análise de sensibilidade à alteração da diferença de cotas para o caso de estudo	78
Tabela 32: Resultados da análise de sensibilidade à alteração da tarifa para o caso de estudo.....	81

Tabela 33: Resultados da análise de sensibilidade à alteração ao número de bombas para o caso de estudo	84
Tabela 34: Resultados da análise de sensibilidade à alteração ao número de turbinas para o caso de estudo	88
Tabela 35: Resultados da análise de sensibilidade à alteração ao número de aerogeradores para o caso de estudo	90
Tabela 36: Valores comparativos com outros estudos teóricos	91

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as principais motivações que levaram à realização deste trabalho, bem como a sua importância para o panorama energético dos sistemas de abastecimento de água.

1.1 Água e Energia: Enquadramento

No mundo moderno, as necessidades de consumo de água, as poupanças energéticas e as metas ambientais têm sido alvo de preocupações crescentes. Nesse sentido, é importante realçar o papel da eficiência hidráulica para o desenvolvimento sustentável dos sistemas de abastecimento de água.

Os maiores custos que as empresas de abastecimento de água enfrentam são os que dizem respeito à bombagem, que variam com a quantidade de água bombeada e com a tarifa de energia diária. Desse modo, tem todo o interesse realizar uma avaliação do potencial energético dos sistemas de abastecimento de modo a serem alcançadas melhorias energéticas. Combinar os sistemas de abastecimento de água com equipamentos capazes para produzir energia é uma solução que pretende aumentar a eficiência energética utilizando recursos renováveis disponíveis no local. Esses benefícios podem ser obtidos recorrendo a turbinas hidráulicas, que aproveitariam as horas de menor consumo da população, para produzir energia elétrica.

Os modelos matemáticos de otimização têm como principal objetivo maximizar ou minimizar uma certa quantidade, através de uma função objetivo limitada por certas restrições [1].

Quando a tarifa elétrica é variável, faz sentido otimizar todo o sistema de abastecimento de água, resultando em benefícios económicos e energéticos significativos [2]. A implementação deste tipo de soluções resulta numa menor dependência energética, numa redução dos custos de exploração e tem a vantagem de a maioria dos componentes do sistema já existir (por exemplo: reservatórios, condutas, válvulas).

Estas soluções são aplicáveis sempre que haja um excesso de energia disponível do sistema e o gradiente topográfico seja favorável [1]. A garantia de fornecimento suficiente de água à população e em boa qualidade é um requisito que não pode ser ignorado. A otimização tem um papel fundamental na aplicação destas soluções, pois é possível determinar o melhor funcionamento horário dos equipamento de forma a minimizar o custo de exploração e em alguns casos a maximizar os lucros.

1.2 Otimização

Otimizar faz parte do nosso cotidiano e da natureza que nos rodeia. Existem diversos exemplos, como a evolução das espécies, em que há uma tentativa de otimização de geração em geração através da transmissão de conhecimentos. No nosso dia-a-dia são aplicados métodos de otimização de forma natural, como por exemplo, quando há uma tentativa de maximizar um determinado processo ou minimizar os custos relativos a esses mesmos processos.

Os vários métodos de otimização têm vindo a sofrer grandes desenvolvimentos. Atualmente, a comunidade científica dedica-se a melhorar o que já existe, ou seja, a otimizar [3].

É importante caracterizar o problema geral de otimização. O problema de otimização é baseado na necessidade de otimizar uma determinada função, de forma a procurar um valor mínimo ou máximo para essa mesma função. Desse modo é importante definir determinados parâmetros: (i) função objetivo, (ii) variáveis de decisão ou de otimização, (iii) restrições e (iv) valor ótimo.

A *função objetivo* representa a meta ou objetivo a atingir, a equação matemática que se pretende otimizar. A otimização pode consistir em maximizar ou minimizar uma determinada expressão analítica.

A função objetivo pode ser uma função linear ou não-linear. Na grande maioria dos casos de engenharia a função analítica é não-linear, como é o caso de funções custo. Em relação à continuidade, a função objetivo pode ser contínua ou apresentar descontinuidades. A descontinuidade da função objetivo dificulta bastante a análise, pois o comportamento da função pode variar bastante quando passa de um ponto para o outro, mesmo que muito próximos [3].

As *variáveis de otimização* são variáveis que podem ser ajustadas de modo a otimizar a função objetivo. O conjunto das variáveis de otimização que levam à maximização, ou minimização da função é o objetivo principal do problema.

As *restrições* podem surgir como funções de igualdade ou desigualdade. A função objetivo deve respeitar essas limitações, podendo também corresponder a restrições ao espaço da procura das variáveis de otimização [3].

O *valor ótimo* corresponde ao valor da função objetivo no seu ponto extremo, respeitando as restrições e tendo em consideração as variáveis de otimização.

Um problema de otimização pode ser representado por uma função $f(x)$ que satisfaça M restrições de desigualdade e L restrições de igualdade e que se pretende otimizar (maximizar ou minimizar), encontrando as variáveis de otimização adequadas, variáveis estas dadas pelo vetor

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_n]^T, \quad (1.1)$$

sendo n de domínio N , isto é

$$\begin{array}{lll}
\min_x & f(x) & \\
\text{sujeito a:} & g_m(x) \geq 0, & m = 1, \dots, M, \\
& hl(x) = 0, & l = 1, \dots, L, \\
& x_i^{\min} < x_i < x_i^{\max}, & i = 1, \dots, n,
\end{array} \tag{1.2}$$

com f , g_m e $hl : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$

Em problemas reais, o valor da função que se pretende otimizar pode corresponder por exemplo a custos, emissões, consumos, entre outros. O problema de otimização pode tornar-se bastante complexo se depender de múltiplas variáveis. Essa complexidade tem levado ao desenvolvimento de variadas metodologias de otimização.

Nos sistemas mais complexos é comum recorrer-se a softwares que tenham implementado os algoritmos de otimização pretendidos. Um algoritmo de otimização é mais um conjunto de regras ou comandos que o computador tem que seguir durante todo o processo de cálculo [3].

1.3 Objetivos

O objetivo desta dissertação é estudar um modelo de otimização que recorre ao uso de energias renováveis para reduzir o custo operacional duma estação de abastecimento de água, de forma a aumentar a sua eficiência energética.

Para isso, pretende-se estudar um caso base, sem recurso e energias renováveis, e de seguida avaliar o impacto da instalação de aerogeradores e uma estação hidroelétrica. Realizar estudos energéticos e económicos de forma ser possível comparar as situações analisadas. Avaliar diversas análises de sensibilidade ao sistema, variando alguns parâmetros de modo a analisar várias situações distintas.

1.4 Guia de Leitura

Esta dissertação é constituída por 6 capítulos.

O capítulo 1 é dividido por 4 subcapítulos. O primeiro visa fornecer ao leitor o enquadramento em relação à temática da água e da energia. No segundo subcapítulo é feita uma abordagem geral a sistemas de otimização. Seguindo-se uma abordagem às principais motivações que levaram à realização deste trabalho. Por fim é apresentado este subcapítulo que serve como orientação para o leitor.

No capítulo 2 é retratado todo o levantamento bibliográfico para a realização desta dissertação. Num primeiro subcapítulo é dado destaque ao consumo energético e aproveitamento hidroelétrico a nível nacional e mundial. De seguida é abordado o tema da eficiência energética e política energética em Portugal. No subcapítulo seguinte é descrito de forma sumária a utilidade e funcionamento de energias renováveis, mais concretamente o uso de aerogeradores. Segue-se um subcapítulo dedicado ao funcionamento geral das redes de abastecimento de água.

O capítulo 3 descreve a modelação matemática dos SAA e é constituído por 4 subcapítulos. O primeiro subcapítulo faz referência a algoritmos de optimização não-lineares, enquanto o segundo aborda alguns métodos de optimização.

No terceiro subcapítulo é feita uma descrição à modelação matemática de SAA, seguido da formulação de optimização de SAA.

No capítulo 4 é descrito o caso de estudo, com uma caracterização do problema seguido da apresentação dos principais resultados. Foram analisadas 4 situações distintas: (i) uma denominada de situação inicial; (ii) sistema foi optimizado sem recurso a energias renováveis, (iii) implementação de aerogeradores para uma situação de verão, e (iv) para uma situação de inverno. Num subcapítulo do capítulo 4 é feito um estudo de sensibilidade a várias alterações ao sistema original, de forma a avaliar os impactos no comportamento do sistema. É feita uma comparação com um modelo teórico para o mesmo sistema de modo a avaliar os resultados obtidos.

No capítulo quinto são tiradas as principais conclusões desta dissertação e são propostos trabalhos futuros, respetivamente. Para concluir, são apresentadas as principais referências bibliográficas.

2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentado o panorama nacional e mundial dos sistemas de abastecimento de água e consumo energético. As implicações do uso de energias renováveis também são alvo de discussão. Por fim é feita uma abordagem ao funcionamento das redes de abastecimento de água.

2.1 Água e Energia: Panorama Nacional e Mundial

A realidade das sociedades modernas está baseada num consumo crescente de energia. À medida que os países emergentes vão progredindo nas suas etapas de crescimento, essa realidade tende a agravar-se. Os combustíveis e a eletricidade são fundamentais para a qualidade de vida atual e para a atividade económica desenvolvida pelas empresas.

Em Portugal, essa realidade é bem visível. De 1990 a 2010, o consumo de eletricidade aumentou cerca de 78%, relativo a um crescimento médio anual superior a 5% [4].

A economia nacional é gravemente afetada pela sua dependência energética. Portugal importa aproximadamente 85% da energia primária que consome, correspondendo a aproximadamente 8,2 mil milhões de euros [4].

O mix energético¹ de Portugal está assente principalmente em importações de petróleo, carvão e gás natural, trazendo graves prejuízos ambientais e económicos. Portugal está vulnerável aos mercados externos. É por isso fundamental reforçar a segurança energética, reduzindo as importações, face à instabilidade dos países fornecedores de combustíveis fósseis.

Portugal produz energia elétrica proveniente da energia cinética da água dos rios desde os finais do século XIX. O desenvolvimento industrial promoveu o desenvolvimento de grandes projetos hidroelétricos, que sofreram algumas condicionantes devido a contestações ambientais, suspendendo a construção do aproveitamento de Foz Côa.

No início deste século, a barragem do Alqueva, inserida no aproveitamento de fins múltiplos, deu origem ao maior lago artificial da Europa.

Na Europa, vários países têm investido no aproveitamento da água dos seus rios, já que é um recurso com elevado potencial para o desenvolvimento económico e em particular para a produção de eletricidade [5]. A Alemanha apresenta uma percentagem de potencial hidroelétrica de 96 % enquanto Portugal para o ano de 2011 apresenta uma percentagem de 46 %, como se observa na figura 1.

¹ Mix Energético é a distribuição percentual das fontes de energia primária na produção da energia eléctrica da rede nacional

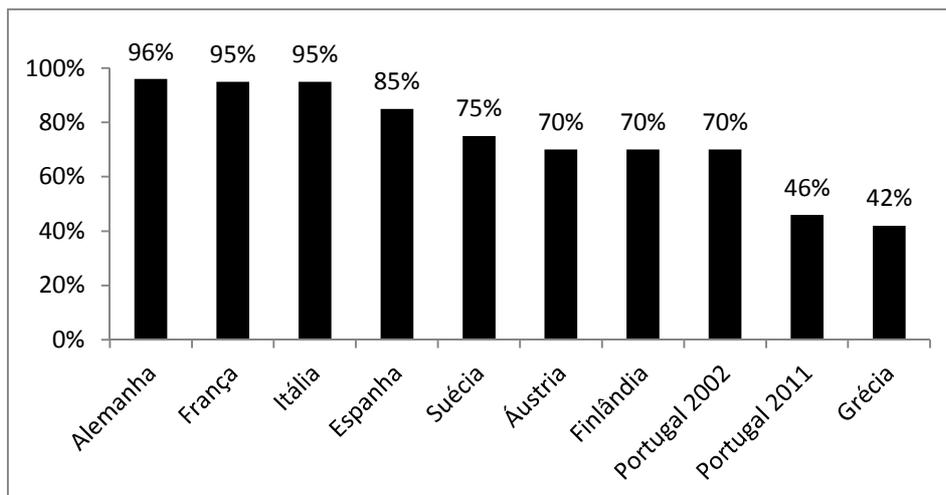


Figura 1: Potencial hidroelétrico utilizado na Europa [5]

Com a hidroeletricidade é possível dotar o setor elétrico de um recurso endógeno e renovável, fundamental para estabilizar a rede elétrica, com capacidade de dar uma rápida resposta em situações de perturbação do sistema provocadas por variações bruscas da oferta ou da procura.

É também possível integrar outras formas de energias renováveis, como solar ou eólica, onde as albufeiras são reservas estratégicas de energia elétrica, potenciada com estações de bombagem [5].

Em Portugal, a ausência de uma política económica orientada para a valorização da água nas diversas vertentes e as dificuldades dos promotores em enquadrar as questões ambientais, conduziram a uma reduzida utilização do potencial hidroelétrico instalado [5].

Segundo Mira Amaral, existe em Portugal um lóbi eólico com elevado poder económico. Defende que este tipo de produção energética, tendo em conta o seu enorme custo de investimento, teria que trabalhar todo o dia e em Portugal o vento é um recurso sofrível. Defende que à noite há vento, mas não consumo de eletricidade, de modo que as eólicas produzem energia quando não é necessária. A construção de centrais de bombagem iria aproveitar o excesso de energia elétrica para elevar a água que está em baixo para cima da albufeira. Como em Portugal não existem centrais de bombagem, há uma tentativa de vender a energia elétrica em excesso a Espanha, que se depara com o mesmo problema, ou seja, Portugal exporta energia elétrica a custo zero [6].

A quantidade de energia renovável com carácter volátil que pode ser instalada numa determinada região tem um limite. Para o caso de Portugal, o limite de eólica encaixável não deveria exceder 15% do consumo total de eletricidade [7]. Esse valor foi atingido em Dezembro de 2009, quando Portugal começou a vender energia para Espanha a custo zero.

Um mix energético é por isso, uma mistura equilibrada entre diversas formas de energia.

2.2 Eficiência Energética, Energias Renováveis e Política Energética em Portugal

Atualmente, a política económica tem que ter em consideração a dimensão ecológica e ambiental no contexto dos recursos físicos que podem ser finitos. Essa preocupação dá origem ao conceito de Desenvolvimento Sustentável.

As necessidades cada vez maiores das potências emergentes, as preocupações ambientais, a previsível escassez de combustíveis fósseis e o fato de Portugal ser altamente dependente de petróleo e gás natural, leva Portugal a transitar para um sistema energético mais diversificado e menos dependente de combustíveis fósseis.

O conceito de energias renováveis não se enquadra no conceito de “eficiência energética”, já que na maior parte dos casos constitui uma forma irracional e pouco eficiente de produção de energia, tendo em consideração o desenvolvimento científico e tecnológico.

A política energética de Portugal tem que seguir as orientações de Bruxelas que se tem centrado no apoio à produção de eletricidade pela via eólica, com custos elevados para um país endividado e sem dinheiro.

Projeções realizadas pela Agência Internacional de Energia (AIE) e pela ONG Greenpeace revelam que em 2030 a contribuição das renováveis não irá além dos 3% para satisfazer as necessidades de energia primária mundial, excluindo a hidroeletricidade [7]. No que diz respeito aos impactos ambientais, a União Europeia tem o objetivo de reduzir em 20% as emissões de gases com efeito de estufa até 2020, relativo ao ano de 1990, promovendo a utilização de energias renováveis (eólica, biomassa, solar, etc.) e aumentando a eficiência energética por via da redução do consumo.

O plano Nacional para a Eficiência Energética tem metas para o aumento da eficiência de 1%, metas manifestamente pouco ambiciosas. Contudo, Portugal ultrapassou os objetivos de eficiência energética para 2010 e já tem cumprido 37% das metas estabelecidas para 2015 do Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética, correspondendo a uma poupança anual superior a 350 milhões de euros em importação energética [4].

Portugal consome 2,47 vezes mais energia que França para produzir um euro de riqueza (PIB) e 1,49 vezes mais energia que Espanha [4].

O aproveitamento de recursos renováveis como o eólico impunha a construção de albufeiras para armazenamento de água, pois desta forma é possível responder de forma rápida a uma oscilação da procura e aumentar a capacidade de armazenar energia não consumível no momento da geração.

Um dos problemas das centrais eólicas é a variabilidade do vento. Em Portugal o vento só é suficiente 25% do tempo [6]. Outro problema destas centrais é o custo de manutenção, que se prevê que daqui a 15 anos irão custar 4 a 5 euros por megawatt-hora e o seu desmantelamento futuro [6].

De modo a diversificar o mix energético de Portugal foi realizado um forte investimento em energias renováveis, contudo, não satisfazem todas as necessidades energéticas

Em dias em que não há vento é necessário recorrer a centrais térmicas, de forma a garantir a segurança de aprovisionamento. As centrais eólicas precisariam de centrais de bombagem para acumular energia à noite, que é a altura em que há vento e não há consumo e das centrais térmicas de apoio para o dia. Mira Amaral chama-lhe triplo investimento e nunca exclui a importação de carvão e gás natural.

O objetivo português é atingir uma capacidade instalada de energia proveniente do vento de 5.500 megawatts, o equivalente a 4 grupos nucleares de 1.500 megawatts. Esta opção seria vantajosa se o vento estivesse disponível 100% do tempo. Contudo, em Portugal essa disponibilidade ronda os 25%. Essa energia quer seja usada quer não é paga a 90 euros por MWh. Porém, a que não é usada é exportada a custo zero [6].

As estações de bombagem poderiam aproveitar este excedente energético para voltar a colocar a água no cimo das albufeiras. Esta energia poderia ser, posteriormente, extraída durante o dia. É neste contexto que se insere a temática desta dissertação.

2.3 Energias Renováveis

2.3.1 Aerogeradores

Um aerogerador é um equipamento que converte a energia eólica em energia eléctrica. Poderá ser um sistema que aproveita um recurso renovável e, em geral é não poluente. Este equipamento apresenta algumas condicionantes que têm que ser levadas em linha de conta: (i) O custo de investimento é elevado, só sendo rentável instalá-los em áreas com vento constante, (ii) são fonte de poluição sonora, que perto de zonas residenciais, pode ser incomodativo, e (iii) são agressivos para a paisagem envolvente, entrando várias vezes em conflito com zonas de património protegido e alterando rotas de aves migratórias.

De uma forma geral existem dois tipos básicos de aerogeradores: de eixo vertical e de eixo horizontal.

Os rotores de eixo vertical têm a vantagem de ser mais baratos, mas apresentam um desempenho inferior. Estes têm a particularidade de ter o gerador fixo enquanto o rotor gira seguindo a direcção do vento.

Os rotores de eixo horizontal têm um investimento maior, mas a sua eficiência é superior, compensando assim o investimento. Os mais conhecidos são os rotores de 3 pás que têm a vantagem de serem mais estáveis que os de 2 pás e podem ser construídos até uma altura de 100 m e capacidade de gerar energia até 5 MW. Estes aerogeradores atingem eficiências de 45% com ventos fortes [8].

2.4 Redes de Abastecimento de Água

2.4.1 Funcionamento das Redes de Abastecimento de Água

Em Portugal, o setor do abastecimento de água tem vindo a crescer rapidamente, prevendo-se que dentro de poucos anos atinja a quase totalidade de cobertura da população [9]. Com essa meta quase alcançada, as atenções viram-se agora para a qualidade do serviço prestado às populações, que passaria pela progressiva implementação de mecanismos de melhoria global da qualidade dos sistemas ao longo de todo o ciclo de vida.

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) têm por objetivo prestar um serviço público, que é fundamental para a saúde e bem-estar das populações. Este serviço tem a finalidade de fornecer água às comunidades.

Os SAA são um “conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados ao abastecimento de água potável de uma comunidade para consumo humano, serviços públicos, consumo industrial e outros usos” [10].

Uma rede de abastecimento de água poderá conter as seguintes etapas: captação de água do seu meio natural, tratamento de qualidade e transporte até ao ponto de consumo consoante as necessidades.

Os sistemas de abastecimento podem ser dimensionados para pequenas populações ou para uma grande cidade. A concepção geométrica das redes de distribuição tem que ter em linha de conta as características topográficas, o tamanho da população e a classe do utilizador (doméstico, comercial, industrial).

A figura 2 lista as etapas de um sistema de abastecimento de água.

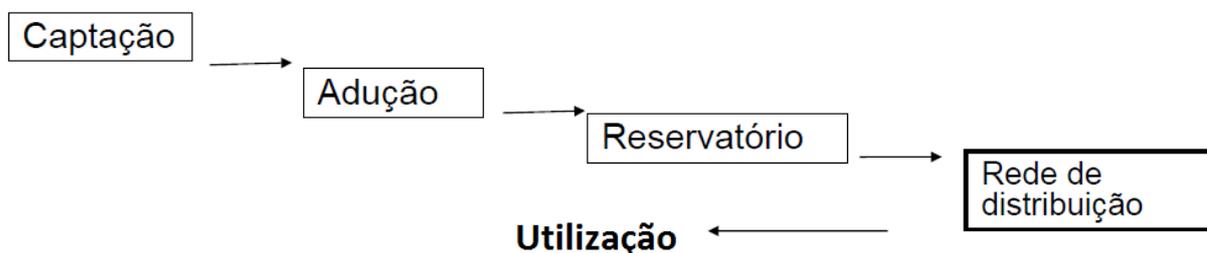


Figura 2: Etapas do sistema de abastecimento água

A captação é constituída por um conjunto de equipamentos e instalações de forma a retirar a água do seu meio natural. A adução corresponde ao transporte da água através das condutas e pode ter ainda uma estação de tratamento de água (ETA), que tem como objetivo melhorar a qualidade da água do ponto de vista químico, físico e bacteriológico, obedecendo a critérios de qualidade de consumo humano. Os reservatórios armazenam a água por forma a garantir a flutuação do consumo e a manter a pressão mínima na rede. Para sistemas de aproveitamento energético com recurso a turbinas hidráulicas, o depósito serve como acumulador de água para posteriores descargas. A rede de distribuição diz respeito à condução de água para os pontos de consumo, através das condutas instaladas na via pública.

Em alguns casos, para transportar a água até pontos mais distantes ou aumentar o caudal das condutas é necessário recorrer a estações elevatórias. Estas estações servem para aumentar a pressão do líquido e permite ultrapassar dificuldades topográficas do terreno.

Uma rede de distribuição é constituída por condutas principais, que vão abastecer condutas secundárias. Estas são de menor diâmetro e têm a função de abastecer diretamente os pontos de consumo.

Os sistemas de abastecimento de água podem ser classificados principalmente em dois tipos: Ramificados ou Malhados.

Nas *Redes Ramificadas*, o abastecimento faz-se a partir de um tronco alimentado por um reservatório de montante, ou sob pressão de bombeamento. Este tipo de redes tem a característica de saber o sentido do escoamento em cada troço, sendo utilizado para o abastecimento de pequenas comunidades. A figura 3 ilustra este tipo de redes.

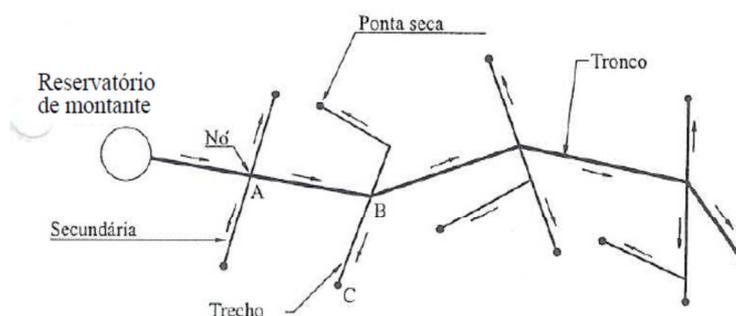


Figura 3: Esquema Redes Ramificadas [11]

As *Redes Malhadas* são constituídas por tubagens que formam anéis ou malhas, nos quais é possível reverter o sentido do escoamento consoante as necessidades de consumo.

Têm a capacidade de abastecer o mesmo ponto por dois caminhos distintos, apresentando maior segurança e flexibilidade. As condutas são de maior comprimento, mas com diâmetros menores. A figura 4 representa este tipo de redes.

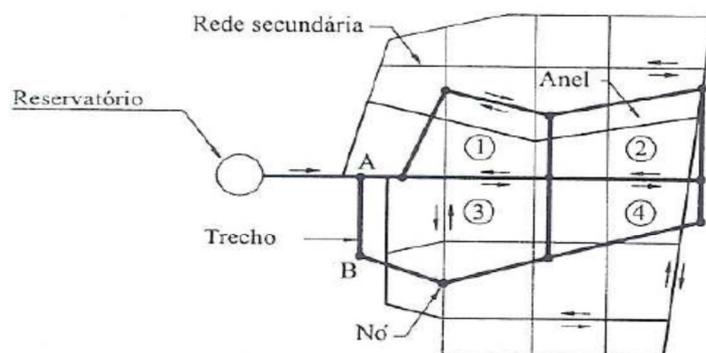


Figura 4: Esquema Redes Malhadas [11]

As estações de bombagem complementam as redes de abastecimento de água e têm como finalidade bombear água de forma a abastecer uma determinada população. Usualmente o objetivo passa por bombear a água de um nível mais baixo para um ponto a uma cota superior, onde se encontra um reservatório. Estes sistemas são o principal custo dos sistemas de abastecimento de água, pois são grandes consumidores de energia elétrica. Atualmente as bombas dos SAA estão parametrizadas para ligar ou desligar consoante o nível do reservatório. É por isso fundamental, otimizar o funcionamento destas estações à tarifa aplicada, resultando em grandes retornos financeiros e estabilização da própria rede elétrica.

É importante caracterizar detalhadamente o funcionamento das bombas que constituem as estações de bombagem. O fundamento das máquinas hidráulicas é promover a troca de energia mecânica entre um líquido (água) e um dos seus órgãos.

Existem máquinas hidráulicas de diversos tipos: rodas de água (em que a água atua pelo peso), turbomáquinas, bombas de êmbolo, carneiros hidráulicas e ejetores.

O elemento fundamental das turbomáquinas é a roda ou rotor, também denominado por impulsor, e possui a característica de efetuar movimentos circulares.

A designação *máquinas rotodinâmicas* é frequentemente utilizada em vez de turbomáquinas, já que esta última é também utilizada como turbina-bomba: máquina hidráulica reversível, que pode funcionar como turbina ou como bomba.

As turbomáquinas podem dividir-se nos seguintes tipos:

- Turbomáquinas motoras, turbinas, que recebem energia mecânica do líquido, e a torna disponível no veio (mediante um binário e uma velocidade angular);
- Turbomáquinas recetoras, bombas, que transferem para o líquido energia mecânica recebida do exterior;
- Turbomáquinas transmissoras, transmissões hidráulicas, que transmitem energia mecânica de um veio para outro, e estão normalmente associadas a uma turbomáquinas recetora e uma turbomáquinas motora.

No entanto, quando as variações topográficas assim o permitem as estações hidroelétricas podem trazer grandes benefícios energéticos e financeiros. As estações de aproveitamento hidroelétrico são basicamente constituídas por turbinas e geradores elétricos.

As turbinas podem ser classificadas em dois grandes grupos, consoante a água que passa pela roda da turbina se encontra à pressão atmosférica (turbina de ação) ou é atravessada por um escoamento sob pressão (turbina de reação). As turbinas de ação mais frequentes são do tipo Pelton. Como se observa na figura 5.

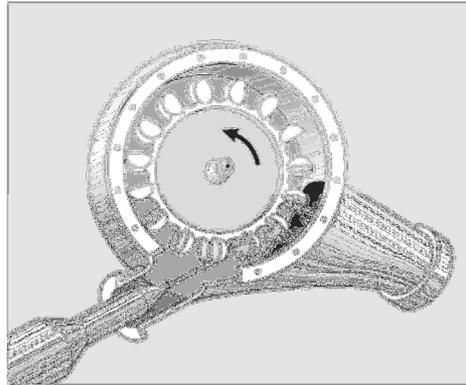


Figura 5: Esquema de Funcionamento da Turbina Pelton [12]

As turbinas de reacção, as bombas e as turbinas-bombas classificam-se quanto à direcção do movimento do líquido relativamente à respetiva roda: radial, axial ou mista.

Uma turbina típica de reacção é a turbina Francis, que se caracteriza por receber água sob pressão na direcção radial e descarregá-la numa direcção axial, ocorrendo transformação de energia cinética em trabalho e energia de pressão em trabalho.

A roda da turbina Francis encontra-se em elevado contato com a água que percorre as condutas, não sendo por isso recomendável a aplicação em centrais cuja água apresente um elevado teor de sólidos em suspensão. A roda desta turbina caracteriza-se por ser formada por uma coroa de alhetas fixas, que recebem a água radialmente e a encaminham para a saída do rotor numa direcção axial, ver figura 6.

A entrada na turbina dá-se simultaneamente por múltiplas comportas de admissão, e o trabalho exercido sobre as alhetas faz rodar a turbina e o gerador [14].

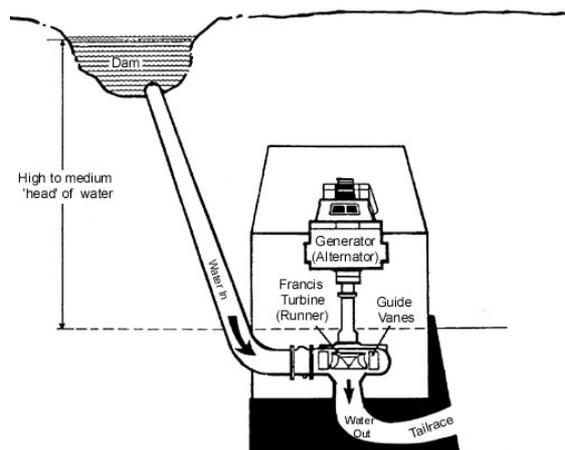


Figura 6: Esquema de Funcionamento da Turbina Francis [14]

A classificação das turbinas apresenta-se na tabela 1.

Tabela 1: Classificação das diferentes turbinas [15]

Turbomáquinas	Classificação quanto ao escoamento na roda		Designação corrente
Turbinas	De ação (ou de impulsão)		Turbinas Pelton
	De Reacção	Hélico-centripetas (ou radiais-axiais)	Turbinas Francis
		Mistas (ou diagonais)	Turbinas Mistas
		Axiais	Turbinas Kaplan

A finalidade das turbinas é aproveitar a energia cinética da água produzindo energia elétrica. Uma queda de água, com uma determinada diferença de cota, irá fazer girar as pás de uma turbina que irá transformar essa energia em eletricidade.

O exemplo mais concreto deste tipo de estações são as barragens, que armazenam água numa albufeira artificial, para posterior aproveitamento energético.

Em SAA, onde há recurso a reservatórios situados a uma cota superior, a estação de aproveitamento hidroelétrico seria construída paralela à estação de bombagem.

Um tipo de turbina-bomba é a máquina isógira que compreende duas rodas acopladas, uma de turbina, outra de bomba, e é dotada de dispositivos que permitem alimentar separadamente a roda da turbina ou a da bomba [15].

A substituição das bombas existentes por bombas reversíveis com capacidade para bombear e turbinar a água seria uma hipótese a ter consideração. Contudo, é necessário realizar uma análise de investimento de forma a averiguar o retorno financeiro.

O recurso a bombas funcionando como turbinas, para substituir as turbinas convencionais como as Pelton ou Francis, tem sido comum em países como os EUA, Alemanha e França para gerar energia em pequenos recursos hídricos.

A grande vantagem são os baixos custos, quando comparados com turbinas convencionais para a mesma potência [16].

Em centrais de aproveitamento hidroelétrico, que já têm as turbinas instaladas, o que se efetua é a construção de estações de bombagem, que irão voltar a colocar a água turbinada novamente no cimo da albufeira.

3 MODELAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo é feita uma abordagem a algoritmos de otimização não-linear, abordando alguns métodos de otimização. É abordada a temática da modelação matemática e ainda a formulação de otimização dos SAA.

3.1 Introdução

Os custos associados à operação de bombagem de água representam um valor significativo nos sistemas de abastecimento de água. É, portanto, fundamental otimizar o funcionamento das bombas de modo a satisfazer o abastecimento da população e, simultaneamente, minimizar o custo. Atualmente, o funcionamento das bombas é controlado pelos níveis de água dos tanques de armazenamento a jusante. São parametrizados níveis máximos e níveis mínimos nos depósitos e quando o nível mínimo é alcançado, as bombas ligam até ser atingido o nível máximo.

Quando a topografia do terreno assim o permite, pode ser vantajoso instalar uma estação hidroelétrica, que aproveitaria o excesso de água armazenada para produzir energia elétrica. Contudo, para este caso é necessário definir o melhor funcionamento horário das bombas e das turbinas para o período de um dia. Pretende-se por isso estabelecer uma sequência de decisões, com o objetivo de obter a solução mais económica, e ao mesmo tempo, a melhor solução em termos sociais e ambientais, nunca pondo em causa a garantia de abastecimento de água.

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) necessitam de ser modelados de forma a ser possível realizar um estudo ao seu comportamento. É necessário conhecer as características dos reservatórios de água e das condutas. A estação de bombagem necessita de ser analisada, assim como a estação hidroelétrica. No seguimento desta modelação é essencial avaliar as perdas de carga do sistema de forma a determinar a energia mínima necessária que a estação de bombagem tem que vencer para conseguir elevar a água.

A quantidade de água que é consumida pela população também necessita de ser quantificada. Essa quantificação pode ser feita em quantidade média de água que é consumida a cada hora, durante um dia.

É necessário analisar a tarifa energética que se encontra em vigor, sendo importante para avaliar o custo energético do sistema e os benefícios económicos com a venda de eletricidade.

Os aerogeradores também necessitam de ser caracterizados já que um sistema de fins-múltiplos caracteriza-se por ter uma fonte de energia renovável: a relação entre a velocidade do vento e a energia que eles produzem é algo fundamental para o sistema, bem como a curva de ventos. A curva de ventos pode variar consoante o local onde é instalado o aerogerador e pode variar também com a altura do ano.

3.2 Algoritmos de otimização não-linear

Na otimização não linear é gerada uma sequência de pontos cujo limite converge para o ponto ótimo. O processo termina quando um ponto está suficientemente próximo da solução. Na otimização não-linear os processos são iterativos, gerando um conjunto de possíveis soluções em que a solução calculada é baseada na sua precedente. Os algoritmos existentes para o cálculo de otimização não-linear podem ser realizados com ou sem restrições à função objetivo. Os métodos podem ser classificados de acordo com a existência ou não de restrições. São métodos de algoritmos sem restrições: Método de Newton-Raphson, Método do Maior Gradiente, Método dos Gradientes Conjugados, Métodos Quase-Newtonianos, Método de Fletcher Powell, Método de Hooke e Jeeves, entre outros [17].

Para os métodos de algoritmos com restrições temos por exemplo: Método das Penalidades, Método das Direções Viáveis, Método Lagrangeana Projetada (Programação Quadrática), Método dos Gradientes Reduzidos Generalizado (GRG), Método das Variações nas Coordenadas, entre outros [17].

3.2.1 Método do Gradiente Reduzido [17]

O método do gradiente reduzido resolve problemas de otimização não-linear com restrições lineares. A expressão matemática (3.1) mostra uma aplicação da otimização não-linear.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } & z=f(x) \\ \text{Sujeito a: } & A.X=B \\ & \beta \geq x \geq \alpha \end{aligned} \tag{3.1}$$

onde

$f(x)$ é a função real diferenciável e com as primeiras derivadas contínuas; \mathbf{A} é a matriz de dimensão $M \times N$, onde $M \leq N$; \mathbf{B} é o vetor de dimensão M ; β e α são os limites dos valores assumidos pelas variáveis.

O vetor \mathbf{X} pode ser repartido em dois vetores, $X = (X^C, X^D)$, onde X^C é o vetor com as variáveis básicas, ou dependentes, e X^D é o vetor com as variáveis não básicas, ou independentes. A matriz A pode ser transformada em duas sub-matrizes, C e D . Então a equação (3.1) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } & z = f(X^C, X^D) \\ \text{Sujeito a: } & C.X^C + D.X^D = B, \\ & \beta^C \geq X^C \geq \alpha^C \\ & \beta^D \geq X^D \geq \alpha^D \end{aligned} \tag{3.2}$$

a sub-matriz \mathbf{C} é composta pelas primeiras colunas de \mathbf{A} referentes às variáveis dependentes X^C , ou seja, \mathbf{C} corresponde ao vetor X^C que é não singular. Então pode-se explicitar X^C da seguinte forma

$$X^C = C^{-1}.B - C^{-1}.D.X^D. \tag{3.3}$$

A equação (3.3) mostra que se pode assinalar quaisquer valores às componentes de X^D e resolver sempre o sistema da equação (3.2), em termos de X^C . Por isso, o vetor X^D é independente.

A partir dessa afirmação, deve-se calcular o gradiente reduzido da função e, conseqüentemente, obter os vetores procurados. O gradiente reduzido é então dado por:

$$\nabla r(X^D) = \nabla_{X^D} f - (c^{-1} \cdot D)' \cdot \nabla_{X^C} f \quad (3.4)$$

Onde

∇r é o gradiente reduzido de X^D .

A direção viável que melhora a função f em que X também é dada em razão de D ou da direção dir_D , que é estabelecida com a direção do gradiente de $f(X^C, X^D)$ e dada por

$$dir_D = -\nabla_D f(X_C, X_D) + \nabla_C f(X_C, X_D) \cdot C^{-1} \cdot D \quad (3.5)$$

A resolução do problema é iniciada com a adoção de um ponto viável X_K e o cálculo da direção $dir_K = (dir_C^K, dir_D^K)$. Se após todos os cálculos descritos acima, a direção de dir_K for determinante de um ponto ótimo, X_K será esse ponto; caso contrário adota-se um novo X_K .

3.2.2 Método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) [17]

O Método do Gradiente Reduzido Generalizado, como o próprio nome indica é uma generalização feita do Método do Gradiente Reduzido.

Essa generalização permitiu que o método fosse introduzido para restrições não-lineares. Este método pode ter restrições lineares e não-lineares, e expressa o gradiente em termos dessa base normal.

A ideia presente nessa metodologia passa por resolver um problema de otimização não-linear por um processo parecido com o método simplex da otimização linear. O problema a seguir demonstra isso mesmo.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } z &= f(x), \text{ com } X = [X_i]^T \\ \text{Sujeito a: } g(x) &= 0, \\ \beta &\geq x \geq \alpha \end{aligned} \quad (3.6)$$

A variável x pode ser repartida em duas outras variáveis, $x = (X^C, X^D)^T$ onde X^C são as variáveis básicas e X^D são as variáveis não básicas. Estas últimas variáveis deverão ser conhecidas previamente. A equação anterior pode então ser escrita da seguinte forma

$$\begin{aligned}
&\text{Minimizar: } z = f(X^C, X^D) \\
&\text{Sujeito a: } g(X^C, X^D) = 0, \\
&\quad \beta^C \geq X^C \geq \alpha^C \\
&\quad \beta^D \geq X^D \geq \alpha^D
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Em termos de função Lagrangeana o problema será minimizado da seguinte forma:

$$\text{Minimizar: } f(X^C, X^D) + \lambda^T \cdot g(X^C, X^D) \tag{3.8}$$

Deve-se iniciar o problema com um X_K qualquer. Então, uma vez que se conhece X_K^N e definida a restrição $g(X^C, X^D)=0$ pode-se, através de um método iterativo determinar X_K^N . Inicia-se a direção de buscas das variáveis não básicas, com a direção de busca conhecida como gradiente reduzido ($\nabla^D \phi(x^D)$), com base no gradiente da Lagrangeana.

$$\nabla^D \phi(X^D) = \nabla^D f(X_K^C, X_K^D) + \lambda_K^T \cdot J^D(x_K^B, X_K^N) \tag{3.9}$$

Onde λ_K é dado por

$$\lambda_K = -\nabla^C f(X_K^C, X_K^D) \cdot [J^C(X_K^C, X_K^D)]^{-1}. \tag{3.10}$$

Se o módulo do vetor gradiente reduzido ($\nabla^D \phi(X^D)$) for menor que a tolerância de convergência pré-definida, a variável x_K é tida como ponto ótimo da função. Caso isso não ocorra, x_K deverá ser incrementado, e as duas outras variáveis, conseqüentemente, também serão incrementadas $X_{K+1}^D = X_K^D + \alpha \cdot \nabla^D \phi(X^D)$. O método generalizado do gradiente reduzido é baseado sobre uma movimentação iterativa de um ponto x , até qualquer que seja atingido um ponto x onde ($\nabla^D \phi(X^D)$) satisfaça as restrições do problema.

Depois de analisados alguns métodos de otimização não-linear é necessário definir o modelo matemático que será a base desta dissertação.

3.3 Modelação Matemática de SAA

Os reservatórios são parte essencial dos SAA. Para uma correta modelação matemática é necessário conhecer detalhadamente as suas características. É necessário conhecer a cota a que os depósitos se encontram; as suas dimensões, de forma a ser possível conhecer a área da base e a correspondente altura de água para armazenamento; o valor mínimo de altura de água do depósito tem que ser tido em consideração, de forma a não falhar com o aprovisionamento e o valor máximo de altura de água também tem que ser descrito.

O nível no depósito a uma determinada hora N_h está relacionado com o comportamento do sistema na hora anterior. Como mostra a equação

$$N_h(m) = N_{h-1} + dN_{in_{h-1}} - dN_{out_{h-1}} - dN_{con_{h-1}}. \tag{3.11}$$

O nível no depósito a uma dada hora tem em consideração o nível do reservatório na hora anterior, N_{h-1} , a quantidade de água que foi bombeada para o reservatório, $dN_{in_{h-1}}$, o montante que foi turbinado, $dN_{out_{h-1}}$ e o consumo da população $dN_{con_{h-1}}$. O consumo de água da população tem que ser todo em linha de conta. Não pode ser esquecido que um SAA serve para garantir água em qualidade e quantidade suficiente à população.

As condutas que constituem os SAA também necessitam de ser analisados ao pormenor. Informação relativa ao comprimento das condutas, L , tem que ser conhecida, o material de que são revestidas, K , e o diâmetro das tubagens, D .

Um escoamento permanente uniforme é caracterizado por ter velocidade constante ao longo da trajetória. Os sistemas de abastecimento de água com escoamento permanente e sob pressão são normalmente formados por intervalos de condutas (constituídos por tubos montados em série), com eixo retilíneo, unidos por acessórios, com curvas, cotovelos, válvulas e derivações e estão normalmente associados a máquinas hidráulicas.

Para regimes permanentes, o escoamento ao longo das condutas é uniforme e a perda de carga unitária pode ser considerada constante para estas condutas.

Em 1883, Reynolds executou experiências que mostram claramente a existência de dois modos de escoamento (laminar e turbulento) e a ocorrência de um ou de outro consoante o valor assumido pelo parâmetro a que veio a ser dado o nome de número de Reynolds, Re .

A equação (3.12) traduz a equação que descreve o número de Reynolds e relaciona a densidade do líquido ρ , a velocidade do escoamento v , o diâmetro da conduta D e a viscosidade μ .

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\mu} \quad (3.12)$$

A transição de regime laminar para turbulento não está bem definida, correspondendo a uma faixa ou zona de transição. Observa-se que essa passagem se dá para números de Reynolds próximos de 2000 [15].

Quando o número de Reynolds passa além de determinados limites, a resistência ao escoamento é condicionada só pela turbulência. Desse modo, o fator de resistência é independente do número de Reynolds e unicamente função da rugosidade relativa, dada por

$$E_{rel} = \frac{K}{D} \quad (3.13)$$

Importa referir que a rugosidade relativa é influenciada pelo tipo de material que constitui a conduta. A tabela 2 mostra as diferentes rugosidades equivalentes k para diferentes materiais.

Tabela 2: Rugosidade Absoluta Equivalente [15]

Natureza da Conduta	Rugosidade Equivalente K (mm)
Latão, vidro	0,003
Fibrocimento	0,02
Aço Laminado	
-Novo	0,005
-Enferrujado	0,15 - 0,25
-Incrustado	1,5; 3
-Revestido Betume	0,015
Aço Soldado	
-Novo	0,03 - 0,1
-Enferrujado	0,4
Aço Galvanizado	0,15 - 0,2
Ferro Fundido	
-Novo	0,25
-Enferrujado	1 - 1,5
-Revestido Betume	0,1
-Fortemente Incrustado	Até 3
Grés	0,3 - 1
Madeira	0,3 - 1
Galerias em Rocha (não revestidas)	90 - 60
Betão Rugoso	0,5

Apoiados nas experiências de Nikuradse e com base em considerações teóricas, Karman (1881-1963) e Prandtl (1875-1953) apresentaram a expressão matemática (3.14) para tubos rugosos em regimes turbulentos [15].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \times \log_{10} \frac{3,7 \times D}{K} \quad (3.14)$$

A expressão matemática anterior permite determinar o valor do fator de atrito f , onde D representa o diâmetro da conduta. Contudo, para o regime puramente turbulento (elevados valores de Re), o fator de atrito torna-se independente do número de Reynolds, este fato significa, que as forças dissipativas e as tensões tangenciais, devido ao efeito da viscosidade, se tornaram desprezáveis, face ao valor de K .

No entanto, o valor de f pode ser obtido pelo *Diagrama de Moody* que relaciona o número de Reynolds e a rugosidade relativa, como se pode ver na figura 7.

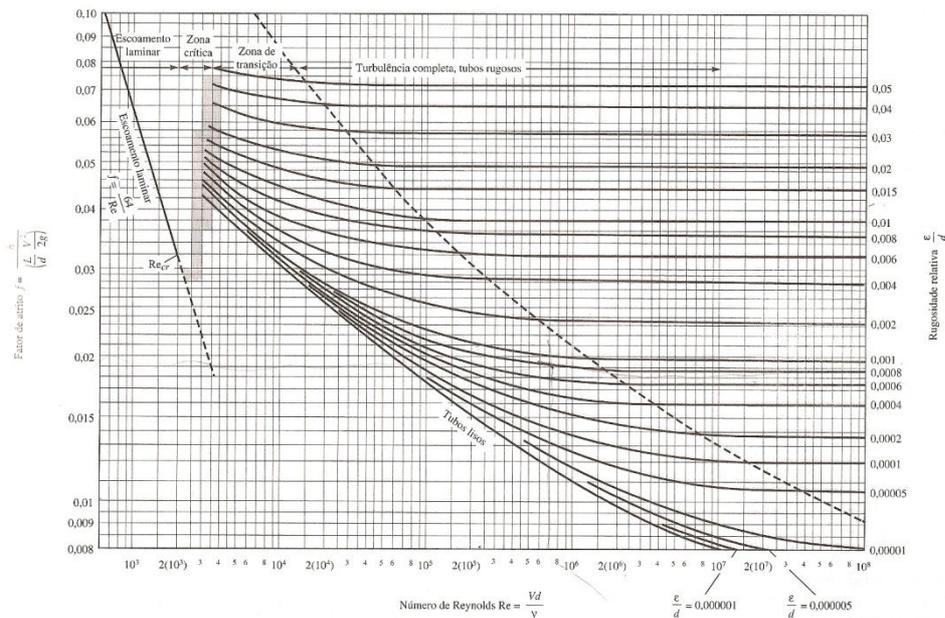


Figura 7: Diagrama de Moody [15]

A expressão geral da perda de carga, dada pela equação de DARCY-WEISBACH, pode ser definida por

$$hc = 2 \times f \times \left(\frac{L}{D}\right) \times \frac{v^2}{g}, \quad (3.15)$$

em que L representa o comprimento da conduta, v a velocidade média do escoamento e g a aceleração da gravidade.

Avaliada a forma geral para determinação das perdas de carga de um escoamento, torna-se agora necessário apresentar um modelo para a caracterização da estação de bombagem.

Nesta dissertação foi considerada uma estação de bombagem e uma estação hidroelétrica a funcionar de forma independente, contudo, existem turbomáquinas que funcionam como bombas e turbinas.

Uma estação de bombagem é um conjunto de bombas, ligadas em paralelo ou em série, que permite elevar a água até um ponto a uma cota mais elevada.

A estação de bombagem possui uma curva característica que relaciona a altura manométrica H com o caudal Q_B , ou seja

$$H = f(Q_B). \quad (3.16)$$

Essa relação pode ser traduzida por meio de uma equação de 2º grau, que expressa qual a altura manométrica para os diferentes caudais.

Na figura 8 é possível observar-se uma curva típica de uma estação de bombagem.

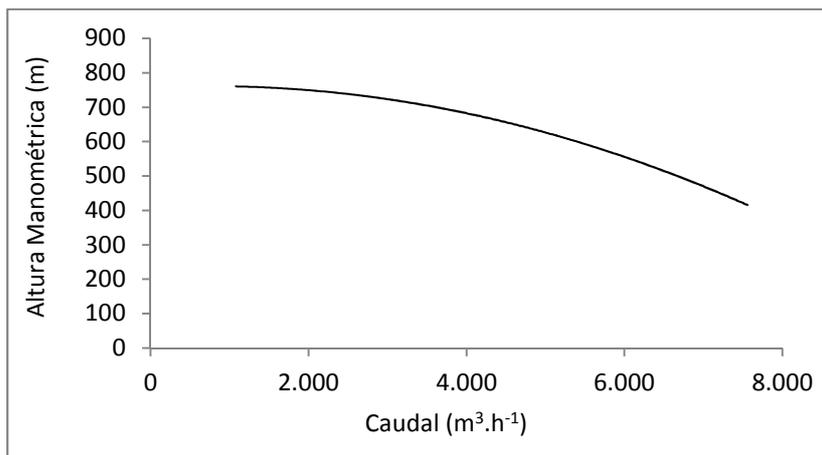


Figura 8: Curva típica de uma estação de bombagem

A potência da bomba para cada hora pode ser calculada como função da densidade da água, do caudal de bombagem, da altura manométrica e da eficiência da bomba η_h , descrita pela equação

$$P_{Bh} \text{ (kW)} = \frac{\rho \times Q_h \times H_h}{\eta_h} \quad (3.17)$$

A eficiência da bomba também pode ser levada em consideração. Na figura 9 é possível observar-se uma curva típica da eficiência de uma estação de bombagem.

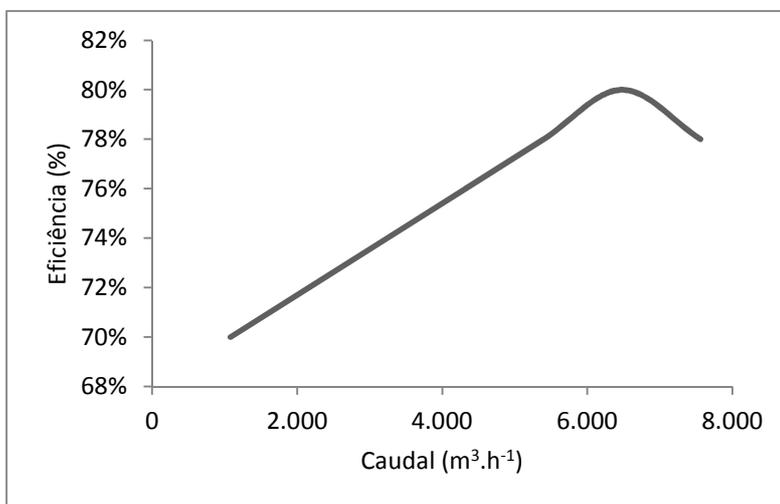


Figura 9: Curva Típica da Eficiência da Estação Bombagem [2]

A potência da bomba para um dia de operação corresponde à expressão matemática

$$P_B = \sum_{h=1}^{24} \frac{\left(\frac{dN_h + |dN_h|}{2} \right) \times A \times H_h \times \rho}{\eta_h}, \quad (3.18)$$

onde se realça que o valor de dN_h é sempre positivo e com um custo parcial de bombagem expresso pela equação matemática

$$C_{PB} = \sum_{h=1}^{24} \left[\frac{(P_{Bh} - P_{Ah}) + |P_{Bh} - P_{Ah}|}{2} \right] \times T_{Eh}, \quad (3.19)$$

onde é subtraída a potência gerada pelo aerogerador P_{Ah} , multiplicada ao custo de eletricidade a cada hora T_{Eh} . De salientar que a potência da bomba nunca pode admitir valores negativos. Esse fato é garantido já que o numerador da equação anterior só admite valores positivos. É um custo total de

$$C_{TB} = P_{Bh} \times T_{Eh}, \quad (3.20)$$

onde não é subtraída a energia produzida pelos aerogeradores.

Na modelação temporal do sistema de abastecimento de água, o incremento temporal corresponde à variação do nível de água do depósito. Ver figura 10.

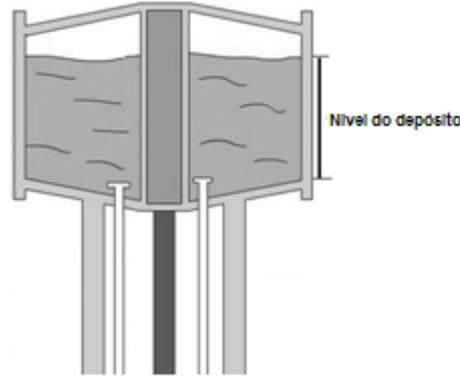


Figura 10: Esquema explicativo do nível de água do depósito

Para determinar o incremento (dN_h) que é possível bombear para o depósito a cada hora é necessário dividir o caudal médio horário pela área do depósito. A equação

$$dN_h = \frac{Q_h}{A}, \quad (3.21)$$

resulta no incremento de água (m) que varia no depósito a cada hora. Este é influenciado pelo consumo das populações, pela água bombeada e pela água turbinada.

A quantidade de água que a estação de bombagem introduz no reservatório é descrita pela expressão

$$dN_{inh} \text{ (m)} = dN_{oti_h} + dN_{Con_h}, \quad (3.22)$$

ou seja, a água que é bombeada é equivalente ao incremento de otimização dN_{oti_h} adicionado à quantidade de água que é consumida pela população dN_{Con_h} .

O incremento de otimização dN_{oti_h} é uma variável de otimização, que é ajustável de forma a minimizar a função objetivo.

O incremento calculado na expressão matemática (3.22) pode agora ser convertido para caudal através da equação (3.23).

$$QB_h(m^3 \cdot h^{-1}) = dN_{in_h} \times A, \quad (3.23)$$

A quantidade de água que entra no depósito QB_h necessita de ser avaliada, de forma a garantir que nenhuma lei hidráulica é infringida. Para isso é necessário conhecer a curva teórica que representa o comportamento da estação de bombagem, onde o caudal e a altura manométrica são relacionados. A figura 8 representa uma curva teórica típica de uma estação de bombagem.

De seguida é necessário localizar os pontos que caracterizam o comportamento da estação de bombagem. Através da equação (3.16) e (3.18) é possível traçar a curva que representa o caso de estudo.

Sobreposta a curva teórica com os pontos que representam o comportamento do caso de estudo é possível avaliar o comportamento da estação de bombagem. A figura 11 mostra um exemplo de uma curva comportamental de uma estação de bombagem.

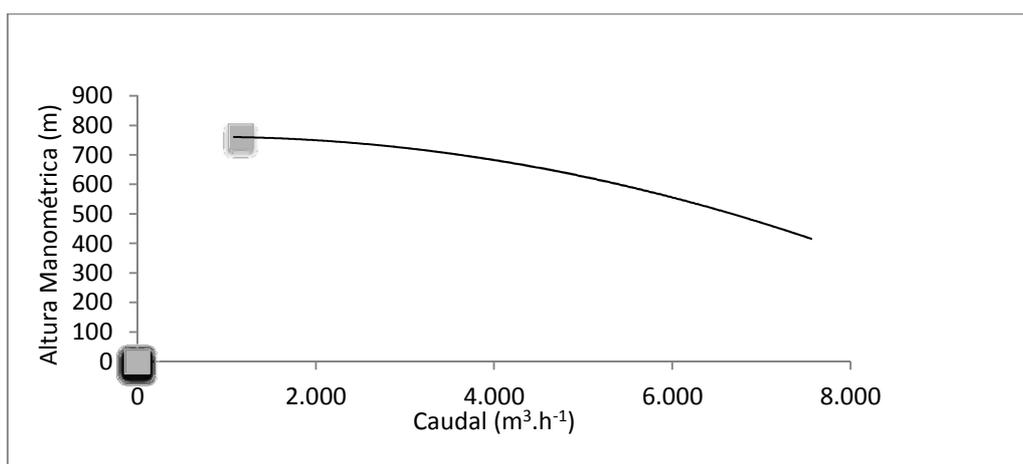


Figura 11: Avaliação do comportamento de uma estação de bombagem

Observa-se na figura 11 que o ponto de funcionamento se encontra dentro da curva teórica. Os pontos de funcionamento que se encontram na origem dos eixos significam que a estação de bombagem não se encontra em funcionamento.

Caraterizada a estação de bombagem é necessário avaliar as perdas de carga associadas ao processo de elevação de água. Para isso é necessário recorrer às equações que traduzem as perdas de carga num determinado escoamento.

A velocidade do escoamento é descrita pela equação

$$v = \frac{Q}{A}, \quad (3.24)$$

e relaciona o caudal de água com a área da seção da conduta.

A energia mínima que é necessária vencer para conseguir elevar a água até ao local pretendido é enunciada na seguinte equação

$$E_{\min} = \Delta Z + hc , \quad (3.25)$$

onde a energia mínima é função da perda de carga em linha hc adicionada à diferença de cotas ΔZ .

A estação de bombagem necessita de atingir uma altura manométrica sempre superior à altura mínima, obrigando assim, o sistema a vencer as perdas de carga contínuas e a diferença de cotas.

Para efeitos de cálculo, converteu-se o caudal máximo em incremento máximo que a bomba tem capacidade de bombear a cada hora. Essa expressão é descrita pela equação (3.26).

$$dN_{B \text{ máx}_h} = \frac{Q_{B \text{ máx}_h}}{A_d} . \quad (3.26)$$

Para a determinação do incremento máximo da estação hidroelétrica é realizado um raciocínio semelhante, como mostra a equação

$$dN_{T \text{ máx}_h} = \frac{Q_{T \text{ máx}_h}}{A_d} . \quad (3.27)$$

A fração de tempo que a estação de bombagem funciona em cada hora é descrita pela equação

$$Ft_{B_h} (\%) = \frac{dN_h}{dN_{B \text{ máx}_h}} , \quad (3.28)$$

onde a equação resulta do rácio da quantidade de água que é bombeada a cada hora para o reservatório com a quantidade máxima que a estação tem capacidade de bombear. Esta fração de tempo é apresentada sob a forma de percentagem.

A curva da estação hidroelétrica traduz a relação entre o caudal e a respetiva altura manométrica, (figura 12).

Através de uma equação de 2º grau é possível relacionar ambas as variáveis, identificando qual a altura manométrica correspondente a cada caudal.

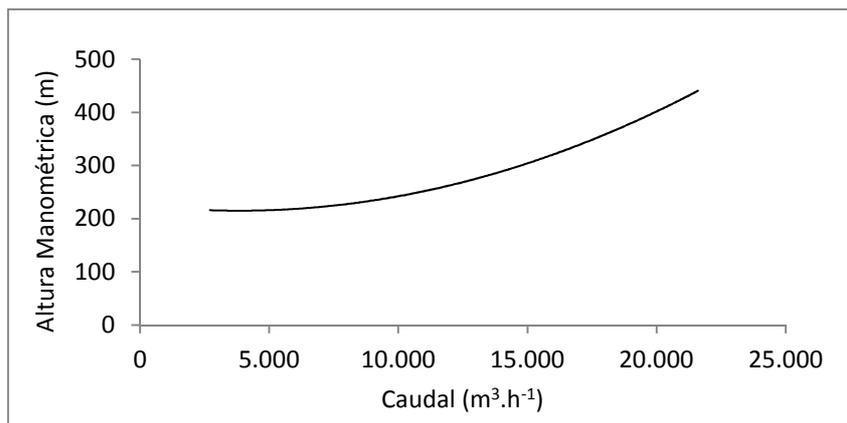


Figura 12: Curva típica de uma estação hidroelétrica [2]

A potência da estação hidroelétrica em cada hora é calculada pela expressão

$$P_{T_h} \text{ (kW)} = \rho \times Q_h \times H_h \times \eta_h, \quad (3.29)$$

relacionando a densidade do fluido, o caudal a cada hora, a respectiva altura manométrica e a eficiência da turbina correspondente.

A eficiência da turbina é descrita pela figura 13.

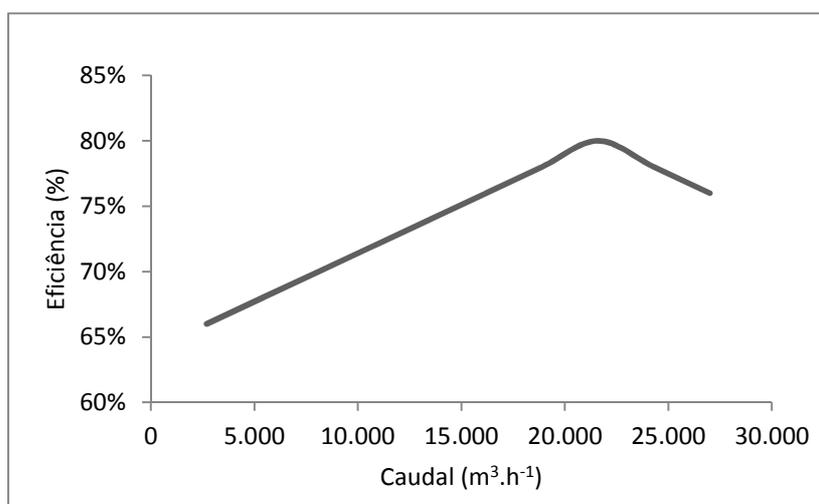


Figura 13: Curva de eficiência de uma estação hidroelétrica [2]

A potência da turbina para um dia de funcionamento é expressa pela equação

$$P_T = \sum_{h=1}^{24} \left(\frac{dN_h - |dN_h|}{2} \right) \times A \times H_h \times \rho \times \eta_T, \quad (3.30)$$

com um benefício total evidenciado pela expressão matemática

$$C_{T_T} = \sum_{h=1}^{24} P_{T_h} \times T_{E_h}. \quad (3.31)$$

A quantidade de água que é turbinada é descrita pela expressão

$$dN_{out_h}(m) = dN_{oti_h} - dN_{Con_h} , \quad (3.32)$$

e tem em linha de conta, o incremento de otimização e a quantidade de água consumida pela comunidade. O caudal de água que é aproveitada na estação hidroelétrica a cada hora é expressa pela equação

$$Q_{T_h}(m^3 \cdot h^{-1}) = dN_{out_h} \times A . \quad (3.33)$$

No seguimento da determinação do caudal que é aproveitado pela estação hidroelétrica torna-se necessário avaliar o comportamento das turbinas. A metodologia de avaliação da estação hidroelétrica é a mesma que a estação de bombagem, como se observa na figura 14.

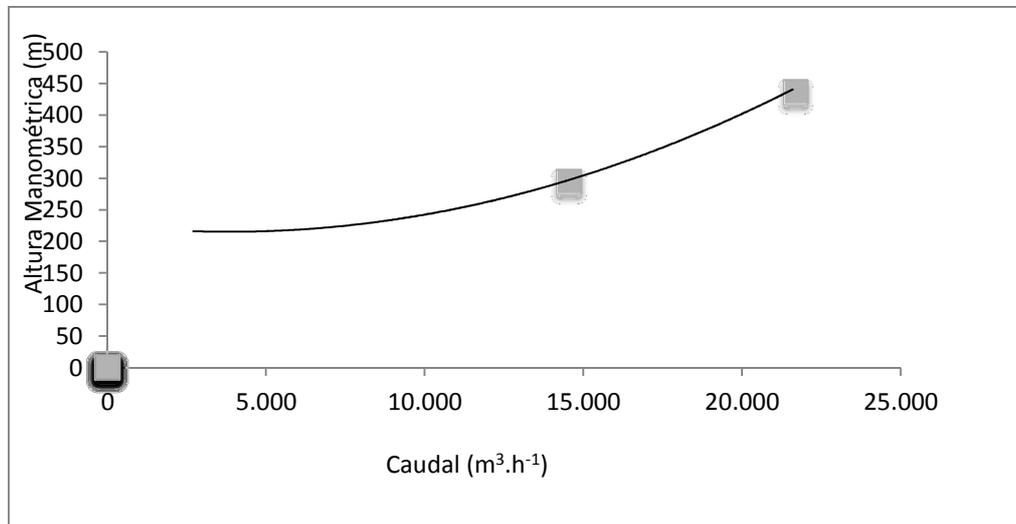


Figura 14: Avaliação do comportamento de uma estação hidroelétrica

Na figura anterior observa-se que os pontos que representam o comportamento da estação hidroelétrica num dado instante caem dentro da curva teórica.

Avaliado o comportamento das turbinas é necessário determinar o tempo que a estação hidroelétrica se encontrou em funcionamento. A fração de tempo é descrita pela equação

$$Ft_{T_h} (\%) = \frac{dN_h}{dN_{T \text{ máx}_h}} , \quad (3.34)$$

e resulta do quociente entre a quantidade de água que é descarregada para a estação hidroelétrica a cada hora e o valor máximo que a estação tem capacidade de processar por hora.

Os aerogeradores têm capacidade de aproveitar energia proveniente do vento e converte-la em energia elétrica. A potência varia com as características de cada aerogerador e também com a velocidade do vento. Normalmente é definida uma curva de funcionamento do aerogerador que caracteriza o seu funcionamento.

A potência aproveitada varia com a intensidade do vento, quando o vento não tem uma elevada intensidade, a produção de eletricidade pode chegar a ser nula. Mas com o aumento da intensidade, a potência do aerogerador aumenta até estabilizar. A partir de uma determinada velocidade de vento e por razões de segurança, o aerogerador não produz energia.

A potência do aerogerador pelo vento pode ser determinada pela equação

$$P_{A_h} = \frac{\rho \times v_h^3 \times A}{2}, \quad (3.35)$$

onde se observa que a varia linearmente com a massa volúmica, cresce ao cubo com a velocidade do vento e é proporcional à área do rotor [18].

O aproveitamento económico é expresso por

$$C_A = \sum_{h=1}^{24} P_{A_h} \times T_{E_h}. \quad (3.36)$$

A velocidade do vento que se faz sentir ao longo do dia pode ser expressa numa curva de ventos, como mostra a figura 15.

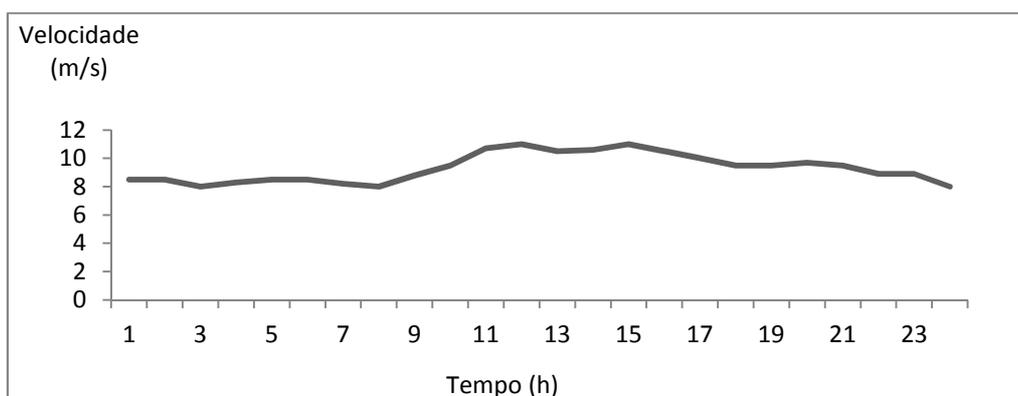


Figura 15: Exemplo de uma curva típica de velocidade do vento

Observa-se na figura 15 que a intensidade do vento varia ao longo do dia. Contudo, quando se faz referência a uma curva de ventos é importante definir a época do ano e o local a que se refere. Esta informação é importante pois existe uma variabilidade muito grande das características do vento com a época do ano e com o local a que se refere. Para efeitos de modelação é necessário ir à curva que representa a intensidade do vento ao longo do dia e definir uma velocidade para cada hora. Essa formulação resulta numa potência produzida pelo aerogerador que varia ao longo do dia.

A variação da potência produzida pelo aerogerador tem implicação no balanço financeiro a que o sistema fica sujeito. Importa por isso definir as características a que os preços de energia elétrica estão sujeitos.

A tarifa elétrica tem que ser caracterizada para que o modelo matemático funcione corretamente. É necessária informação relativa ao preço de compra de eletricidade, assim como a tarifa a que a energia é vendida. Essa tarifa tem que ser sob a base horária para o período de um dia.

3.4 Formulação da Otimização de SAA

A minimização de custos é a principal preocupação da exploração dos SAA. No seguimento da modelação matemática compete agora definir a função objetivo a minimizar. A expressão matemática

$$f = \sum_{h=1}^{24} \left[\frac{C_{Bh}}{\eta_B} \left(\frac{dN_h + |dN_h|}{2} \right) + C_{Th} \eta_T \left(\frac{dN_h - |dN_h|}{2} \right) \right] [2], \quad (3.37)$$

será referência para minimizar os custos dos SAA sem o recurso a energias renováveis. Quando a variação de água no reservatório é positiva, situação de bombagem, o termo relacionado com o funcionamento da turbina é zero. A situação contrária é igualmente verificada.

No entanto, quando é considerada a utilização de energias renováveis a função objetivo a minimizar é

$$f = \sum_{h=1}^{24} \left\{ \left[\frac{|(N_{Vh}/dN_h) - 1| - ((N_{Vh}/dN_h) - 1)}{2} \right] \frac{C_{Bh}}{\eta_B} \times \left(\frac{dN_h + |dN_h|}{2} \right) + C_{Th} \eta_T \left(\frac{dN_h - |dN_h|}{2} \right) \right\} [2], \quad (3.38)$$

onde N_v representa a água que é introduzida no reservatório com recurso a energia renovável. A função objetivo (3.38) mostra que o custo de eletricidade para cada hora não é o mesmo que a tarifa, variando de acordo com a disponibilidade do vento. É assumido que o custo de energia proveniente da eólica é zero. Se durante uma hora a energia do vento for suficiente para satisfazer as necessidades energéticas da estação de bombagem, o custo de exploração para essa hora é zero.

A aplicação das funções objetivo (3.37) e (3.38) possuem determinadas limitações que necessitam de ser consideradas.

As restrições têm o objetivo de garantir que nenhuma lei da hidráulica seja violada, e que o abastecimento de água à população seja garantido. Desse modo é seja necessário ter em consideração as seguinte condicionantes:

- A altura de água no depósito não pode ultrapassar a altura máxima, de forma a garantir que o depósito não chegue ao seu limite. Essa restrição é definida pela equação matemática

$$N_h < N_{h\text{máx}}, \quad (3.39)$$

Onde $N_{h\text{máx}}$ representa o nível máximo no depósito.

- A altura de água no depósito tem que ser superior à altura mínima. Esta restrição tem como principal objetivo garantir o abastecimento de água à população e é definida pela expressão matemática

$$N_h > N_{h_{\min}}, \quad (3.40)$$

Onde $N_{h_{\min}}$ representa o nível mínimo no depósito.

- A energia para elevar a água até ao depósito tem que ser superior a soma das perdas de carga com a diferença de cotas. Essa limitação é descrita pela equação matemática

$$E_{\min} \geq \Delta Z + hc. \quad (3.41)$$

- O caudal máximo não pode ser excedido. As estações de bombagem e hidroelétricas, assim como as condutas estão limitadas. Esta restrição serve para garantir que a quantidade de água que escoar nas condutas não ultrapassa o limite máximo. A limitação para a estação de bombagem é descrita pela expressão matemática

$$Q_{B_h} \leq Q_{B_{\max_h}}, \quad (3.42)$$

e para a estação hidroelétrica a expressão matemática é

$$Q_{T_h} \leq Q_{T_{\max_h}}. \quad (3.43)$$

4 CASO DE ESTUDO

Neste capítulo, a metodologia de otimização é validada através de casos de estudo. Deste modo, apresentam-se os resultados dos diferentes casos estudados sob a forma de balanços económicos e energéticos. É também realizado um estudo de sensibilidade a diversas alterações às características do sistema.

4.1 Introdução

Neste trabalho, será analisado um sistema de fins-múltiplos que se encontra em funcionamento na ilha da Madeira. O sistema foi desenvolvido para abastecer água à população do Funchal, Câmara de Lobos e Santa Quitéria, assim como para regularizar os caudais de rega e produzir energia elétrica.

O sistema reproduzido é composto por dois reservatórios que se encontram com uma diferença de cotas total de 455 m. Para este caso de estudo foi considerada uma estação de bombagem e uma estação hidroelétrica a funcionar de forma independente. A estação de bombagem eleva a água e a estação hidroelétrica aproveita toda a sua energia potencial, aproximadamente 40.000 m³ por dia [2]. É adotada uma tarifa variável que permite obter benefícios financeiros, bem como o recurso a energias renováveis de origem eólica. A validação da metodologia de otimização é validada aplicando o modelo matemático a este caso de estudo.

4.2 Caracterização do problema

4.2.1 Reservatórios

O sistema de abastecimento de água considerado é composto por dois reservatórios. Para que a energia potencial no momento da descarga de água seja aproveitada ao máximo é fundamental que o gradiente de cotas seja considerável.

Para o reservatório que se encontra em Socorridos (cota 85 m) considerou-se para efeitos de modelação como tendo capacidade ilimitada. O depósito do Covão (cota 540 m) tem a forma cilíndrica e possui uma capacidade de 40.000 m³, uma altura máxima de 7 m, altura mínima de 0,5 m e com um diâmetro de 85 m. As características do reservatório estão listadas na tabela 3.

Tabela 3: Características do reservatório do Covão

Depósito Covão	
Cota (m)	540
Altura Água inicial (m)	0,5
Altura Água mínima (m)	0,5
Altura Água máxima (m)	7
Diâmetro (m)	85
Volume (m ³)	40.000
Área Base (m ²)	5.714

4.2.2 Conduitas

Os depósitos estão ligados por 5 troços de conduitas (AB, BC, CD, DE e EF). Os troços têm diferentes diâmetros e comprimentos perfazendo um total de 1.266,25 m. O material da conduta AB é aço, enquanto todas as outras são de betão e cimento. O material que constitui as conduitas tem implicação nas perdas de carga em linha. A figura 16 mostra o esquema das conduitas que fazem a ligação entre os dois depósitos.

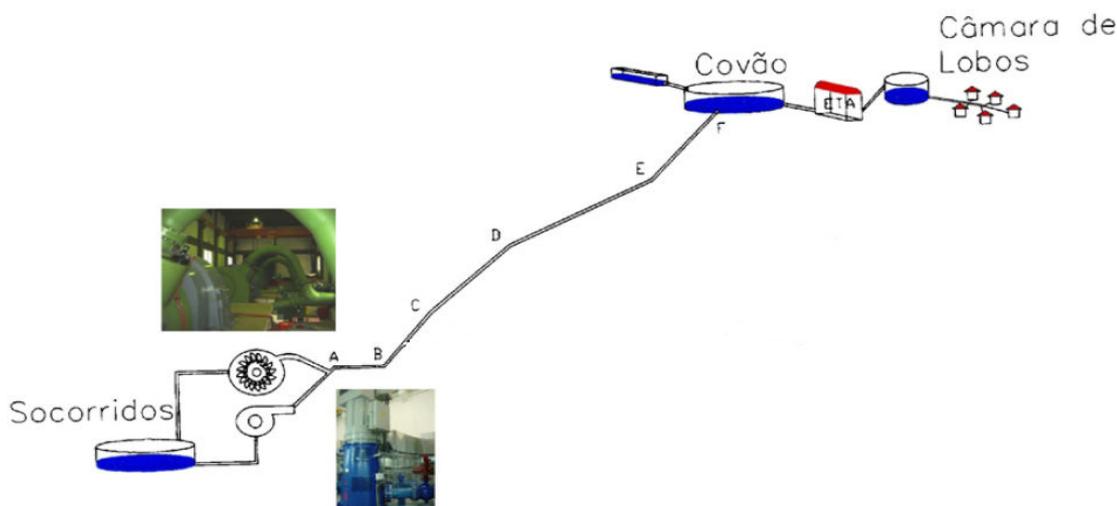


Figura 16: Esquema ilustrativo das conduitas [2]

As características das conduitas encontram-se na tabela 4. Nesta tabela, que resume as principais características dos troços do sistema, observa-se que a rugosidade equivalente está diretamente relacionada com o tipo de material.

Tabela 4: Características das Conduitas

Conduto	Material	Rugosidade Equivalente K ou ε (mm)	Comprimento L (m)	Diâmetro D (m)	Área A (m ²)
AB	Aço	0,15	81,25	1	0,785
BC	Betão Rugoso	0,5	132	1,2	1,131
CD	Betão Rugoso	0,5	303	1,3	1,327
DE	Betão Rugoso	0,5	440	1,4	1,539
EF	Betão Rugoso	0,5	310	1,5	1,767

4.2.3 Estação de bombagem

A estação de bombagem está construída a uma cota de 85 m e é responsável por elevar a água desde o depósito de Socorridos até ao reservatório do Covão. Para o caso de estudo analisado, a estação de bombagem é constituída por 3 bombas ligadas em paralelo com uma potência unitária de 3.750 kW. A estação de bombagem segue o comportamento descrito na figura 17, que relaciona o caudal e a altura manométrica.

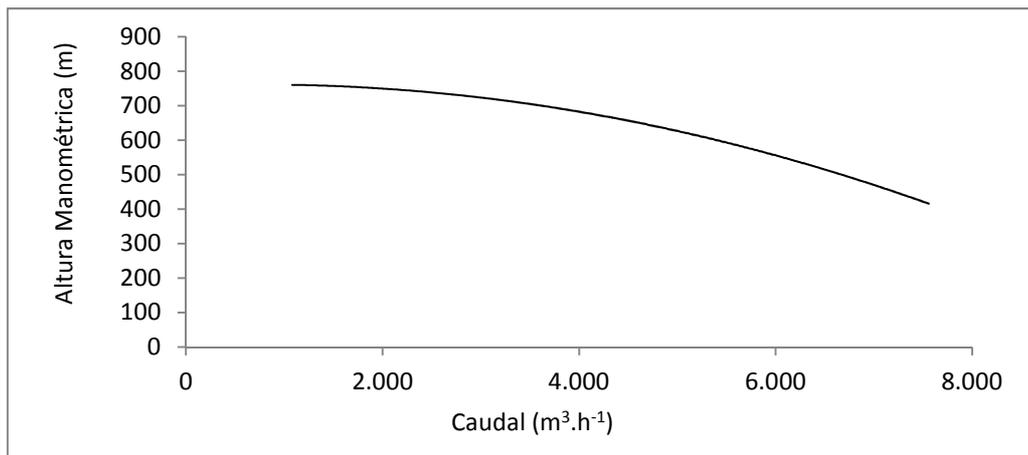


Figura 17: Curva característica da estação de bombagem

A altura manométrica da estação de bombagem é calculada para cada hora e tem um comportamento descrito pela equação (4.1), como se pode ver na figura 17.

$$H_{Bh} \text{ (m)} = -7 \times 10^{-6} \times Q_{Bh}^2 + 0,0111 \times Q_{Bh} + 757,14 \quad (4.1)$$

Importa salientar que a potência da estação de bombagem tem que ser sempre superior à energia mínima, de forma a conseguir vencer as perdas de carga do sistema e as diferenças topográficas.

A potência necessária para deslocar a massa de água, do ponto mais baixo até ao depósito depende do caudal de água, da densidade, da altura manométrica a vencer e da eficiência da estação de bombagem, como é descrito na equação (3.18)

Para a formulação matemática da potência da estação de bombagem parametrizou-se a curva presente na figura 18. Pois tratando-se de uma situação não linear é necessário descrever a variação da potência necessária para elevar água com os diferentes caudais.

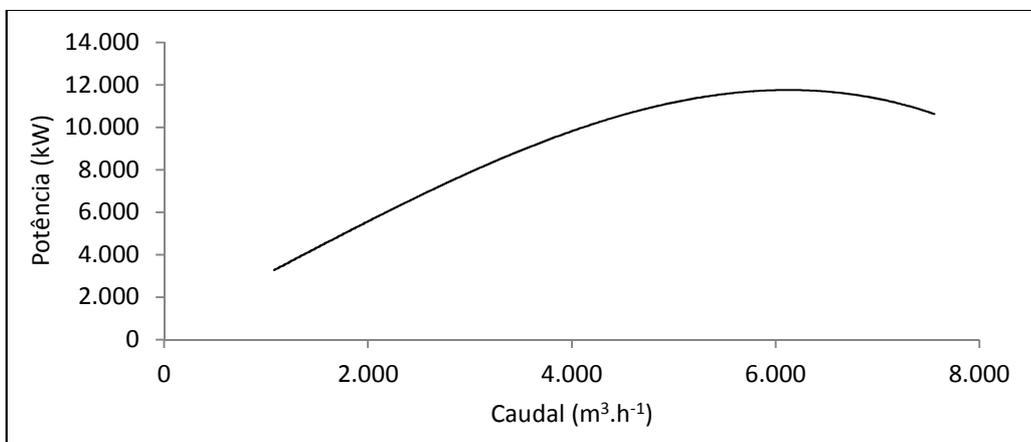


Figura 18: Equação da potência da estação de bombagem

Observa-se uma relação entre a potência necessária para elevar a água e o caudal que é bombeado. Através da equação de 3º grau

$$P_{B_h}(\text{kW}) = -3 \times 10^{-8} \times Q_{B_h}^3 + 0,0001 \times Q_{B_h}^2 + 2,3978 \times Q_{B_h} + 597,14, \quad (4.2)$$

é possível descrever matematicamente o comportamento da estação de bombagem.

O valor de eficiência da bomba varia com o caudal de água, como é descrito na figura 19. O valor de eficiência máxima da estação de bombagem localiza-se para valores de caudal da ordem dos 6.500 m³.h⁻¹, enquanto o valor mínimo de eficiência, aproximadamente 70 %, para caudais de 1.000 m³.h⁻¹. A eficiência da estação de bombagem é traduzida pela equação

$$\eta_B = -9 \times 10^{-13} \times Q_B^3 + 9 \times 10^{-9} \times Q_B^2 - 1 \times 10^{-5} \times Q_B + 0,7029. \quad (4.3)$$

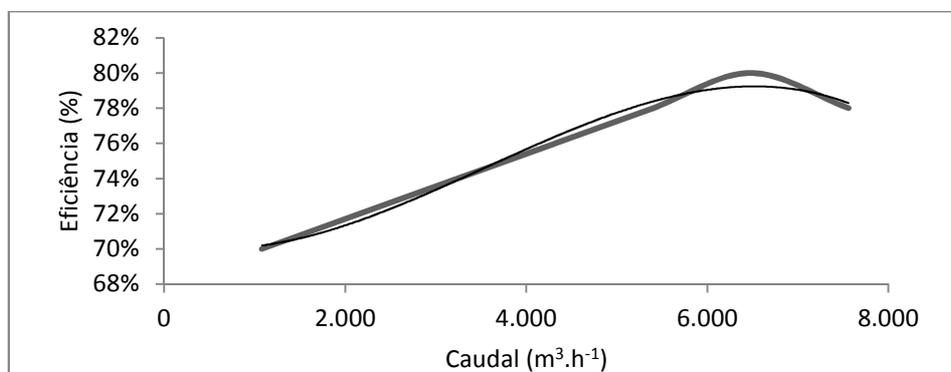


Figura 19: Eficiência da estação de bombagem

A tabela 5 resume as características mais importantes da estação de bombagem. O incremento de água no depósito é calculado através da equação (3.21); a altura manométrica e o caudal são característicos da estação de bombagem; a energia necessária é calculada pela equação (4.2) e a respetiva eficiência pela equação (4.3). A energia mínima para elevar a água até ao depósito é descrita pela equação (4.6), onde são levadas em consideração as perdas de carga ao longo do sistema.

Tabela 5: Características da estação bombagem [2]

Caraterísticas Estação Bombagem						
Incremento Água no Depósito (m)	Altura Manométrica (m)	Caudal (m³.s⁻¹)	Caudal (m³.h⁻¹)	Energia Necessária (kW)	Eficiência (%)	Energia Mínima (m)
0,19	770	0,1	1.080	3.234	70	455
0,38	740	0,2	2.160	6.043	72	457
0,57	700	0,3	3.240	8.343	74	459
0,76	670	0,4	4.320	10.367	76	462
0,95	600	0,5	5.400	11.308	78	467
1,13	540	0,6	6.480	11.907	80	472
1,32	400	0,7	7.560	10.554	78	478

4.2.4 Perdas de carga

Foram quantificadas as perdas de carga do sistema. Para isso, analisaram-se detalhadamente os diferentes caudais, com o objetivo de parametrizar uma equação que relacione as perdas de carga com o respetivo caudal. O objetivo é determinar a energia mínima que a estação de bombagem tem que vencer para conseguir elevar a água até ao reservatório. As condutas que constituem o sistema possuem características diferentes entre si, sendo necessário realizar o cálculo individualmente. Considerações tiveram que ser levadas em linha de conta, a tabela 6 mostra isso mesmo.

Tabela 6: Propriedades utilizadas para o cálculo perdas carga

Cálculo das perdas de carga	
Aceleração gravidade (m.s ⁻²)	9,8
μ - Viscosidade (Pa.s)	0,001
ρ - Densidade (Kg.m ⁻³)	1000
Velocidade média (m.s ⁻¹)	0,25
Cota inferior (m)	85
Cota superior (m)	540

A velocidade do escoamento é descrita pela equação (4.4) que relaciona o caudal com a área da conduta.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (4.4)$$

Sendo hc a perda de carga em linha, a equação (4.5) indica qual a energia mínima que é necessário vencer para conseguir elevar a água até ao local pretendido. ΔZ é a diferença de cotas entre as diferentes condutas e como as condutas têm todas características diferentes, o cálculo teve que ser feito de forma individual

$$E_{\min} = \Delta Z + hc \quad (4.5)$$

A rugosidade relativa E_{rel} é calculada tendo em consideração a expressão matemática (3.13), que relaciona a rugosidade equivalente (tabela 2) com o diâmetro da tubagem.

O número de Reynolds Re e o fator de rugosidade é obtido pelas expressões matemáticas (3.12) e (3.14) respetivamente. O valor da perda de carga hc resulta da aplicação da equação de DARCY-WEISBACH (3.15).

No cálculo das perdas de carga os troços das condutas foram seccionados. O troço AB , é a conduta que liga o ponto A ao ponto B .

Foram criadas tabelas que resumem os valores necessários para as perdas de carga. Contudo, importa salientar que o cálculo foi realizado para diferentes caudais, daí que a tabela 7 e 8 diga respeito ao cálculo das perdas de carga para o caudal de 1080 m³/h; as tabelas 9 e 10 para o caudal de 2160 m³/h; as tabelas 11 e 12 para o caudal de 3240 m³/h; as tabelas 13 e 14 para o caudal de 4320 m³/h; as tabelas 15 e 16 para o caudal de 5400 m³/h; as tabelas 16 e 17 para o caudal de 6480 m³/h e finalmente as tabelas 19 e 20 para o caudal de 7560 m³/h.

As tabelas 8, 10, 12, 14, 16, 18 e 20, dizem respeito à energia mínima que é necessário vencer nos diferentes troços. Esses valores são a soma da perda de carga em linha hc , com a diferença de cotas a que se encontram as tubagens ΔZ .

Tabela 7: Perda de Carga para o caudal de 1080 m³/h

	ΔZ (m)	Rugosidade Manning K ou ε (mm)	Rugosidade Relativa E_{rel}	v (m/s)	Re	Fator rugosidade (f)	Perda Carga hc
AB	15	0,00015	0,0002	0,382	3,82E+05	0,013	0,031
BC	100	0,0005	0,0004	0,265	3,18E+05	0,016	0,025
CD	100	0,0005	0,0004	0,226	2,94E+05	0,016	0,038
DE	100	0,0005	0,0004	0,195	2,73E+05	0,016	0,038
EF	140	0,0005	0,0003	0,170	2,55E+05	0,015	0,019

Tabela 8: Altura mínima para o caudal de 1080 m³/h

Energia mínima (m)	
AB	15,03
BC	100,03
CD	100,04
DE	100,04
EF	140,02
Total	455,2

Tabela 9: Perda de Carga para o caudal de 2160 m³/h

	ΔZ (m)	Rugosidade Manning K ou ε (mm)	Rugosidade Relativa E_{rel}	v (m/s)	Re	Fator rugosidade (f)	Perda Carga hc
AB	15	0,00015	0,00015	0,764	7,64E+05	0,013	0,125
BC	100	0,0005	0,00042	0,531	6,37E+05	0,016	0,101
CD	100	0,0005	0,00038	0,452	5,88E+05	0,016	0,153
DE	100	0,0005	0,00036	0,390	5,46E+05	0,016	0,151
EF	140	0,0005	0,00033	0,340	5,09E+05	0,015	0,074

Tabela 10: Altura mínima para o caudal de 2160 m³/h

Energia mínima (m)	
AB	15,1
BC	100,1
CD	100,2
DE	100,2
EF	140,1
Total	455,6

Tabela 11: Perda de Carga para o caudal de 3240 m³/h

	ΔZ (m)	Rugosidade Manning K ou ε (mm)	Rugosidade Relativa E_{rel}	v (m/s)	Re	Fator rugosidade (f)	Perda Carga hc
AB	15	0,00015	0,00015	1,146	1,15E+06	0,013	0,282
BC	100	0,0005	0,00042	0,796	9,55E+05	0,016	0,228
CD	100	0,0005	0,00038	0,678	8,81E+05	0,016	0,345
DE	100	0,0005	0,00036	0,585	8,19E+05	0,016	0,340
EF	140	0,0005	0,00033	0,509	7,64E+05	0,015	0,167

Tabela 12: Altura mínima para o caudal de 3240 m³/h

Energia mínima (m)	
AB	15,3
BC	100,2
CD	100,3
DE	100,3
EF	140,2
Total	456,4

Tabela 13: Perda de Carga para o caudal de 4320 m³/h

	ΔZ (m)	Rugosidade Manning K ou ε (mm)	Rugosidade Relativa E_{rel}	v (m/s)	Re	Fator rugosidade (f)	Perda Carga hc
AB	15	0,00015	0,00015	1,528	1,53E+06	0,013	0,502
BC	100	0,0005	0,00042	1,061	1,27E+06	0,016	0,405
CD	100	0,0005	0,00038	0,904	1,18E+06	0,016	0,613
DE	100	0,0005	0,00036	0,780	1,09E+06	0,016	0,604
EF	140	0,0005	0,00033	0,679	1,02E+06	0,015	0,297

Tabela 14: Altura mínima para o caudal de 4320 m³/h

Energia mínima (m)	
AB	15,5
BC	100,4
CD	100,6
DE	100,6
EF	140,3
Total	457,4

Tabela 15: Perda de Carga para o caudal de 5400 m³/h

	ΔZ (m)	Rugosidade Manning K ou ε (mm)	Rugosidade Relativa E_{rel}	v (m/s)	Re	Fator rugosidade (f)	Perda Carga hc
AB	15	0,00015	0,00015	1,910	1,91E+06	0,013	0,784
BC	100	0,0005	0,00042	1,326	1,59E+06	0,016	0,633
CD	100	0,0005	0,00038	1,130	1,47E+06	0,016	0,957
DE	100	0,0005	0,00036	0,974	1,36E+06	0,016	0,944
EF	140	0,0005	0,00033	0,849	1,27E+06	0,015	0,464

Tabela 16: Altura mínima para o caudal de 5400 m³/h

Energia mínima (m)	
AB	15,8
BC	100,6
CD	101,0
DE	100,9
EF	140,5
Total	458,8

Tabela 17: Perda de Carga para o caudal de 6480 m³/h

	ΔZ (m)	Rugosidade Manning K ou ε (mm)	Rugosidade Relativa E_{rel}	v (m/s)	Re	Fator rugosidade (f)	Perda Carga hc
AB	15	0,00015	0,00015	2,292	2,29E+06	0,013	1,129
BC	100	0,0005	0,00042	1,592	1,91E+06	0,016	0,912
CD	100	0,0005	0,00038	1,356	1,76E+06	0,016	1,378
DE	100	0,0005	0,00036	1,169	1,64E+06	0,016	1,360
EF	140	0,0005	0,00033	1,019	1,53E+06	0,015	0,669

Tabela 18: Altura mínima para o caudal de 6480 m³/h

Energia mínima (m)	
AB	16,1
BC	100,9
CD	101,4
DE	101,4
EF	140,7
Total	460,4

Tabela 19: Perda de Carga para o caudal de 7560 m³/h

	ΔZ (m)	Rugosidade Manning K ou ε (mm)	Rugosidade Relativa E_{rel}	v (m/s)	Re	Fator rugosidade (f)	Perda Carga hc
AB	15	0,00015	0,00015	2,674	2,67E+06	0,013	1,536
BC	100	0,0005	0,00042	1,857	2,23E+06	0,016	1,241
CD	100	0,0005	0,00038	1,582	2,06E+06	0,016	1,876
DE	100	0,0005	0,00036	1,364	1,91E+06	0,016	1,851
EF	140	0,0005	0,00033	1,188	1,78E+06	0,015	0,910

Tabela 20: Altura mínima para o caudal de 7560 m³/h

Energia mínima (m)	
AB	16,5
BC	101,2
CD	101,9
DE	101,9
EF	140,9
Total	462,4

Relacionando os diferentes caudais com as respectivas alturas mínimas é possível traçar uma curva que relaciona ambas as variáveis, como se pode ver na figura 20.

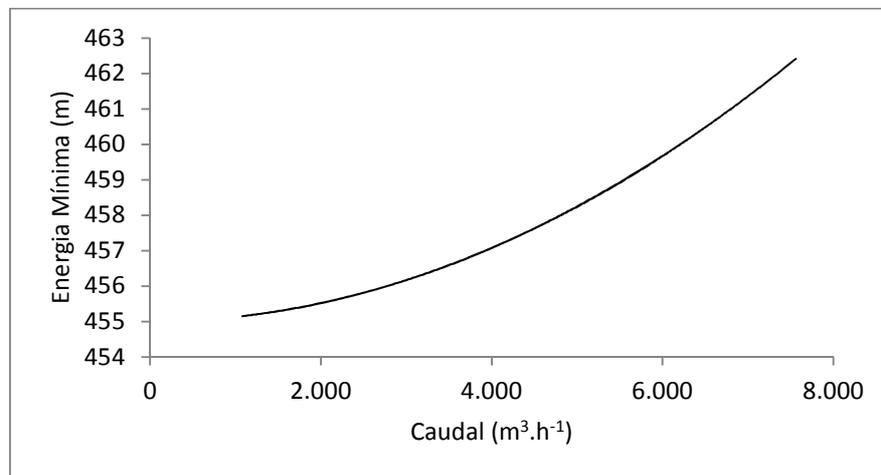


Figura 20: Energia mínima da estação de bombagem

A energia mínima que a estação de bombagem tem que vencer para colocar água no depósito do Covão tem em consideração as perdas de carga em linha ao longo da tubagem e a diferença de cotas. A equação que traduz a relação ilustrada na figura 20 é

$$E_{\min_h} (m) = 1 \times 10^{-7} \times Q_{B_h}^2 - 5 \times 10^{-17} \times Q_{B_h} + 455. \quad (4.6)$$

4.2.5 Estação Hidroelétrica

A estação hidroelétrica em estudo tem um comportamento descrito pela figura 21. A curva caracteriza-se por relacionar a altura manométrica com o caudal e é descrita pela seguinte equação

$$H_{T_h} (m) = 7 \times 10^{-7} \times Q_{T_h}^2 - 0,0055 \times Q_{T_h} + 225,62. \quad (4.7)$$

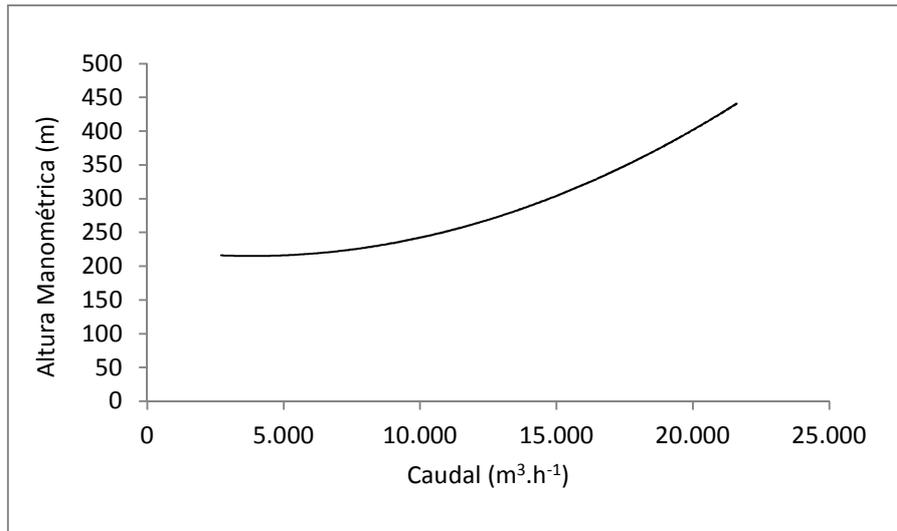


Figura 21: Curva caraterística da estação de hidroelétrica

A potência da estação hidroelétrica segue o mesmo raciocínio, onde foi parametrizada uma curva que relaciona a potência das turbinas com o caudal de água que é descarregado. Essa relação é observada na figura 22 e descrita pela equação

$$P_{T_h}(kW) = 5 \times 10^{-5} \times Q_{T_h}^2 - 0,2763 \times Q_{T_h} + 1884,6. \quad (4.8)$$

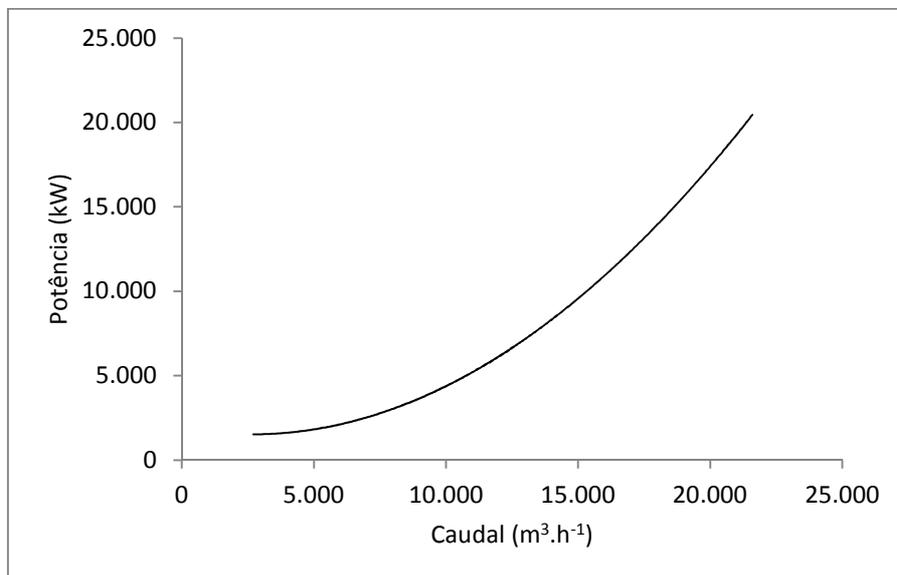


Figura 22: Equação da potência da estação hidroelétrica

O valor de eficiência máxima da estação hidroelétrica é de 80 % para um caudal de aproximadamente 22.000 m³.h⁻¹. Essa eficiência vai diminuindo à medida que os valores de caudal se vão afastando do valor máximo, como se observa na figura 23.

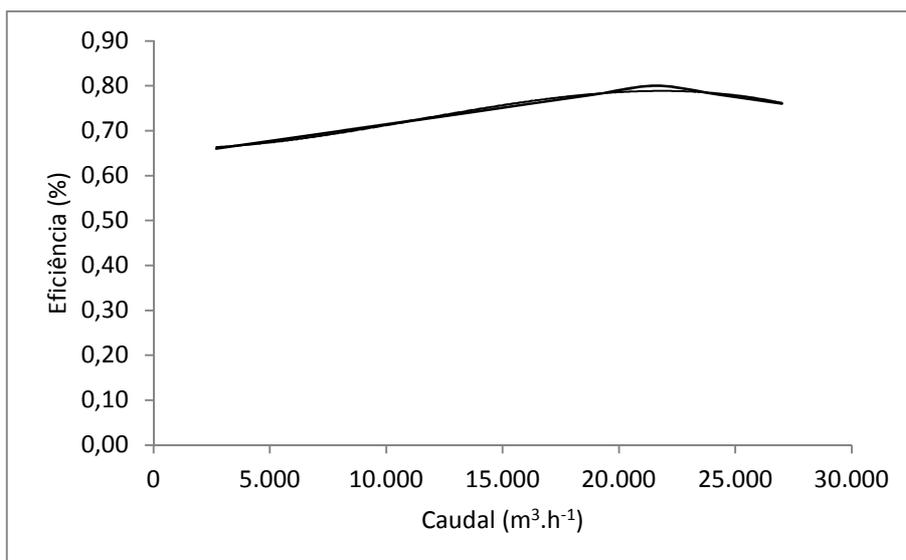


Figura 23: Eficiência da Estação Hidroelétrica

A eficiência da estação hidroelétrica traduz-se por

$$\eta_T = -3 \times 10^{-14} \times Q_T^3 + 9 \times 10^2 \times Q_T^2 - 2 \times 10^{-6} \times Q_T + 0,6613 \quad (4.9)$$

A tabela 21 resume as características mais importantes da estação hidroelétrica. A energia produzida é calculada através da equação (4.8) e a respetiva eficiência pela equação (4.9).

Tabela 21: Características da estação hidroelétrica [2]

Caraterísticas Estação Hidroelétrica					
Incremento Água no Depósito (m)	Altura Manométrica (m)	Caudal (m³.s⁻¹)	Caudal (m³.h⁻¹)	Energia Produzida (kW)	Eficiência (%)
0,47	210	0,25	2.700	1.019	66
0,95	220	0,5	5.400	2.199	68
1,42	235	0,75	8.100	3.627	70
1,89	250	1	10.800	5.292	72
2,36	290	1,25	13.500	7.887	74
2,84	310	1,5	16.200	10.390	76
3,31	370	1,75	18.900	14.848	78
3,78	450	2	21.600	21.168	80

4.2.6 Fração de Tempo de Bombagem e Turbinagem

O incremento de água no depósito diz respeito à variação de altura de água que o reservatório sofre, podendo admitir valores positivos ou negativos. Quando há uma descarga de água para aproveitamento energético na estação hidroelétrica ou quando há consumo de água por parte da população, o incremento toma sinal

negativo (-), indicando que uma determinada quantidade de água saiu do reservatório.

Por outro lado, se a estação de bombagem se encontra em funcionamento, o valor do incremento toma um sinal positivo (+), indicando assim que há uma entrada de água no depósito. Esta variação de incremento é calculada pela equação

$$dN_h(m) = dN_{in_{h-1}} - dN_{out_{h-1}} - dN_{con_{h-1}} \quad (4.10),$$

e tem uma base horária. Numa situação em que há um consumo de água da população o incremento toma o sinal (-). Quando é introduzida água no reservatório através da estação de bombagem o incremento toma o sinal (+). O incremento toma o valor resultante da soma destas variáveis.

A variação do incremento está hidraulicamente limitada. Esse limite depende da capacidade da estação de bombagem ou hidroelétrica. Essas limitações estão modeladas matematicamente pelas equações

$$dN_{B \text{ máx}_h} = \frac{7560}{5714} = 1,32 \text{ m} , \quad (4.11)$$

e

$$dN_{T \text{ máx}_h} = \frac{21600}{5714} = 3,78 \text{ m} . \quad (4.12)$$

Observa-se nos resultados anteriores que a estação de bombagem tem capacidade para elevar o equivalente a 1,32 m de altura de água do depósito a cada hora. A estação hidroelétrica consegue aproveitar 3,78 m de altura de água do reservatório por cada hora. A fração de tempo é dada sob a forma de percentagem (%) e é obtida através das equações (3.28) e (3.34). Importa referir que a estação de bombagem e hidroelétrica nunca funcionam em simultâneo.

4.2.7 Energia Renovável: Aerogerador

O aerogerador tem capacidade de aproveitar a energia proveniente do vento. Para o caso em estudo, o aerogerador escolhido foi um *Fuhrländer FL2500*. Foram considerados 5 equipamento com as mesmas características.

O comportamento dos aerogeradores podem ser normalmente descritos por meio duma curva característica do seu funcionamento. A figura 24 mostra a curva do aerogerador considerado

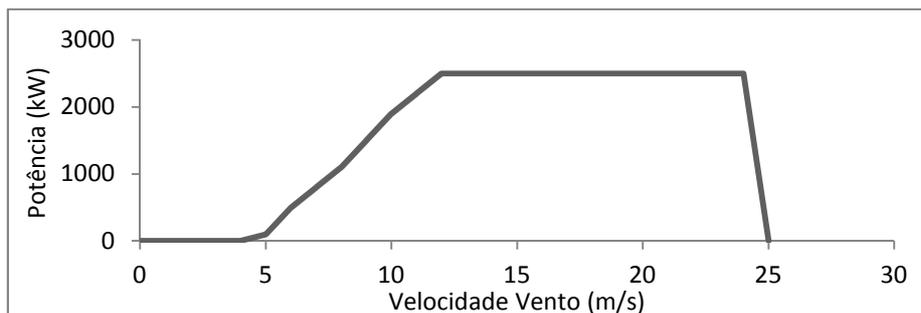


Figura 24: Curva de Potência do Aerogerador [2]

Da análise da curva observa-se que a potência do aerogerador é diretamente relacionada com a velocidade do vento. A curva foi modelada matematicamente e é descrita por um conjunto de equações. A modelação matemática do aerogerador é composta por 4 fases:

- Até uma velocidade do vento de 4 m/s o equipamento encontra-se parado;
- de 5 a 12 m/s o comportamento é descrito pela seguinte equação linear

$$P_{5-12} \text{ (kW)} = N^{\circ} \text{ Aerog.} \times (350 \times u - 1,64 \times 10^3) , \quad (4.13)$$
- de 13 a 24 m/s a potência é uniforme e traduzida pela equação

$$P_{13-24} \text{ (kW)} = N^{\circ} \text{ Aerog.} \times 2500 , \quad (4.14)$$
- para valores de velocidade do vento igual ou superior a 25 m/s o equipamento desliga,

onde u representa a velocidade do vento em m.s^{-1} .

4.2.8 Curva Típica de Ventos

A utilização da energia contida no vento necessita da existência de um fluxo de vento razoavelmente forte e permanente. Atualmente, as turbinas são projetadas para atingirem a potência máxima para velocidades do vento da ordem de 10 a 15 m/s.

A curva de ventos permite saber qual a energia produzida pelo aerogerador a cada hora. As figuras 25 e 26 mostram as curvas de vento que foram analisadas neste trabalho. Foi escolhida uma curva de ventos para a época de verão e outra para a época de inverno. Ambas retratam uma curva de ventos médios típicos da zona da Madeira.

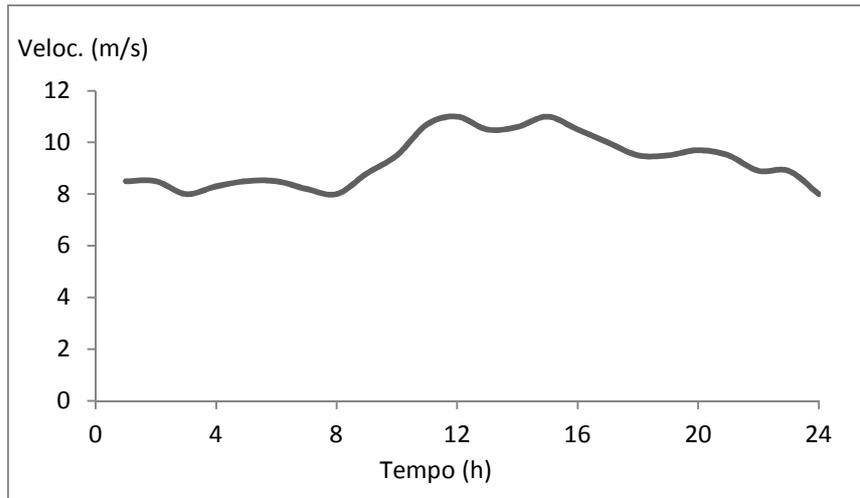


Figura 25: Curva da Velocidade média do vento para o Inverno [2]

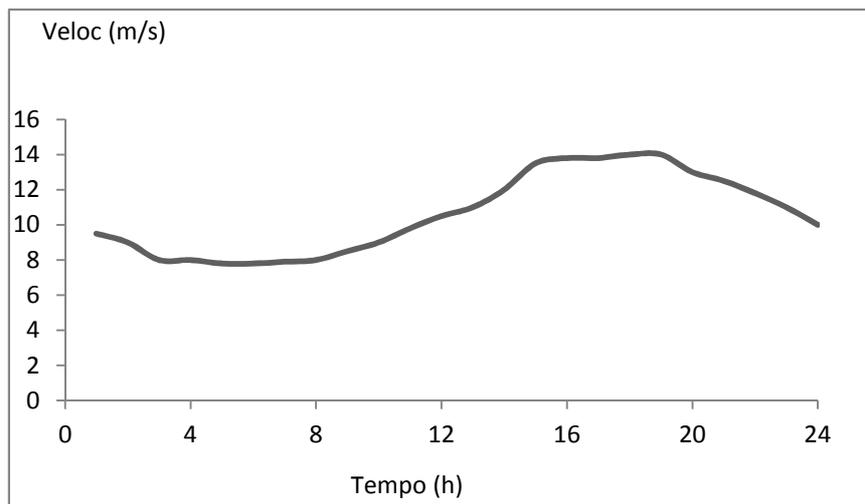


Figura 26: Curva da Velocidade média do vento para o Verão [2]

4.2.9 Tarifa Elétrica e Consumo de Água

Para o artigo em análise a tarifa adotada é referente à Empresa de eletricidade da Madeira [2] como se observa na figura 27

Foi considerado para este estudo um preço de venda de eletricidade à rede igual ao preço de compra.

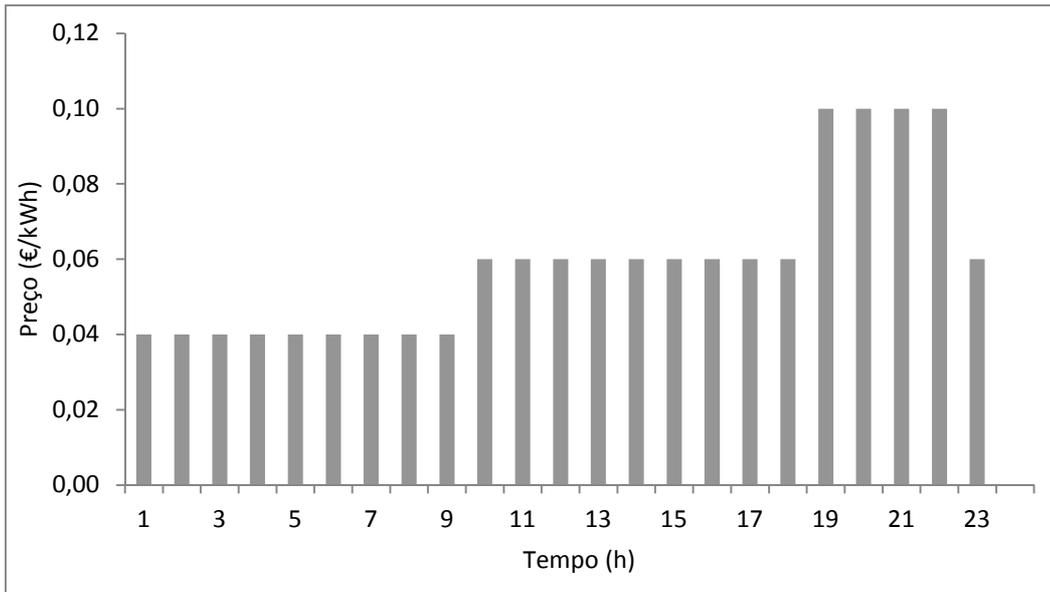


Figura 27: Tarifa aplicada [2]

Devido à falta de dados sobre o consumo da população de Câmara de Lobos assumiram-se os valores do manual de consumo padrão de saneamento básico (DGRN, 1991) [2], como se observa na figura 28.

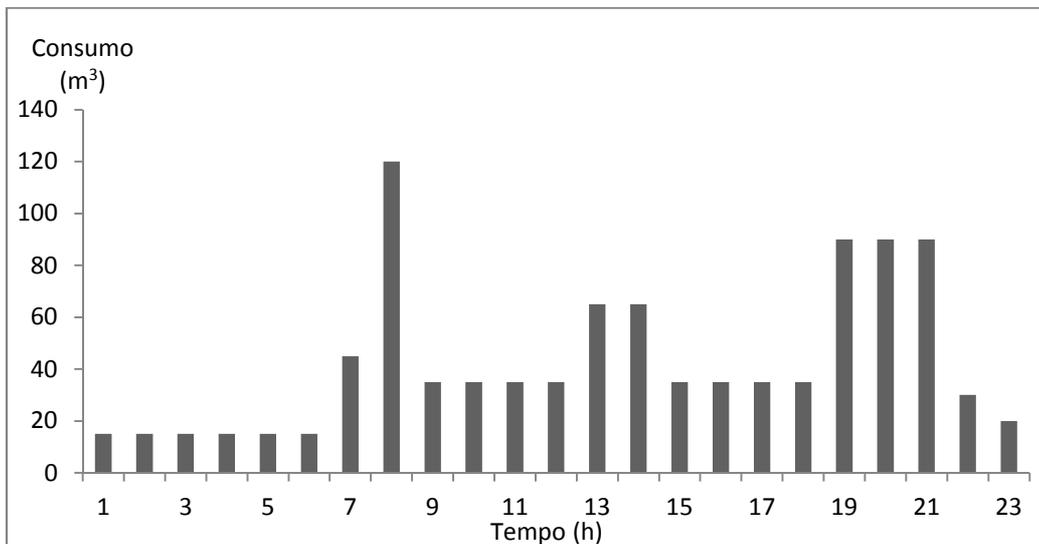


Figura 28: Consumo da População de Câmara de Lobos [2]

O momento do dia em que o consumo é maior é da parte da manhã, às 8 h e à noite por volta das 20 h.

4.2.10 Formulação do Problema de Otimização do Caso de Estudo

As funções objetivo que minimizam os custos de exploração do caso estudado estão definidas no subcapítulo 3.4. Foram consideradas duas situações distintas,

uma sem recurso a energias renováveis onde a função objetivo considerada foi a expressão matemática (3.37) e com recurso a energias renováveis a expressão matemática que define a função objetivo foi a (3.38).

Para que a modelação matemática retrate a realidade do problema estudado é necessário ter algumas restrições em consideração.

A altura máxima do depósito é descrita pela equação

$$N_h < 7 \text{ m}, \quad (4.15)$$

onde N_h é o nível do depósito e define a capacidade máximo de água que o reservatório tem capacidade de acumular.

A altura mínima no depósito não pode ser atingida. A restrição que a define é

$$N_h > 0,5 \text{ m}, \quad (4.16)$$

garantindo assim o abastecimento de água à população.

A expressão matemática que define a energia mínima a vencer é dada por

$$E_{\min} \geq \Delta Z + hc, \quad (4.17)$$

e traduz-se na soma das perdas de carga hc com a diferença de cota das condutas ΔZ . Satisfazendo esta restrição garante-se que a estação de bombagem tem capacidade de elevar a água até ao reservatório. Contudo, o caudal máximo da estação de bombagem não pode ser excedido. A equação matemática que traduz essa restrição é dada por

$$dN_{B \text{ máx}_h} = \frac{Q_{B \text{ máx}_h}}{A} = \frac{7560}{5714} = 1,32 \text{ m}, \quad (4.18)$$

e converte o caudal máximo, em incremento máximo que a bomba tem capacidade de bombear a cada hora. No entanto, o caudal máximo da estação hidroelétrica também não pode ser excedido. Essa restrição é definida por

$$dN_{T \text{ máx}_h} = \frac{Q_{T \text{ máx}_h}}{A} = \frac{21600}{5714} = 3,78 \text{ m}. \quad (4.19)$$

O problema de otimização é representado pela função f que se pretende minimizar e onde está sujeito a certas restrições e o algoritmo de otimização utilizado é o Método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG).

$$\min f = \sum_{h=1}^{24} \left\{ \left[\frac{|(N_{V_h}/dN_h) - 1| - ((N_{V_h}/dN_h) - 1)}{2} \right] \frac{C_{B_h}}{\eta_B} \times \left(\frac{dN_h + |dN_h|}{2} \right) + C_{T_h} \eta_T \left(\frac{dN_h - |dN_h|}{2} \right) \right\} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned}
\text{sujeito a:} \quad & 0,5 \text{ m} < N_h < 7 \text{ m}, \\
& dN_{B \text{ máx}_h} < 1,32 \text{ m} \\
& dN_{T \text{ máx}_h} < 3,78 \text{ m} \\
& E_{\min} \geq \Delta Z + hc
\end{aligned}
\tag{4.21}$$

com f , N_h , dN , ΔZ e hc : $\mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$

4.3 Apresentação e Interpretação dos Resultados

Neste subcapítulo são apresentados os principais resultados, onde foram estudadas 4 situações distintas. Na primeira situação não é considerada a existência da estação hidroelétrica, nem recurso a aerogeradores. Apenas é avaliado o custo do sistema para abastecer a população durante o período de tempo de um dia. Na segunda análise é introduzida a estação hidroelétrica e realizado um balanço energético e financeiro a todo o sistema. No terceiro caso é avaliado o contributo dos aerogeradores ao sistema, considerando uma curva de ventos típica para a época de Verão, enquanto numa quarta situação a curva de ventos típica diz respeito à época de Inverno.

Os resultados são analisados sob a forma de balanços energéticos, balanços económicos, níveis de água no reservatório, incrementos de água a cada hora, frações de funcionamento da estação de bombagem e frações de funcionamento da estação hidroelétrica.

4.3.1 Situação Inicial

De forma a avaliar o custo do abastecimento de água da população foi analisada a potência e o custo da estação de bombagem para abastecer as necessidades da população.

A figura 29 mostra o comportamento do sistema para a análise da situação inicial.

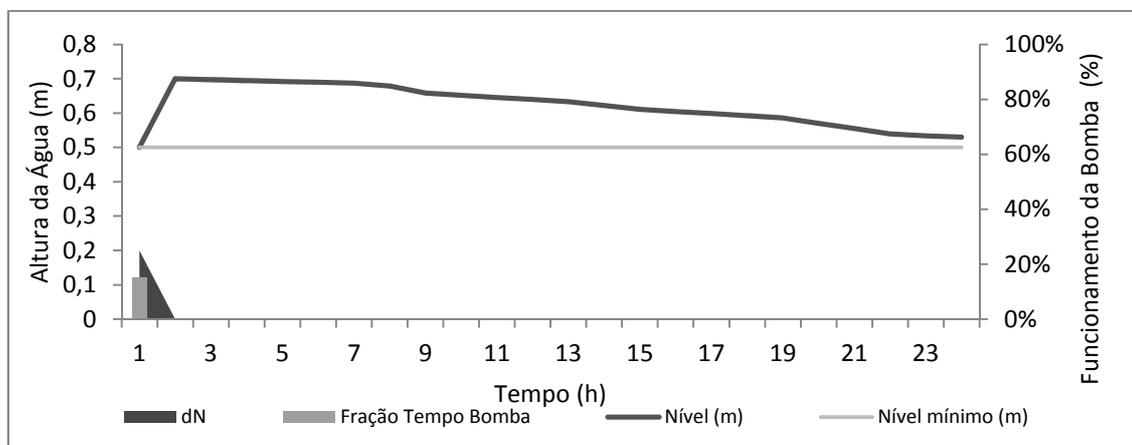


Figura 29: Comportamento do sistema na situação inicial

A metodologia deste caso consistiu em influenciar o resultado apenas do consumo de água. Importa referir que dN diz respeito ao incremento de água, em metros, e que faz variar a altura de água no depósito a cada hora. O depósito está dimensionado para receber grandes quantidades de água para a aproveitar posteriormente na estação hidroelétrica. Nesta análise, o consumo da população é bastante pequeno quando comparado com a capacidade de armazenamento do depósito. Salienta-se que a bomba utilizada está também sobredimensionada para este caso.

Desse modo, o nível de água inicial do depósito é de 0,5 m e aumenta na primeira hora para 0,7 m, o que representa um dN de 0,2 m. A elevação de água dá-se na primeira hora do dia porque a tarifa é mais vantajosa. Devido ao consumo de água pela população o nível vai baixando até que volta a atingir novamente o valor inicial de 0,5 m às 24 h.

A fração de tempo de utilização da estação hidroelétrica representa a percentagem de tempo que a estação de bombagem funcionou nessa hora. Para a situação em causa, a fração de tempo de bombagem foi de aproximadamente 15 %, um funcionamento de aproximadamente 10 min.

O comportamento da estação de bombagem é descrito na figura 30.

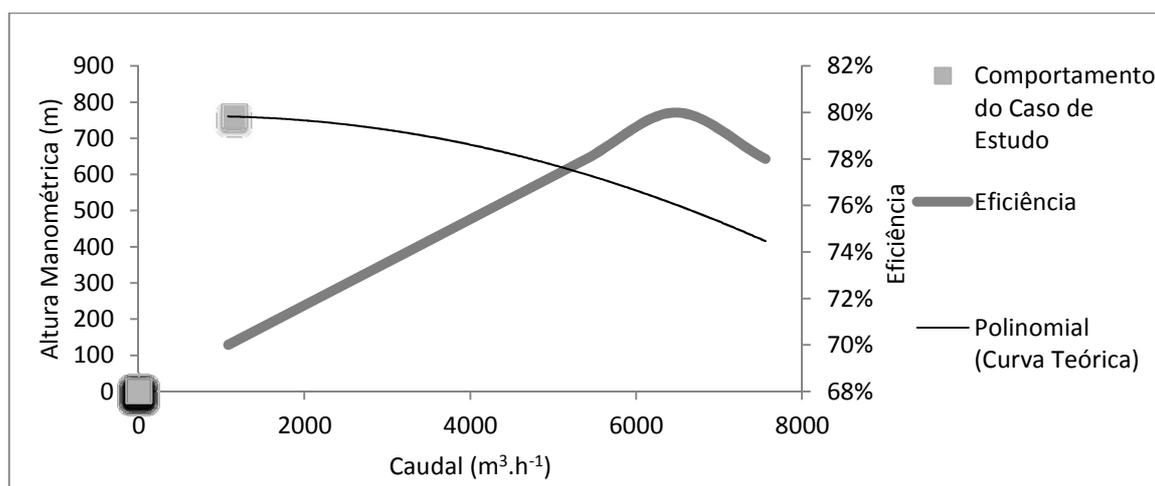


Figura 30: Comportamento da estação de bombagem na situação inicial

O comportamento da estação de bombagem é avaliado sobrepondo os pontos de funcionamento da bomba com os pontos teóricos. Se os valores do caso de estudo se encontrarem sobrepostos aos valores teóricos, o comportamento hidráulico é o esperado. A figura 30 mostra que o comportamento do caso de estudo para a bomba se encontra dentro da curva teórica, não violando nenhuma lei hidráulica. O valor não se encontra no ponto de eficiência máxima. O modelo foi realizado tendo como principal fator de decisão a quantidade de água que necessita para satisfazer as necessidades, e não a eficiência da bomba. A quantidade de água nesta situação é reduzida. O modelo decide a altura de água que necessita, dN , calcula a potência para satisfazer essas necessidades, e através da equação (4.3) é que a eficiência é levada em linha de conta. A eficiência da bomba é apenas função do caudal de água que é bombeado. Importa referir que o passo de otimização é de uma hora, isso significa que

quando é necessário elevar água, o sistema assume que a estação de bombagem funciona durante a hora inteira, com a correção da fração de tempo. A tabela 22 resume o resultado energético e financeiro desta operação.

Tabela 22: Resultados do sistema na situação inicial

	Estação Bombagem
Potência diária (kW)	3.461,0
Custo diário (€)	199,0

O valor da potência necessária para abastecer a população de água é traduzido pela equação (3.18) e o custo associado pela equação (3.20)

O sistema apresenta uma necessidade energética da estação de bombagem de 3.461,0 kW/dia correspondendo a um custo de aproximadamente 200,0 €/dia para as 24 h consideradas.

Não é levada em consideração a existência da estação hidroelétrica nem aerogeradores.

4.3.2 Sistema Otimizado Sem Recurso a Energias Renováveis

Nesta situação, pretende-se perceber como é que o sistema responde à introdução de uma estação hidroelétrica e quais os benefícios de turbinar a água armazenada no reservatório. Não é considerado o contributo da energia proveniente do vento. A figura 31 mostra a reação do sistema a esta alteração.

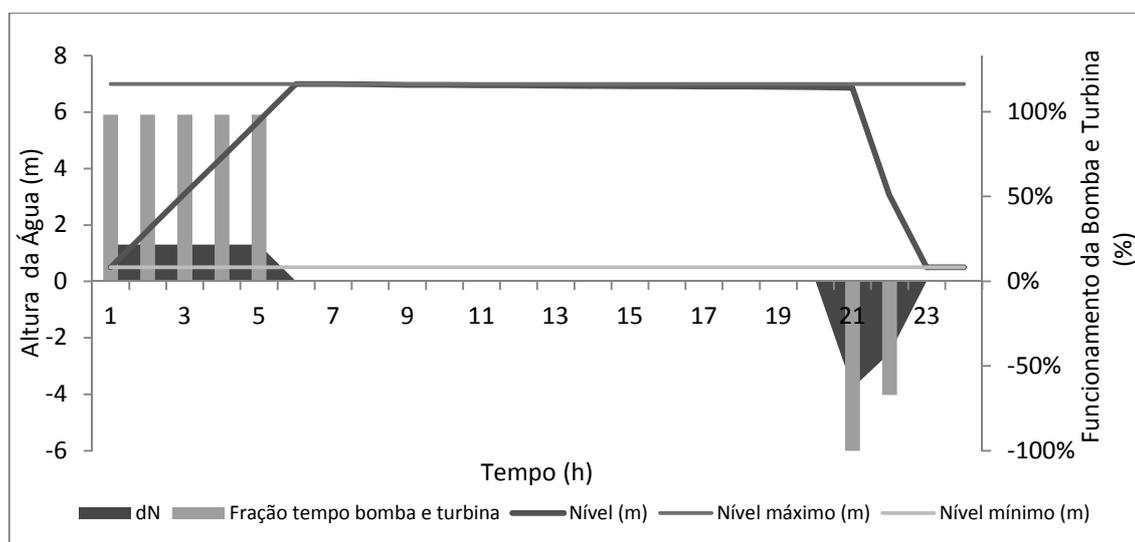


Figura 31: Comportamento do sistema na situação otimizada sem energias renováveis

Nesta figura, o sinal negativo para os valores da fração de tempo de utilização e para os valores de dN representam o recurso à estação hidroelétrica. A intenção é diferenciar a utilização da estação de bombagem da utilização da estação hidroelétrica. Contudo, é importante referir que os consumos das populações também estão considerados.

O nível inicial no depósito encontra-se no valor mínimo 0,5 m e aumenta até atingir o ponto máximo próximo das 6 h, aproveitando assim o benefício da tarifa. A estação de bombagem funciona à taxa máxima, com um valor de dN igual a 1,3 m. O nível de água mantém-se praticamente constante das 7 h até às 21 h só sendo afetado pelo consumo da população. Pelas 21 h a tarifa é mais elevada e é descarregada a maior quantidade de água possível durante duas horas. Na primeira hora de descarga a estação hidroelétrica funciona a 100 % da sua capacidade com um valor de dN igual a -4 m, enquanto na segunda hora a taxa de utilização é 70 % com dN igual a -3 m. Na última hora de otimização o nível de água final é igual ao inicial.

Os comportamentos da estação de bombagem e hidroelétrica necessitam de ser analisados por forma a garantir que não é violada nenhuma lei da hidráulica. O comportamento da estação de bombagem é ilustrado na figura 32.

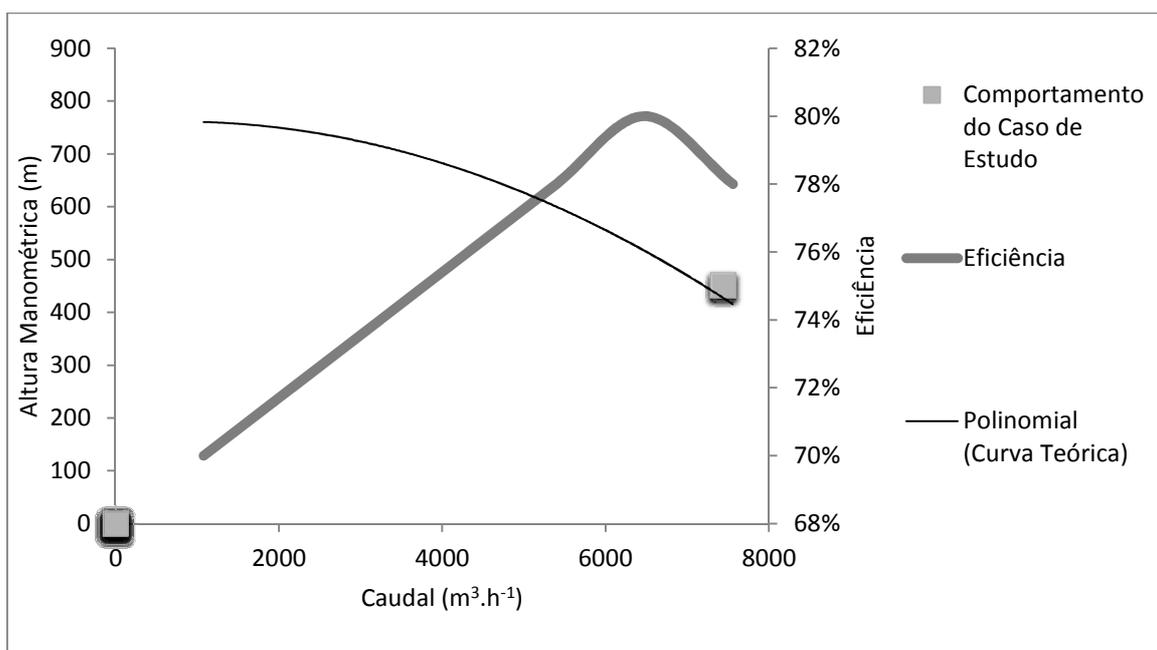


Figura 32: Comportamento da estação de bombagem na situação otimizada sem recurso a energias renováveis

Os valores do caso de estudo da estação de bombagem encontram-se sobrepostos à curva teórica. A estação de bombagem funcionou à capacidade máxima, resultando num valor de caudal de água elevado. Contudo, os valores não se encontram no ponto de eficiência máxima. Importa agora avaliar o comportamento da estação hidroelétrica, figura 33.

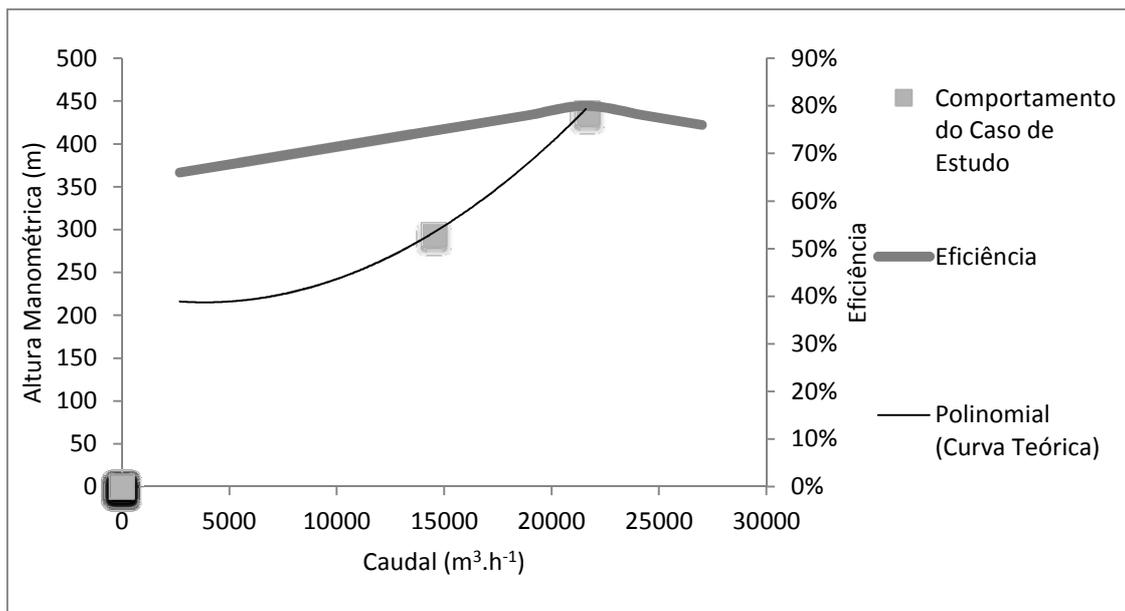


Figura 33: Comportamento da estação hidroelétrica na situação otimizada sem recurso a energias renováveis

Observa-se na figura 33 que o comportamento da estação hidroelétrica se encontra dentro da curva prevista e como era de esperar apresenta dois valores de utilização. Para o funcionamento da estação às 21 h o caudal turbinado é máximo correspondendo a um valor de 22.000,0 m³.h⁻¹ aproximadamente. Este valor corresponde ao rendimento máximo do equipamento. O recurso à estação hidroelétrica na hora seguinte apresenta uma percentagem de utilização de 70 % com um caudal próximo dos 15.000,0 m³.h⁻¹. A influência da eficiência é descrita pela equação (4.9) e é apenas função do caudal que é descarregado, daí existirem valores que não se encontram no ponto de eficiência máxima.

Tabela 23: Resultados do sistema otimizado. Comparação com a situação inicial

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Resultado Final
Potência diária (kW)	58.066,0	-27.857,0	30.209,0 (873 %)
Custo diário (€)	2.323,0	-2.786,0	-463,0 (-233 %)

Na tabela 23 o valor negativo é indicador, serve para evidenciar que a energia é aproveitada e não consumida e que economicamente há um lucro em vez de uma despesa. O valor da potência diária gerada pela estação hidroelétrica é obtido através da equação (3.30) e o custo diário associado pela expressão matemática (3.31). Salienta-se ainda que o resultado energético é calculado pela expressão

$$Res_{pot} = P_B - P_T, \quad (4.22)$$

e o resultado económico pela expressão

$$Res_{Econ_T} = C_{T_B} - C_{T_T}. \quad (4.23)$$

O consumo energético da estação de bombagem é 58.066,0 kW/dia para as 24 h com um custo de 2.323,0 €/dia. Comparando com a situação inicial, o consumo energético é 873 % superior neste caso de estudo. A Estação hidroelétrica aproveita 27.857,0 kW/dia que permite obter um lucro de 2.786,0 €/dia através da diferença da tarifa. No geral, o balanço energético revela que a energia gasta pela estação de bombagem é superior à aproveitada pela estação hidroelétrica, uma variação de 30.209,0 kW/dia no sentido do consumo (valor positivo). Esta situação é energeticamente ineficiente, no entanto, a diferença da tarifa permite obter um lucro de 463,0 €/dia por dia, 233 % mais vantajoso que a situação inicial.

4.3.3 Sistema Otimizado com Recurso a Energias Renováveis – Caso Verão

É também avaliada a vantagem da introdução de energias renováveis no sistema anterior. São considerados 5 aerogeradores que funcionam segundo uma curva de ventos típica de Verão para a região de Socorrido, (ver figura 26). A figura 34 mostra o comportamento do sistema.

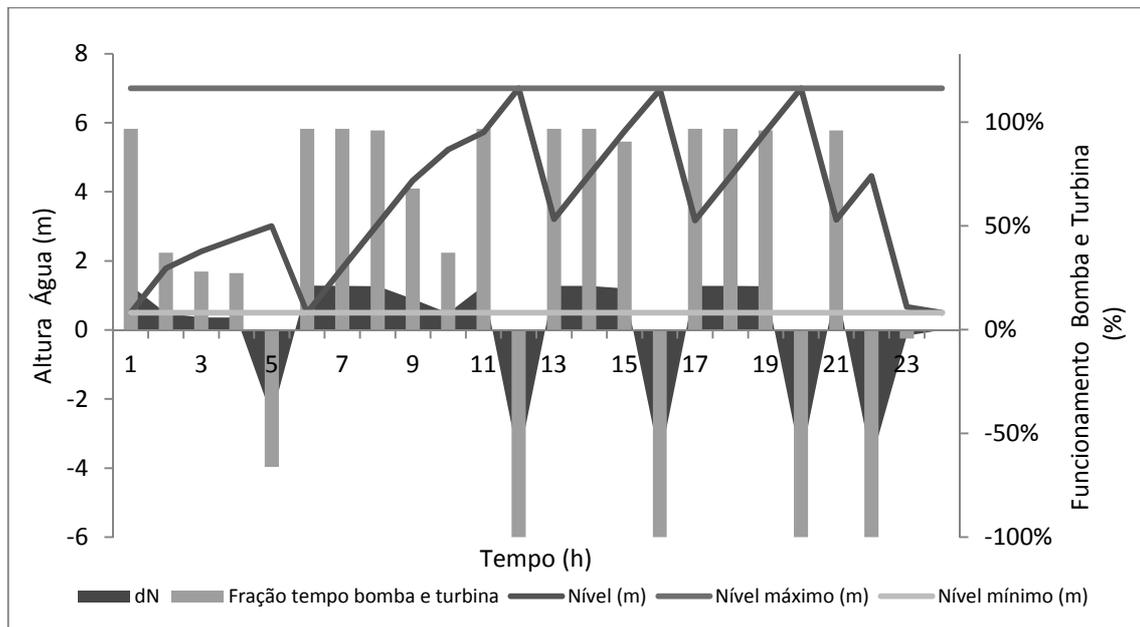


Figura 34: Comportamento do sistema com recurso a aerogeradores na situação de verão

Analisando a figura 34 é notória a maior disponibilidade da estação de bombagem. A variação do nível de água no depósito é elevada ao longo do dia, consequência da introdução de energias renováveis no sistema.

Quando a intensidade do vento assim o permite os aerogeradores abastecem as necessidades energéticas da estação de bombagem que assim eleva a água a preços mais baixos.

O nível inicial corresponde à altura mínima do depósito subindo até aos 3 m. Às 5 h a estação hidroelétrica funciona a 66 % da sua capacidade, suficiente para atingir o nível mínimo novamente. Aproveitando a disponibilidade energética dos aerogeradores a estação de bombagem funciona perto da sua capacidade máxima até atingir 7 m no depósito. Há uma grande variação do nível da água no depósito recorrendo à descarga e elevação da água. O nível no final da otimização corresponde ao valor mínimo admissível no reservatório 0,5 m.

A forma como a estação de bombagem se comporta é apresentada no gráfico 35.

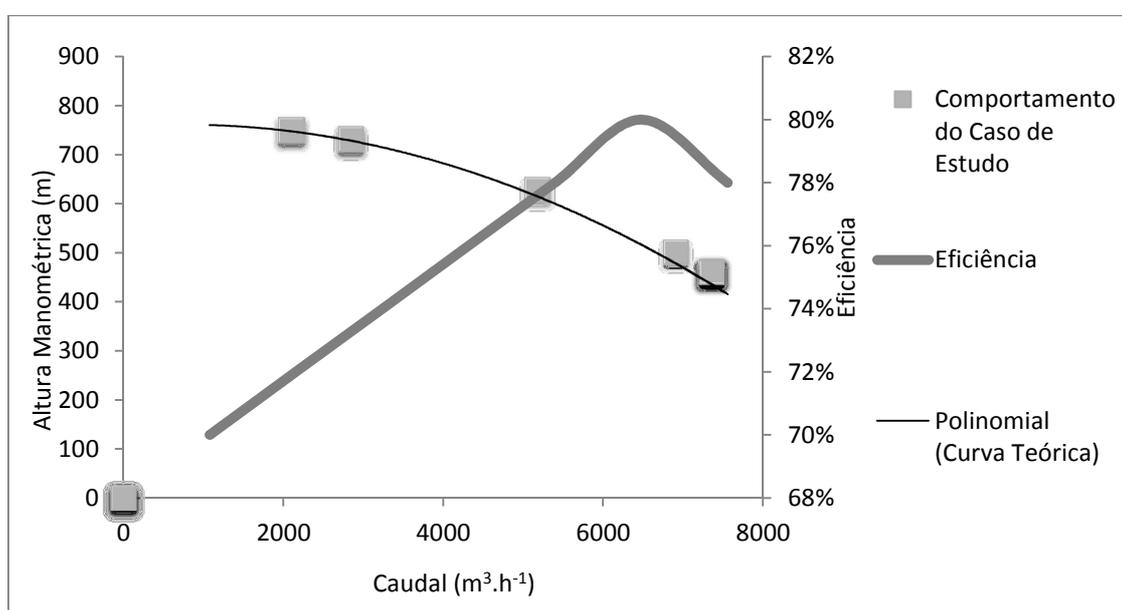


Figura 35: Comportamento da estação de bombagem com recurso a aerogeradores na situação de verão

O comportamento da estação de bombagem varia bastante ao longo da curva teórica mas não há valores que ponham em causa as leis da hidráulica. Os valores não estão todos no ponto de eficiência máxima pois a modelação matemática realizada está formatada para distribuir os pontos em função da quantidade de água necessária e não em função da eficiência máxima. A eficiência é calculada como função do caudal de água. Em relação à estação hidroelétrica a figura 36 mostra a forma como ela se comporta.

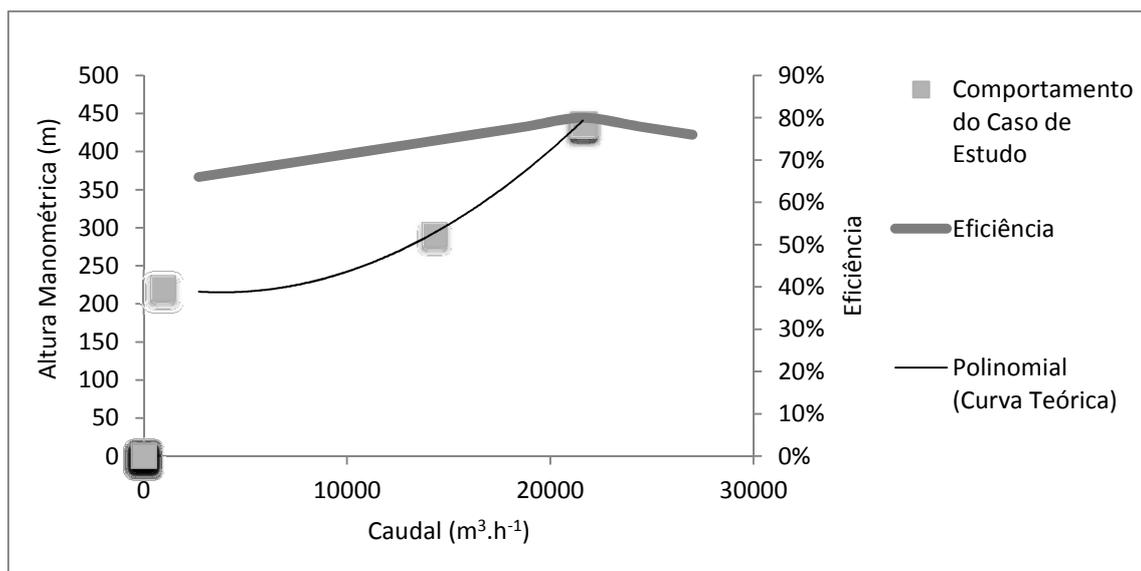


Figura 36: Comportamento da estação hidroelétrica com recurso a aerogeradores na situação de verão

A figura 36 apresenta um valor que se encontra fora da curva teórica. Trata-se de um valor residual pois a otimização tem a restrição de terminar ao fim de 24 h e o valor da última hora é influenciado pelo término da otimização nesse ponto. Na tabela 24 são apresentados os principais resultados financeiros e energéticos.

Tabela 24: Resultados do sistema otimizado com recurso a aerogeradores na situação de verão

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	179.029,0 (308 %)	-87.182,0 (313 %)	-217.583,0	-125.736,0 (-416 %)
Custo diário parcial (€)	1.266,0 (54 %)	-6.616,0 (42 %)	-13.923,0	-5.350,0 (1156 %)
Custo diário total (€)	10.129,0			-10.410,0

O valor do custo diário parcial da estação de bombagem é expresso pela equação matemática (3.19) e o benefício económico do aerogerador C_A , pela expressão matemática (3.36). O balanço de potência é expresso por

$$Res_{pot} = P_B - P_T - P_A, \quad (4.24)$$

onde P_B , P_T e P_A são expressos pelas equações matemáticas (3.18) e (3.30) respetivamente. P_A é expresso pela equação

$$P_A = \sum_{h=1}^{24} \frac{\rho \times v_h^3 \times A}{2}. \quad (4.25)$$

Enquanto o resultado do custo diário parcial é expresso por

$$Res_{custop} = C_{P_B} - C_{T_T}. \quad (4.26)$$

com C_{P_B} e C_{T_T} expressos pelas equações matemáticas (3.19) e (3.31) respetivamente. O resultado do custo diário total é definido pela equação matemática

$$Res_{custo_T} = C_{T_B} - C_{T_T} - C_A, \quad (4.27)$$

com C_{T_B} enunciado pela expressão matemática (3.20)

Os aerogeradores, para a curva de ventos considerada, produzem 217.583,0 kW/dia de energia elétrica durante 24 h, com um benefício económico de 13.923,0 €/dia, para a curva de ventos considerada. Sempre que possível, a energia dos aerogeradores é consumida pela estação de bombagem que necessita de 179.029,0 kW/dia de eletricidade para elevar a água com um custo total de 10.129,0 €/dia. A energia disponibilizada pelo aerogerador consegue baixar a fatura com a bombagem de água para 1.266,0 €/dia, criando um benefício para a estação de bombagem de 8.863,0 €/dia. A estação hidroelétrica produz 87.182,0 kW/dia de eletricidade contribuindo para o sistema com 6.616,0 €/dia. No global, o balanço energético mostra que há um ganho de 125.736,0 kW/dia, ou seja, a eletricidade produzida é superior à consumida.

O excedente da energia eólica representa a energia total gerada pelos aerogeradores, energia que foi consumida pela estação de bombagem e a que por não haver necessidade energética da estação de bombagem não foi injetada mas foi gerada pelos aerogeradores.

Se o excedente da energia eólica não for considerado, o lucro da operação é de 5.350,0 €/dia. Contudo, caso seja levado em consideração, o lucro global do sistema sobe para 10.410,0 €/dia, onde a energia excedente seria injetada na rede elétrica. Comparando este caso de estudo com o sistema otimizado sem recurso a energias renováveis salienta-se que o custo de exploração do sistema de abastecimento de água foi 54 % mais vantajoso e permite um lucro 1156 % superior.

4.3.5 Sistema Otimizado com Recurso a Energias Renováveis – Caso Inverno

No subcapítulo 4.3.3 foi analisado o comportamento do sistema à introdução de energias renováveis. É importante diferenciar as épocas do ano, pois a velocidade do vento influencia o resultado e as suas conclusões. Foi estudado o mesmo sistema mas agora com uma curva de ventos típica para a época de Inverno, como se observa na figura 37.

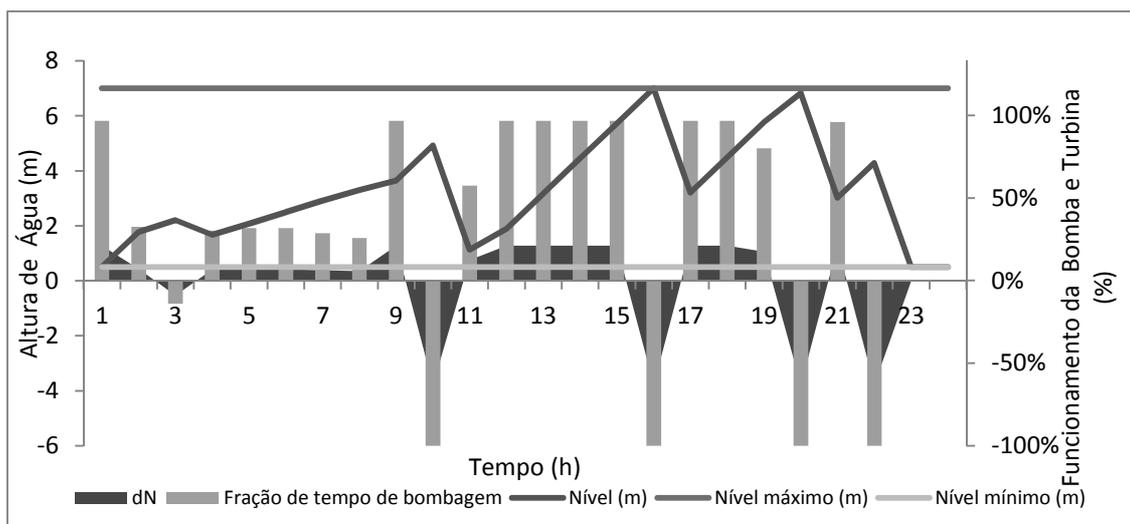


Figura 37: Comportamento do sistema com recurso a aerogeradores na situação de Inverno

Pela análise da figura 37 observa-se uma elevada disponibilidade da estação de bombagem para elevar a água. O sistema começa no nível mínimo, aumentando até às 10 h para próximo dos 5 m de altura de água. A estação hidroelétrica aproveita o benefício da tarifa na hora seguinte e descarrega a água do reservatório durante uma hora a 100 % da capacidade. Das 11 h até às 15 h a estação de bombagem eleva a água novamente para o reservatório a uma taxa de funcionamento próxima da máxima até atingir o nível de 7 m. Pelas 16 h a estação hidroelétrica funciona a 100 % da sua capacidade baixando o nível até os 3 m. Nas 3 h seguintes a estação de bombagem faz elevar a altura de água até atingir novamente o nível máximo. Por volta das 20 h a tarifa volta a ser atrativa e a estação hidroelétrica aproveita a máxima quantidade de água. Ao fim das 24 h de otimização o sistema atinge o nível 0,5 m.

O comportamento da estação de bombagem para esta operação é descrito na figura 38.

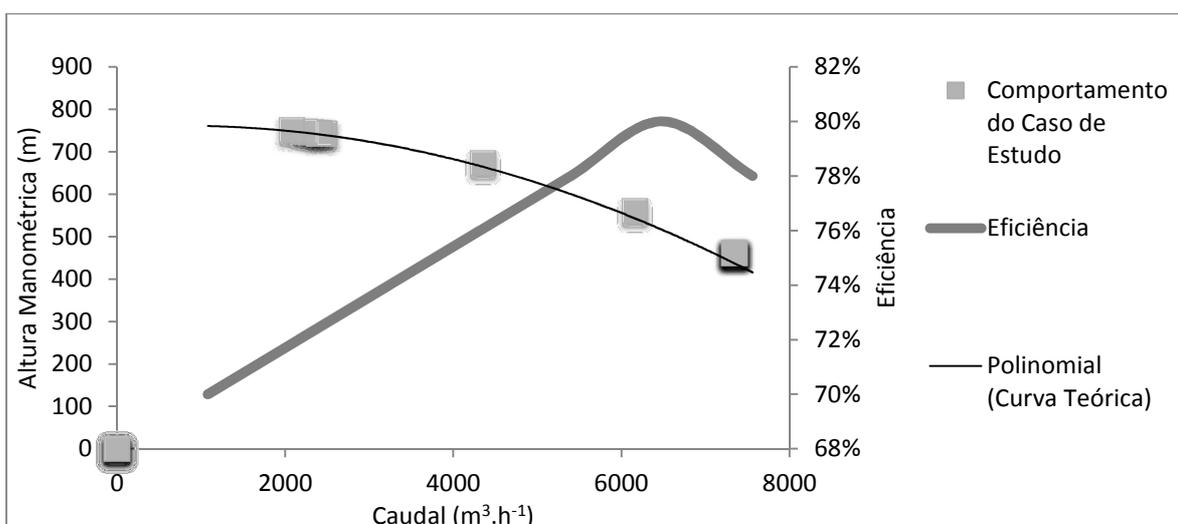


Figura 38: Comportamento da estação de bombagem com recurso a aerogeradores na situação de Inverno

Observa-se que o comportamento se encontra dentro do esperado, não apresentando valores fora da curva teórica. Os valores variam ao longo da curva, o que faz variar a eficiência da operação. O comportamento da estação hidroelétrica é expresso na figura 39.

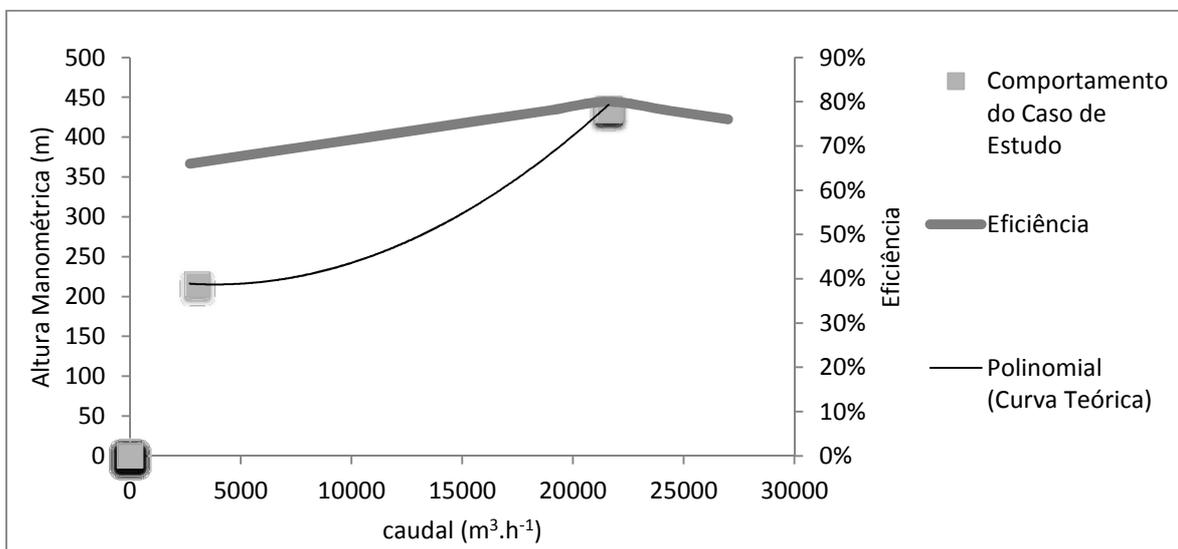


Figura 39: Comportamento da estação hidroelétrica com recurso a aerogeradores na situação de Inverno

A estação hidroelétrica apresenta um comportamento coerente com as leis da hidráulica, não infringindo qualquer lei, com valores próximos da eficiência máxima. O resumo energético e financeiro é apresentado na tabela 25.

Tabela 25: Resultados do sistema otimizado com recurso a aerogeradores na situação de Inverno

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	165.899,0 (93%)	-78.843,0 (90%)	-187.492,0 (86%)	-100.436,0 (80%)
Custo diário parcial (€)	1.686,0 (133%)	-6.249,0 (94%)	-11.410,0 (82%)	-4.463,0 (80%)
Custo diário total (€)	9.682,0 (96%)			-7.977,0 (77%)

Os aerogeradores para a época de Inverno produzem 187.492,0 kW/dia de energia com um benefício económico de 11.410,0 €/dia, 82% da situação de Verão. Sempre que há disponibilidade dos aerogeradores e necessidade da estação de bombagem, toda a energia proveniente do vento abastece a estação de bombagem. A estação de bombagem necessita de 165.899,0 kW/dia por dia

com um custo total de 9.682,0 €/dia. Contudo, o contributo dos aerogeradores baixa essa fatura para 1.686,0 €/dia.

A estação hidroelétrica produz 78.843,0 kW/dia com um lucro de 6.249,0 €/dia. O balanço energético mostra que há produção de 100.436,0 kW/dia de eletricidade, 80% da situação anterior. No total, e contando com o excedente da energia eólica, o lucro é de 7.977,0 €/dia. Se não for considerado esse excedente o benefício passa a ser 4.463,0 €/dia. Comparando com a situação de otimização com recurso a energias renováveis para a época de Verão, salienta-se que o custo o parcial diário e o resultado final da potência diária é 80% do sistema em comparação.

4.4 Análise de Sensibilidade

Foi tido como caso de comparação a situação em que é considerada a otimização com a curva de ventos para a época de Verão. É a partir desse modelo que serão analisadas as sensibilidades aos diferentes parâmetros.

Todas as variáveis são fiéis ao caso original (situação de verão) exceto a variável que está a ser estudada em cada análise.

Foram analisadas variações à capacidade do reservatório, ao nível inicial e final, curva de ventos, diferença de cotas, alteração da tarifa, número de bombas, número de turbinas e número de aerogeradores.

4.4.1 Variação da Capacidade Reservatório

A capacidade do reservatório é um fator determinante no dimensionamento deste tipo de sistemas, é fundamental analisar o comportamento do sistema à alteração desta variável.

O depósito inicial tem a capacidade de 40.000,0 m³, esse valor foi reduzido para 1/4 de forma a avaliar uma alteração significativa à sua capacidade, tendo o novo reservatório agora 10.000,0 m³. A figura 40 mostra o comportamento do sistema a esta alteração.

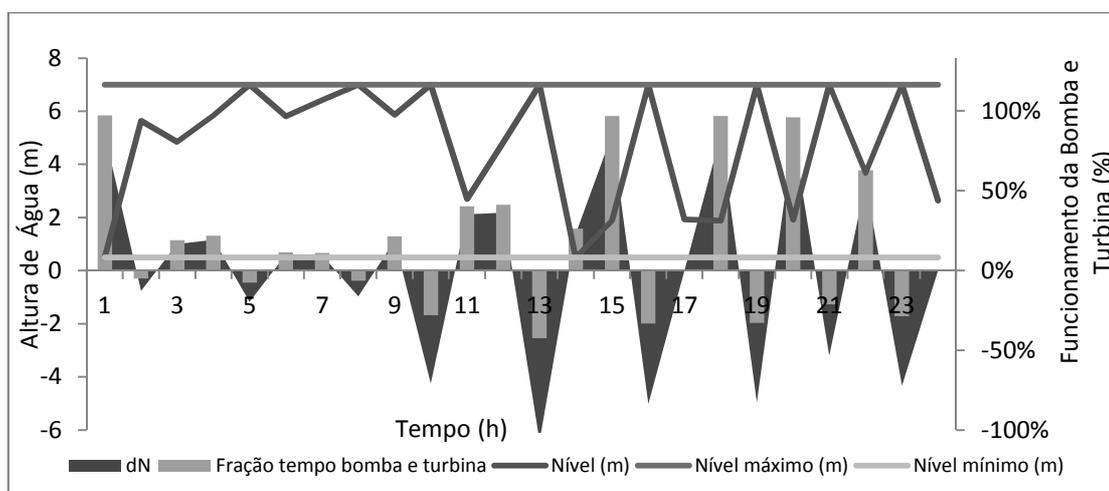


Figura 40: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à capacidade do reservatório

A alteração da capacidade do reservatório faz com que a variação do nível de água no reservatório seja agora maior. O dimensionamento da estação de bombagem, da estação hidroelétrica e dos aerogeradores não foi alterado. A flutuação do nível de água dentro do reservatório mostra que o limite máximo foi várias vezes atingido. É evidente que há um esforço menor da estação hidroelétrica para conseguir aproveitar a energia potencial da água. A capacidade instalada dos equipamentos pode estar agora dimensionada acima do necessário. Na figura 41 é avaliado o comportamento da estação de bombagem.

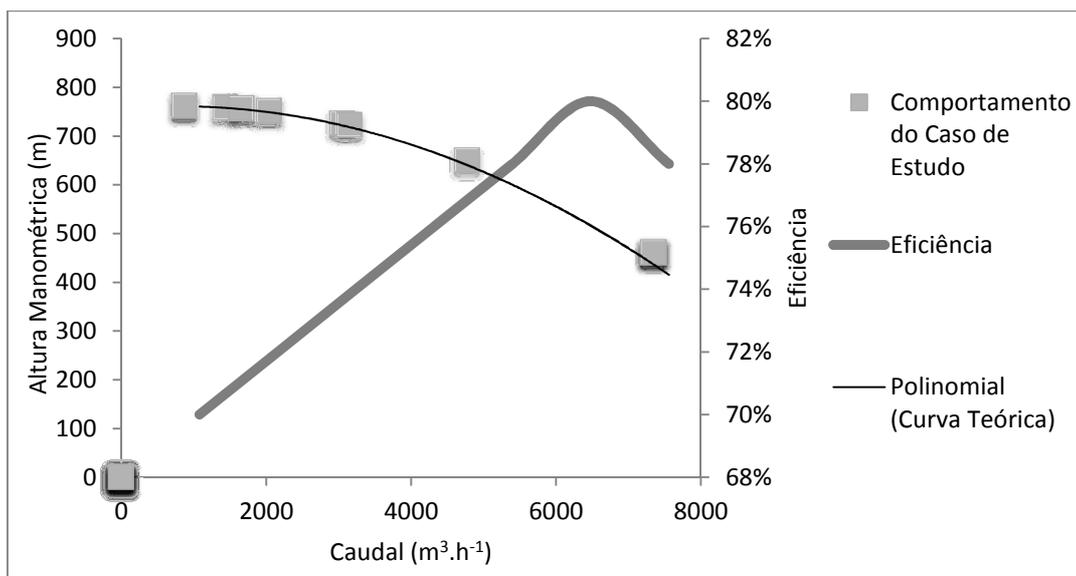


Figura 41: comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à capacidade do reservatório

O comportamento da estação de bombagem encontra-se dentro da curva teórica, com valores fora do ponto de eficiência máxima. A figura 42 evidencia o comportamento da estação hidroelétrica.

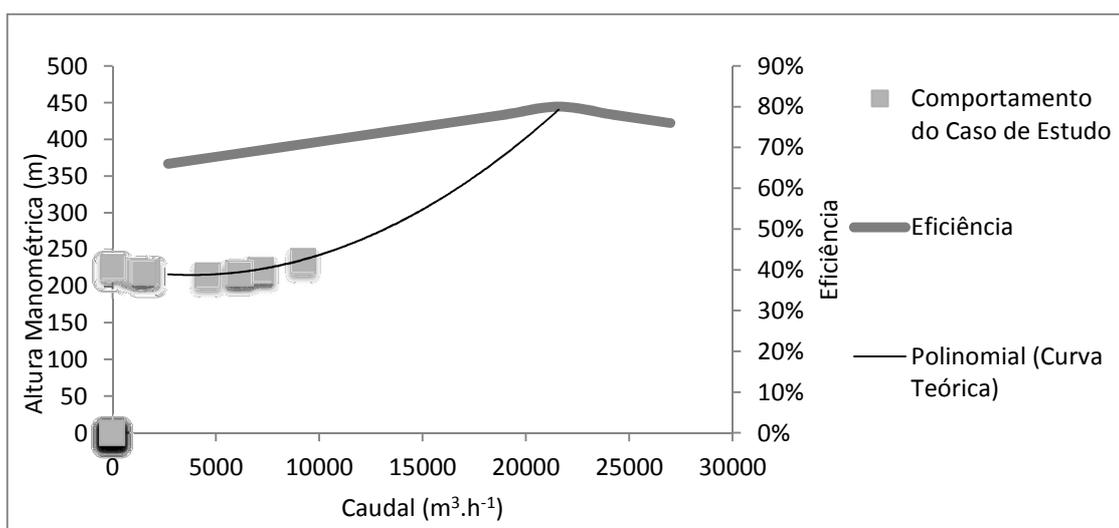


Figura 42: comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à capacidade do reservatório

Observa-se na figura 42 que uma elevada quantidade de valores se encontra fora da curva. O fato do reservatório ser de menor capacidade faz com que a estação hidroelétrica esteja sobredimensionada. Na tabela 26 são apresentados os principais resultados económicos e energéticos a esta alteração.

Tabela 26: Resultados da análise de sensibilidade à capacidade do reservatório para o caso de estudo

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	98.885,0 (55%)	-21.049,0 (24%)	-217.583,0 (100%)	-139.747,0 (111%)
Custo diário parcial (€)	132,0 (10 %)	-1.334,0 (20%)	-13.923,0 (100%)	-1.202,0 (23%)
Custo diário total (€)	6.227,0 (62%)			-9.030,0 (87%)

A estação de bombagem necessita de 98.885,0 kW/dia para elevar a água com um custo de 6.227,0 €/dia mas o auxílio dos aerogeradores baixa esse custo para 132,0 €/dia, 10% da situação comparativa. A energia proveniente do vento consegue produzir 217.583,0 kW/dia com um benefício económico de 13.923,0 €/dia, 100%. Energeticamente o sistema com um reservatório de 10.000,0 m³ produz um total de 139.747,0 kW/dia, 111%, com um lucro parcial de 1.202,0 €/dia, 23%. Contabilizando o excedente da energia eólica o lucro passa a ser 9.030,0 €/dia, 87%.

A capacidade do reservatório tem elevada influência na quantidade de água que é possível turbinar, o fato de ser de menor capacidade faz com que o aproveitamento hidroelétrico seja menor. Com o depósito original o lucro parcial é 5.350,0 €/dia, enquanto neste exemplo é 1.202,0 €/dia, 23 %.

A estação de bombagem neste exemplo consome 98.885,0 kW/dia, 55 %. O lucro produzido pela estação hidroelétrica sofre uma variação substancial, produzindo menos 5.282,0 €/dia, 20 %.

4.4.2 Alteração do Nível Inicial

O nível de água do reservatório no momento inicial influencia a otimização do sistema. Na situação base o nível de água inicial corresponde à situação mais desfavorável, com a água a encontrar-se à cota mais baixa do reservatório (0,5 m). É por isso importante avaliar o comportamento do sistema, alterando o nível inicial da situação mais desfavorável para a situação mais favorável (7 m).

É necessário distinguir duas situações: uma em que o nível final é diferente do nível inicial ou seja, o sistema começa com o nível em 7 m e termina no nível mínimo 0,5 m; outra em que o nível final é igual ao inicial, começando a otimização com o nível do depósito no máximo (7 m) e a terminar com o mesmo nível.

4.4.3 Situação 1: Nível Inicial e Final Diferentes

Admite-se que o sistema começa com o reservatório no nível máximo (7 m) e no final encontra-se no nível mais baixo (0,5 m). O comportamento do sistema a esta alteração é descrito na figura 43.

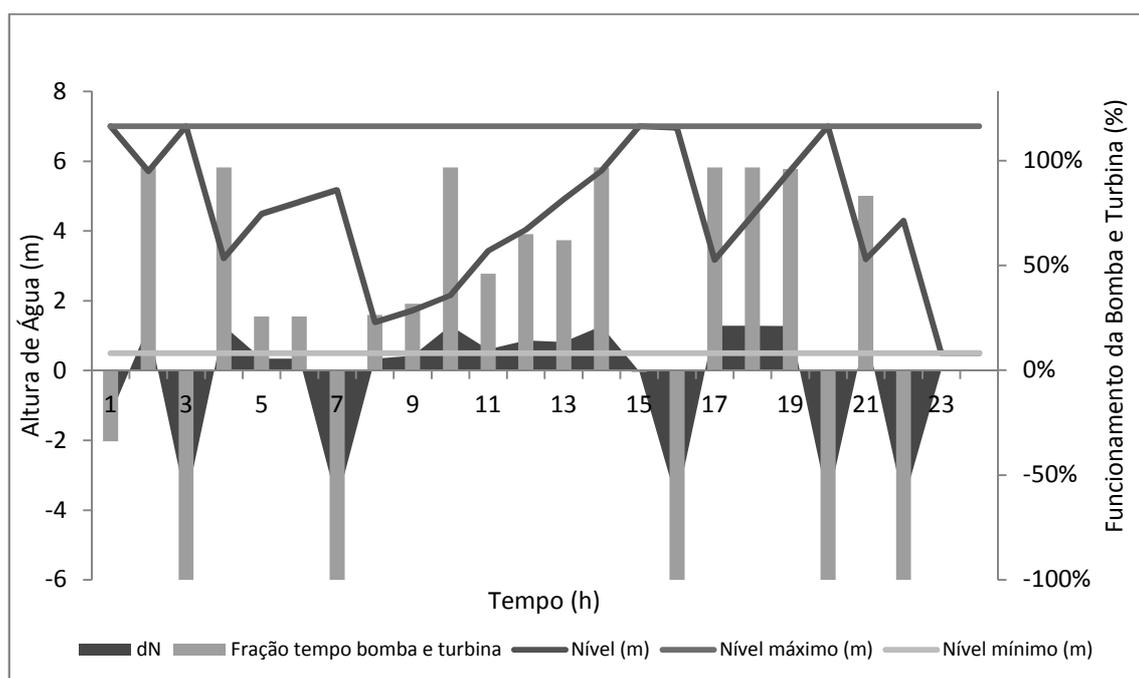


Figura 43: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração do nível inicial: nível final diferente do nível inicial

O nível inicial encontra-se agora na situação mais favorável, no limite máximo do reservatório. O comportamento é bastante dinâmico com a estação hidroelétrica a produzir energia à capacidade máxima sempre que lhe é conveniente. Este sistema tem a particularidade de não ter o nível final igual ao inicial. Numa lógica de continuidade esta situação nunca se poderia verificar só sendo possível fazer numa análise a 24 h. De seguida, na figura 44 é analisado o comportamento da estação de bombagem.

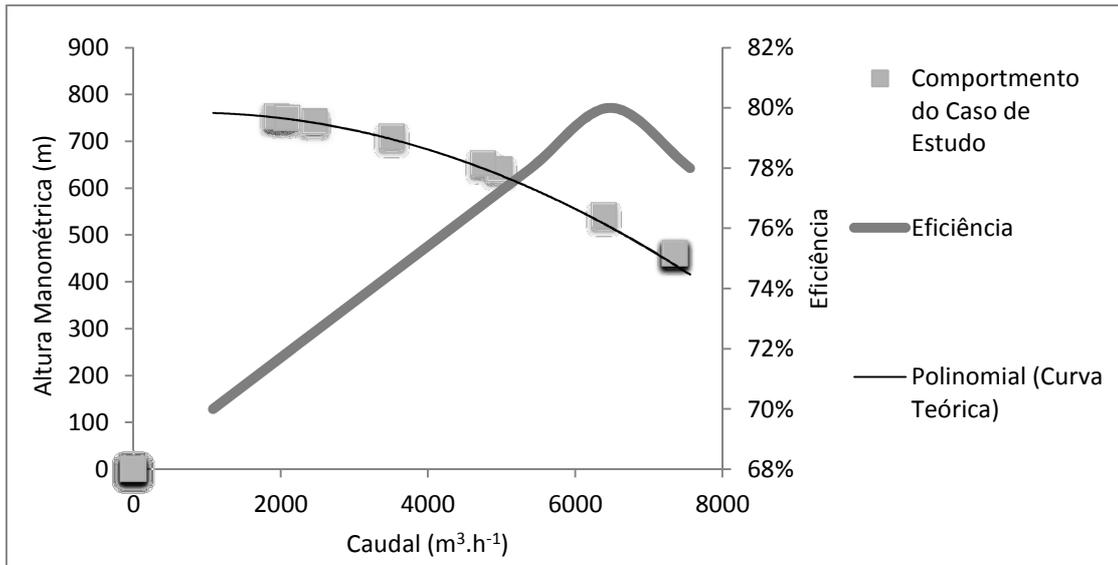


Figura 44: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração do nível inicial: nível final diferente do nível inicial

Os valores que mostram o comportamento da estação de bombagem para este caso de estudo e encontram-se dentro da curva esperada. Não é violada nenhuma lei da hidráulica, contudo o valor da eficiência varia bastante. A estação hidroelétrica descreve o seu comportamento na figura 45.

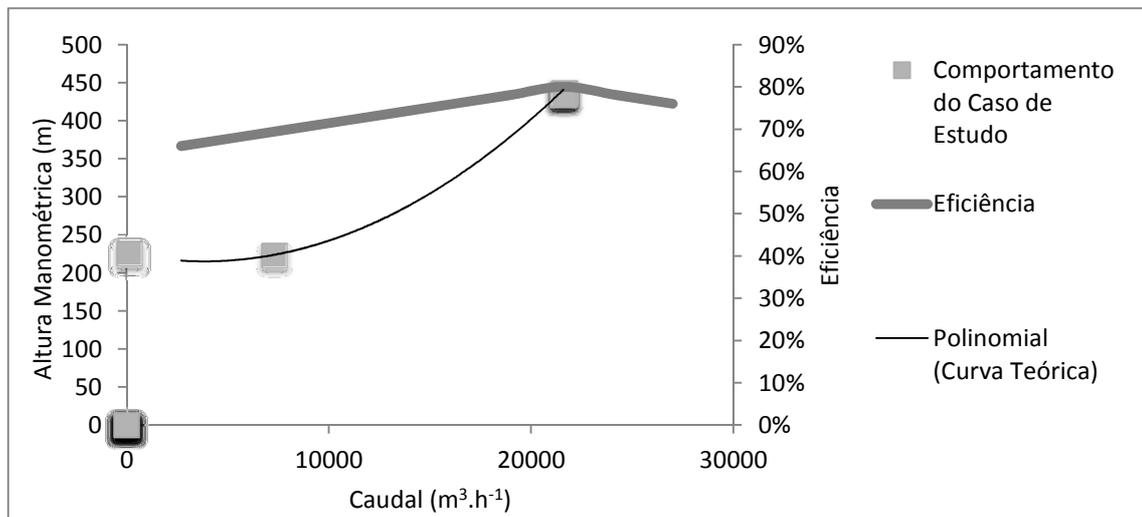


Figura 45: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração do nível inicial: nível final diferente do nível inicial

Analisando a figura 45 observa-se que há um valor que se encontra fora da curva. Esse valor corresponde à última hora de funcionamento da estação hidroelétrica, que condiciona o modelo matemático pois tem obrigatoriamente que terminar naquele momento. O comportamento da estação hidroelétrica apresenta valores no ponto de eficiência máxima. O balanço económico e financeiro é descrito na tabela 27.

Tabela 27: Resultados da análise de sensibilidade à alteração do nível inicial para o caso de estudo

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	148.737,0 (83%)	-101.000,0 (116%)	-217.583,0 (100%)	-158.136,0 (126%)
Custo diário parcial (€)	723,0 (57%)	-6.786,0 (103%)	-13.923,0 (100%)	-6.062,0 (113%)
Custo diário total (€)	8.945,0 (88%)			-11.764,0 (113%)

O consumo energético da estação de bombagem para este caso é 148.737,0 kW/dia com a estação hidroelétrica a contribuir com 101.000,0 kW/dia para o balanço global e os aerogeradores a contribuir com 217.583,0 kW/dia. No final há um benefício energético de 158.136,0 kW/dia. Economicamente a estação de bombagem necessita de 8.945,0 €/dia, com o contributo das energias renováveis a baixar essa tarifa para 723,0 €/dia, 57%. A estação hidroelétrica contribui com 6.786,0 €/dia e os aerogeradores com 13.923,0 €/dia. No final há um lucro diário de 6.062,0 €/dia, sem o excedente da eólica que se for contabilizado passa para 11.764,0 €/dia, 113% em ambas as situações. Quando o nível inicial de água no reservatório se encontra no valor máximo e comparando com o caso original a estação de bombagem faz um esforço menor, 83%.

4.4.4 Situação 2: Nível Inicial e Final Iguais

Neste caso, o depósito no momento inicial encontra-se à cota de 7 m e no momento final a cota é a mesma, ou seja, na otimização do sistema colocou-se uma restrição que dava instruções para que o nível final fosse igual ao nível inicial. A figura 46 mostra o comportamento do sistema a esta alteração.

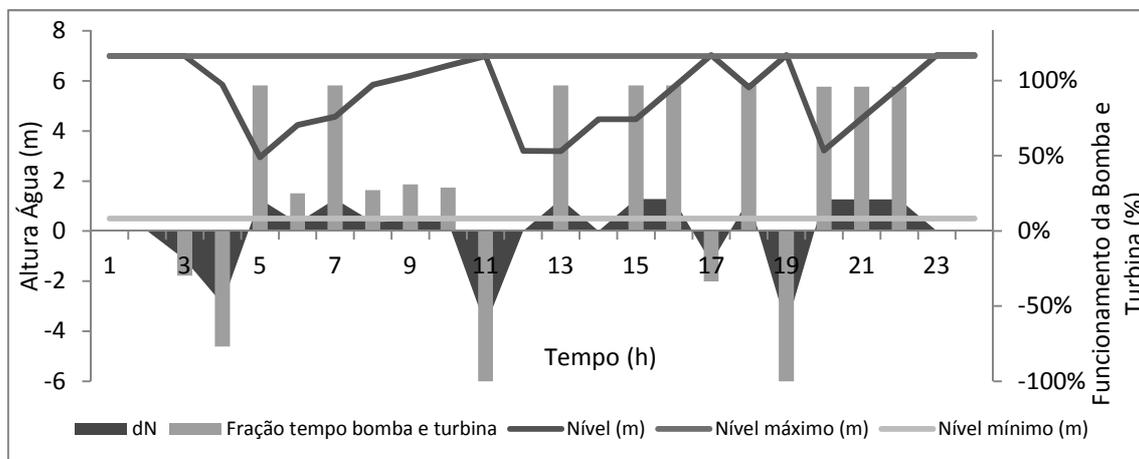


Figura 46: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração do nível inicial: nível final igual ao nível inicial

O nível inicial encontra-se à cota máxima 7 m assim como o nível final. A reposição do nível do reservatório no momento final da otimização prejudica o sistema, pois a essa hora a estação de bombagem está a funcionar no momento em que o custo de eletricidade é mais elevado, com prejuízos para o balanço económico. O comportamento da estação de bombagem é descrito na figura 47.

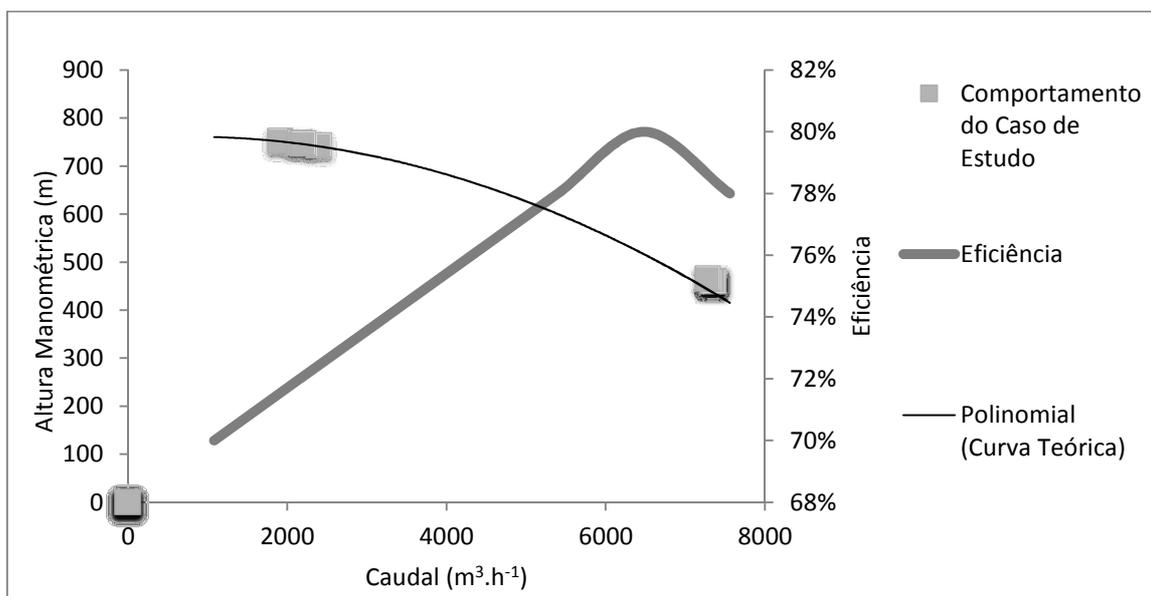


Figura 47: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração do nível inicial: nível final igual ao nível inicial

O comportamento da estação de bombagem está dentro dos limites hidráulicos impostos ao sistema. O comportamento da estação hidroelétrica é descrito na figura 48.

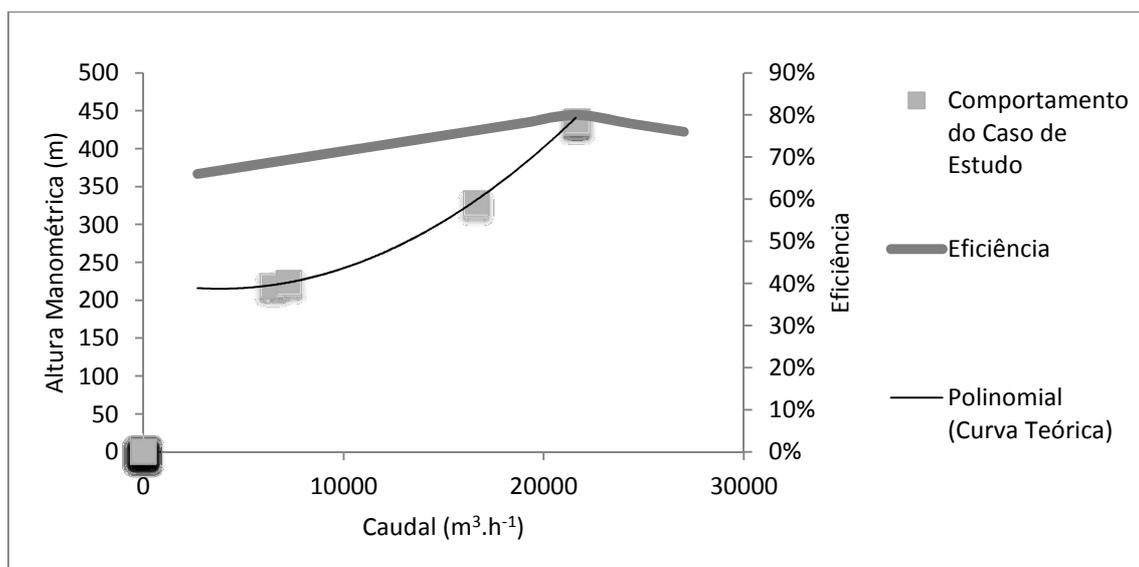


Figura 48: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade ao nível final igual ao nível inicial

A estação hidroelétrica não apresenta valores fora da curva teórica. A tabela 28 resume os resultados energéticos e financeiros desta modificação.

Tabela 28: Resultados da análise de sensibilidade à alteração do nível inicial para o caso

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	129.282,0 (72%)	-56.382,0 (65%)	-217.583,0 (100%)	-144.683,0 (115%)
Custo diário parcial (€)	541,0 (43%)	-3.893,0 (59%)	-13 923 (100%)	-3.352,0 (63%)
Custo diário total (€)	8 340 (82%)			-9 476 (91%)

Esta parametrização tem um consumo energético de 129.282,0 kW/dia com um custo total de 8.340,0 €/dia que é reduzido para 541,0 €/dia, 43%, com o auxílio dos aerogeradores. Não há alteração na produção energética nem nos benefícios financeiros dos aerogeradores. O aproveitamento hidroelétrico tem uma contribuição energética de 56.382,0 kW/dia e económica de 3.893,0 €/dia, 65% e 59% respetivamente. No global, o balanço energético mostra-nos um benefício de 144.683,0 kW/dia, 115%, e financeiramente obtém-se um lucro de 9.476,0 €/dia (91%) contabilizando o excedente eólico e de 3.352,0 €/dia caso não seja considerado, 63%.

Alterar o nível final de 0,5 m para 7 m tem implicações no comportamento do sistema ao nível do aproveitamento hidroelétrico que é menor nesta situação: 56.382,0 kW/dia contra 87.182,0 kW/dia na situação original, 65%. Esse aproveitamento é menor porque o sistema apresenta a restrição de ter o nível em 7 m no final.

O balanço económico é mais desfavorável nesta situação. No momento em que a tarifa de compra/venda é mais cara é precisamente o momento em que é necessário repor o nível no depósito, impedindo assim o aproveitamento hidroelétrico e consumindo energia para a estação de bombagem a um preço de compra superior.

4.4.5 Alteração da Curva de Ventos

Com o objetivo de analisar a influência da curva de ventos na reação do sistema, essa variável foi alterada para uma curva com velocidades do vento de um dia típico na cidade de Aveiro. As características dos aerogeradores não foram alteradas nem qualquer outro parâmetro. A figura 49 mostra a nova curva de intensidade do vento considerada.

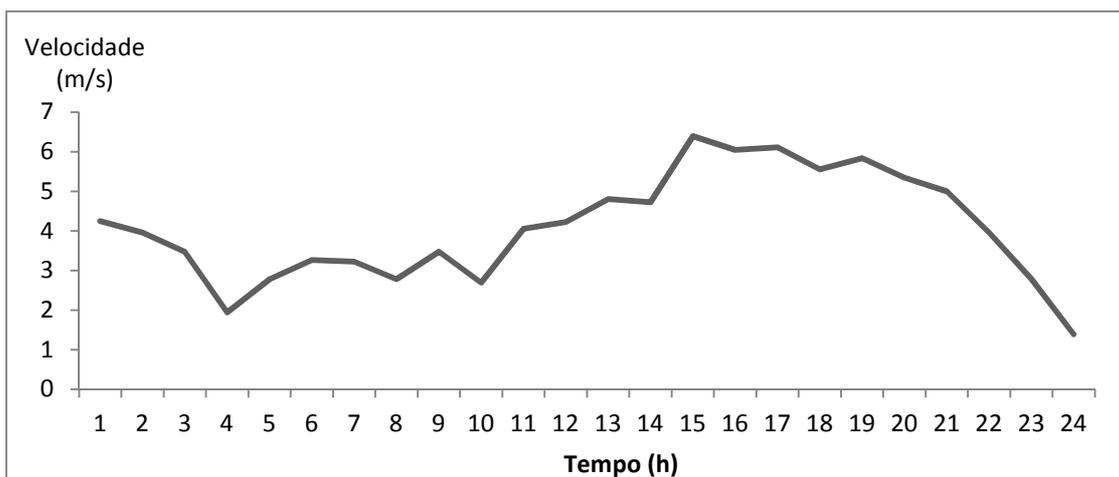


Figura 49: Curva de ventos típica para a região de Aveiro para o dia 22 de Julho de 2011 [19]

A nova curva de ventos apresenta um valor máximo de velocidades de aproximadamente 7 m.s^{-1} e o valor mínimo é aproximadamente 2 m.s^{-1} . Esta curva é bastante distinta da considerada anteriormente², com valores consideravelmente mais baixos para este caso de estudo. Desse modo apresenta-se a figura 50 que representa o comportamento do sistema já com esta alteração.

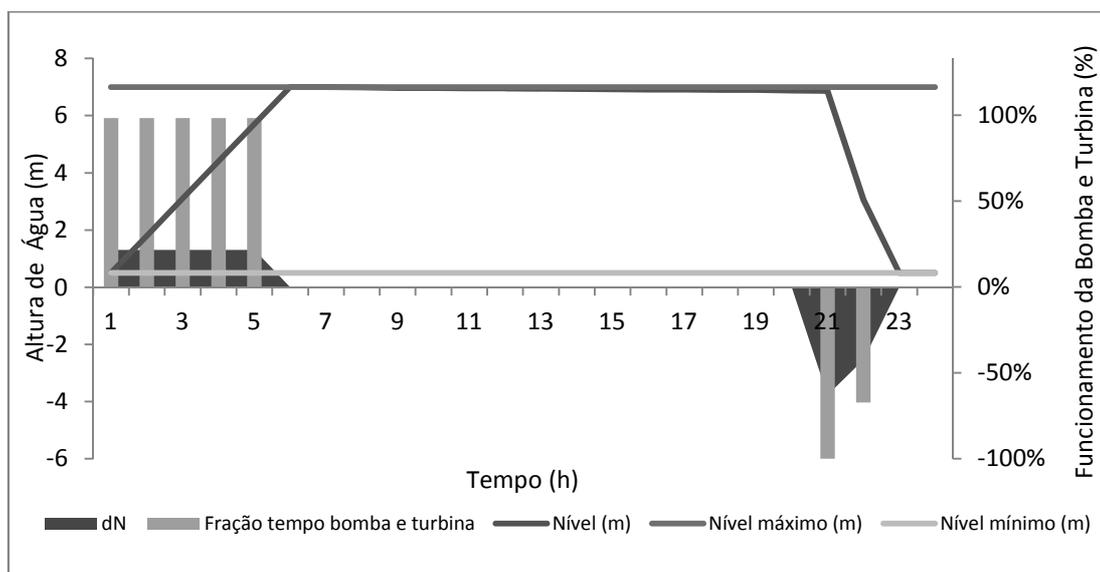


Figura 50: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração da curva de ventos

A figura 50 apresenta um comportamento em todo semelhante à situação em que não é considerado o contributo dos aerogeradores, (subcapítulo 4.3.2). Observa-se que a estação de bombagem eleva água no período inicial, fruto da tarifa ser mais barata a essa hora.

² A curva considerada no caso de estudo anterior foi obtida para as condições climáticas para a época de Verão da ilha da Madeira.

A estação de bombagem funciona durante 5 horas à capacidade máxima atingindo o nível de 7 m e mantendo-o praticamente constante até ao final do dia. Por volta das 21 h dá-se aproveitamento hidroelétrico aproveitando ao máximo a vantagem da tarifa e baixando nível de água no reservatório até ao nível mínimo. A figura 51 apresenta os pontos de funcionamento da estação de bombagem para este caso de estudo.

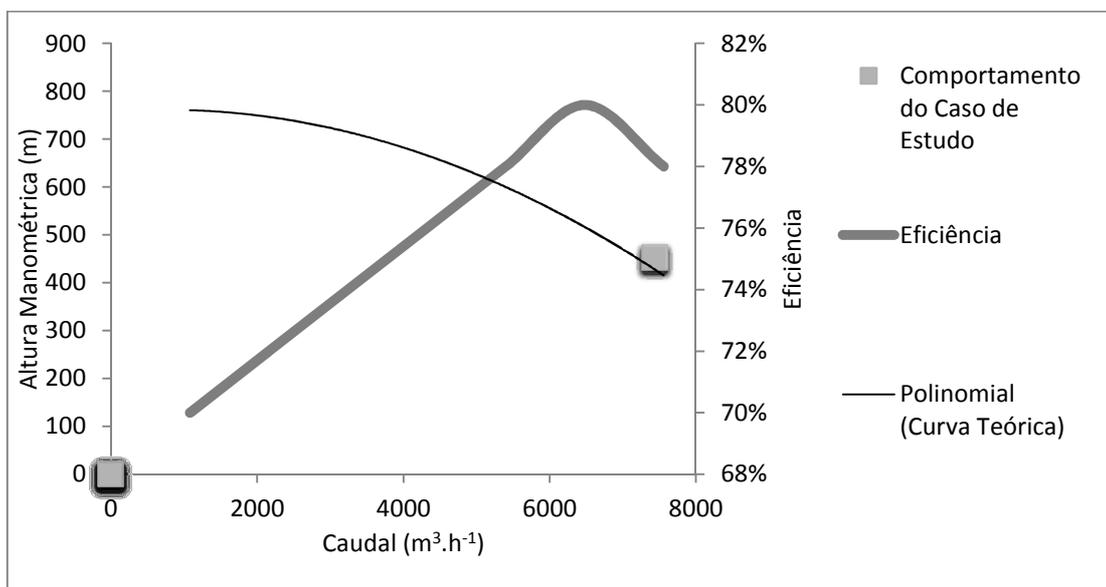


Figura 51: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração da curva de ventos

O comportamento da estação de bombagem para este caso de estudo encontra-se dentro do esperado ou seja, dentro da curva teórica com um comportamento igual ao do subcapítulo 4.3.2. Na figura 52 são apresentados os pontos de funcionamento da estação hidroelétrica.

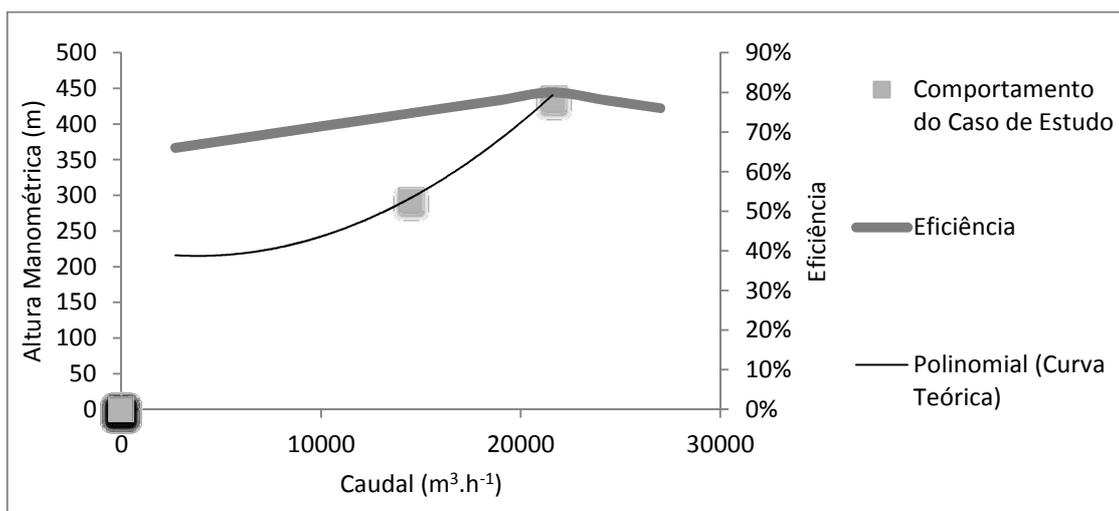


Figura 52: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração da curva de ventos

A estação hidroelétrica apresenta um comportamento igual ao analisado no subcapítulo 4.3.2. Sendo assim, é possível afirmar que o comportamento da estação hidroelétrica é aceitável. A tabela 29 resume todo o balanço económico e energético desta alteração.

Tabela 29: Resultados da análise de sensibilidade à alteração da curva de ventos para o caso de estudo

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	58.066,0 (32%)	-27.857,0 (32%)	-12.985,0 (6%)	17.224,0 (-14%)
Custo diário parcial (€)	2.323,0 (183%)	-2.786,0 (42%)	-926,0 (7%)	-463,0 (9%)
Custo diário total (€)	2.323,0 (23%)			-1.389,0 (13%)

Neste caso, a estação de bombagem necessita de 58.066,0 kW de energia para elevar a água com um custo parcial igual ao custo total de 2.323,0 €/dia. Para a curva de ventos considerada não há qualquer benefício para a estação de bombagem pois o custo total de elevar a água é aproximadamente o mesmo do parcial. Contudo os aerogeradores produzem 12.985,0 kW, 6%, com um lucro de 926,0 €/dia (7%). Mas no momento em que há produção de energia proveniente do vento a tarifa nessa altura é mais vantajosa e compensa descarregar a água para a estação de aproveitamento hidroelétrico que produz 27.857,0 kW com um lucro de 2.786,0 €/dia.

No global, o balanço energético mostra que há um consumo de 17.224,0 kW mas a variação da tarifa permite obter um lucro parcial de 463,0 € (9%) e um lucro global com o excedente dos aerogeradores de 1.389,0 €, 13%..

Ao analisar a curva de potência do aerogerador percebe-se que os aerogeradores estudados não são os mais apropriados para esta gama de velocidade do vento, 6 % da potência gerada inicialmente. A velocidade máxima atingida pelo vento equivale praticamente à velocidade mínima para o aerogerador produzir eletricidade.

O uso destes aerogerador não é o mais eficiente, já que o seu aproveitamento é quase nulo e a otimização realizada apresenta o mesmo resultado que a otimização em que não são consideradas energias renováveis. Para a nova curva de ventos teria que se proceder à substituição dos aerogeradores por uns que se adequem a estas velocidades de vento.

Importa referir que Aveiro é uma cidade situada ao nível do mar com velocidades do vento bastante inconstantes. Os aerogeradores considerados não foram dimensionados para esta gama de velocidades do vento.

4.4.6 Diminuição da Diferença de Cota

Com o intuito de avaliar a diferença de alturas entre o ponto de elevação/aproveitamento de água e o reservatório foi realizada uma análise de sensibilidade em que se considera uma diferença de cota metade da inicial ou seja, na situação base a diferença de alturas é 455,0 m e nesta análise é 228,0 m. O comprimento e o diâmetro das secções de condutas também foram reduzidos para metade do valor base. A tabela 30 resume as principais alterações realizadas a este caso. Os valores apresentados na tabela 30 são metade dos iniciais.

Tabela 30: Características das condutas à análise de sensibilidade à alteração da diferença de cotas

Conduta	Cumprimento (m)	Diâmetro (m)	Zf-Zi (m)
AB	40,0	0,5	8,0
BC	65,0	0,6	50,0
CD	150,0	0,65	50,0
DE	220,0	0,7	50,0
EF	270,0	0,75	70,0

Na figura 53 é apresentado o comportamento do sistema com as alterações enunciadas.

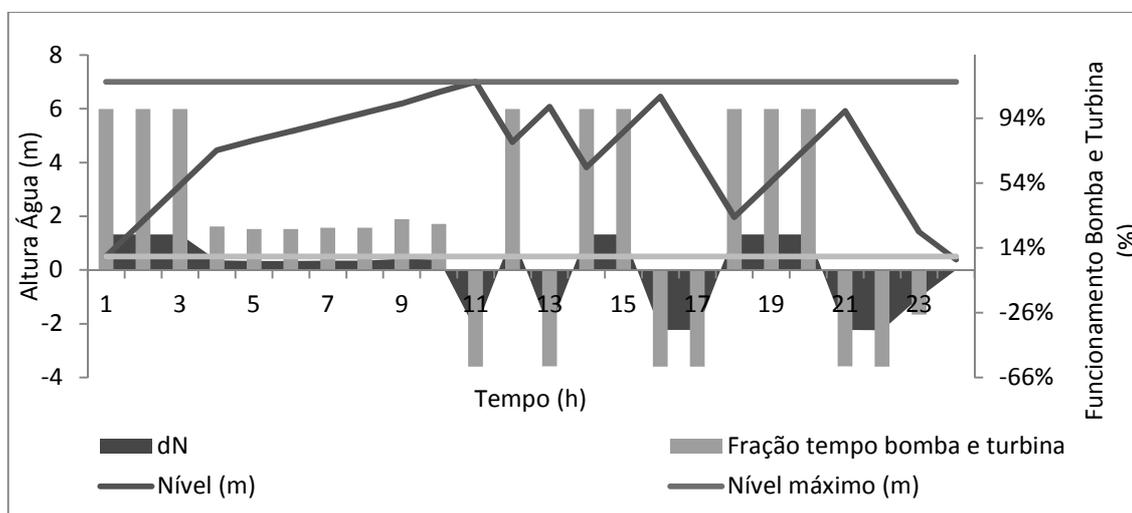


Figura 53: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração da diferença de cotas

O comportamento geral do sistema é semelhante ao caso original (4.3.3) com uma elevada disponibilidade para elevar a água e um elevado recurso à estação hidroelétrica. Na fase inicial e aproveitando o benefício da tarifa e dos aerogeradores, a estação de bombagem eleva a água à capacidade máxima durante 3 h.

Nas 7 h seguintes a elevação de água é feita com menor esforço por parte da estação de bombagem até que o nível máximo é atingido. Nos momentos seguintes observa-se uma grande flutuação do nível de água no reservatório com a estação de aproveitamento hidroelétrica a ser muitas vezes utilizada. A figura 54 mostra o comportamento da estação de bombagem.

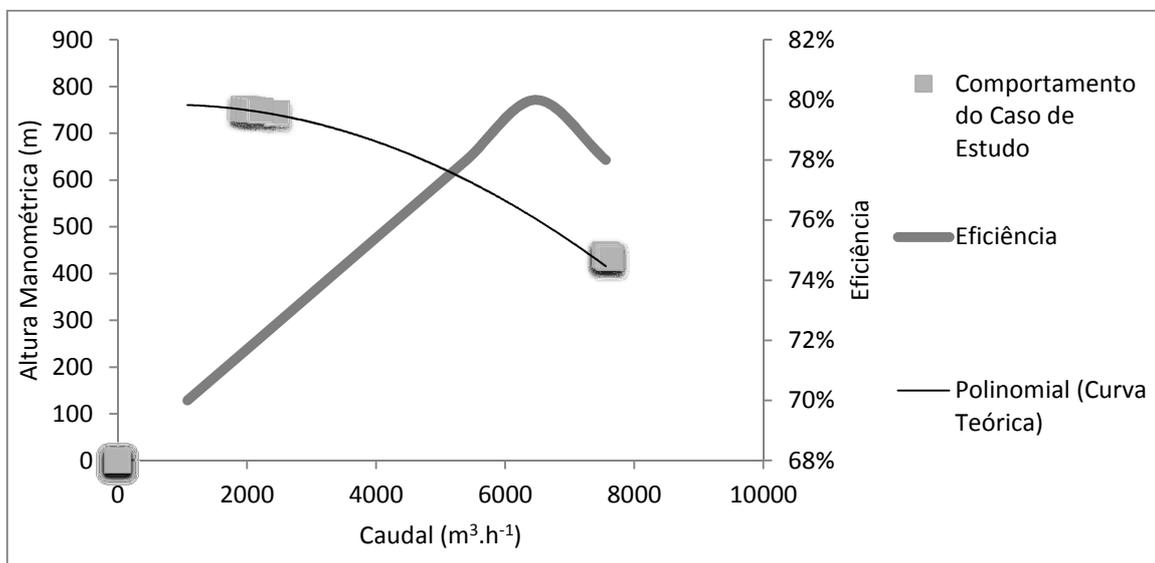


Figura 54: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração da diferença de cotas

É possível observar na figura acima que a estação de bombagem apresenta um comportamento fiel ao esperado com os valores dentro da curva teórica, mas longe dos pontos de eficiência máxima. Na figura 55 é analisado o comportamento da estação hidroelétrica.

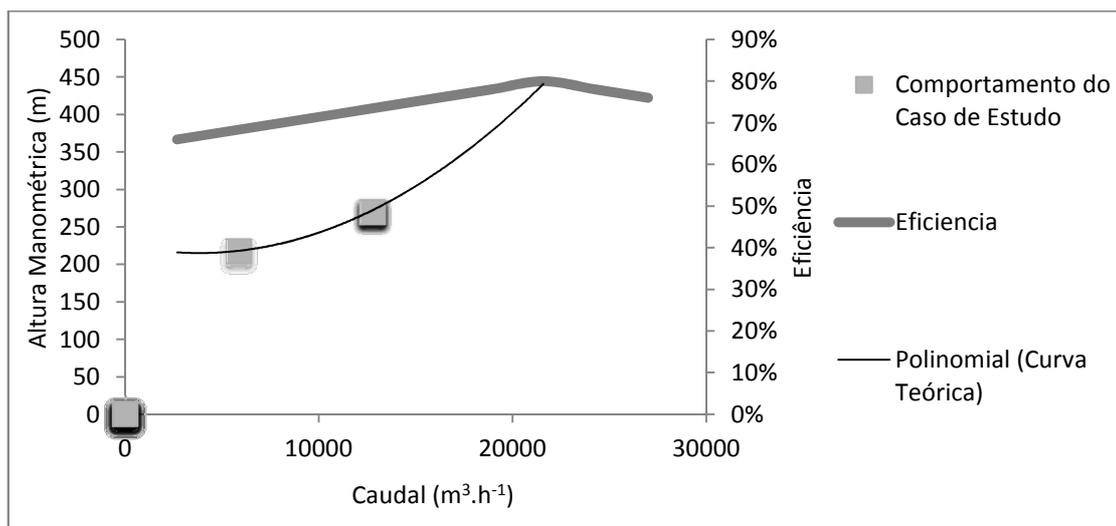


Figura 55: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade da alteração da diferença de cotas

Em comparação com o caso de estudo original, não se verificam valores fora da curva, pois não existem valores residuais no final da otimização que necessitem de ser ajustados. Os valores não se encontram no ponto de eficiência máxima. A tabela 31 mostra os balanços económicos e energéticos a esta alteração.

Tabela 31: Resultados da análise de sensibilidade à alteração da diferença de cotas para o caso de estudo

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	143.757,0 (80%)	-41.272,0 (47%)	-217.583,0 (100%)	-115.098,0 (92%)
Custo diário parcial (€)	586,0 (46%)	-3.000,0 (45%)	-13.923,0 (100%)	-2.414,0 (45%)
Custo diário total (€)	8.153,0 (80%)			-8.770,0 (84%)

Esta alteração traduz-se num consumo de energia por parte da estação de bombagem de 143.757,0 kW/dia (80%) com um custo total de 8.153,0 €/dia (80%) que é reduzido para 586,0 €/dia, 46%, devido à utilização dos aerogeradores. Os aerogeradores produzem 217.583,0 kW/dia de energia com um benefício diário de 13.923,0 €/dia, 100% em ambos os casos. A estação hidroelétrica produz 41.272,0 kW/dia com um lucro para o sistema de 3.000,0 €/dia, 45% do caso original

No global há produção de 115.098,0 kW/dia de energia elétrica com um lucro total de 8.770,0 €/dia (84%), contabilizando o excedente da energia eólica. Sem levar em linha de conta esse excedente e assumindo que toda a energia que a estação de bombagem necessita é suprimida pelos aerogeradores, na existência de vento, o lucro parcial é 2.414,0 €/dia, 45% da situação comparativa.

A energia produzida pela estação hidroelétrica é 47 % da produzida no caso original. O lucro parcial é 2.414,0 €/dia nesta análise contrastando com 5.350,0 €/dia no caso original, 45 %, pois as energias envolvidas com esta alteração são sensivelmente metade das envolvidas no caso de estudo original. Quanto menor for a diferença de cotas, menor é a energia necessária para elevar a água e menor é o aproveitamento da estação hidroelétrica.

4.4.7 Alteração da Tarifa

Com o objetivo de analisar a influência da tarifa na resposta do sistema recorreu-se à tarifa regulada da EDP para clientes finais em Média Tensão para médias utilizações e para o II e III trimestre do ano de 2011 [20]. A tarifa é descrita na figura 56.

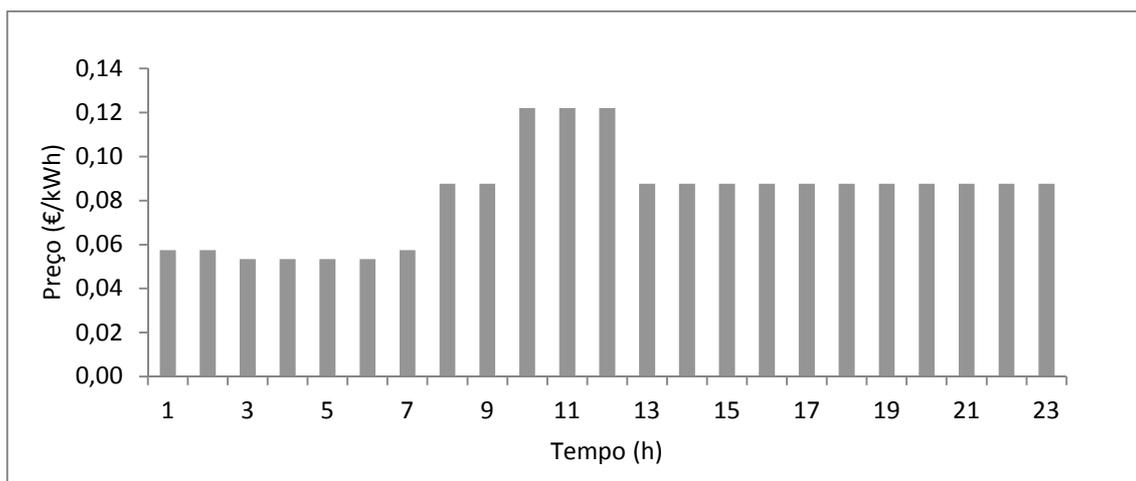


Figura 56: Tarifa adoptada para a análise de sensibilidade a este caso de estudo

Esta tarifa diferencia-se da adotada no caso base na hora em que a eletricidade é mais cara. Nesta situação das 10 h às 12 h é a hora em que a eletricidade é mais cara. Contudo e tendo em linha de conta que foi considerado que o preço de compra de energia à rede é igual ao preço de venda este intervalo de tempo torna-se assim no que mais benefícios económicos oferece. No caso original o momento mais interessante para vender energia à rede é das 18 h às 21 h. Na figura 57 é analisado o comportamento do sistema com esta alteração.

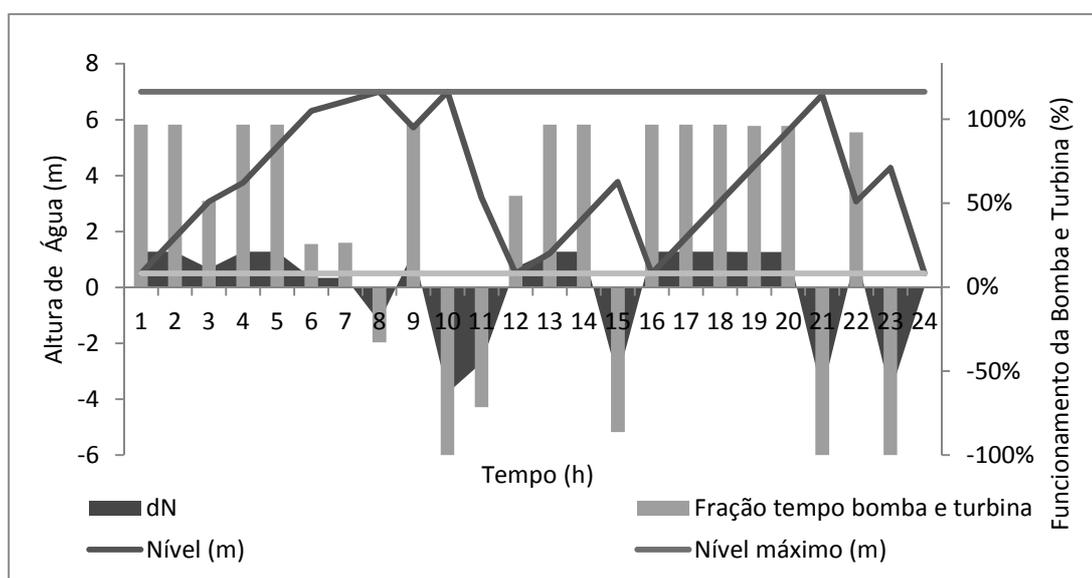


Figura 57: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração da tarifa

A figura 57 mostra que na fase inicial da otimização há uma preferência por elevar a água até ao reservatório, isso acontece com a estação de bombagem a funcionar quase à taxa máxima durante as primeiras 5 h. Pelas 10 h e aproveitando a vantagem da tarifa o sistema opta por descarregar a máxima quantidade de água possível durante 2 h até que o nível mínimo é atingido.

O fato de haver energia de origem renovável fornece ao sistema a capacidade de bombear a água até ao depósito que atinge o nível máximo às 21 h. A partir desse momento e até ao final do dia o nível mínimo é atingido com aproveitamento de energia elétrica pela estação hidroelétrica. A figura 58 avalia o comportamento da estação de bombagem.

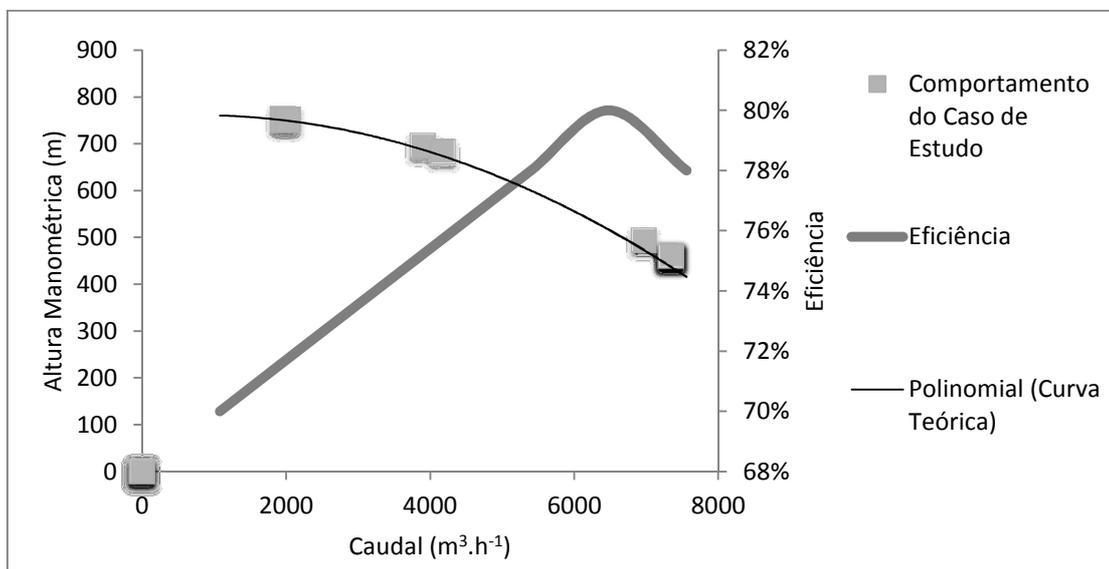


Figura 58: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração da tarifa

Analisando a figura 58 observa-se que os valores se encontram dentro da curva de comportamento teórica. Não se verifica uma preferência pelo ponto de eficiência máxima. A figura 59 representa o comportamento da estação hidroelétrica.

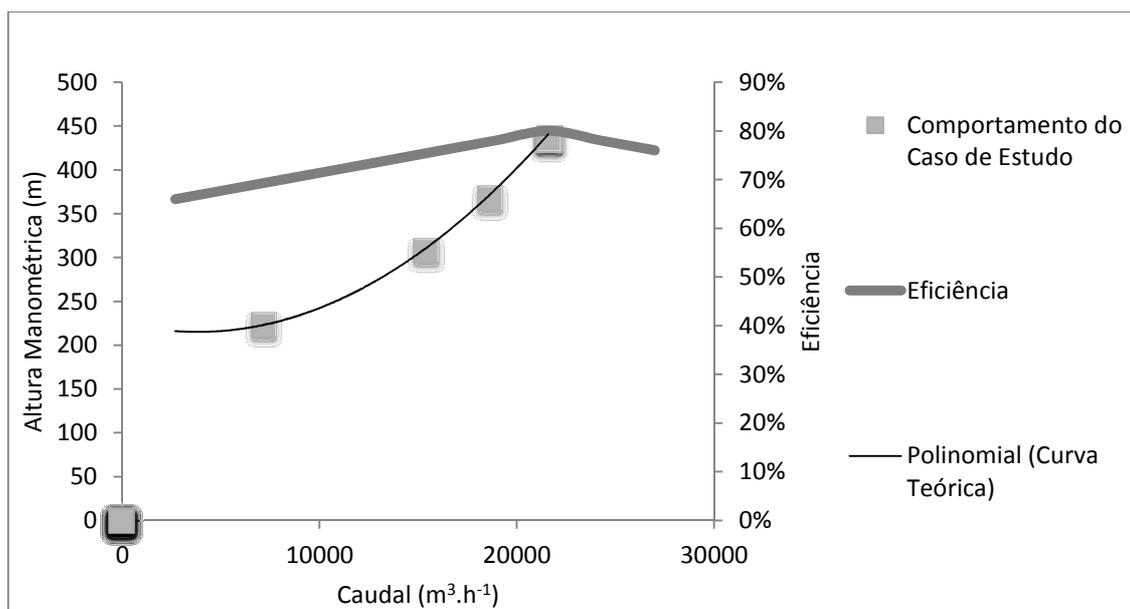


Figura 59: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração da tarifa

Observa-se na figura 59 que não é infringida nenhuma lei da hidráulica com todos os valores dentro da curva teórica, com alguns valores no ponto de eficiência máxima. A tabela 32 tem resumido o balanço energético e financeiro ao sistema.

Tabela 32: Resultados da análise de sensibilidade à alteração da tarifa para o caso de estudo

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	183.408,0 (102%)	-84.190,0 (97%)	-217.583,0 (100%)	-118.365,0 (94%)
Custo diário parcial (€)	1.791,0 (141%)	-8.376,0 (127%)	-18.577,0 (133%)	-6.585,0 (123%)
Custo diário total (€)	14.236,0 (141%)			-12.717,0 (122%)

Com a alteração da tarifa não há alteração da quantidade de energia produzida pelos aerogeradores. O valor continua a ser 217.583,0 kW/dia. Contudo, a venda dessa energia à rede rende agora 18.577,0 €/dia acrescentado 4.654,0 €/dia ao valor obtido no caso original, 133 %. A estação de bombagem apresenta uma necessidade energética de 183.408,0 kW/dia com um custo total de 14.236,0 €/dia (141%). No caso original o custo diário é 10.129,0 €/dia.

O benefício da energia dos aerogeradores permite reduzir a fatura da estação de bombagem para 1.791,0 €/dia. A estação hidroelétrica produz menos 84.190 kW/dia (97 %) de energia com a nova tarifa. Desse modo, o lucro obtido é maior, 8.376,0 €/dia neste caso contra 6.616,0 €/dia no caso original, 127 %. No global, o balanço energético mostra que há menos 7.371,0 kW/dia de produção energética, 94% do caso original. Assim, com esta tarifa o lucro parcial sem o excedente da eólica é 123 % do caso comparativo. Contabilizando o excedente, a vantagem económica é 12.717,0 €/dia, 122 %.

4.4.8 Diminuição do Número de Bombas

Com o intuito de analisar qual a influência do número de bombas no comportamento do sistema foi realizada uma otimização apenas com o contributo de uma bomba em vez de três em paralelo.

A alteração do número de bombas acarreta algumas alterações ao sistema considerado. A curva que relaciona a altura manométrica atingida pela estação de bombagem com o caudal é alterada, sendo necessário adaptar uma nova curva de forma a relacionar essas duas variáveis corretamente. A equação que define a potência da estação de bombagem também é influenciada pela diminuição do número de bombas bem como as perdas de carga e respetivas energias mínimas a alcançar. Essa relação pode ser observada na figura 60.

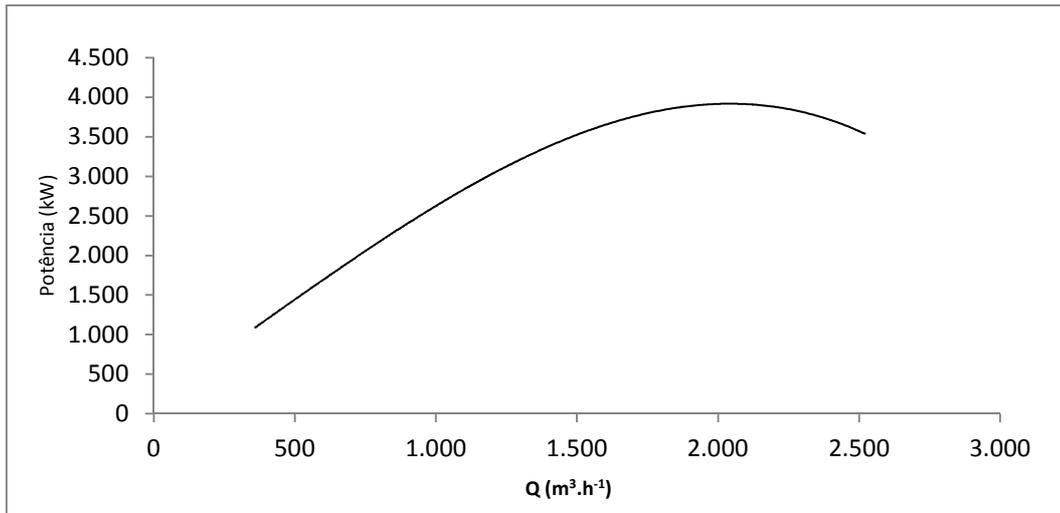


Figura 60: Curva de potência da estação de bombagem para a análise de sensibilidade à alteração do número de bombas para o caso de estudo

O gráfico da figura 60 pode ser traduzido pela equação

$$P_{B_h}(\text{kW}) = -3 \times 10^{-7} \times Q_{B_h}^3 + 0,0003 \times Q_{B_h}^2 + 2,3978 \times Q_{B_h} + 199,05, \quad (4.28)$$

onde a potência da bomba se relaciona com o caudal de bombagem por meio de uma equação de 3º grau.

A nova altura manométrica da bomba é agora definida pela seguinte equação

$$H_{B_h}(\text{m}) = -7 \times 10^{-5} \times Q_{B_h}^2 + 0,0334 \times Q_{B_h} + 757,14. \quad (4.29)$$

O número de bombas ao ser alterado influencia a equação que define a relação entre altura mínima de elevação da água e o caudal. A equação

$$H_{Mín_h}(\text{m}) = 1 \times 10^{-7} \times Q_{B_h}^2 - 2 \times 10^{-15} \times Q_{B_h} + 455, \quad (4.30)$$

relaciona essas variáveis e é observado na figura 61.

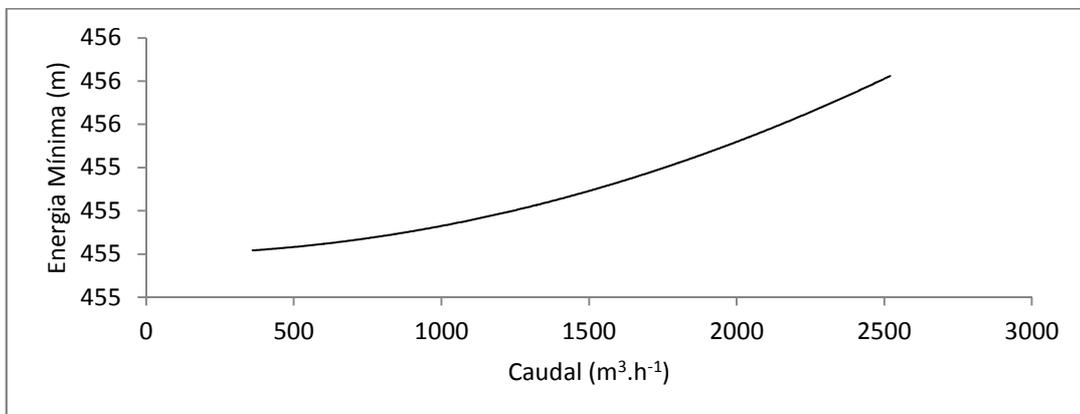
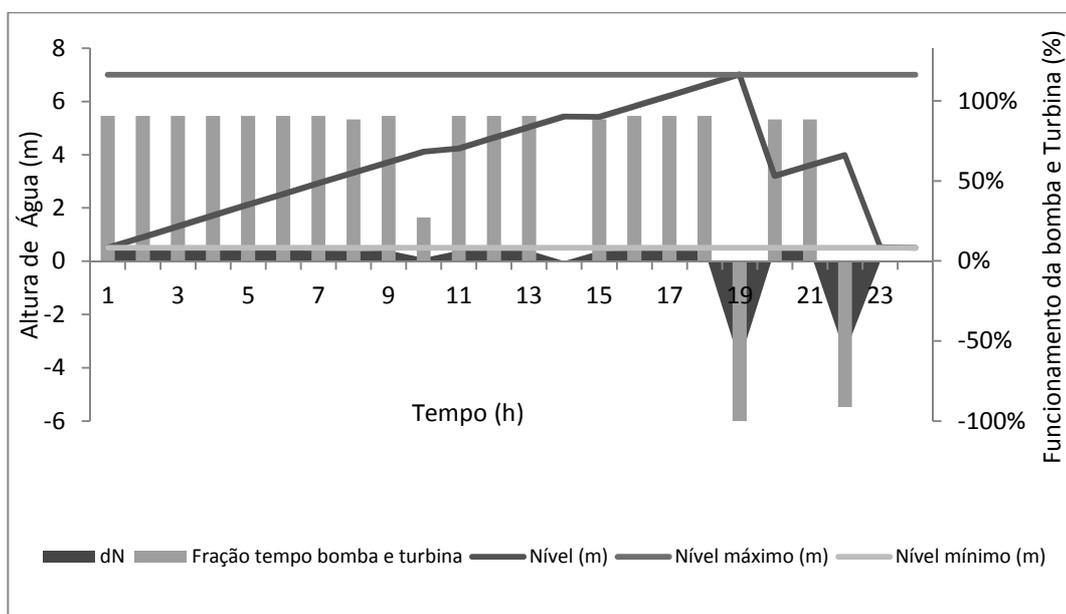


Figura 61: Energia mínima a vencer na análise de sensibilidade ao número de bombas

O gráfico que mostra o comportamento do sistema com esta alteração é evidenciado na figura 62.



A figura 62 mostra que o sistema perde capacidade para colocar uma elevada quantidade de água num curto espaço de tempo.

Numa fase inicial é bombeada água para o reservatório com a bomba a funcionar próximo da sua capacidade máxima e o limite máximo do reservatório só é atingido próximo das 19 h. Quando o nível máximo é atingido, a estação hidroelétrica funciona a 100 % da sua capacidade durante uma hora. Pelas 20 h e 21 h a estação de bombagem eleva novamente água para que na hora seguinte seja toda descarregada atingindo assim o nível mínimo no final da otimização. A figura 63 retrata o comportamento da estação de bombagem.

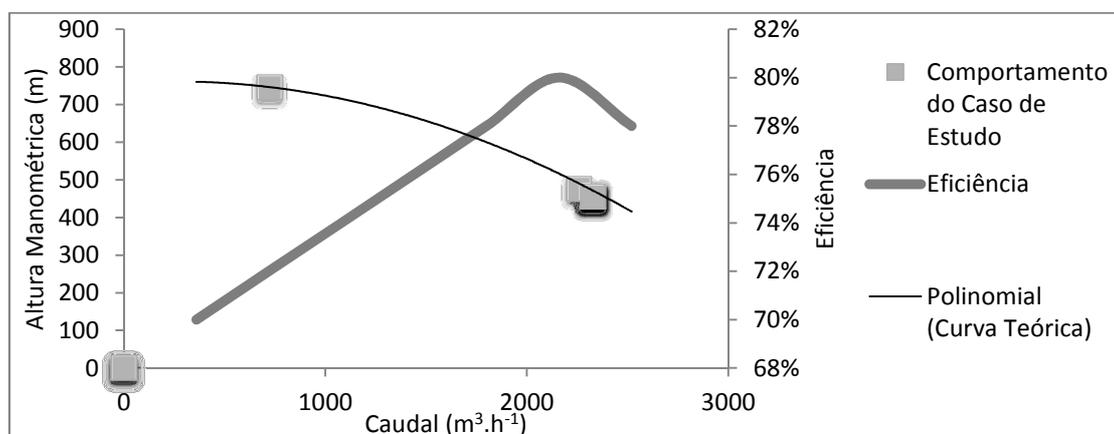


Figura 63: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração do número de bombas

O comportamento da estação de bombagem é coerente com o esperado, com os valores dentro da curva e com uma tendência preferencial para os pontos de rendimento máximo, elevando uma elevada quantidade de água a cada hora. A menor capacidade da estação de bombagem que passou de 3 bombas em paralelo para apenas 1 explica esse fato. Na figura 64 é avaliado o comportamento da estação hidroelétrica.

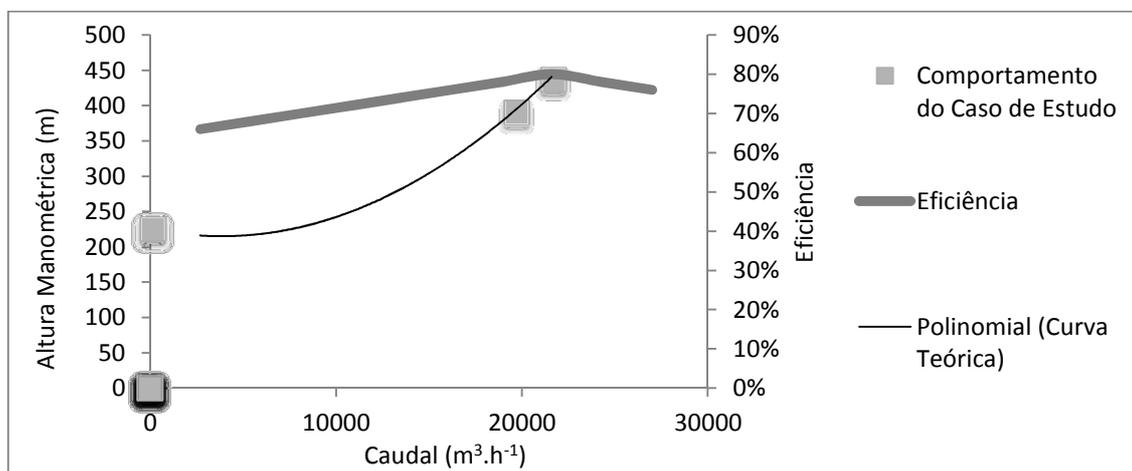


Figura 64: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração do número de bombas

A estação hidroelétrica apresenta um valor fora da curva teórica que corresponde à última hora da otimização. Os restantes valores apresentam valores de caudal elevados com a estação hidroelétrica a ser utilizada à taxa máxima sempre que é solicitada, com valores de eficiência elevados. A tabela 33 resume o balanço energético e financeiro desta alteração.

Tabela 33: Resultados da análise de sensibilidade à alteração ao número de bombas para o caso de estudo

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	67.239,0 (38%)	-39.058,0 (45%)	-217.583,0 (100%)	-189.402,0 (151%)
Custo diário parcial (€)	0,0 (0%)	-3.757,0 (57%)	-13.923,0 (100%)	-3.757,0 (70%)
Custo diário total (€)	3.672,0 (36%)			-14.008,0 (135%)

A potência que a nova estação de bombagem necessita para elevar a água é agora 67.239,0 kW/dia, 38 % do caso original, com um custo total de 3.672,0 €/dia. Na situação em que a estação de bombagem possuiu 3 bombas em paralelo o consumo é de 179.029,0 kW/dia com um custo de 10.129,0 €/dia.

Este exemplo evidencia o contributo dos aerogeradores já que com apenas uma bomba todo o custo da estação de bombagem é suportado pelos aerogeradores não consumindo energia da rede elétrica. Na situação em que são consideradas 3 bombas na estação de bombagem os aerogeradores baixaram a fatura energética de 10.129,0 €/dia para 1.266,0 €/dia.

A estação hidroelétrica, por seu lado produz uma quantidade menor de eletricidade (39.058,0 kW/dia), 45 % do caso original. Esta diferença é explicada pela menor capacidade que a estação de bombagem possui para elevar a água. Os aerogeradores não sofrem qualquer alteração energética e financeira em relação à situação original.

Energeticamente o balanço global é mais favorável pois o consumo por parte da estação de bombagem é menor e a produção de energia com origem no vento mantém-se inalterável. A nível financeiro, o lucro parcial do sistema com esta alteração é 3.757,0 €/dia, 70 % do caso original O lucro total é agora 14.008,0 €/dia, 135 % do caso base, devido à menor capacidade da estação de bombagem para elevar a água.

4.4.9 Diminuição do Número de Turbinas

Neste caso concreto o número de turbinas da central hidroelétrica passou de 3 para 1. A equação que define a relação entre o caudal e a altura manométrica é alterada assim como a equação da potência da estação hidroelétrica. A altura manométrica da estação hidroelétrica em relação ao caudal para esta situação é definida pela equação

$$H_{T_h} \text{ (m)} = 6 \times 10^{-6} \times Q_{T_h}^2 - 0,0164 \times Q_{T_h} + 225,62 . \quad (4.31)$$

O gráfico da potência gerada pela nova estação hidroelétrica é apresentado na figura 65.

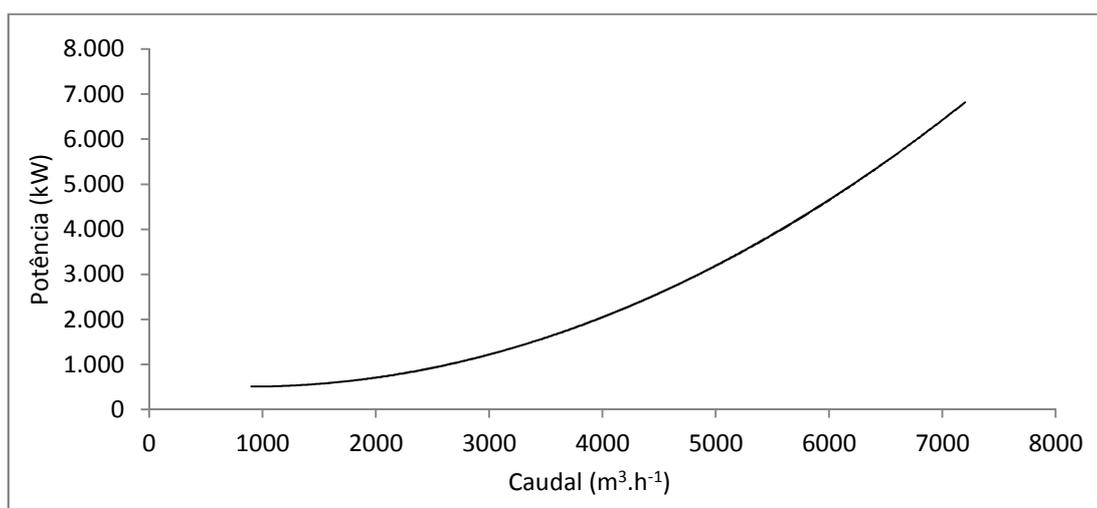


Figura 65: Potência da estação hidroelétrica na análise de sensibilidade à alteração do número de turbinas

A potência gerada pela turbina é agora definida pela equação

$$P_{T_h}(\text{kW}) = 2 \times 10^{-4} \times Q_{T_h}^2 - 0,2763 \times Q_{T_h} + 628,2 . \quad (4.32)$$

O comportamento do sistema a esta alteração é observado na figura 66.

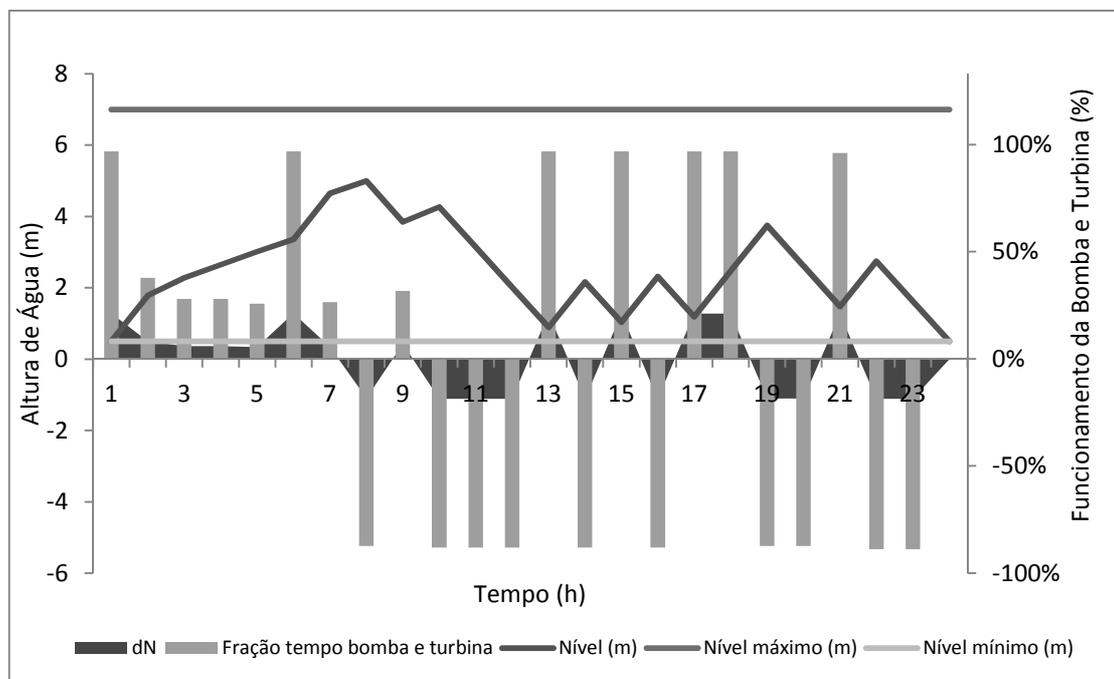


Figura 66: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração do número de turbinas

Esta alteração reflete-se numa menor capacidade da estação hidroelétrica em turbinar a água, fato que limita a capacidade da estação de bombagem. A altura máxima do reservatório nunca é atingida em contrapartida, o nível de água oscila muitas vezes próximo da capacidade mínima. A turbina, neste caso, funciona mais vezes o que limita a capacidade do sistema para bombear água.

O sistema começa a otimização por elevar a água durante as primeiras 7 h nunca atingindo a altura máxima. O nível mínimo no reservatório é obtido às 13 h ao fim de quase 4 h de descarga com a estação hidroelétrica a funcionar à capacidade máxima. Mostrando assim a maior limitação no aproveitamento energético face à situação original. Das 13 h até ao final do dia o sistema alterna entre a elevação e a descarga de água até que às 24 h o sistema termina a otimização com o nível mínimo a ser atingido.

O comportamento da estação de bombagem segue na figura 67.

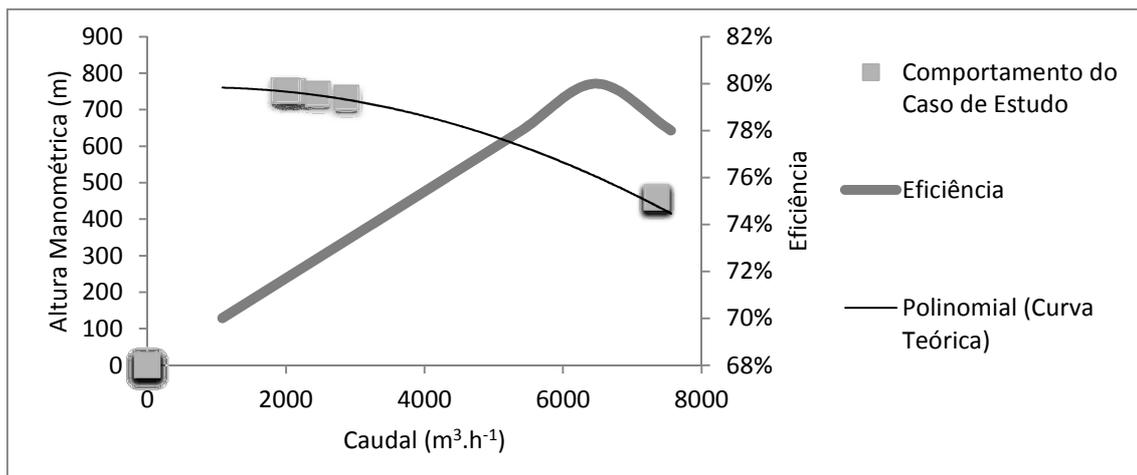


Figura 67: Comportamento da estação de bombeamento à análise de sensibilidade à alteração do número de turbinas

A estação de bombeamento apresenta um comportamento coerente com aquilo que era esperado, com valores de eficiência ligeiramente afastados dos pontos de eficiência máxima. O comportamento da estação hidroelétrica é analisado na figura 68.

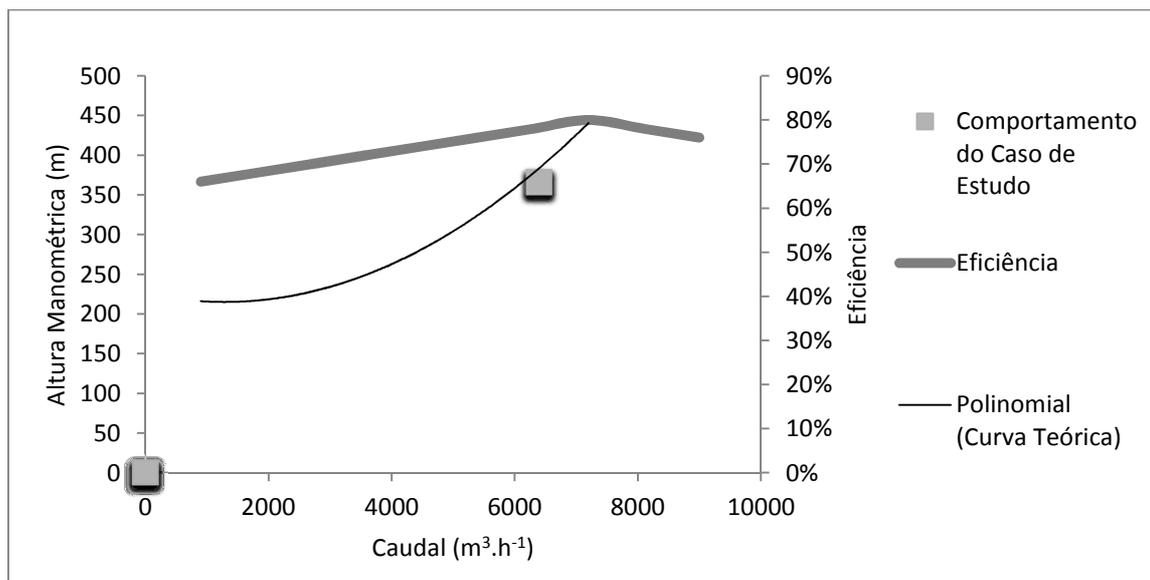


Figura 68: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração do número de turbinas

Os valores que demonstram o comportamento real da estação hidroelétrica encontram-se todos dentro da curva teórica e próximos do ponto de eficiência máxima. A tabela 34 resume todo o balanço energético e financeiro a esta modificação.

Tabela 34: Resultados da análise de sensibilidade à alteração ao número de turbinas para o caso de estudo

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	118.936,0 (66%)	-70.560,0 (81%)	-217.583,0 (100%)	-169.207,0 (135%)
Custo diário parcial (€)	430,0 (34%)	-4.939,0 (75%)	-13.923,0 (100%)	-4.509,0 (84%)
Custo diário total (€)	6.397,0 (63%)			-12.465,0 (120%)

A estação de bombagem apresenta uma necessidade energética de 118.936,0 kW/dia com um custo total de 6.397,0 €/dia. Contudo, o contributo dos aerogeradores faz baixar esse encargo financeiro para 430,0 €/dia, 34 % da situação original. A estação hidroelétrica apresenta um valor de aproveitamento energético inferior ao caso original, 81 %. Com apenas uma turbina considerada a sua taxa de utilização é máxima, enquanto no caso de estudo base a sua frequência de utilização é menor.

Nesta situação, a estação hidroelétrica funciona durante 10 h contra apenas 4 h de utilização no caso original. O aumento da frequência de uso da estação hidroelétrica traduz-se numa menor frequência de utilização da estação de bombagem, perdendo-se assim a capacidade de elevar uma grande quantidade de água.

O lucro parcial com esta alteração baixou de 5.350,0 €/dia para 4.509,0 €/dia, 84 %. Observa-se uma diminuição da energia produzida pela estação hidroelétrica que é agora 70.560,0 kW/dia e com 3 turbinas foi 87.182,0 kW/dia, 81 %. A menor capacidade para turbinar água a cada hora faz com que ela necessite de funcionar mais vezes, o que impede a estação de bombagem de elevar a água. A energia que a estação de bombagem necessita é 118.939,0 kW/dia enquanto com 3 turbinas esse valor é 179.029 kW/dia, 66 %.

4.4.10 Diminuição do Número de Aerogeradores

Foi avaliada a reação do sistema à diminuição do número de aerogeradores, dos 5 iniciais apenas se consideraram 2. O comportamento do sistema a essa alteração pode ser observado na figura 69.

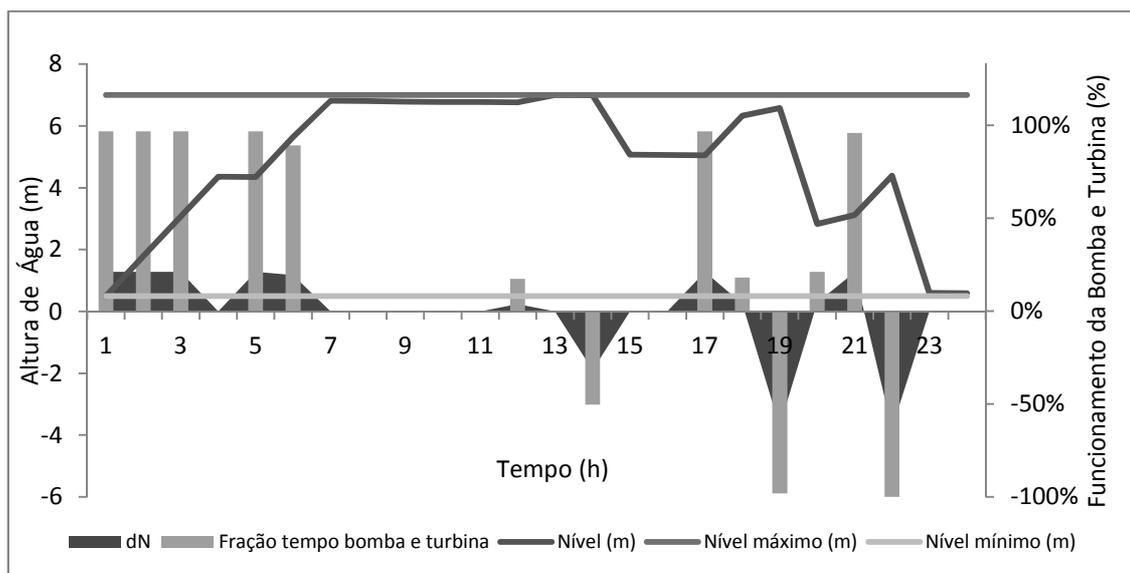


Figura 69: Comportamento do sistema à análise de sensibilidade à alteração do número de aerogeradores

A diminuição do número de aerogeradores faz com que a flutuação do nível da água seja menor, pois a disponibilidade de energia proveniente de fontes renováveis é menor.

Aproveitando o benefício da tarifa, o sistema na fase inicial opta por elevar água até ser atingido o nível máximo no reservatório. O fato de não haver uma elevada disponibilidade energética por parte dos aerogeradores faz com o nível de água se mantenha constante até às 13 h. Nos instantes seguintes, o sistema varia entre descarga e elevação de água até que atinge o valor mínimo no final do ciclo de funcionamento.

O comportamento da estação de bombagem é descrito na figura 70.

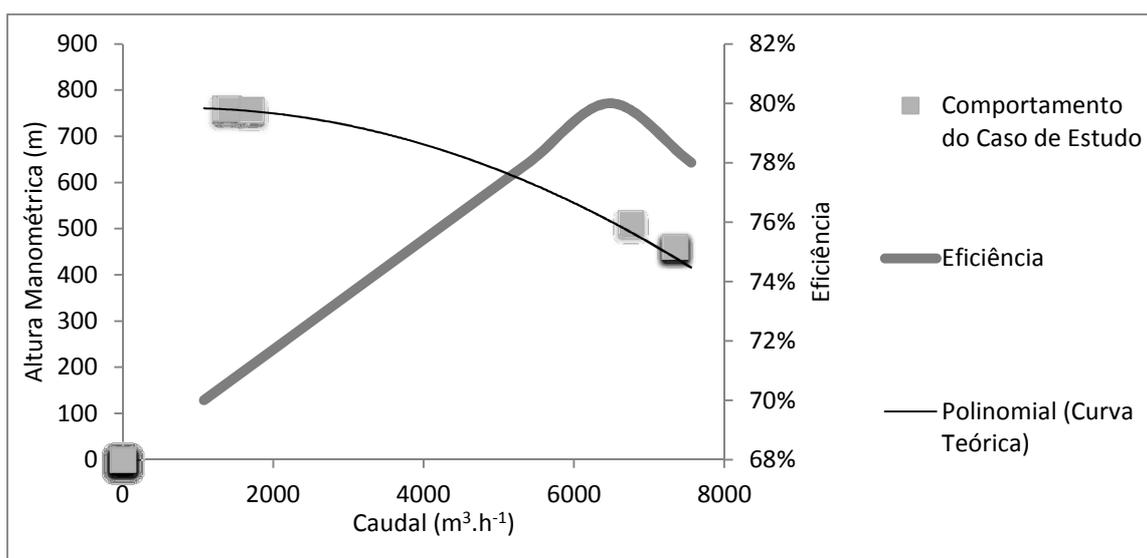


Figura 70: Comportamento da estação de bombagem à análise de sensibilidade à alteração ao número de aerogeradores

A estação de bombagem apresenta os valores dentro da curva de comportamento teórico não violando assim nenhuma lei da hidráulica e evidenciando o seu comportamento normal.

A estação hidroelétrica é alvo de avaliação do seu comportamento na figura 71.

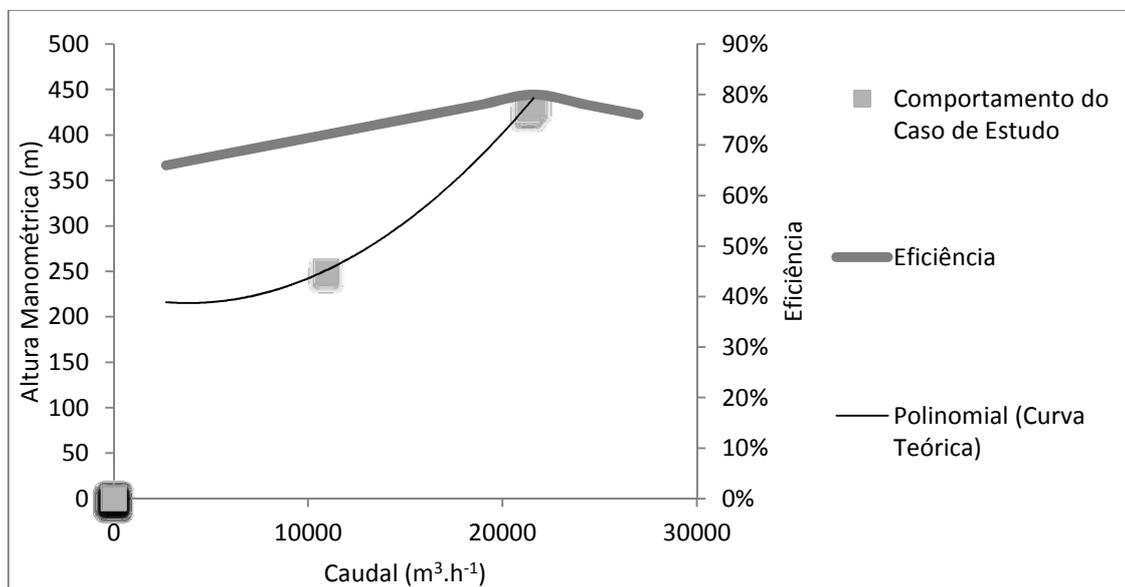


Figura 71: Comportamento da estação hidroelétrica à análise de sensibilidade à alteração ao número de aerogeradores

O comportamento da estação hidroelétrica diz respeito a 3 horas de funcionamento e todos os valores se encontram dentro da curva teórica, com valores no ponto de eficiência máxima.

Na tabela 35 é resumido os balanços financeiros e energéticos do sistema.

Tabela 35: Resultados da análise de sensibilidade à alteração ao número de aerogeradores para o caso de estudo

	Estação Bombagem	Estação Hidroelétrica	Aerogeradores	Resultado Final
Potência diária (kW)	95.312,0 (53%)	-42.830,0 (49%)	-87.033,0 (40%)	-34.551,0 (27%)
Custo diário parcial (€)	2.910,0 (230%)	-4.090,0 (62%)	-5.569,0 (40%)	-1.180,0 (22%)
Custo diário total (€)	5.202,0 (51%)			-4.457,0 (43%)

A diminuição do número de aerogeradores tem elevado impacto nos resultados. A nível energético, a estação de bombagem apresenta um consumo de 95.312,0 kW/dia, 53%. A estação hidroelétrica e os aerogeradores produzem 42.830,0 kW/dia e 87.033,0 kW/dia, respetivamente. O custo total com a estação de bombagem é de 5.202,0 €/dia.

Contudo, os aerogeradores conseguem baixar essa fatura para 2.910,0 €/dia. A estação hidroelétrica e os aerogeradores apresentam lucros de 4.090,0 €/dia e 5.569,0 €/dia por dia, respetivamente. No global e sem o excedente da energia eólica o sistema apresenta uma vantagem económica de 1.180,0 €/dia. Se for levado em linha de conta o excedente, o lucro passa para 4.457,0 €/dia.

Comparando esta situação com o caso original percebe-se que o sistema perde capacidade para turbinar a água necessitando de mais horas do dia para aproveitar a mesma quantidade de água. O acréscimo de funcionamento da turbina vai limitar o sistema, pois assim há uma menor utilização da estação de bombagem, onde nível de água máximo no depósito não é sequer atingido. O lucro parcial é 22 % da situação original e o lucro total é 43 %. O custo diário parcial para elevar a água é 230% da situação comparativa.

4.5 Comparação com outros resultados

Torna-se importante comparar os resultados obtidos com outros estudos numéricos feitos para o mesmo sistema (Fins-Múltiplos da Madeira) [2]. A tabela 36 mostra alguns resultados.

Tabela 36: Valores comparativos com outros estudos teóricos

	Otimizado sem Energias Renováveis	Otimizado com Recurso a Aerogeradores para uma situação de Verão
Resultado do atual modelo (€)	463,0	5.350,0
Resultado de [2] (€)	510,0	5.161,0
Varição	110 %	96,5 %

Os resultados listados na tabela 36 dizem respeito à situação otimizada sem recurso a energias renováveis e otimizada com recurso a aerogeradores para a situação de Verão. Comparando para este caso de estudo é possível concluir que os valores se encontram próximos. O primeiro caso apresenta uma variação de 10 %, ou seja, no caso de estudo apresentado em [2] o resultado financeiro foi superior que no modelo analisado nesta dissertação. Na segunda situação considerada, o resultado económico do modelo atual é 96,5% do caso de estudo apresentado em [2].

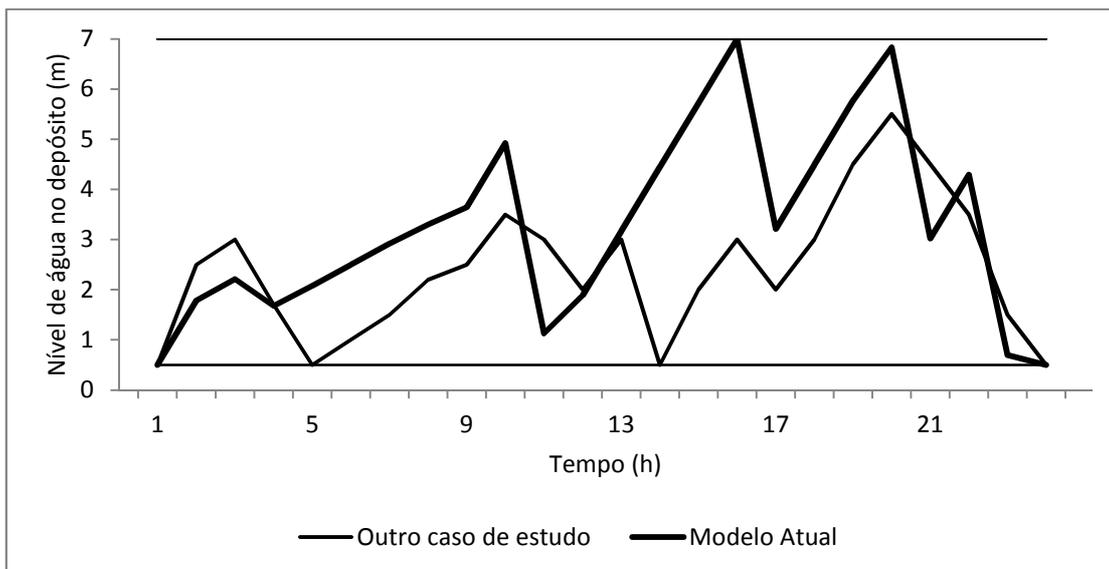


Figura 72: Comparação da variação do nível de água no depósito com o caso de estudo de [2]

Analisando a figura 72 é possível observar que o comportamento e tendências das duas situações são similares. Contudo, no modelo atual o nível máximo é atingido por duas vezes, situação que nunca se verifica no caso de estudo comparativo. A fração de funcionamento nos dois casos é descrita na figura 73.

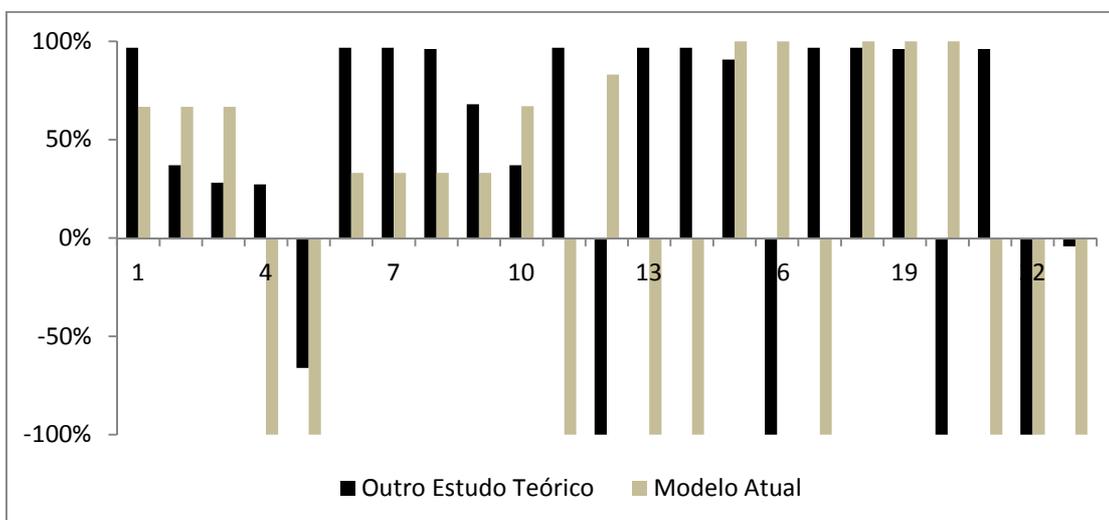


Figura 73: Comparação da fração de funcionamento da estação de bombagem e estação hidroelétrica com outro caso de estudo [2]

A fração de funcionamento das duas situações em análise é descrita na figura 73. A comparação é feita hora a hora e salienta-se que um funcionamento de 100 % corresponde a uma utilização máxima, 60 minutos. Os dois casos apresentam algumas semelhanças, mas não é possível afirmar que o comportamento é similar.

5 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

Neste capítulo são discutidas as principais conclusões deste trabalho. Adicionalmente também são propostos alguns trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Em Portugal, o excesso de potência eólica instalada pode ser aproveitado para armazenar a água de forma a ser aproveitada energeticamente quando for necessário.

Embora não tenha sido feita uma análise de investimento, os sistemas de fins múltiplos apresentam inúmeras vantagens. Desde já importa salientar que este sistema permite armazenar energia de forma a utilizá-la quando for necessário, ou mais conveniente. Deste modo é possível estabilizar a rede elétrica, evitando assim picos de consumo.

A existência de uma tarifa variável e a otimização do horário de funcionamento do sistema resulta em elevados benefícios económicos.

Este tipo de modelos corretamente implementados permitem estudar uma grande variedade de situações pois este é um modelo flexível, onde facilmente se alteram os parâmetros de entrada.

A situação inicial representa apenas o consumo da população e tem um custo de aproximadamente 200 €. A introdução de uma estação hidroelétrica permite obter um resultado positivo de 463 € embora energeticamente a operação seja ineficiente. Com a introdução de aerogeradores e considerando a curva de ventos típica para a altura de Verão o lucro é 5.350 €, 1156 %, quando comparado com o sistema sem recurso a energias renováveis. Se a curva de ventos considerada for para a altura de Inverno, o lucro é 83 % do relativo à situação de Verão.

As análises de sensibilidade feitas às variáveis do sistema mostram a flexibilidade do modelo. A diminuição da capacidade do reservatório para metade aumenta a energia produzida, 111 % em relação ao caso que considera o recurso a aerogeradores para a época de Verão, mas diminui o lucro, apenas 22,5 % do caso de estudo comparativo.

O nível no momento inicial do processo de otimização tem implicação direta nos resultados. Quando o nível inicial é máximo e o nível final é mínimo há um aumento da energia produzida e do lucro obtido para o período de um dia, 126 % e 113 %, respetivamente, quando comparado com o caso em que há recurso a energia com origem no vento para a época de Verão. Se o nível inicial e final for máximo o lucro diário diminui, 63 % do caso de estudo com recurso a aerogeradores para uma curva de ventos típica do Verão.

A curva de ventos tem elevado impacto nos resultados do modelo. Para uma curva de ventos para a região de Aveiro típica da altura do Verão, o resultado financeiro diminui, 9 % quando comparado com a situação em que há recurso a aerogeradores para a época de Verão da ilha da Madeira.

A diminuição para metade da diferença de cota entre os dois reservatórios baixa o lucro diário do sistema, 45 % quando comparado com o caso de estudo em que são considerados aerogeradores para a época de Verão.

A tarifa utilizada também sofreu alteração, a nova tarifa considerada aumentou o lucro diário, 123 %, apesar de haver uma diminuição da energia produzida, 94 %, em relação ao caso de estudo em que são consideradas energias renováveis para a época de Verão.

A redução do número de bombas em paralelo de 3 para 1 resulta na diminuição do lucro, 70 %, enquanto a diminuição do número de turbinas de 3 para 1 diminui o lucro inicial, 84 %, comparando com o caso de estudo com energias renováveis para a altura de Verão.

Na última análise foi avaliado o impacto da diminuição do número de aerogeradores de 5 para 2, com uma diminuição do lucro inicial e produção energética, 22 % e 27 %, respetivamente, quando comparado com a situação em que há recurso a energias renováveis para a uma curva de ventos típica do Verão.

Dos resultados da análise de sensibilidade é possível concluir que o sistema que apresenta maior rentabilidade financeira é aquele que aplica uma nova tarifa [20]. Contudo, este caso de estudo valida a metodologia aplicado, provando que poderia ser aplicado a qualquer caso.

A comparação com outros trabalhos sobre o mesmo sistema apresenta resultados similares, o que permite validar o modelo implementado.

5.2 Perspetivas futuras

Não foi realizado um estudo de viabilidade económica sobre a implementação deste tipo de sistemas num local onde não existisse qualquer tipo de infraestruturas. O estudo realizado apenas tem em consideração o ganho com o equipamento já instalado e não tem em linha de conta custos de manutenção ou qualquer outro tipo de prejuízos. Contudo, esse seria o próximo passo deste trabalho. Seria interessante avaliar o período de retorno da instalação de um sistema com estas características, aliada à implementação de aerogeradores, de forma a perceber, qual o número ideal de aerogeradores que maximizaria os lucros. Este modelo seria importante para avaliar qual a melhor solução a instalar, pois sendo um modelo bastante flexível seria possível estudar diversas situações distintas e avaliar a que seria mais vantajosa.

A diminuição do passo de otimização para meia hora seria um ponto interessante de avaliar. A sensibilidade e a capacidade de resposta do sistema aumentaria, o que aproximaria o resultado da realidade.

ANEXOS

LISTA DE ABREVIATURAS

AIE	Agência Internacional Energia
ONG	Organização Não Governamental
PIB	Produto Interno Bruto
CO ₂	Dióxido de Carbono
PRV	Válvula Redutora de Pressão
SAA	Sistema Abastecimento Água
ETA	Estação de Tratamento de Água
Re	Número de Reynolds
ρ	Densidade (Kg.m ⁻³)
v	Velocidade (m.s ⁻¹)
D	Diâmetro (m)
μ	Viscosidade (Pa.s)
E_{rel}	Rugosidade Relativa
K	Rugosidade Equivalente (mm)
f	Fator de Resistência
L	Comprimento (m)
ΔH	Perdas de Carga Pontuais
N_h	Nível Reservatório a cada hora (m)
N_{h-1}	Nível Reservatório na hora anterior (m)
dN_{in_h}	Incremento de água bombeada para o depósito a cada hora (m)

dN_{out_h}	Incremento de água turbinada do depósito a cada hora (m)
dN_{con_h}	Incremento de água consumida pela população a cada hora (m)
H	Altura Manométrica (m)
Q_B	Caudal da Estação de Bombagem ($m^3.h^{-1}$)
P_{B_h}	Potência da Estação de Bombagem a cada hora (kWh)
P_{T_h}	Potência da Estação de Bombagem a cada hora (kWh)
η	Eficiência (%)
A	Área (m^2)
E_{min}	“Energia” mínima para vencer as perdas de carga (m)
ΔZ	Diferença de cotas
hc	Perdas de Carga em Linha
Q_T	Caudal da Estação Hidroelétrica ($m^3.h^{-1}$)
FT_{B_h}	Fração de Tempo de Bombagem a cada hora (%)
FT_{T_h}	Fração de Tempo de Turbinagem a cada hora (%)
U	Velocidade Vento ($m.s^{-1}$)

6 REFERÊNCIAS

Bibliografia

1. Ramos, Helena. *Optimization of operational planning for wind/hydro hybrid water supply systems*. s.l. : Elsevier, 2008. pp. 928-936. Vol. 34.
2. Ramos, Helena e Vieira, F. *Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: A case study*. Elsevier, 2008. pp. 4142-4148. Vol. 36.
3. Coelho, Bernardete da costa. *Optimização de Recursos Energéticos*. Dissertação Mestrado : Universidade Aveiro, 2011.
4. Ramos, Carlos Matias. Energia: um designio nacional. *INGENIUM*. Março/Abril de 2011, p. 5.
5. Filipe, Joaquim silva. A Energia Hidroelétrica em 2020. *INGENIUM*. Março/Abril de 2011, pp. 34,35.
6. Amaral, Luís Mira. *Almoço com o Expresso*. [entrev.] Clara Ferreira Alves. 22 de Abril de 2011.
7. Política Energética e Energias Renováveis. *INGENIUM*. Março/Abril de 2011, pp. 22,23,24.
8. Wikipedia. *Aerogerador*. [Citação: 12 de Julho de 2011.] Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Aerogerador>.
9. Baptista, Jaime Melo. Como melhorar a qualidade em sistemas de abastecimento de água. [Citação: 10 de Agosto de 2011.] Disponível em: <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/c71.pdf>.
10. Sanesul. *O sistema de abastecimento de água*. [Citação: 28 de Junho de 2011.] Disponível em: <http://www.sanesul.ms.gov.br/default.aspx?tabid=200>.
11. Matos, Arlindo. Apontamentos Saneamento e Abastecimento. Universidade Aveiro : 2011.
12. Turbina Pelton. Google image. [Citação: 3 de Agosto de 2011.] Disponível em: http://www.energysavers.gov/images/pelton_wheel.gif.

13. Junior, Mario Cesar Machado. Turbinas Hidráulicas e a Vapor. 18 de Fevereiro de 2010. [Citação: 21 de Julho de 2011.] Disponível em: <http://www.webartigos.com/articles/32834/1/TURBINAS/pagina1.html>.
14. Turbina Francis. Google images. [Citação: 3 de Agosto de 2011.] <http://www.see.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/hydro/image007.jpg>.
15. Quintela, António de Carvalho. *Hidráulica*. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 2009.
16. Silva, Augusto Nelson Carvalho da. Bombas de fluxo operando como turbina. [Citação: 23 de Maio de 2011.] Disponível em: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/d3339f7f1411fd1867899fa1822ad20b.pdf>.
17. Rosal, Maria Crystianne Fonseca. Programação Não Linear Aplicada À Otimização De Redes Pressurizadas De Distribuição De Água. 2007. [Citação: 25 de Junho de 2011.] Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/diss_maria_crystianne.pdf.
18. Jervell, José Tor. Estudo da influência das características do vento no desempenho. *Relatório de Final de Projecto*. Julho de 2008. [Citação: 20 de Junho de 2011.] Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~em02090/Documentos/final2.pdf>.
19. Portugal, Instituto Meteorologia. [Citação: 2 de Agosto de 2011.] Disponível em: <http://www.meteo.pt/pt/otempo/graficosobservacao/obsHorariosHistorico.jsp>.
20. EDP. Tarifa Tri-Horária. [Citação: 2 de Agosto de 2011.] Disponível em: <http://www.edpsu.pt/pt/tarifasehorarios/Pages/TarifaMT.aspx>.