

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu



Aos meus pais, à minha irmã e irmão, aos meus avós e à minha namorada.

“No meio da confusão, encontre a simplicidade. A partir da discórdia, encontre a harmonia. No meio da dificuldade reside a oportunidade.”
Albert Einstein

RESUMO

A água é um bem essencial para toda a humanidade e a sua disponibilidade está condicionada pelo seu transporte desde os pontos de captação. O seu transporte pode ser efectuado com taludes naturais por gravidade ou recorrendo a bombas, que consomem energia eléctrica ou derivada do petróleo. A energia proveniente da queima de combustíveis fósseis contribui para a deterioração do meio-ambiente aumentando o efeito de estufa. Assim, a crescente preocupação com os impactos ambientais que advêm da sua utilização, levou à procura de fontes de energia alternativas, nomeadamente de origem renovável.

Neste contexto, o carneiro hidráulico tem sido utilizado ao longo dos anos como dispositivo de elevação de água à superfície, com ampla utilização em locais remotos e cujo funcionamento não prejudica o meio-ambiente. Esta dissertação procurou conceber uma solução de bombeamento de água, complementando a sua operação com uma bomba de diafragma alimentada com energia eléctrica produzida a partir de fonte solar fotovoltaica.

Ao longo dos anos têm sido realizadas pesquisas e ensaios experimentais de modo a avaliar a influência das diversas variáveis no rendimento do carneiro.

Assim, tendo como base outros trabalhos construiu-se um protótipo do carneiro hidráulico convencional e numa primeira fase através da realização de ensaios experimentais efectuou-se o estudo dos factores que mais afectam o seu desempenho. De acordo com os resultados obtidos a bomba carneiro foi sofrendo algumas alterações tendo em vista uma melhor *performance*. Posteriormente foi concebido e testado o protótipo aperfeiçoado, culminando numa última e importante alteração, com a aplicação de uma electroválvula de forma a torná-la numa solução vantajosa face às bombas disponíveis no mercado.

Ainda no presente trabalho apresentam-se diversas soluções atendendo a várias capacidades e caudais de elevação, bem como o processo de dimensionamento a utilizar. No final aborda-se um caso de estudo, representando um exemplo real de possível aplicação.

ABSTRACT

Water is a precious resource for all mankind, and its availability is conditioned by its transport from the catchments. Its transportation can be achieved with gravitational force in a natural slope or with the help of pumps, which consume electrical energy or oil derived products. The burning of fossil fuels to obtain energy contributes to the deterioration of the environment, ultimately leading to the increase of the greenhouse effect. Thus, the growing concern over their environmental impacts has led to the search for alternative renewable sources of energy.

In this context, the hydraulic ram pump has been used over the years as a water lifting device in remote locations and whose operation causes no environmental damage. Based on this device, this work sought to devise a solution for water pumping, upgrading its mechanism with a diaphragm pump powered with electricity generated from solar photovoltaic energy.

Over the years has been carried out studies and experimental tests in order to evaluate the influence of different parameters on the efficiency of the hydraulic ram pump.

Thus, based on other works we built a prototype of the conventional hydraulic ram pump and through experimental tests, we studied the factors that most affect its performance. According to these results, we changed the ram pump in order to improve its performance. After the improvement, we tested the prototype, which led to a last major change, in order to make it an advantageous solution compared to the available pumps in the market.

In this paper we also present some solutions, in what concerns the several capacities and rates as well as regarding the system design. We end this work with a discussion of a case study, reflecting about the applicability of this pump.

PALAVRAS-CHAVE

carneiro hidráulico,
energia hídrica,
energia solar fotovoltaica,
bomba diafragma,
sistemas de elevação de água.

KEY WORDS

hydraulic ram pump,
hydropower,
photovoltaic solar energy,
diaphragm pump,
lifting water systems.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não seria possível sem o apoio de diversas pessoas a quem gostaria de expressar o meu agradecimento.

Aos meus pais, avós, irmã e irmão pela dedicação e apoio incondicional que sempre demonstraram.

À minha namorada Anita pelo apoio, amizade, companheirismo, compreensão e incentivo incondicionalmente manifestados.

Ao Professor Doutor Joaquim Delgado pelo apoio, conhecimentos e ideias partilhadas ao longo desta jornada. Agradeço também pela sua irrepreensível disponibilidade, orientação e sugestões.

Ao Eng^oCândido Roque fundador da Tojaltec, Lda tanto pela oportunidade de trabalhar neste projecto, bem como pela proposta de realização deste trabalho, disponibilidade, incentivo, apoio e interesse mostrado.

Agradeço a todos os colaboradores da Tojaltec pela integração na empresa e em especial ao Luís Pacheco pela disponibilidade, apoio, conhecimento e valiosas contribuições no acompanhamento dos trabalhos desenvolvidos.

A todos os restantes familiares e amigos que não foram aqui referidos, mas que de forma directa ou indirecta contribuíram para este trabalho, o meu muito obrigado.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	xviii
ÍNDICE DE TABELAS	xxii
ABREVIATURAS E SIGLAS	xxiv
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Utilidade, potencialidades e limitações.....	2
1.3 Objectivos	3
1.4 Organização da dissertação.....	4
2. O carneiro hidráulico	5
2.1 Golpe de aríete	5
2.2 Evolução histórica.....	6
2.3 Constituição	9
2.4 Fases de funcionamento.....	10
2.5 Rendimento.....	13
2.6 Instalação e recomendações.....	17
2.6.1 Reservatório inferior	18
2.6.2 Tubagem de alimentação.....	18
2.6.3 Altura de queda ou de alimentação - H_{fc}	19
2.6.4 Tubagem de envio	19
2.6.5 Tipos de instalação	20
3. Análise teórica de parâmetros do sistema.....	23
3.1 Energia e escoamento	23
3.1.1 Energia cinética	23
3.1.2 Pressão hidrostática	24
3.1.3 Equação de Bernoulli	25
3.2 Propriedades no carneiro hidráulico	27
3.2.1 Estudo matemático do golpe de aríete.....	27
4. Discussão de propostas	29
4.1 Proposta inicial	29
4.2 Solução adoptada	32
4.2.1 Painel solar fotovoltaico.....	34

4.2.2	Bomba solar de diafragma.....	39
4.2.3	Linear current booster (LCB).....	41
5.	Montagem e ensaios do carneiro convencional.....	43
5.1	Montagem do protótipo	43
5.1.1	Protótipo 1	46
5.1.2	Protótipo 2.....	49
5.1.3	Aperfeiçoamento da válvula de impulso.....	51
6.	Resultados experimentais	59
6.1	Criação artificial de condições.....	59
6.2	Carneiro hidráulico	60
6.2.1	Influência do curso da mola	60
6.2.2	Influência do volume da câmara de ar	62
6.2.3	Influência do tipo de câmara	63
6.2.4	Problemas encontrados.....	64
6.3	Bomba solar	64
7.	Metodologia de instalação.....	69
7.1	Projecto do carneiro hidráulico.....	69
7.2	Seleccção da bomba de diafragma.....	71
7.3	Electroválvula NF de 2 vias.....	78
7.4	Dimensionamento do gerador FV e escolha do LCB	79
8.	Aplicação a um caso de estudo.....	83
8.1	Local	83
8.2	Dimensionamento do carneiro hidráulico.....	87
8.3	Dimensionamento da bomba diafragma	89
8.4	Dimensionamento do painel FV e LCB.....	90
8.5	Dados gerais da instalação.....	94
9.	Conclusão	97
9.1	Desenvolvimentos futuros	98
	REFERÊNCIAS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Representação do efeito do golpe de aríete [1]	5
Figura 2-2: Aríete [2]	6
Figura 2-3: “ <i>Pulsating machine</i> ” criada por John Whitehurst [3]	6
Figura 2-4: Carneiro hidráulico desenvolvido por Joseph-Michel Montgolfier [4]	7
Figura 2-5: Carneiro hidráulico aperfeiçoado com válvula de impulso [5]	7
Figura 2-6: Da esquerda para a direita os fabricantes, <i>Meribah</i> , <i>Marumby</i> e <i>Blaken</i> [6][7][8]	8
Figura 2-7: Esquema de bombagem de um carneiro hidráulico	9
Figura 2-8: Esquema de funcionamento do carneiro hidráulico	9
Figura 2-9: Representação da Fase 1	10
Figura 2-10: Representação da Fase 2	11
Figura 2-11: Representação da Fase 3	11
Figura 2-12: Representação da Fase 4	13
Figura 2-13: Relação entre a velocidade e o tempo durante um ciclo de operação de um carneiro hidráulico [9]	13
Figura 2-14: Exemplo de instalação de uma bomba carneiro <i>Walton</i>	16
Figura 2-15: Parâmetros da bomba carneiro	17
Figura 2-16: Exemplo de instalação do carneiro hidráulico [6]	20
Figura 2-17: Exemplo de instalação da bomba carneiro num rio [10]	20
Figura 2-18: Exemplo de instalação de bombas carneiro em paralelo [7] [11]	21
Figura 3-1: escoamento de um fluido num tubo [12]	25
Figura 3-2: Caudal do tanque	26
Figura 4-1: Proposta inicial	30
Figura 4-2: Funcionamento das bombas diafragma [13]	30
Figura 4-3: Servomotor linear, à esquerda e um electroímã linear de duplo efeito à direita [14][15]	31
Figura 4-4: Esquema hidráulico da solução adoptada	33
Figura 4-5: Esquema que exemplifica a pressão final do sistema	33
Figura 4-6: Esquema eléctrico da proposta final	34
Figura 4-7: Parâmetros de máxima potência de uma célula FV [16]	35
Figura 4-8: Efeito da variação da radiação solar [16]	36
Figura 4-9: Posição do painel face à posição anual do Sol [16]	36
Figura 4-10: Radiação solar horária para um dia do mês de Julho, em Viseu	37
Figura 4-11 - Bomba diafragma [17]	40
Figura 4-12: Bomba diafragma [18]	40
Figura 4-13: Entradas e saídas de um LCB [19]	42
Figura 5-1: Disposição das peças do corpo do carneiro	44
Figura 5-2: Interior de uma válvula de retenção [20]	44
Figura 5-3: Algumas peças vedadas com fita de teflon	45
Figura 5-4: Corpo do carneiro hidráulico	45
Figura 5-5: Válvula de corte manual e fixação no balde	45
Figura 5-6: Tubo PVC (4´´) e tampa de visita	46
Figura 5-7: Reduções e uniões em PVC	47
Figura 5-8: Montagem do carneiro	47
Figura 5-9: Válvula de impulso obtida a partir de uma válvula de retenção	48
Figura 5-10: Válvula de impulso montada no carneiro	48

Figura 5–11: Interligação do reservatório inferior ao carneiro	48
Figura 5–12: Perfuração da rolha da garrafa	49
Figura 5–13: Carneiro hidráulico com garrafa PET	50
Figura 5–14: Instalação do carneiro hidráulico	50
Figura 5–15: Válvula de impulso a partir de uma válvula de retenção	51
Figura 5–16: Válvula de pé com crivo	51
Figura 5–17: Válvula com pesos	52
Figura 5–18: Corte efectuado na válvula de pé	52
Figura 5–19: Perfuração do topo da válvula	53
Figura 5–20: Aspecto final após perfurações	53
Figura 5–21: Válvula de pé com crivo alterada	53
Figura 5–22: Válvula de impulso instalada no carneiro	54
Figura 5–23: Carneiro hidráulico com válvula de impulso com pesos	54
Figura 5–24: Ensaio do carneiro com pesos	55
Figura 5–25: Válvula de impulso com mola a actuar com o deslocamento do Parafuso	55
Figura 5–26: Esquema da válvula com mola a actuar no prato	56
Figura 5–27: Esquema da válvula de aríete aberta/fechada	57
Figura 5–28: Válvula de aríete com mola	57
Figura 5–29: Teste do carneiro hidráulico	58
Figura 6–1: Altura de queda (H_{fc})	59
Figura 6–2: Deslocamento da mola na válvula de impulso	60
Figura 6–3: Relação entre o caudal de envio e o curso da mola	61
Figura 6–4: Bomba diafragma DC adquirida	64
Figura 6–5: Carneiro hidráulico	65
Figura 6–6: Carneiro hidráulico e bomba de diafragma	65
Figura 6–7: Esquema final do protótipo	68
Figura 7–1: Carneiros hidráulicos fabricados pela <i>Williamson Hi-Flo Ram Pumps</i> [21]	70
Figura 7–2: Ângulo de inclinação do tubo de alimentação	71
Figura 7–3: Bomba <i>Shurflo – Aqua King Standard 3.0</i> [22]	72
Figura 7–4: Bomba <i>Shurflo – Extreme Series Smart Sensor 5.7</i> [23]	72
Figura 7–5: Bomba <i>Aquatec – Booster Series</i> [24]	73
Figura 7–6: Bomba <i>Aquatec – Delivery Pump 7800 Series</i> [25]	74
Figura 7–7: Bomba <i>Dankoff – Solaram Surface Pump 8000</i> [17]	75
Figura 7–8: Características técnicas das bombas escolhidas	77
Figura 7–9: Electroválvula de duas vias [26]	78
Figura 8–1: Características do local de instalação	84
Figura 8–2: Exemplo de medição do caudal através do método volumétrico [36]	85
Figura 8–3: Exemplo de medição do caudal de um rio através do método V [27]	86
Figura 8–4: Exemplo da possível instalação no açude do rio (foto tirada no Inverno)	88
Figura 8–5: Determinação do comprimento do tubo de alimentação	88
Figura 8–6: Aspecto do LCB da <i>Solar Converters Inc.</i> [28]	91
Figura 8–7: Esquema eléctrico a implementar	92
Figura 8–8: Características do local de instalação e do sistema implementado	94
Figura 8–9: Dados da instalação	95

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2–1: Capacidade das bombas <i>Walton</i> [29]	16
Tabela 4–1: Orientação do painel face ao tipo de necessidade na instalação	37
Tabela 4–2: Exemplo das características de um painel FV do fabricante <i>altE</i>	38
Tabela 4–3 : Características de bombas diafragma de três fabricantes	41
Tabela 5–1: Tipo e quantidade de peças utilizadas	43
Tabela 5–2: Tipo de peças utilizadas	46
Tabela 6–1: Ensaio para diferentes afinações da mola	61
Tabela 6–2: Ensaio para diferentes volumes de câmara	62
Tabela 6–3: Ensaios com garrafa PET e garrafa de alumínio	63
Tabela 6–4: Características da bomba solar	64
Tabela 6–5 – Ensaio do protótipo com bomba solar ligada e desligada	66
Tabela 6–6 – Comparação do desempenho do protótipo final com as restantes configurações	66
Tabela 6–7 – Comparação entre o desempenho do protótipo e o desempenho do carneiro hidráulico convencional	67
Tabela 7–1: Características técnicas dos carneiros hidráulicos da <i>Williamson</i> [21]	71
Tabela 7–2: Características técnicas da bomba <i>Shurflo – Aqua King</i>	72
Tabela 7–3: Características técnicas da bomba <i>Shurflo – Extreme S.S.</i>	73
Tabela 7–4: Características técnicas da bomba <i>Aquatec – Booster 88X2</i>	74
Tabela 7–5: Características técnicas da bomba <i>Aquatec – Delivery 7864</i>	75
Tabela 7–6: Características técnicas da bomba <i>Dankoff – Solaram 8221</i>	76
Tabela 7–7: Características técnicas da bomba <i>Dankoff – Solaram 8543</i>	77
Tabela 7–8: Características eléctricas típicas de um LCB [26]	79
Tabela 7–9: Características do painel FV a instalar	80
Tabela 7–10: Potência produzida pelo gerador FV	81
Tabela 7–11: Potência à saída do LCB	81
Tabela 7–12: Tensão e corrente à saída do LCB	81
Tabela 7–13: Tensão e corrente à saída do gerador FV	82
Tabela 8–1: Consumo aproximado de água no meio rural [30]	84
Tabela 8–2: Consumo aproximado de água na propriedade	85
Tabela 8–3: Estimativa da radiação solar do local no mês de Setembro numa superfície com inclinação de 25°	87
Tabela 8–4: Dados da instalação	89
Tabela 8–5: Características da bomba na instalação	90
Tabela 8–6: Consumo de energia eléctrica da instalação	90
Tabela 8–7: Características do painel FV escolhido	90
Tabela 8–8: Características eléctricas do LCB	91
Tabela 8–9: Cálculo da potência de saída do LCB	93
Tabela 8–10: Dados da instalação	94

ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente alternada (<i>Alternating Current</i>)
CO ₂	Dióxido de carbono
DC	Corrente contínua (<i>Direct Current</i>)
ESTGV	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu
FV	Fotovoltaico
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
LCB	<i>Linear current booster</i>
MPP	<i>Maximum power point</i>
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
NF	Normalmente fechado/fechada
PET	Politereftalato de etileno
PVC	Policloreto de vinilo
STC	<i>Standard test conditions</i>

1. Introdução

1.1 Enquadramento do tema

Vivemos actualmente momentos de mudança devido à degradação ambiental resultante do consumo de combustíveis fósseis. À produção de energia eléctrica a partir do gás natural, do carvão e do petróleo, está associada emissão de dióxido de carbono (CO₂) principal gás responsável pelo efeito de estufa.

Deste modo, o grande desafio consiste em contrariar esta situação apostando fortemente nas fontes de energia renováveis. Estes recursos naturais encontram-se em constante renovação, não se esgotam e podem ser continuamente utilizados, pois são uma energia limpa e sem emissões de gases de efeito de estufa.

Neste contexto, desde há dois séculos que o carneiro hidráulico é utilizado como uma alternativa viável de bombagem de água, através do aproveitamento de uma fonte renovável, a energia hídrica. Este constitui um sistema de elevação de água que dispensa qualquer outro tipo de energia ou de intervenção humana, operando durante o dia e noite, de modo autónomo, sendo por isso um dispositivo com custos de operação praticamente nulos.

Actualmente, a maioria das pessoas desconhece as capacidades e vantagens deste mecanismo de bombeamento. Em Portugal a tecnologia do carneiro hidráulico é pouco conhecida, sendo no entanto muito utilizada em alguns países como fonte alternativa de bombagem de água.

1.2 Utilidade, potencialidades e limitações

A problemática do abastecimento de água no sector rural não é novidade e tem-se agravado principalmente com o aumento do custo da energia de origem fóssil e com as preocupações da sua racionalização. Para a captação de água na maioria dos casos, recorre-se à energia eléctrica ou combustível fóssil com custos de operação cada vez mais elevados.

Em muitos países, nomeadamente em vias de desenvolvimento, não existe disponível energia eléctrica da rede no sector rural, pelo que as alternativas para bombagem passam por equipamentos mecânicos, como os operados por motores de combustão, pelos animais, ser humano e o carneiro hidráulico.

A instalação das bombas carneiro é de baixo custo e de rápida aplicação e o seu funcionamento é livre de emissão de gases poluentes, pois utiliza a energia proveniente de uma queda de água, para elevar uma parte dessa para uma cota mais elevada. Neste processo desde que haja um fluxo contínuo proveniente da fonte, a bomba funciona autonomamente. Estas bombas são adequadas para áreas remotas, onde existem extremas dificuldades de transporte de água, bem como em locais onde as fontes de energia tradicionais são escassas ou inexistentes.

A disponibilidade de água doce constitui uma das necessidades mais básicas das populações. Desta forma, a água de uma nascente, de um lago ou de um rio pode ser bombeada para reservatórios de armazenamento de uma aldeia, para quintas de criação de gado ou ainda para campos de cultivo.

Seja para fins domésticos ou de irrigação, o carneiro hidráulico pode ser utilizado em diferentes situações, como por exemplo, na bombagem de água para reservatórios colocados em vertentes de montanhas no meio florestal, facilmente acessíveis pelos meios de combate aéreos (helicópteros) e terrestres de incêndios (carros tanque). O abastecimento de diversos reservatórios, espalhados em locais estratégicos, permitiria aos meios de combate uma actuação mais eficaz e económica contra o flagelo dos incêndios florestais.

O tipo de aplicação e dimensão das bombas carneiro dependem por um lado da abundância do recurso hídrico e necessidade efectiva de água e por outro dos desníveis e distâncias a vencer. Para a sua instalação é necessário identificar os locais adequados, através de um estudo a nível hidrológico e orográfico.

1.Introdução

Uma das limitações deste dispositivo é a sua baixa eficiência, pois bombeia apenas uma pequena parte da água que escoar até este, sendo que esta depende de parâmetros da própria instalação, tais como, o tipo dos materiais/equipamentos utilizados, e como já referido, as características do terreno.

As principais limitações do carneiro hidráulico são assim:

- A quantidade do recurso hídrico disponível ao longo do tempo;
- A necessidade de haver um desnível entre a fonte e o carneiro, uma vez que em zonas planas não é possível a sua instalação dada a inexistência de queda de água;
- O facto de bombear apenas uma parte do fluxo disponível da fonte, pelo que requer maior caudal e disponibilidade desta quando é pretendido um maior fluxo na entrega.

1.3 Objectivos

Como referido anteriormente, muitos países têm dificuldade no abastecimento de água por questões económicas, principalmente por se encontrarem em locais isolados da rede eléctrica, o que dificulta ainda mais o acesso à água potável. Para além disso, a produção de energia eléctrica a partir de combustíveis fósseis prejudica o meio-ambiente e o seu consumo acarretam custos cada vez mais elevados, pelo que outras alternativas à bombagem como o carneiro hidráulico assumem maior importância.

Deste modo, o objectivo da dissertação foi desenvolver um sistema que com a ajuda de um actuador eléctrico alimentado a partir de energia renovável, permitisse melhorar a eficiência de bombagem do carneiro tradicional. Para o desenvolvimento desta dissertação foi escolhida a energia solar como fonte complementar, por ser a que se encontra disponível com maior densidade na maioria das regiões e na altura do ano em que a bombagem é mais necessária.

Com a junção das duas tecnologias, carneiro hidráulico e actuador eléctrico, pretende-se introduzir inovação, complementando o funcionamento do modelo clássico com a bombagem assistida por energia eléctrica renovável proveniente de painéis fotovoltaicos durante o período diurno. O sistema electromecânico desenvolvido deve poder operar em regiões remotas de forma totalmente autónoma.

1.4 Organização da dissertação

Neste capítulo faz-se um enquadramento do tema no mundo actual e apresentam-se os objectivos principais do seu estudo.

No capítulo 2 descreve-se o estado de arte e explica-se o princípio de funcionamento do carneiro hidráulico. Analisa-se ainda o seu rendimento e modo de instalação.

No capítulo 3 faz-se a análise matemática associada ao movimento, escoamento e bombagem do fluido no carneiro hidráulico.

O capítulo 4 descreve a análise e explicação da proposta inicial (cuja implementação se revelou mais tarde inviável) e posteriormente expõe-se a solução final que foi adoptada, desenvolvida e exposta nesta dissertação.

O capítulo 5 engloba os passos efectuados na montagem e operação do carneiro hidráulico tradicional. São também descritos alguns dos obstáculos encontrados, bem como as soluções para os ultrapassar e que culminam com a alteração de alguns componentes.

No capítulo 6 são exibidos os resultados experimentais alcançados com o carneiro hidráulico convencional e com o protótipo final desenvolvido.

O capítulo 7 aborda a metodologia de dimensionamento a adoptar na instalação do conjunto electromecânico.

No capítulo 8 apresenta-se um caso de estudo de aplicação do protótipo perante as condições e características especificadas.

Finalmente, no capítulo 9 são sintetizadas as conclusões alcançadas com este trabalho e possíveis desenvolvimentos em trabalhos futuros.

2. O carneiro hidráulico

2.1 Golpe de aríete

O golpe de aríete também conhecido como golpe hidráulico, resulta da variação violenta de pressão numa canalização, provocada pela diminuição brusca da velocidade do fluido que nela circula. Esta variação pode ser originada pelo fecho repentino de uma válvula que interrompe o fluxo do fluido (Figura 2-1).

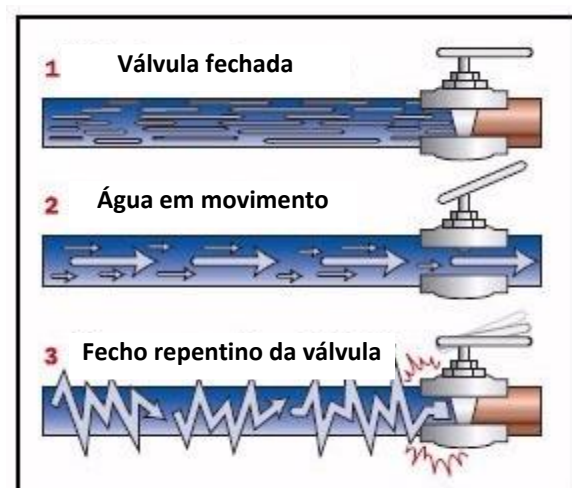


Figura 2-1: Representação do efeito do golpe de aríete [1].

Este fenómeno pode ser sentido nas nossas casas principalmente nas mais antigas, quando se fecha rapidamente uma torneira, ouvindo-se de seguida um som de uma pancada forte que faz estremecer a tubagem. O fecho repentino interrompe o movimento da água originando uma súbita elevação da pressão provocada pela sua

2.O carneiro hidráulico

rápida desaceleração. Esta sobrepressão pode pôr em causa o bom funcionamento do circuito hidráulico e em casos críticos originar a sua ruptura.

O nome de baptismo do carneiro hidráulico foi inspirado num aparelho de guerra da Idade Média denominado de aríete, utilizado para derrubar os portões das fortalezas e castelos (Figura 2-2).

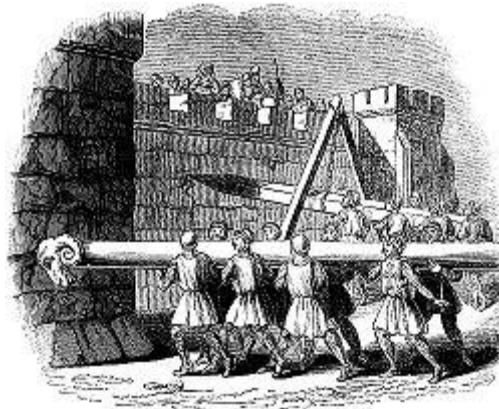


Figura 2-2: Aríete [2].

Este artefacto bélico era constituído por um tronco de madeira reforçado com uma cabeça de carneiro metálica na extremidade e era impulsionado por intervenção humana. Para o portão resistir aos golpes do aríete tinha que ser bem reforçado. Daí pensa-se ter sido atribuída a designação de carneiro hidráulico tanto para o aparelho, bem como para o fenómeno que o caracteriza (golpe de aríete) [2].

2.2 Evolução histórica

Em 1772 o inglês John Whitehurst inventou um precursor do carneiro hidráulico denominado “*pulsating machine*” (Figura 2-3), porém o seu aparelho não podia funcionar de forma autónoma, por exigir um comando manual.

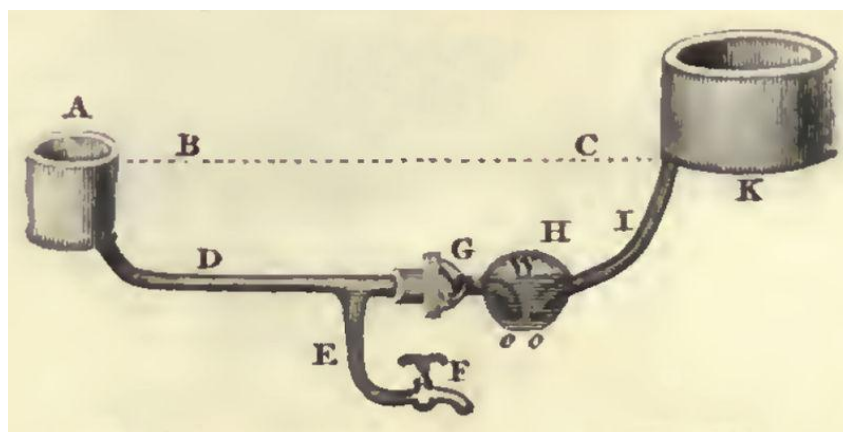


Figura 2-3: “*Pulsating machine*” criada por John Whitehurst [3].

2.O carneiro hidráulico

A elevação da água de H até K verificava-se quando o fluxo de água proveniente de A para G era interrompido bruscamente, fechando a torneira em F. Neste sistema era necessária a abertura e fecho manual da torneira por forma a criar pulsos de pressão suficientes para elevar a água.

No entanto, em 1797 graças ao engenho do francês Joseph-Michel Montgolfier, conhecido também pelo invento do balão de ar quente, surge o principal aperfeiçoamento do aparelho de John Whitehurst, tornando-o automático (Figura 2-4) [4].

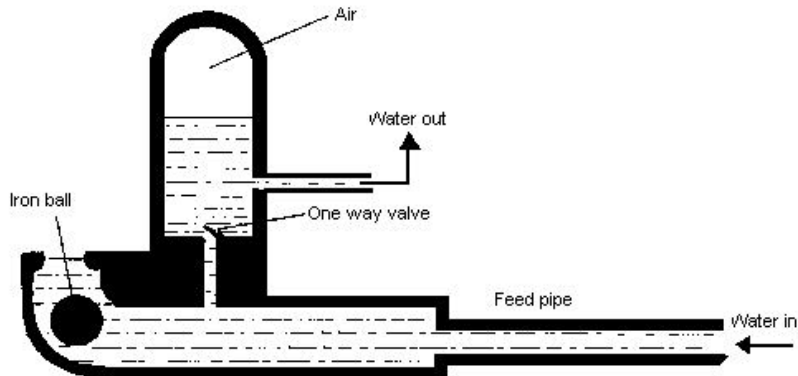


Figura 2-4: Carneiro hidráulico desenvolvido por Joseph-Michel Montgolfier [4].

O movimento da água faz deslocar a esfera de ferro ao longo da tubagem e esta sobe a curva até bloquear a sua saída, originando assim o golpe de aríete. A água é assim obrigada a fluir pela válvula de sentido único. De seguida, a pressão desce por acção do seu peso e a esfera volta atrás na tubagem dando início a um novo ciclo. O princípio de funcionamento do carneiro hidráulico irá ser explicado com maior detalhe neste capítulo na secção 2.4.

Este modelo sofria de um defeito dado que o ar presente na câmara acabava por ser dissolvido. Assim, decorrido algum tempo Montgolfier melhorou-o, retirando a bola de ferro e substituindo-a por uma válvula, por forma a introduzir ar de compensação na câmara, sendo este o *design* ainda hoje utilizado (Figura 2-5).

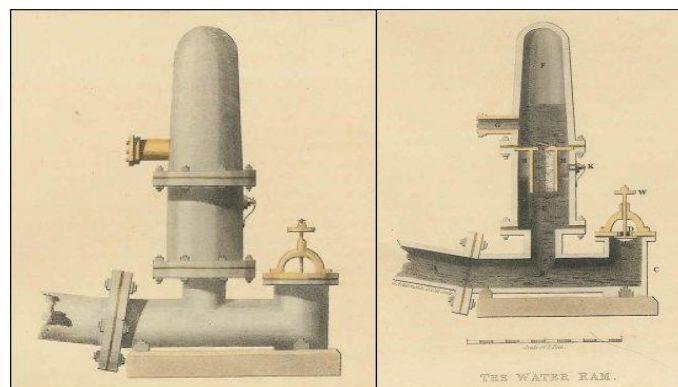


Figura 2-5: Carneiro hidráulico aperfeiçoado com válvula de impulso [5].

2.O carneiro hidráulico

Após o seu aperfeiçoamento, nos locais que dispunham de condições adequadas, o carneiro hidráulico foi o principal elevador de água para casas, quintas, indústria, ferrovias e cidades. Este contribuiu para uma melhoria da produção agrícola, criação de extensas paisagens de jardinagem e principalmente para a saúde e saneamento [10].

A invenção do motor de combustão interna, o uso da electricidade e das primeiras bombas mecânicas em conjunto com o baixíssimo preço da energia fóssil, conduziram no início do século XX ao abandono dos carneiros hidráulicos e desinteresse pela sua melhoria.

No entanto, devido à crescente escassez dos combustíveis fósseis, aumento do seu custo, e preocupações ambientais, conduziram à necessidade de um sistema de bombagem barato com custos de operação menores.

Actualmente existem empresas que fabricam e comercializam carneiros hidráulicos com ergonomias e aspectos diferentes (Figura 2-6), no entanto o princípio de funcionamento mantem-se.



Figura 2-6: Da esquerda para a direita os fabricantes, *Meribah*, *Marumby* e *Blake* [6][7][8].

2.3 Constituição

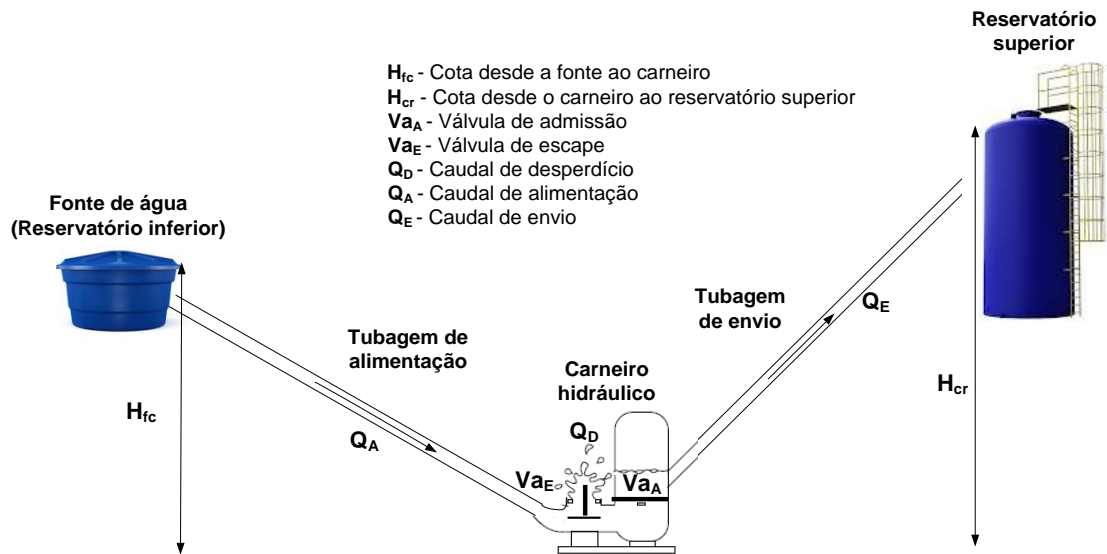


Figura 2-7: Esquema de bombeamento de um carneiro hidráulico.

Conforme se pode observar pela Figura 2-7, a instalação de um sistema de bombeamento através do carneiro hidráulico é constituída por:

- **Fonte de água** – reservatório inferior, canal ou rio;
- **Sistema de alimentação** – tubagem que conduz a água da fonte até à entrada do carneiro;
- **Carneiro hidráulico**;
- **Sistema de saída ou envio** – tubagem que conduz a água do carneiro até ao reservatório superior;
- **Reservatório superior** - onde será armazenada a água conduzida pela tubagem de envio.

Na Figura 2-8, apresenta-se o interior de um carneiro hidráulico:

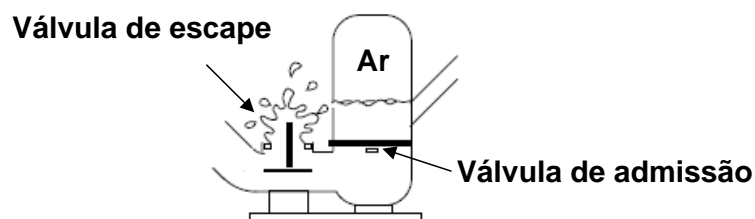


Figura 2-8: Esquema de funcionamento do carneiro hidráulico.

2.O carneiro hidráulico

Este é constituído por duas válvulas, uma de admissão e uma de escape. É na válvula de escape ou de impulso que se originam os golpes de aríete, como irá ser descrito na secção 2.4. Por isso, o *design* da mesma é fundamental no funcionamento da bomba carneiro, porque a sobrepressão produzida pelo golpe, dependerá da rapidez do fecho que se traduzirá na força necessária a exercer pela massa de água para a fechar. Quanto maior for essa força, maior será a capacidade da bomba em elevar a água a maior altitude.

Existem muitos tipos de válvulas de escape, no entanto todas têm a mesma finalidade. Um permitem a regulação da força necessária para a fechar, através do uso de uma mola cujo alongamento pode ser ajustável, enquanto outras permitem este ajuste através da colocação ou eliminação de pesos.

A válvula de admissão é uma válvula unidireccional ou que permite a passagem do fluido só num sentido. O que, neste caso, será da tubagem para a câmara do carneiro. Esta câmara possui uma determinada quantidade de ar no seu interior, cuja compressibilidade vai permitir armazenar a energia do impulso provocado pelo fecho brusco da válvula de escape e libertá-la depois na bombagem da água.

2.4 Fases de funcionamento

A operação do carneiro pode ser dividida em quatro fases:

Fase 1:

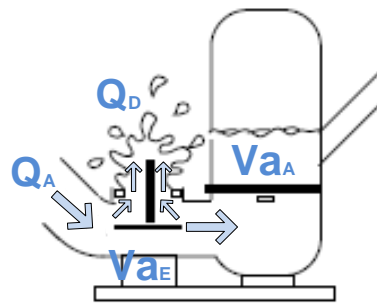


Figura 2-9: Representação da fase 1.

A água proveniente da fonte (Q_A) acelera na tubagem de alimentação por acção da gravidade, para o corpo do carneiro hidráulico e sai (Q_D) através da válvula de escape (V_E). A válvula de admissão (V_A) mantém-se na posição normalmente fechada.

Fase 2:

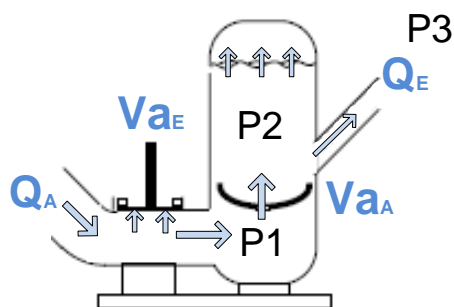


Figura 2-10: Representação da fase 2.

Devido ao desnível existente entre a fonte e o carneiro (H_{fc}) e ao aumento da velocidade da coluna de água no sistema de alimentação (ver Figura 2-13), esta atinge uma determinada pressão capaz de fechar a válvula de escape (V_{aE}) contrariando o seu peso e interrompendo repentinamente o fluxo. O fecho repentino desta válvula origina o golpe de aríete.

Quando a pressão gerada ($P1$) for superior à pressão na câmara de ar ($P2$), a válvula de admissão (V_{aA}) abre e a água começa a fluir para esta, comprimindo o ar existente. Quando a pressão interna da bomba ($P2$) for superior à pressão da coluna de água até ao reservatório superior ($P3$), a água flui (Q_E) para a tubagem de envio. À medida que o ar contido no interior da câmara é comprimido, oferece resistência à entrada de água até que a pressão no interior ($P2$) seja superior a $P1$ e provoque o fecho desta válvula.

Fase 3:

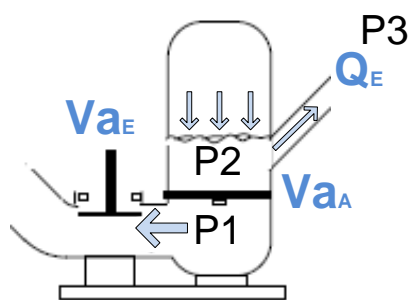


Figura 2-11: Representação da fase 3.

De seguida a água deixa de fluir da fonte para a tubagem de alimentação devido à “onda de pressão” criada pelo golpe de aríete e, em vez disso, passa a circular no sentido oposto. O retorno da água na tubagem de alimentação produz um ligeiro efeito de sucção no corpo da bomba, originando uma queda de pressão que produz a abertura da válvula de escape (V_{aE}) e o fecho da válvula de admissão (V_{aA}).

2.O carneiro hidráulico

Assim que a válvula de admissão (V_{aA}) fecha, esta interrompe qualquer fluxo proveniente do corpo do carneiro. Nesta altura, a água contida na câmara, como não pode retornar ao corpo do carneiro, só tem como saída a tubagem de envio (Q_E). O volume de ar na câmara continua a expandir-se de forma a equilibrar a pressão, empurrando a água por esta.

Fase 4:

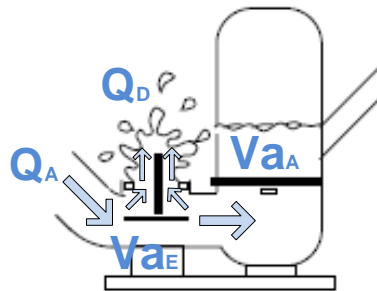


Figura 2-12: Representação da fase 4.

Quando o retorno da água na tubagem de alimentação termina, a água começa novamente a acelerar e, parte desta, sai pela válvula de escape (Q_E). A válvula de admissão (V_{aA}) permanece fechada, o volume de ar na câmara estabiliza e a água pára de fluir pela tubagem de envio. A partir deste ponto o ciclo recomeça automaticamente.

Este ciclo de bombagem acontece com uma periodicidade que depende dos parâmetros do carneiro e, como foi referido anteriormente, apenas uma pequena quantidade da água admitida pela tubagem é bombeada.

A Figura 2-13 demonstra a relação existente entre a velocidade da água e o tempo decorrido durante cada ciclo. O intervalo de tempo t_1 (de b a c) corresponde ao tempo que a válvula de escape (V_{aE}) demora a fechar e t_2 (de c a f) representa o tempo que a válvula de admissão (V_{aA}) permanece aberta. A soma destes dois intervalos de tempo ($t_1 + t_2$) corresponde ao tempo de duração do ciclo de operação (Δt).

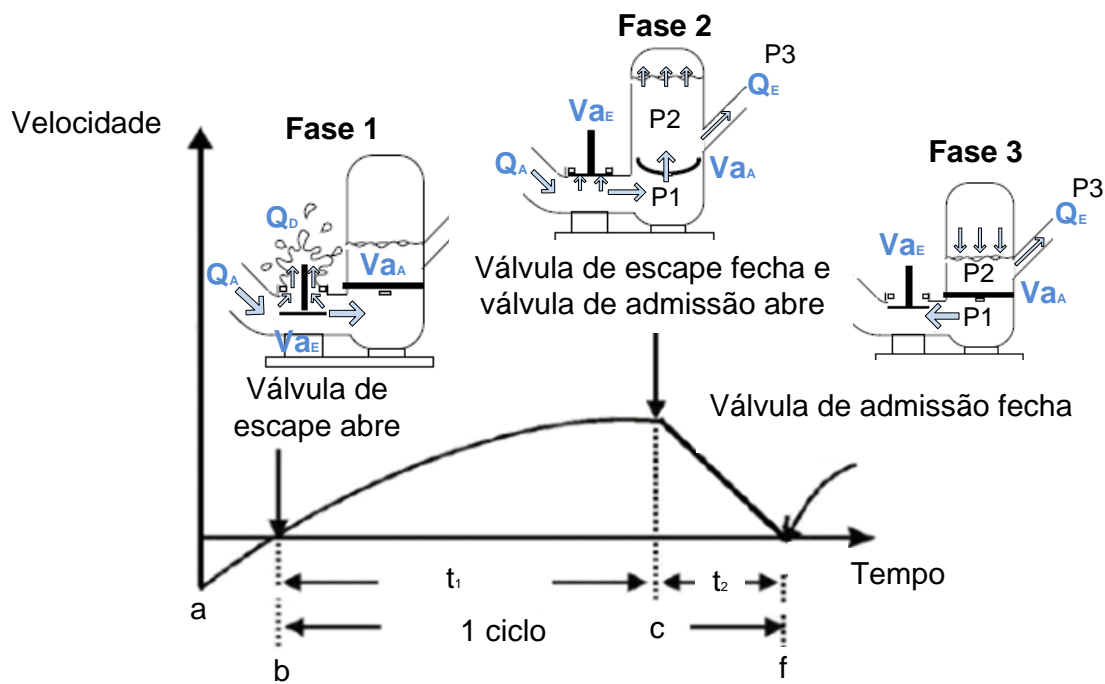


Figura 2-13: Relação entre a velocidade e o tempo durante um ciclo de operação de um carneiro hidráulico [9].

Através da análise da Figura 2-13 verifica-se o aumento progressivo da velocidade da água em função do tempo de escoamento até t_1 . O fecho brusco da válvula de escape no instante c , faz diminuir gradualmente a velocidade até que a coluna de água no tubo de alimentação pare (instante f). No intervalo de tempo de a a b verifica-se um valor negativo da velocidade devido ao retorno da água na tubagem de alimentação (fase 3).

O valor de t_1 depende da força que é necessária realizar para provocar o fecho da válvula de escape, logo quanto maior for essa força para a mesma massa de água, menor será t_1 . Assim, quanto “mais pesada” for a válvula de escape maior é o tempo necessário para a água adquirir a energia suficiente para provocar o seu fecho. O parâmetro t_1 é analisado matematicamente no capítulo 3, pois influencia a pressão produzida pelo golpe de aríete, seja a manobra de fecho rápida, lenta, total ou parcial.

2.5 Rendimento

Para o cálculo do rendimento importa primeiro definir a energia associada à altura de instalação da bomba carneiro: a energia potencial gravítica.

A energia potencial gravítica de um corpo é a energia que esse corpo possui a uma determinada altura h :

2.O carneiro hidráulico

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (2-1)$$

E_p – energia potencial gravítica, N.m ou J;

m – massa do corpo, kg;

g – aceleração da gravidade, m/s^2 ;

h – é a posição do corpo em relação a um plano de referência, m.

Durante o funcionamento do carneiro hidráulico podem ser considerados dois tipos de rendimento, o energético e o volumétrico.

O rendimento energético traduz a relação entre a energia potencial que a água possui no estado inicial ($E_{p\ in}$), ou seja, à altura H_{fc} e a energia potencial final de uma determinada quantidade ($E_{p\ out}$) à altura H_{cr} . Assim, este é dado pela seguinte expressão:

$$\eta_{energético} = \frac{E_{p\ out}}{E_{p\ in}} \times 100\% \quad (2-2)$$

$\eta_{energético}$ – rendimento energético, %;

$E_{p\ out}$ – energia potencial final, N.m ou J;

$E_{p\ in}$ – energia potencial inicial, N.m ou J.

Sabendo que:

$$E_{p\ in} = m_{in} \cdot g \cdot H_{fc} \quad (2-3)$$

$$E_{p\ out} = m_{out} \cdot g \cdot H_{cr} \quad (2-4)$$

Onde:

$E_{p\ in}$ – energia potencial inicial, N.m ou J;

m_{in} – massa de água inicial, kg;

g – aceleração da gravidade, m/s^2 ;

H_{fc} – altura de alimentação, m;

$E_{p\ out}$ – energia potencial final, N.m ou J;

m_{out} – massa de água final, kg;

H_{cr} – altura de envio, m.

Vem:

$$\eta_{energético} = \frac{m_{out} \cdot g \cdot H_{cr}}{m_{in} \cdot g \cdot H_{fc}} \times 100\% = \frac{m_{out} \cdot H_{cr}}{m_{in} \cdot H_{fc}} \times 100\%$$

2.O carneiro hidráulico

A massa de água que percorre um tubo num dado intervalo de tempo t , é dada pelo produto entre o caudal e a sua massa volúmica:

$$m_{in} = Q_A \cdot \rho_{\acute{a}gua} \cdot t \quad (2-5)$$

$$m_{out} = Q_E \cdot \rho_{\acute{a}gua} \cdot t \quad (2-6)$$

m_{in} – massa de água inicial, kg;

m_{out} – massa de água final, kg;

Q_A – caudal de alimentação, m³/s;

Q_E – caudal de envio, m³/s;

$\rho_{\acute{a}gua}$ – massa volúmica do fluido, kg/m³;

t – intervalo de tempo, s.

Assim:

$$\eta_{energ\acute{e}tico} = \frac{Q_E \cdot \rho_{\acute{a}gua} \cdot t \cdot H_{cr}}{Q_A \cdot \rho_{\acute{a}gua} \cdot t \cdot H_{fc}} \times 100\%$$

$$\eta_{energ\acute{e}tico} = \frac{Q_E \cdot H_{cr}}{Q_A \cdot H_{fc}} \times 100\% \quad (2-7)$$

H_{fc} – altura de alimentação, m;

H_{cr} – altura de envio, m;

Q_E – caudal de envio, l/dia;

Q_A – caudal de alimentação, l/dia.

Durante cada ciclo de bombagem quando a válvula de escape está aberta, há uma considerável perda do caudal de alimentação, denominado caudal de desperdício (Q_D). O rendimento volumétrico corresponde à relação entre a quantidade de água fornecida e a quantidade que foi elevada:

$$\eta_{volum\acute{e}trico} = \frac{Q_E}{Q_A} \times 100\% \quad (2-8)$$

$\eta_{volum\acute{e}trico}$ – rendimento volumétrico, %;

Q_E – caudal de envio, l/dia;

Q_A – caudal de alimentação, l/dia.

Na Tabela 2-1 apresenta-se a capacidade das bombas carneiro de um fabricante francês *Walton*, em função da altura de queda, da altura de elevação e do caudal de alimentação.

2.O carneiro hidráulico

Tabela 2-1: Capacidade das bombas *Walton* [29].

Bomba	Altura de Queda H_{fc} [m]		Altura de Elevação H_{cr} [m]		Caudal de Alimentação Q_A [l/min]		Caudal de Envio - Q_E [l/dia]					
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	1/5		1/10		1/15	
Nº	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
1	0,6	5	3	35	2	4	210	880	120	440	60	240
2	1	6	4	40	3	9	680	2100	340	1050	150	500
3	1,5	6	5	50	7	16	1100	3600	550	1900	270	900
4	1,5	7	5	60	15	30	2300	7000	1150	3500	570	1750
5	2	8	6	65	30	50	4600	11000	2300	5500	1000	2750
6	2	9	7	70	45	100	8800	22000	4400	11000	2100	5500
7	2	10	7	80	90	180	18000	42000	9000	21000	4600	10000

Este fabricante comercializa sete modelos de carneiros com diversos tamanhos para atender a diferentes exigências de caudais de envio de água. A relação 1/5, 1/10 e 1/15 é a relação entre a altura de alimentação (H_{fc}) e a dimensão da tubagem de envio (L_E). Para se ter uma ideia, os preços de venda actuais podem variar entre os 1.100€ e os 3.700€ [29].

Com base nesta tabela podem-se obter os rendimentos desta bomba. Assim, supondo uma altura de envio de 35 metros, uma altura de queda de 5 metros e uma relação de 1/15 que corresponde a um comprimento do tubo de envio (L_E) igual a 125 metros (Figura 2-14), vem:

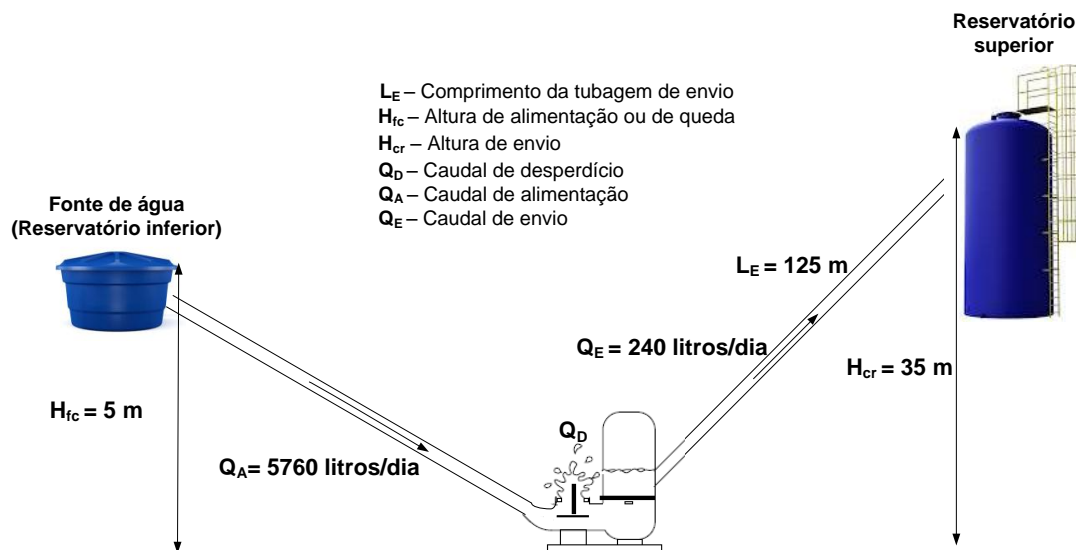


Figura 2-14: Exemplo de instalação de uma bomba carneiro.

$$Q_A = 4 \frac{\text{litros}}{\text{min}} \times 60 \text{ min} \times 24 \text{ horas} = 5760 \frac{\text{litros}}{\text{dia}}$$

$$Q_E = 240 \frac{\text{litros}}{\text{dia}}$$

$$\eta_{\text{energético}} = \frac{Q_E \cdot H_{cr}}{Q_A \cdot H_{fc}} \times 100\% = \frac{240 \cdot 35}{5760 \cdot 5} \times 100\% \approx 29,2\%$$

2.O carneiro hidráulico

$$\eta_{volumétrico} = \frac{Q_E}{Q_A} \times 100\% = \frac{240}{5760} \times 100\% \approx 4,2 \%$$

O caudal de desperdício (Q_D) pode então ser calculado:

$$Q_D = Q_A - Q_E = 5760 - 240 = 5520 \frac{\text{litros}}{\text{dia}}$$

Como se pode concluir, o rendimento volumétrico é baixo devido à quantidade de água dissipada para bombear os 240 litros por dia. No entanto, a altura de elevação é sete vezes superior à altura de queda, logo o rendimento energético obtido é francamente superior.

O rendimento energético das bombas carneiro pode atingir os 60% [32]. Existem fabricantes como por exemplo a *Williamson* que refere que a capacidade máxima de elevação até hoje instalada é de 420 metros [21].

2.6 Instalação e recomendações

Na Figura 2-15, expõem-se os parâmetros associados à bombagem de água através do carneiro hidráulico:

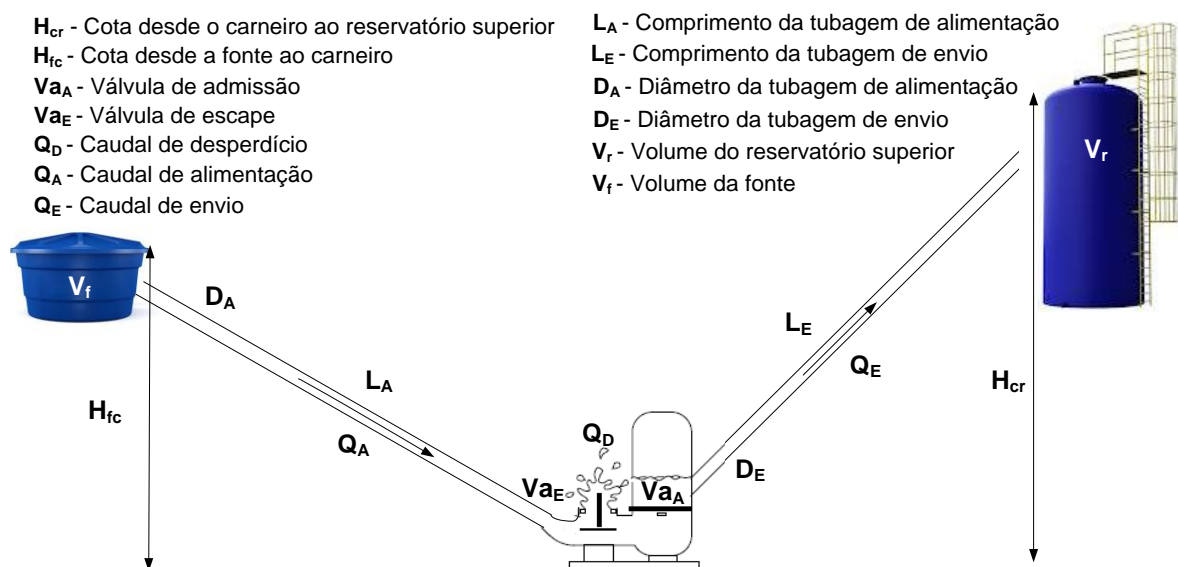


Figura 2-15: Parâmetros da bomba carneiro.

A escolha da localização para a instalação do carneiro hidráulico deve ser feita após uma avaliação preliminar de potenciais locais. Deverá ser medido o caudal de água na origem (fonte), de modo a prever o seu fluxo em diferentes épocas do ano.

2.O carneiro hidráulico

Este dispositivo está assim limitado às características do local de instalação, que influenciam o seu desempenho, pelo que os parâmetros do mesmo dependerão do estudo dos seguintes factores:

- **Quantidade de água necessária na entrega (Q_E)** – deverá ser estimado o abastecimento diário de acordo com as necessidades [litros/dia];
- **Quantidade de água disponível na fonte (Q_A)** – obter o caudal mínimo disponível na fonte, em particular no Verão e o caudal máximo esperado [litros/dia];
- **Altura de elevação da água (H_{cr})** – este indicador deverá ser medido até ao nível máximo de enchimento do reservatório [m];
- **Altura entre a fonte e o carneiro (H_{fc})** – este valor é vital na eficiência do carneiro e, caso as características de implantação o permitam, deverá ser o mais elevado quanto possível [m].

2.6.1 Reservatório inferior

Este é responsável pelo armazenamento da água proveniente da fonte que posteriormente irá alimentar a bomba carneiro e deverá ser projectado de modo a garantir um nível constante.

A operação do carneiro requer que a água não possua sólidos que possam causar o entupimento das válvulas. Alguns dos cuidados a ter na sua instalação, para evitar a interrupção do fornecimento de água, passa por colocar um sistema de filtragem a montante.

2.6.2 Tubagem de alimentação

Esta liga o reservatório inferior ao carneiro hidráulico e constitui o elemento fixo mais importante em conjunto com as válvulas, pois suporta com maior intensidade os efeitos dos golpes de aríete: Por isso, este tubo deve ser de material de grande rigidez, de modo a suprimir a sua deformação. Deste modo, evita-se a dissipação de energia provocada pela absorção dos impactos em cada ciclo de bombagem. Por outro lado, as paredes internas da tubagem devem possuir baixa rugosidade, para minimizar o atrito resultante do movimento da água, que causa a diminuição da sua velocidade. A instalação deve ainda evitar curvas para minimizar as perdas de carga.

2.O carneiro hidráulico

O comprimento e a inclinação deste tubo influenciam o tempo do ciclo de transporte da massa de água e o tempo de aceleração desta. Para um determinado comprimento deve ser o mais inclinado quanto possível, para permitir a aceleração rápida da água na tubagem e garantir uma maior velocidade à entrada no carneiro. Na secção 3.1.1 é analisado matematicamente este parâmetro.

Se este tubo for demasiado curto a dinâmica de ambas as válvulas terá uma influência negativa, uma vez que devido à sua inércia não têm tempo suficiente para abrir e fechar por completo num mesmo ciclo, sendo a quantidade de água bombeada menor.

A escolha do diâmetro deste tubo (D_A) está relacionada com a quantidade de água desejada e disponível.

Segundo os mais recentes estudos, existe uma relação entre o comprimento da tubagem de alimentação e o seu diâmetro de forma a obter um desempenho satisfatório. Assim, a equação 2-9 traduz essa relação [33]:

$$150 < \frac{L_A}{D_A} < 1000 \quad (2-9)$$

L_A – comprimento da tubagem de alimentação, m;

D_A – diâmetro da tubagem de alimentação, m.

A mesma é válida desde que o comprimento do tubo não seja inferior a 5 metros. [33].

2.6.3 Altura de queda ou de alimentação - H_{fc}

A altura de queda de água (H_{fc}) é medida verticalmente desde o nível médio de água esperado no reservatório inferior, ao nível de saída na válvula de escape. Este valor vai variar ao longo do ano devido à sazonalidade, no entanto, desde que as condições no terreno o permitam, quanto maior for a altura de queda, maior será a capacidade de bombeamento.

2.6.4 Tubagem de envio

Neste tubo a água é impulsionada desde a câmara de ar do carneiro até ao reservatório. Este pode ser de material flexível pois não é afectado pelos golpes de aríete e facilita também a sua instalação.

2.O carneiro hidráulico

A secção deste tubo (D_E) deve ser inferior em relação à tubagem de alimentação, pois só irá elevar parte da água disponível no caudal de alimentação.

À semelhança da tubagem de alimentação, deve-se utilizar tubo com parede interna lisa e evitar curvas acentuadas no seu trajecto de modo a minimizar as perdas.

2.6.5 Tipos de instalação

As fontes de água podem ser um rio, ou uma albufeira, desde que haja disponibilidade do recurso hídrico, no entanto é necessário definir como fornecê-la ao carneiro. Normalmente são efectuadas derivações para desviar a água destes pontos para tanques de abastecimento que posteriormente abastecem o carneiro hidráulico (Figura 2-16).

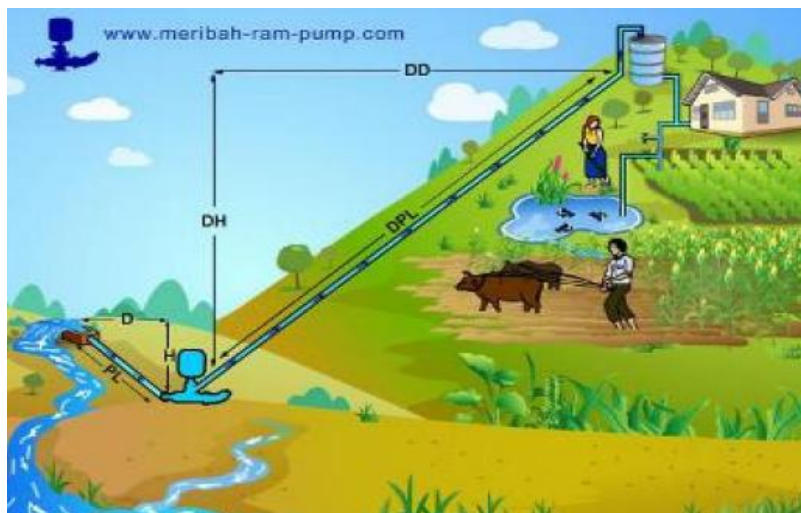


Figura 2-16: Exemplo de instalação do carneiro hidráulico [6].

Outra forma de alimentar o carneiro quando a fonte é um rio, é construir um açude ou represa para encaminhar directamente a água para o carneiro (Figura 2-17). Deste modo, aproveita-se a velocidade e a queda natural do curso de água para provocar um desnível, não sendo necessário construir um tanque de abastecimento.

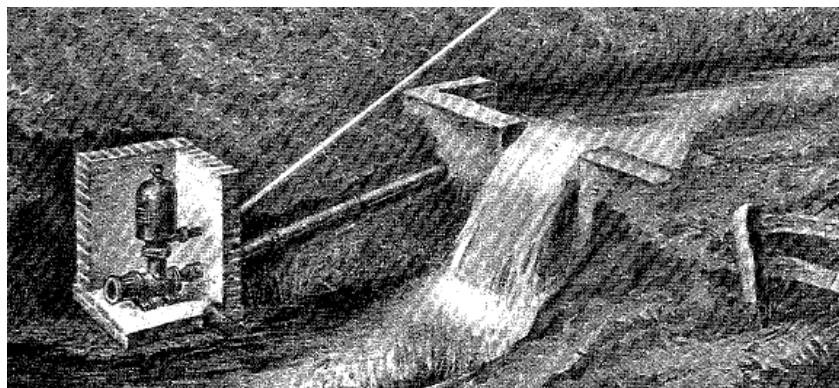


Figura 2-17: Exemplo de instalação da bomba carneiro num rio [10].

2.O carneiro hidráulico

Quando se pretende um maior caudal de envio e o potencial hídrico disponível é abundante, considera-se a instalação de dois ou mais carneiros hidráulicos em paralelo, sendo a tubagem de envio comum (Figura 2-18).

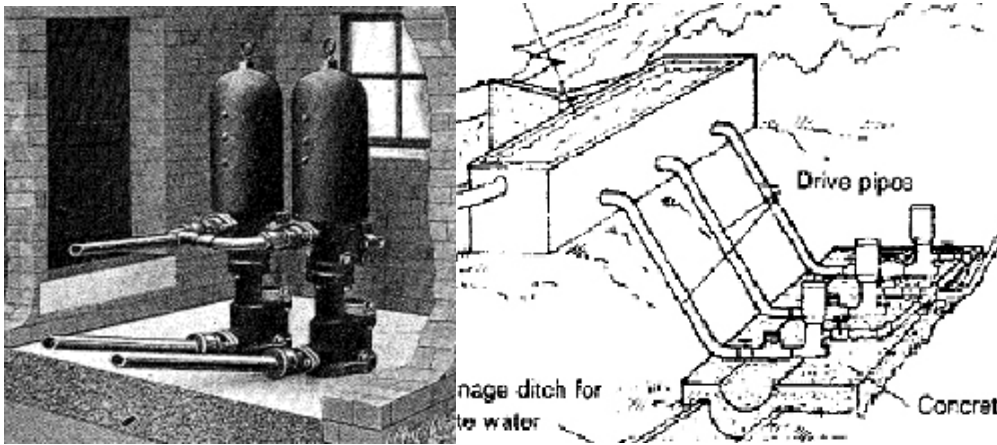


Figura 2-18: Exemplo de instalação de bombas carneiro em paralelo [7] [11].

Pode ainda adoptar-se uma outra configuração na instalação destes dispositivos quando a altura de envio for muito elevada, instalando-se diversos carneiros ligados em série. Neste tipo de instalação a água é bombeada por etapas ou patamares, de modo a que cada quantidade de água elevada pelo carneiro precedente seja suficiente para alimentar a etapa seguinte acima deste. Naturalmente que com esta configuração o rendimento de bombagem será muito menor devido à fuga de água pela válvula de escape em cada carneiro instalado.

A escolha dos materiais que constituem os componentes de instalação de um carneiro hidráulico, são factores determinantes no dimensionamento e *design* do mesmo. O equipamento terá que resistir às agressões externas do meio-ambiente, tais como chuva, radiação solar, corrosão, a lama, a matéria orgânica e à fadiga provocada pelos impactos do golpe de aríete.

Os carneiros hidráulicos comerciais são fabricados actualmente em ferro fundido, apesar de existirem noutros materiais, como o aço galvanizado e o policloreto de vinilo (PVC). Habitualmente é utilizado aço galvanizado para a tubagem de alimentação.

3. Análise teórica de parâmetros do sistema

3.1 Energia e escoamento

Existem muitos parâmetros envolvidos no funcionamento do carneiro hidráulico associados ao movimento da água, como a energia potencial gravítica definida no capítulo anterior.

Quando a válvula de escape abre, a energia potencial transforma-se em energia cinética originando o escoamento da água na tubagem, do ponto mais elevado para um nível inferior. De seguida esta válvula fecha e a energia cinética converte-se num pico de pressão. Quando o ar está na fase de descompressão e exerce força na água para que esta se eleve no tubo, a pressão é convertida em energia potencial.

3.1.1 Energia cinética

A energia cinética é a capacidade que um corpo possui em transformar a sua velocidade em trabalho e a expressão é a seguinte:

$$E_c = \frac{1}{2} . m . v^2 \quad (3-1)$$

3. Análise teórica de parâmetros do sistema

E_c – energia cinética, N.m ou J;

m – massa do corpo, kg;

v – velocidade, m/s.

Assim, quanto maior for a massa de água ou quanto maior for a sua velocidade, maior será a energia cinética e maior será a força que a água vai exercer na válvula de escape, ou seja, maior é a intensidade e o seu aproveitamento através do golpe de aríete.

3.1.2 Pressão hidrostática

A pressão hidrostática indica-nos a diferença de pressão existente entre dois pontos da coluna de um fluido devido ao seu peso, ou seja, corresponde ao peso de uma coluna de um líquido sobre uma superfície unitária [34]. Por outras palavras, associado à energia potencial, a pressão de um depósito colocado a uma altura superior possui maior pressão (energia) do que um depósito situado a um nível inferior.

A diferença de pressão devido a uma diferença na elevação de uma coluna de água é dada por:

$$\Delta P = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot \Delta H \quad (3-2)$$

ΔP – pressão, Pa;

$\rho_{\text{água}}$ – massa volúmica do fluido, kg/m^3 ;

g – aceleração da gravidade, m/s^2 ;

ΔH – altura do fluido, m.

Como exemplo, a pressão da água num depósito situado a 5 metros do solo é igual a:

$$\begin{aligned} \Delta P &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5 \text{ m} \\ \Delta P &= 49050 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \text{m}^2} = 49050 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{m}} = 49050 \text{ Pa}^1 = 0,5 \text{ bar} \end{aligned}$$

Outra unidade de pressão muito utilizada nestes casos por ser de clara associação, é metros por coluna de água (m.c.a), ou seja, a pressão da água num depósito instalado a 5 metros do solo é de 5 m.c.a, aproximadamente 0,5 bar.

¹ 1 Pa = 1 $\text{kg/s}^2\text{m}$ = 1 N/m^2 = 10^{-5} bar

3.1.3 Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli descreve o comportamento do escoamento de um fluido ao longo de um tubo. Considera-se neste estudo que o escoamento é permanente, a água é incompressível e as perdas de atrito são desprezáveis [12].

Um elemento de um fluido tem energia potencial devido à altura h_1 em relação a um referencial e possui energia cinética devido à sua velocidade v_1 (Figura 3-1).

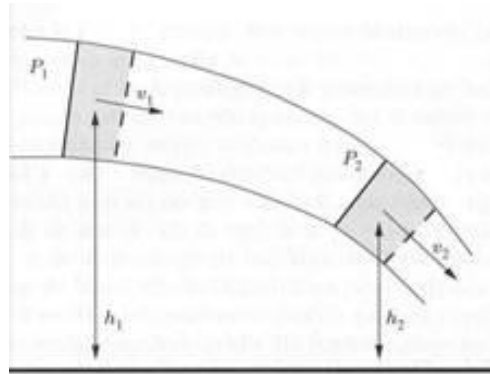


Figura 3-1: Escoamento de um fluido num tubo [12].

As características do deslocamento da água num tubo de um ponto inicial (1) até um ponto final (2) são dadas pela seguinte expressão de *Bernoulli*:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_2 \quad (3-3)$$

P_1 – pressão no ponto 1, N/m^2 ou Pa;

P_2 – pressão no ponto 2, N/m^2 ou Pa;

v_1 – velocidade no ponto 1, m/s;

v_2 – velocidade no ponto 2, m/s;

h_1 – altura no ponto 1, m;

h_2 – altura no ponto 2, m;

γ – peso específico do fluido, kg/m^3 ;

g – aceleração da gravidade, m/s^2 .

Esta equação permite estimar a velocidade com que a água chega ao carneiro e como irá ser demonstrado a seguir, a velocidade da água à saída de um tanque (Figura 3-2).

Como se desprezam as perdas por fricção o somatório da energia cinética, da energia potencial e da pressão por unidade de peso, é constante. A energia cinética é representada pelo termo $v^2/2 \cdot g$, a energia potencial é dada por h e o termo P/γ representa a capacidade da unidade de peso de fluido em produzir trabalho, em virtude de estar sob pressão [13].

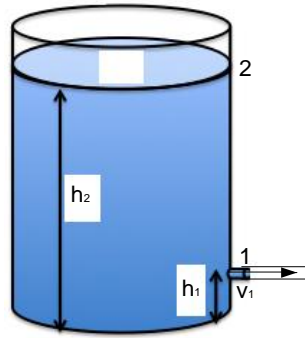


Figura 3-2: Caudal do tanque.

O nível de água no reservatório é h_2 . Aplicando a equação de Bernoulli, vem:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_2$$

Como não há movimento da água no topo do tanque, a energia cinética inicial é zero ($v_2=0$). As pressões anulam-se e considerando a energia potencial final (h_2-h_1) resulta:

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} = h_2 - h_1$$

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_2 - h_1)} \quad (3-4)$$

P_1 – pressão à saída no tanque, N/m^2 ;

P_2 – pressão da água no topo do tanque, N/m^2 ou Pa;

v_1 – velocidade da água à saída do tanque, m/s;

v_2 – velocidade no ponto 2, m/s;

h_1 – altura à saída do tanque, m;

h_2 – altura do nível da água no tanque, m;

γ – peso específico do fluido, kg/m^3 ;

g – aceleração da gravidade, m/s^2 .

Conforme se pode verificar, quanto maior for o nível de água no tanque, maior irá ser a velocidade de escoamento à saída deste. O possível incremento deste valor torna-se importante na força que irá ser desenvolvida na válvula de escape dado que, como referido anteriormente, este vai aumentado em função do tempo de escoamento devido à transformação da sua energia potencial gravítica em energia cinética.

3.2 Propriedades no carneiro hidráulico

3.2.1 Estudo matemático do golpe de aríete

A variação da velocidade decorrente do fecho repentino da válvula de escape é transmitida ao longo da canalização através da água na forma de uma onda de pressão. Esta onda de propagação percorre a tubagem em ambos os sentidos até que o atrito provocado entre a água e o tubo e o atrito resultante da sua deformação elástica, a neutralize. A velocidade da propagação da onda de choque pode também ser designada por celeridade (c) e a expressão geral para o seu cálculo é dada por [35]:

$$c = \frac{9900}{\sqrt{(48,3 + k \frac{D}{e})}} \quad (3-5)$$

c – celeridade, m/s;

D – diâmetro interno do tubo, m;

e – espessura do tubo, m;

k – constante que depende da natureza do tubo;

$k = 0,5$ para o aço;

$k = 1,0$ para o ferro fundido;

$k = 6,6$ para o poliéster;

$k = 33,3$ para o PVC.

Pela análise da equação conclui-se que a celeridade depende do tipo de material e rigidez do tubo e ainda das suas características, diminuindo com o aumento do diâmetro e aumentando com o aumento da espessura. Por exemplo, o valor da celeridade para um tubo de aço de diâmetro 25 mm e espessura 1 mm é igual a:

$$c = \frac{9900}{\sqrt{(48,3 + 0,5 \frac{0,0025}{0,0001})}} = 1270 \text{ m/s}$$

O tempo de propagação da onda de pressão (T) é expresso pela seguinte equação:

$$T = \frac{2 \cdot L_A}{c} \quad (3-6)$$

T – tempo de propagação da onda de pressão, s;

L_A – comprimento da tubagem de alimentação, m;

c – celeridade, m/s.

3. Análise teórica de parâmetros do sistema

Uma manobra diz-se rápida se o tempo de fecho da válvula (t_1) é menor ou igual ao T ($t_1 < T$), caso contrário a manobra é lenta ($t_1 = T$). Assim, segundo a fórmula de Alliévi ou de Frizell-Joukowsky a expressão usada na análise da sobrepressão gerada pelo golpe de aríete, no caso de a válvula ter uma manobra de fecho rápida é [35]:

$$\Delta P_{GA} = \frac{c \cdot v_{m\u00e9dia}}{g} \quad (3-7)$$

ΔP_{GA} – sobrepressão gerada, metro de coluna de água (m.c.a)²;

$v_{m\u00e9dia}$ – velocidade média da água, m/s;

c – celeridade, m/s;

g – aceleração da gravidade, m/s².

Por outro lado, segundo Michaud, caso a válvula tenha uma manobra de fecho lenta vem [35]:

$$t_1 = T = \frac{2 \cdot L_A}{c}$$

$$c = \frac{2 \cdot L_A}{t_1}$$

Substituindo c na equação:

$$\Delta P_{GA} = \frac{2 \cdot L_A \cdot v_{m\u00e9dia}}{g \cdot t_1} \quad (3-8)$$

ΔP_{GA} – sobrepressão gerada, m.c.a;

L_A – comprimento da tubagem de alimentação, m;

$v_{m\u00e9dia}$ – velocidade média da água, m/s;

g – aceleração da gravidade, m/s²;

t_1 – tempo de fecho da válvula de escape, s.

Pela análise destas equações conclui-se que o fecho da válvula de escape deverá ser o mais rápido possível, assim como a velocidade da água de modo a produzir uma maior sobrepressão.

² 1 m.c.a (metro coluna de água) = 9806,65 Pa = 0,1 bar

4. Discussão de propostas

Entre as alternativas analisadas para o desenvolvimento de um novo protótipo de carneiro hidráulico, a ideia inicial descrita em 4.1 foi a mais relevante e embora não tenha sido a adoptada, esta contribuiu para a concepção do trabalho final.

4.1 Proposta inicial

Na Figura 4-1 apresenta-se o esquema da proposta inicial, que se baseia no funcionamento do carneiro hidráulico convencional com o apoio de um actuador eléctrico alimentado com energia eléctrica de origem solar fotovoltaica.

A água proveniente do tanque fluiria para duas câmaras no carneiro, uma convencional (2) e uma outra de dimensão inferior (1) instalada no topo. A elevação na câmara superior (1) ocorreria devido à acção do actuador (3) apenas quando a radiação solar estivesse disponível. A acção do actuador (3) também se repercutiria na câmara convencional (2) e em sincronismo com os golpes de aríete aumentaria a sua capacidade de bombagem.

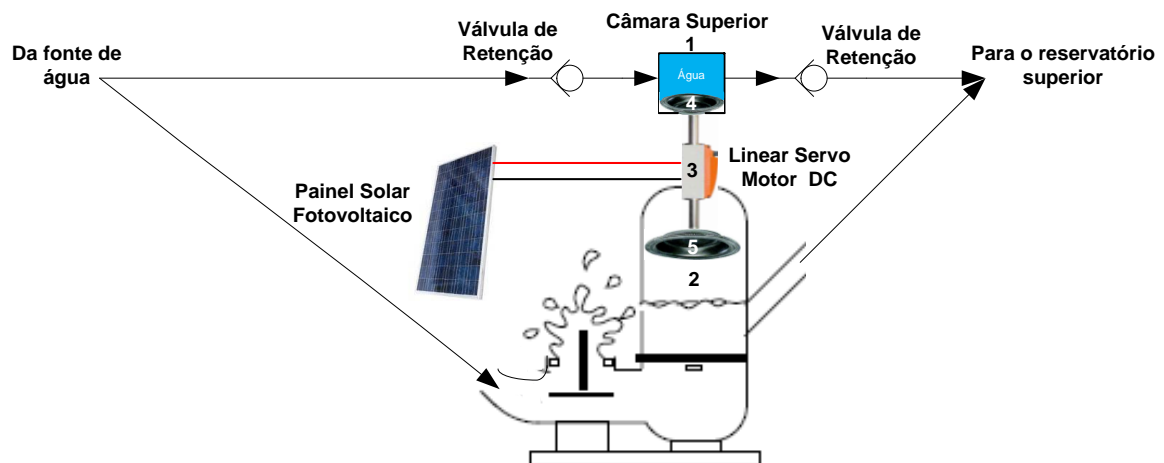


Figura 4-1: Proposta inicial.

O actuador eléctrico (3) seria acoplado mecanicamente ao diafragma da câmara superior (1) e ao da câmara inferior (2). A deslocação linear e ascendente deste origina o aumento de pressão em 1 devido à força de compressão exercida no diafragma (4), enquanto o volume em 2 é expandido. Quando se desloca no sentido descendente o volume em 1 expande-se e o volume em 2 é comprimido.

A operação da câmara superior (1) baseia-se numa bomba de diafragma (Figura 4-2). Quando o diafragma é traccionado origina o efeito de aspiração da água da tubagem que está a montante da válvula de retenção à entrada de 1, para dentro da câmara (imagem da esquerda da Figura 4-2). Quando o diafragma é comprimido a pressão aumenta e o fluido é impulsionado para fora da câmara passando pela segunda válvula de retenção em 2 (imagem da direita da Figura 4-2).

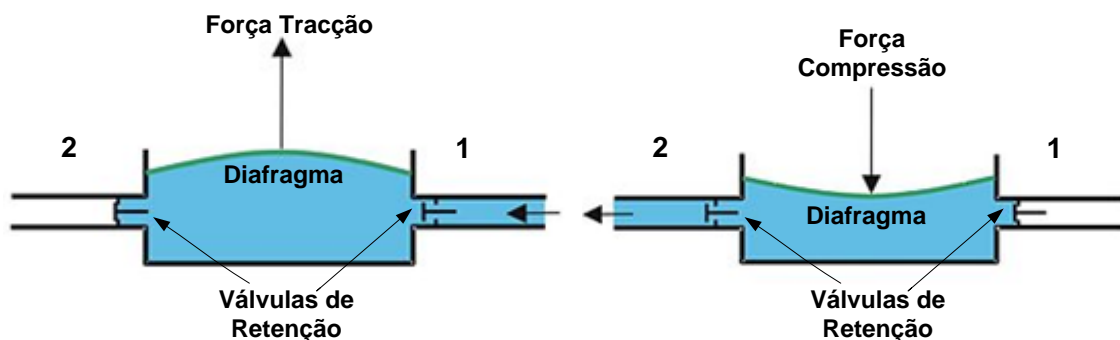


Figura 4-2: Funcionamento das bombas diafragma [13].

Para actuar o diafragma poderia ser utilizado um electroímã linear de duplo efeito, (Figura 4-3, à direita) ou um servomotor linear (Figura 4-3).



Figura 4–3: Servomotor linear, à esquerda e um electroíman linear de duplo efeito à direita [14][15].

Sabendo que a pressão é o quociente entre a força e a área de distribuição, ou força por área unitária:

$$P = \frac{F}{A} \quad (4-1)$$

P – pressão, N/m^2 ou Pa;

F – força normal à superfície, N;

A – área da superfície onde a força é aplicada, m^2 .

A pressão que a bomba deve exercer é dada pela altura de coluna de água entre o carneiro e o reservatório superior, desprezando perdas por fricção na tubagem. Basicamente, esta pressão corresponde ao aumento de 1 bar a cada 10,28 metros de elevação. Portanto, para se elevar a água da câmara superior até ao reservatório instalado por exemplo a 100 metros de altura³, admitindo que o diafragma possui 5 centímetros de diâmetro, vem:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (4-2)$$

$$\Leftrightarrow A = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$P = \frac{F}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}}$$

$$\Leftrightarrow 100 \times 9806,65 = \frac{F}{\pi \cdot \frac{0,05^2}{4}}$$

$$\Leftrightarrow F = 1925,5 \text{ N}$$

³ 1 m.c.a (metro coluna de água) = 9806,65 Pa = 0,1 bar

Será, portanto necessário exercer uma força no diafragma superior a 1925,5 N. Quanto menor for a área de superfície, menor terá que ser a força a exercer no diafragma e menor o volume expelido em cada actuação.

O volume da câmara do topo do carneiro depende do curso de deslocação do diafragma cuja área seria dimensionada de acordo com as necessidades e características de cada instalação e permitiria uma montagem de adaptação fácil tipo “*Lego*”.

Depois da pesquisa e análise das características técnicas dos actuadores eléctricos e após o contacto com alguns fabricantes, verificou-se que não seria viável a sua instalação. A principal razão foi a limitação destes equipamentos quanto à velocidade de actuação e força máxima que estes são capazes de exercer.

Para além disso, seria necessário implementar um circuito que realizasse o perfeito sincronismo entre o golpe de aríete e o movimento do actuator, para garantir a compressão do diafragma na câmara inferior quando a válvula de admissão estivesse fechada.

Outras das desvantagens da utilização do electroímã são:

- A elevada potência exigida (para uma força de 2800N – 2200W com o modelo *ECH* da *Nafsa*);
- Uma intermitência elevada de funcionamento (*duty-cycle* – ciclo de trabalho) para a força máxima desenvolvida.

Face ao exposto, apesar dos equipamentos apresentados efectuarem o movimento desejado para actuação nos diafragmas, considerou-se que as suas características não seriam as melhores para os objectivos que se pretendiam alcançar.

4.2 Solução adoptada

Tendo por base o princípio de funcionamento descrito em 4.1, substituiu-se o actuator eléctrico por uma bomba com diafragma a funcionar em paralelo com o carneiro.

Na Figura 4-4 apresenta-se o esquema de montagem da solução adoptada.

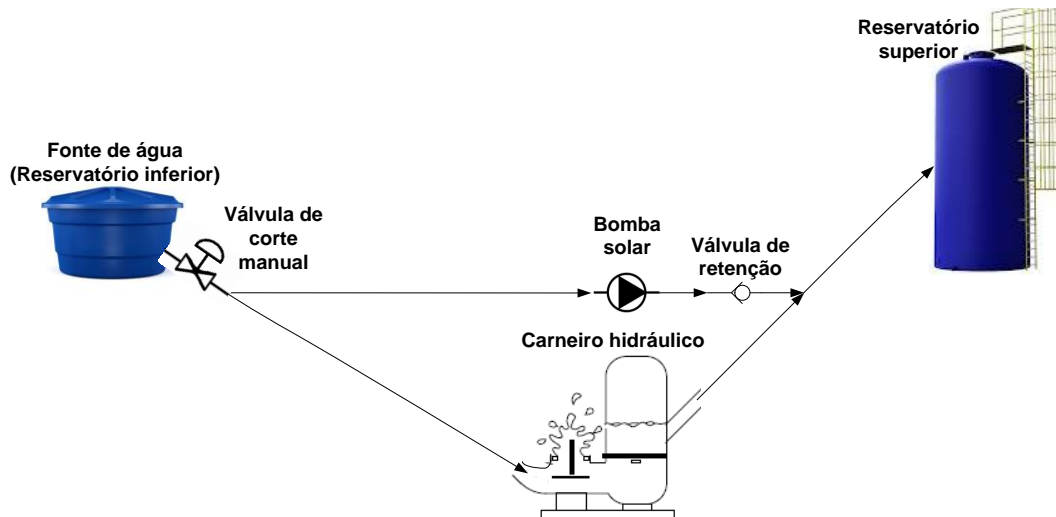


Figura 4–4: Esquema hidráulico da solução adoptada.

Com esta montagem funcionam em paralelo os dois sistemas de bombagem, o carneiro convencional e a bomba solar a corrente contínua (DC) alimentada com energia eléctrica de origem solar fotovoltaica. Esta bombeia durante o período diurno, enquanto o carneiro opera sempre que o recurso hídrico esteja disponível.

As bombas alimentadas com corrente alternada (AC) poderiam ser eventualmente utilizadas, no entanto requerem um maior investimento e aumentam a complexidade, devido a originarem maiores perdas na conversão de DC para AC, sendo por isso não utilizadas quando se pretende um sistema de bombagem de água autónomo como é o caso deste projecto.

De entre as bombas solares pesquisadas, as de deslocamento positivo são as que permitem uma maior capacidade de elevação, factor este preponderante no sistema implementado. Neste tipo de bombas, o movimento do fluido dá-se na mesma direcção das forças transmitidas, razão pela qual é atribuída essa designação.

A configuração adoptada permite o aproveitamento da pressão proveniente da altura de queda da coluna de água (P_{in}) no bombeamento, aumentando a pressão à saída (P_{out}) da bomba (Figura 4-5).



Figura 4–5: Esquema que exemplifica a pressão final do sistema.

A válvula de retenção têm por objectivo garantir o fluxo unidireccional.

4. Discussão de propostas

Na Figura 4-6 pode observar-se um esboço do esquema eléctrico projectado. O painel solar fotovoltaico (FV) é ligado a um *linear current booster* (LCB⁴) cujo objectivo é permitir o arranque da bomba quando a radiação solar é ainda pouco intensa e aumentar o período de funcionamento (explicado no ponto 4.2.3).

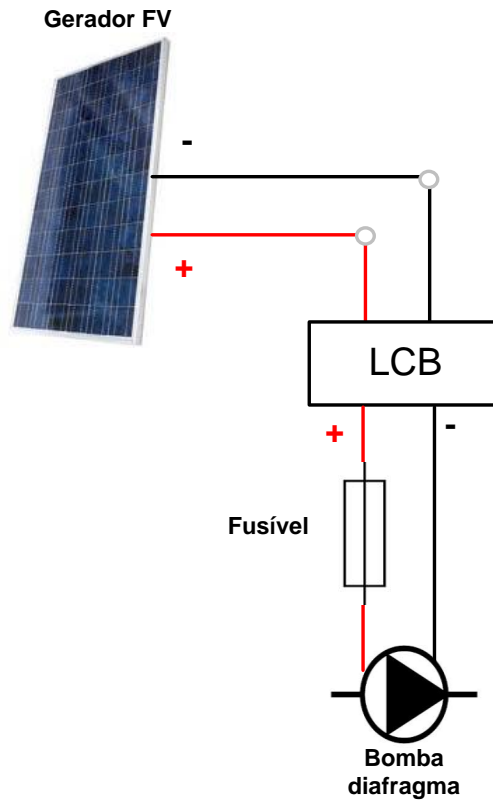


Figura 4–6: Esquema eléctrico da proposta final.

É instalado um fusível de protecção contra sobrecargas entre o LCB e a bomba.

O sistema é assim constituído pelos seguintes componentes: painel FV; bomba solar diafragma; LCB e fusível.

4.2.1 Painel solar fotovoltaico

Na Figura 4-7 representa-se a curva característica de saída de um equipamento FV, célula ou painel denominada por curva de corrente/tensão.

⁴ LCB (*linear current booster*) – equipamento que mediante uma determinada potência de entrada, permite adaptar a tensão às condições exigidas pela bomba solar.

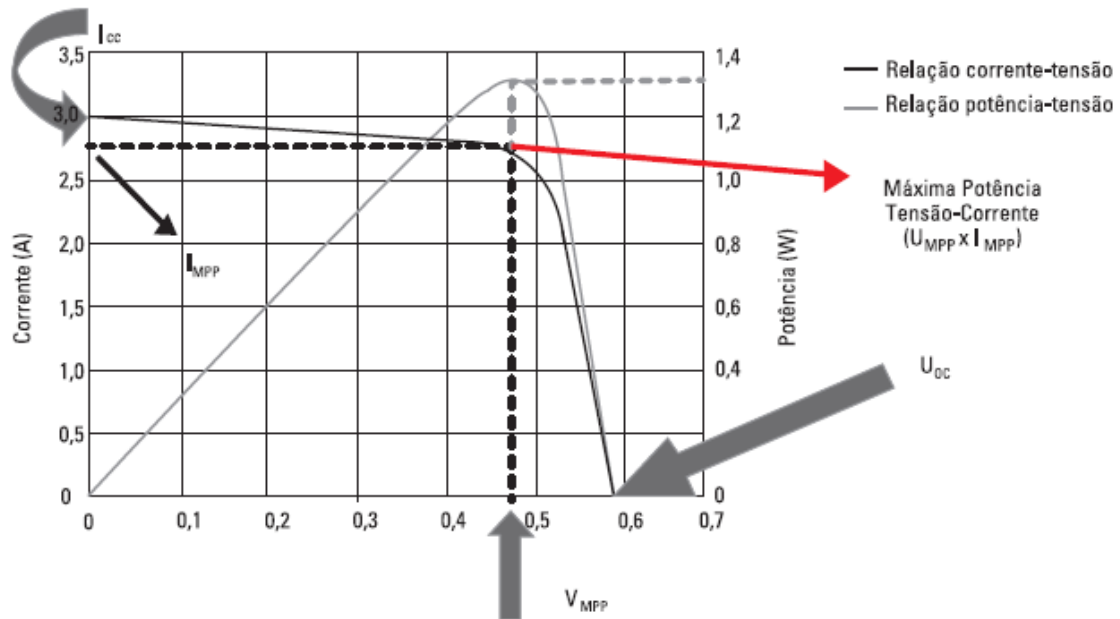


Figura 4–7: Parâmetros de máxima potência de uma célula FV [16].

O ponto da curva onde o produto da tensão pela corrente é máximo, designa-se por MPP (*Maximum Power Point*) e corresponde à máxima potência produzida pela célula/painel FV. Em condições de funcionamento normal a potência produzida aumenta com a tensão até um determinado valor máximo (MPP) e de seguida diminui bruscamente. Os valores da tensão e corrente que causam este valor de potência máxima são designados, respectivamente, por V_{MPP} e I_{MPP} [16].

- **Corrente máxima (I_{MPP}):** é o valor da corrente que é entregue a uma carga à máxima potência, sob determinadas condições de radiação e de temperatura.
- **Tensão máxima (V_{MPP}):** é o valor da tensão que é entregue à carga à máxima potência, sob determinadas condições de radiação e de temperatura.
- **Potência máxima (P_{MPP}):** é o valor máximo de potência que se pode entregar a uma carga e corresponde ao ponto da curva no qual o produto $V \times I$ são máximo [16].

A potência máxima produzida por um painel FV é assim dada pela seguinte expressão:

$$P_{MPP} = V_{MPP} \times I_{MPP} \quad (4-3)$$

A intensidade da corrente gerada num painel FV é directamente proporcionalmente à radiação solar incidente, enquanto o valor da tensão pouco varia, conforme se verifica na Figura 4-8.

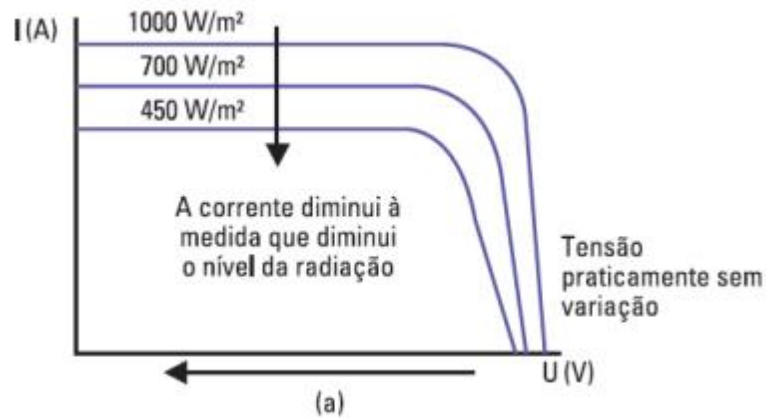


Figura 4–8: Efeito da variação da radiação solar [16].

A temperatura constitui outro parâmetro relevante uma vez que, para a maioria dos painéis, o seu aumento provoca uma diminuição da tensão produzida.

Caso exista uma necessidade de bombagem de água sazonal, para maximizar a captura de energia solar em diferentes épocas do ano, os painéis FV necessitam de estar instalados com uma determinada inclinação em função da radiação incidente (Figura 4-9).

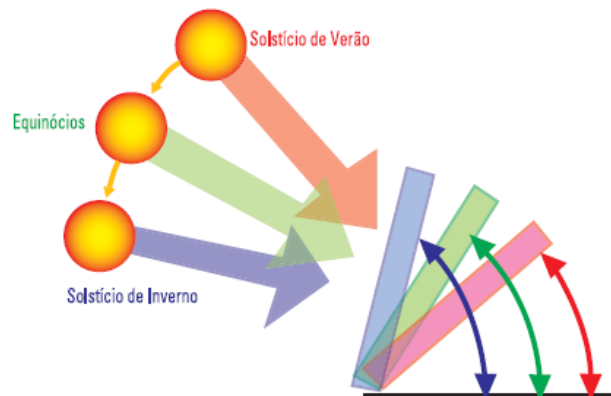


Figura 4–9: Posição do painel face à posição anual do Sol [16].

Recorrendo-se ao simulador solar do centro de informação geográfica fotovoltaica do *Joint Research Centre* (JRC⁵) pode-se obter para um dado local no continente europeu, a radiação solar incidente (diária e mensal) e o ângulo de inclinação óptimo para os painéis e uma determinada altura do ano. Para a região de Viseu e considerando uma otimização anual de produção de energia, este é de 35°.

Ao meio-dia no hemisfério Norte, o Sol está virado a sul pelo que em Portugal os painéis devem ser orientados para Sul.

⁵ JRC - Joint Research Centre (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>)

4. Discussão de propostas

A Tabela 4-1 deve ser consultada quando se pretende otimizar a produção de energia e obter a inclinação ideal para diferentes estações do ano [16].

Tabela 4–1: Orientação do painel face ao tipo de necessidade na instalação [16].

Utilização	Inclinação
Verão	Latitude - 15°
Inverno	Latitude + 15°
Anual	Latitude - 5°

Em Viseu a latitude é de 40°, então considerando uma optimização da produção de energia durante o Verão, o painel FV deverá ser instalado com uma inclinação de 25° (40°-15°).

Na Figura 4-10, apresenta-se a variação diária da radiação incidente (W/m^2) sobre uma superfície com inclinação de 25°, no mês de Julho na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV) em Viseu (latitude: 40°38'28" Norte; longitude: 7°54'36" Oeste).

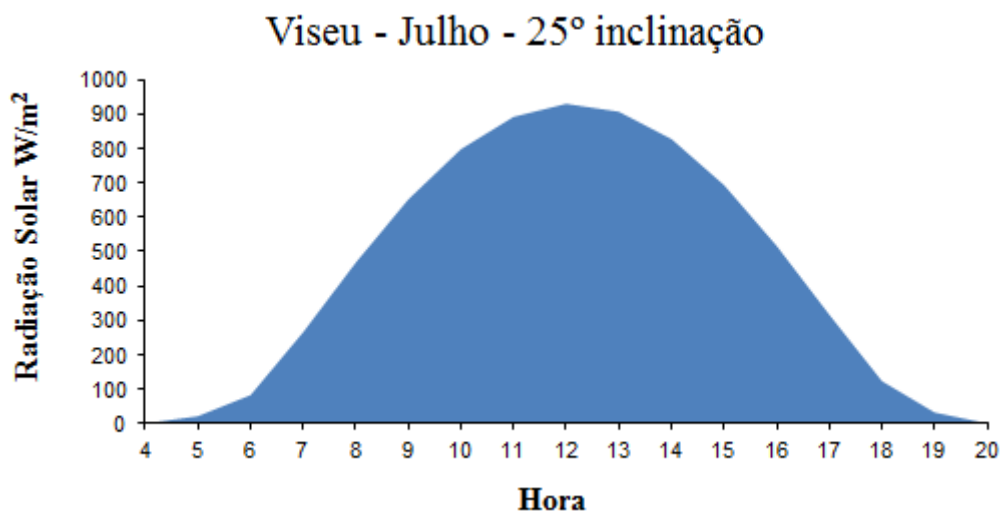


Figura 4–10: Radiação solar horária para um dia do mês de Julho, em Viseu.

A máxima radiação solar é registada ao meio-dia e tem o valor de $930 W/m^2$. Para um dia típico deste mês, a energia da radiação solar corresponde à área inferior delimitada pela curva da Figura 4-10, e tem neste caso o valor de $7.522 W/m^2/dia$. Ora, para efeitos de cálculo energético, esta situação pode considerar-se equivalente a que um painel FV com $1 m^2$ de superfície e com 25° de inclinação, receba 1000 W durante 7,52 horas.

A radiação solar máxima é de cerca de $1000 W/m^2$, ou seja um painel com $1 m^2$ e um rendimento de 15% produzirá no máximo 150 W.h. No entanto, o mesmo painel

4. Discussão de propostas

produzirá apenas 75 W.h se a radiação incidente for metade (500 W/m²). Num dia com nebulosidade, a radiação difusa poderá representar cerca de 300 W/m², e em péssimas condições atmosféricas a intensidade luminosa poderá descer para 100 W/m² produzindo neste exemplo apenas 15 W.h.

As características de painéis FV apresentadas pelos fabricantes são obtidas sob determinadas condições (STC⁶). Na Tabela 4-2, apresentam-se as características de um painel de 100W.

Tabela 4–2: Exemplo das características de um painel FV do fabricante *altE*.

Painel FV <i>altE</i> ALT100-12P- 100W	
V_{MPP}	18,0 V
I_{MPP}	5,56 A
η	13,80%
Área	0,725 m ²

Fonte: altE store Polycrystalline 100W 12 V Solar Panel

De forma simplificada, a potência produzida por um grupo gerador FV é determinada através da equação 4-4 [36]:

$$P_{PRODUZIDA\ g} = \frac{\eta \cdot I_{SOLAR} \cdot P_{MPP\ g}}{R} \quad (4-4)$$

Sendo que [36]:

$$R = \frac{P_{MPP}}{A_{FV}} \quad (4-5)$$

$P_{PRODUZIDA\ g}$ – potência produzida pelo gerador FV, W;

$P_{MPP\ g}$ – potência máxima do gerador FV, W;

I_{SOLAR} – radiação solar que incide na superfície do gerador FV, W/m²;

η – rendimento total do gerador FV, %;

R – relação entre a potência máxima de um painel FV e a área que este ocupa, W/m²;

A_{FV} – superfície de um painel FV, m²;

P_{MPP} – potência máxima do painel FV, W.

⁶ STC – *Standard test conditions*
Radiação solar de 1000W/m²
Temperatura do painel FV de 25°C

4. Discussão de propostas

A equação 4-4 é utilizada quando o gerador FV é constituído por mais de um painel FV com as mesmas características.

Considerando uma instalação solar fotovoltaica com um painel FV com as características da Tabela 4-2 e uma radiação solar máxima de 930Wh/m² vem:

$$P_{PRODUZIDA\ FV} = \frac{\eta \cdot I_{SOLAR} \cdot P_{MPP\ FV}}{\frac{P_{MPP\ FV}}{A_{FV}}}$$
$$P_{PRODUZIDA\ FV} = A_{FV} \cdot I_{SOLAR} \cdot \eta \quad (4-6)$$

$$P_{PRODUZIDA\ FV} = 0,725 \times 930 \times 0,138 = 93,05\ W$$

Caso se opte por uma instalação de dois painéis FV vem:

$$P_{PRODUZIDA\ g} = \frac{\eta \cdot I_{SOLAR} \cdot P_{MPP\ g}}{\frac{P_{MPP\ FV}}{A_{FV}}} = \frac{0,138 \times 930 \times (100 \times 2)}{\frac{100}{0,725}} = 186,1\ W\ (93,05W \times 2)$$

Como se pode concluir, a área do painel FV, a radiação solar incidente e o seu rendimento são as variáveis que mais contribuem para a produção de energia solar fotovoltaica.

4.2.2 Bomba solar de diafragma

Nas bombas de deslocamento positivo, a acção do órgão de impulsão obriga o fluido a executar o mesmo movimento a que está sujeito o impulsor (êmbolo ou pistão, engrenagens, pás rotativas), provocando o deslocamento do fluido [37]. Perante a diversidade de bombas deste tipo, optou-se pela de diafragma. Isto porque é a que detêm maior capacidade de elevação, permite o funcionamento a seco e minimiza os sistemas de filtragem.

Caso seja necessário, é possível instalar duas bombas em série elevando desta forma a pressão em dois estágios.

Na Figura 4-11 pode observar-se um tipo de bomba diafragma:

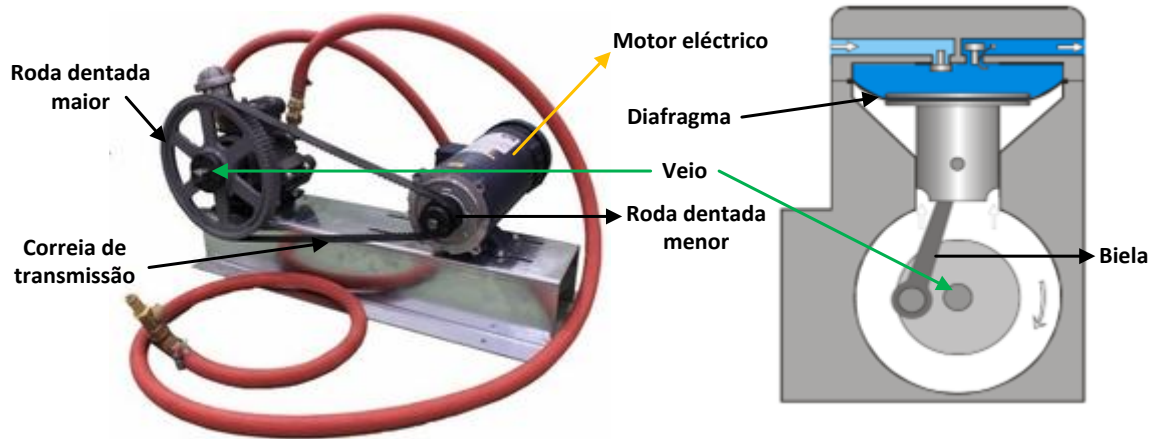


Figura 4-11 - Bomba diafragma [17].

O veio do motor eléctrico, acoplado a uma pequena polia dentada, transmite movimento a uma outra de maior diâmetro através de uma correia de transmissão. A relação de redução reduz a velocidade e aumenta o binário. A actuação do diafragma é realizada através do movimento rotacional de uma cambota e biela, fazendo a bomba admitir ou expulsar a água na câmara.

Outro tipo de bomba diafragma é apresentado na Figura 4-12:

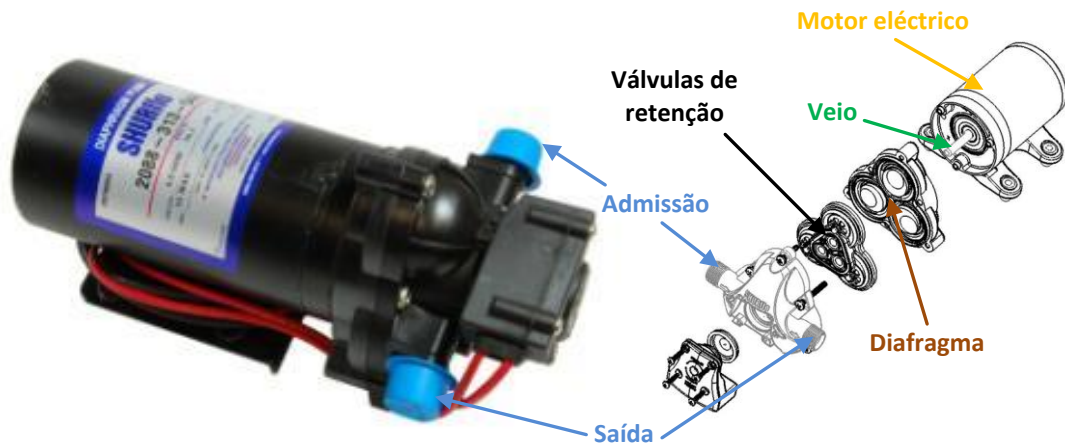


Figura 4-12: Bomba diafragma [18].

Esta possui um veio do motor DC, acoplado a um excêntrico que ao rodar comprime o diafragma no seu interior. No espaço entre as válvulas de retenção e o diafragma está localizada a câmara de admissão e expulsão da água.

Devido à sua natureza electromecânica as bombas tem propriedades operacionais bem definidas. Estas variam com o tipo de bomba, respectivo modelo e fabricante. A quantidade de água a bombear por um determinado período de tempo depende da

4. Discussão de propostas

pressão contra a qual a bomba tem de funcionar, do bombeio em cada ciclo e da rapidez dos ciclos.

De entre as bombas de diafragma disponíveis no mercado foram seleccionadas as apresentadas na Tabela 4-3, pretendendo-se garantir soluções para diferentes alturas de bombeamento.

Tabela 4-3 : Características de bombas diafragma de três fabricantes.

Marca	Modelo	Tensão Nominal	Capacidade de Elevação	Caudal de Envio	Potência Exigida
Shurflo	Aqua King Standard 3.0 Fresh Water Pump	12 VDC	35 metros	2,6 l/min	57,6 W
Shurflo	Extreme Series Smart Sensor 5.7	12 VDC	42 metros	4,9 l/min	120 W
Aquatec	Booster 8800 Series - 88x2	12 VDC	56 metros	0,94 l/min	20,4 W
Aquatec	Delivery Pump 7800 Series - 7864	24 VDC	91 metros	0,9 l/min	54 W
Dankoff	Solaram Surface Pump 8000-8221	24 VDC	293 metros	9,9 l/min	705 W
Dankoff	Solaram Surface Pump 8000-8543	180 VDC	293 metros	30,3 l/min	2145 W

4.2.3 Linear current booster (LCB)

Conforme se pode verificar pela Figura 4-8, a corrente produzida pelo painel FV depende da radiação solar incidente, enquanto a tensão se mantém praticamente constante. A velocidade de rotação num motor DC é directamente proporcional à tensão de operação.

O LCB actua como um conversor DC/DC pois converte a tensão à saída do painel FV, numa tensão de valor inferior. Este equipamento permite aumentar a corrente em detrimento da tensão actuando como um controlador MPPT⁷, pois procura o MPP do painel FV para converter na potência de funcionamento do motor DC [38].

Nos períodos de menor radiação, a corrente fornecida pelo painel FV é muitas vezes insuficiente para permitir que a bomba funcione (dependendo da potência deste). Este dispositivo electrónico possibilita o arranque do motor mais cedo do que seria normal numa instalação directa entre painel FV e bomba, dado que converte o excesso de tensão em corrente [39].

⁷ MPPT (Maximum Power Point Tracking) – procura para obter o MPP do painel FV

4. Discussão de propostas

Quando se pretende um maior período de funcionamento do sistema, aumenta-se a área de superfície de painel FV atingida pela radiação solar, no entanto nas horas de maior exposição solar, a potência produzida pode ultrapassar a potência de operação dos equipamentos podendo danificá-los. Uma outra vantagem do LCB é limitar a potência de alimentação às cargas protegendo-as, prevenindo que o motor DC se danifique devido a uma velocidade de rotação excessiva.

A tensão máxima de saída do LCB é assim limitada de acordo com a tensão máxima de operação das bombas, isto porque estas permitem tensões até 15VDC (bombas a 12VDC) e 30VDC (bombas a 24VDC).

A instalação do LCB permite um aumento da quantidade de água bombeada diariamente apesar das perdas associadas à conversão, normalmente no máximo até 8% [39].

As equações associadas à conversão de um LCB podem assim ser dadas:

$$P_{LCBout} = \eta_{LCB} \times P_{LCBin} \quad (4-7)$$

$$V_{LCBout} \times I_{LCBout} = \eta_{LCB} \times (V_{LCBin} \times I_{LCBin}) \quad (4-8)$$

$P_{LCB\ out}$ – potência à saída do LCB, W;

η_{LCB} – rendimento do LCB;

$P_{LCB\ in}$ – potência à entrada do LCB, W;

$V_{LCB\ out}$ – tensão à saída do LCB, V;

$V_{LCB\ in}$ – tensão à entrada do LCB, ou tensão produzida pelo gerador FV, V;

$I_{LCB\ out}$ – corrente à saída do LCB, A;

$I_{LCB\ in}$ – corrente à entrada do LCB, ou corrente produzida pelo gerador FV, A.

A maioria dos LCB possui uma entrada para ligação do sinal de uma bóia que permite ligar ou desligar a bomba dependendo do nível pretendido num reservatório (Figura 4-13). Esta funcionalidade poderá ser utilizada caso se pretenda a interrupção do funcionamento com controlo do nível do reservatório superior.

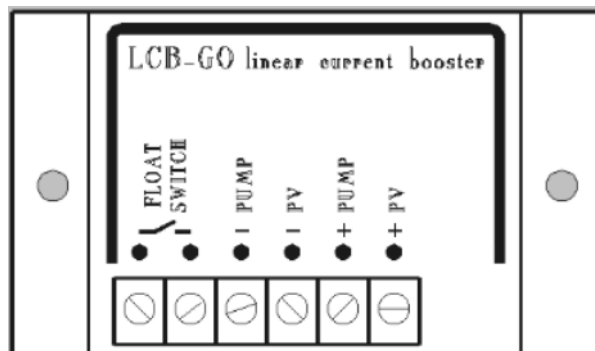


Figura 4–13: Entradas e saídas de um LCB [19].

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional

Neste capítulo expõe-se uma das montagens realizadas para a concretização do protótipo.

5.1 Montagem do protótipo

Para instalar a bomba optou-se inicialmente pela montagem das peças descritas na Tabela 5-1 de acordo com a Figura 5-1.

Tabela 5–1: Tipo e quantidade de peças utilizadas.

Nº	Material	Quantidade
1	Tê Latão 1''	2
2	Válvula de Retenção Lat/Inox 1''	2
3	Casquilho Latão Macho/Macho 1''	3
4	Casquilho Redução Latão Macho/Fêmea 1''x 3/4''	1
5	Válvula de Esfera Macho/Fêmea Borboleta 3/4''	1
6	Canhão Macho 3/4'' Adaptador Mangueira	1

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional



Figura 5-1: Disposição das peças do corpo do carneiro.

Optou-se por utilizar tubagem com diâmetro comum por forma a facilitar o processo de aquisição e montagem de peças. Foi então escolhido o diâmetro de uma polegada (1'') para o circuito de alimentação e de três quartos de polegada ($\frac{3}{4}$ '') para o circuito de envio (porque apenas parte da água é elevada).

Numa primeira fase foi decidido utilizar como válvula de impulso, uma válvula de retenção alterada. Na secção 5.1.1 é descrita em pormenor esta alteração. Na Figura 5-2 pode-se observar o aspecto do interior desta válvula.



Figura 5-2: Interior de uma válvula de retenção [20].

No seu estado de repouso encontra-se fechada devido à força de uma mola de baixa tensão que empurra o prato no interior. Quando se dá o golpe de aríete a pressão da água excede a força exercida pela mola, permitindo a passagem da água.

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional

Sendo as uniões entre as peças pontos críticos do sistema, foi necessário vedar a parte roscada com fita de teflon de modo a evitar fugas no corpo do carneiro (Figura 5-3).



Figura 5-3: Algumas peças vedadas com fita de teflon.

De seguida com o auxílio de ferramenta adequada foi efectuada a montagem (Figura 5-4).



Figura 5-4: Corpo do carneiro hidráulico.

Para simular o reservatório inferior foi utilizado um balde previamente perfurado para permitir a ligação ao tubo de alimentação de 1". Tendo em vista o controlo do sistema de alimentação, instalou-se à saída do balde a válvula de corte manual (Figura 5-5).



Figura 5-5: Válvula de corte manual e fixação no balde.

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional

Este tubo, com cerca de 6 metros, foi unido à entrada do carneiro. Utilizou-se uma mangueira flexível como tubagem de envio que foi interligada com a peça nº6 da Figura 5-1.

5.1.1 Protótipo 1

Câmara de ar

Inicialmente utilizou-se tubagem PVC por ser facilmente adaptável, pois caso se pretendesse realizar ensaios para diferentes volumes de câmara, bastava cortar o tubo na dimensão pretendida. Para isso, adquiriu-se um metro de tubo PVC de quatro polegadas (110 mm) de diâmetro (imagem à esquerda da Figura 5-6).



Figura 5-6: Tubo PVC (4'') e tampa de visita.

A tampa de visita permite o tamponamento da câmara e o acesso rápido para verificação do estado da mesma.

Dada a dificuldade em encontrar material que permita a redução directa de diâmetros, esta teve que ser efectuada recorrendo a reduções sucessivas até ao valor de 1'' (Tabela 5-2 e Figura 5-7).

Tabela 5-2: Tipo de peças utilizadas.

Nº	Material	Quantidade
1	Aumento Excêntrico 110-90 mm	1
2	Aumento Excêntrico 90-50 mm	1
3	União Interior Branca PVC	1
4	Casquilho Roscado PVC 2'' (50 mm)	1
5	União Tubo PVC 4'' (110 mm)	1

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional



Figura 5-7: Reduções e uniões em PVC.

Realizou-se de seguida a montagem da câmara de ar no corpo do carneiro (Figura 5-8).



Figura 5-8: Montagem do carneiro.

Adaptação da válvula de impulso

A válvula de impulso foi obtida através da modificação de uma válvula de retenção. Desta forma trocou-se a posição da mola no interior desta válvula (imagem à esquerda da Figura 5-9) e criou-se um batente para esta (imagem da direita da Figura 5-9).

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional

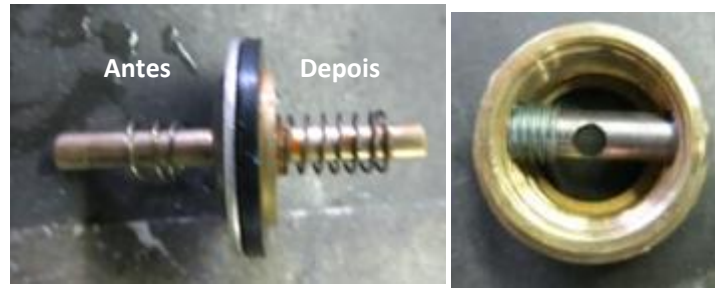


Figura 5-9: Válvula de impulso obtida a partir de uma válvula de retenção.

Na imagem à esquerda da Figura 5-9, pode observar-se o prato responsável pela vedação da válvula, constituído por uma camada de borracha e uma anilha em inox para a fixar.

Com a inversão da posição da mola na parte superior do prato, em vez desta fazer força para fechar a válvula, faz força para a abrir, tornando-a aberta em repouso.

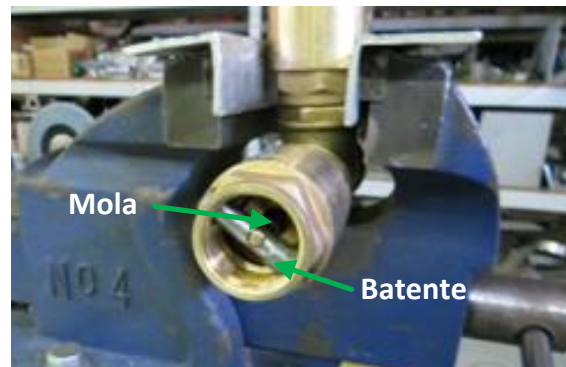


Figura 5-10: Válvula de impulso montada no carneiro.

Teste

Criou-se o desnível desde o reservatório inferior ao carneiro hidráulico (H_{fc}) para garantir o escoamento da água (Figura 5-11).

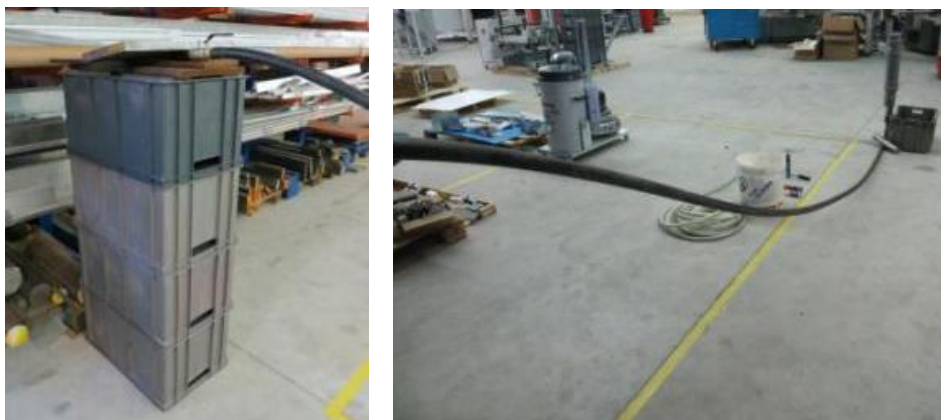


Figura 5-11: Interligação do reservatório inferior ao carneiro.

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional

Dando início aos ensaios o carneiro hidráulico funcionou até uma dada altura em que deixou de bombear. Abriu-se o tampão de visita e verificou-se que a câmara estava cheia de água impedindo a realização de novos ciclos. Havia fugas de ar e água nas juntas de ligação entre os acessórios utilizados na câmara.

Dada a existência de muitos acessórios conclui-se que os mesmos reduzem a fiabilidade do carneiro. A iteração seguinte passou por garantir a estanqueidade da câmara em PVC, utilizando uma garrafa de politereftalato de etileno (PET), utilizada na comercialização de refrigerantes.

5.1.2 Protótipo 2

Câmara de ar

O passo seguinte foi a adaptação da nova câmara em PET ao carneiro hidráulico (Figura 5-12).



Figura 5–12: Perfuração da rolha da garrafa.

Colocou-se um *o-ring* na rosca da garrafa, criando deste modo uma melhor vedação nesta união.

Nesta fase a garrafa está pronta a ser roscada no corpo do carneiro (Figura 5-13).



Figura 5–13: Carneiro hidráulico com garrafa PET.

Teste

Efectuada a montagem do sistema como ilustrado na Figura 5-14, o carneiro hidráulico começou a bombear água.

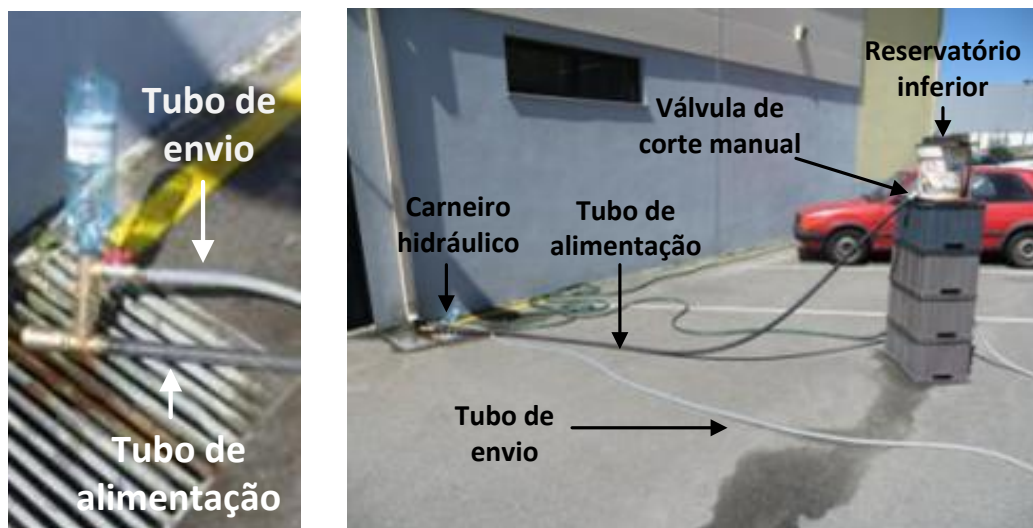


Figura 5–14: Instalação do carneiro hidráulico.

Verificou-se a elevação da água no tubo de envio até ao reservatório superior.

A esta altura começou-se a dar mais atenção ao funcionamento da válvula de impulso. Um dos problemas detectados foi o facto de esta não permitir a regulação da tensão da mola. Deste modo a pressão resultante do golpe de aríete está dependente das características comprimento e elasticidade da mola.

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional

De seguida constatou-se que a válvula de impulso não estava a vedar totalmente quando fechava, devido à alteração efectuada com a inclusão do batente, pois esse não ficou bem alinhado com o seu eixo (ver Figura 5-15).



Figura 5–15: Válvula de impulso a partir de uma válvula de retenção.

A existência de fugas originava perdas de pressão que afectam a eficiência da bomba.

5.1.3 Aperfeiçoamento da válvula de impulso

O passo seguinte foi o do aperfeiçoamento da válvula de impulso a partir de uma válvula de pé com crivo (Figura 5-16).



Figura 5–16: Válvula de pé com crivo.

Este tipo de válvula é utilizado nos sistemas de sucção de bombas de poço, de modo a reter a coluna de água na tubagem quando houver interrupção do seu funcionamento. São instaladas na vertical com o crivo para baixo estando em repouso fechadas por acção do peso do prato no seu interior e da coluna de água, prevenindo que as bombas desferrem, quando do seu arranque.

Para a sua adaptação como válvula de impulso deve ser instalada na vertical com o crivo voltado para cima, tornando-se normalmente aberta. Comparativamente com a alteração efectuada em 5.1.1 decidiu-se criar a possibilidade de controlo e regulação

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional

manual da força que esta exerce para fechar. Para além disso, como a força do fluxo de água proveniente do balde é superior ao peso do prato, caso não se altere a sua fisionomia, esta fecha e não regressa à posição inicial.

Assim, procederam-se às alterações de acordo com o apresentado na Figura 5-17.



Figura 5–17: Válvula com pesos.

Com a instalação de um parafuso a actuar no prato no interior da válvula, pretendeu-se permitir a colocação de pesos e aumentar desta forma a força necessária para desencadear o fecho da mesma. Para isso, este possibilita a colocação de peças roscadas do mesmo diâmetro como porcas ou outras.

Cortou-se parte do crivo para se aceder mais facilmente ao seu interior (Figura 5-18).



Figura 5–18: Corte efectuado na válvula de pé.

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional

Em seguida, perfurou-se o topo da válvula com o auxílio de uma fresadora (imagem da esquerda da Figura 5-19) e de um torno mecânico (imagem da direita da Figura 5-19).

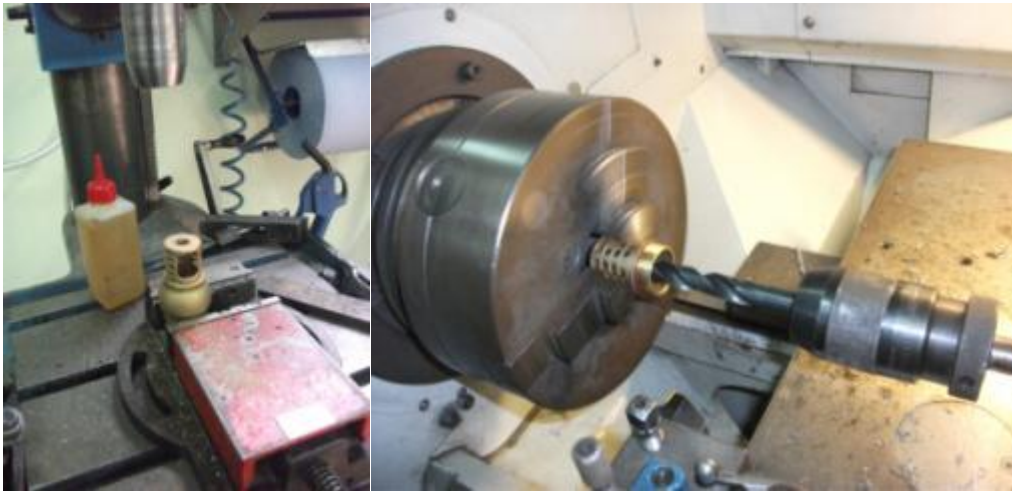


Figura 5–19: Perfuração do topo da válvula.

O resultado final destas operações pode ser observado na Figura 5-20.



Figura 5–20: Aspecto final após perfurações.

Na Figura 5-21, apresenta-se a válvula com a colocação do parafuso no seu interior.



Figura 5–21: Válvula de pé com crivo alterada.

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional

Com esta configuração a válvula estava apta para a colocação de pesos. Na Figura 5-22, pode verificar-se a aplicação desta no carneiro.



Figura 5-22: Válvula de impulso instalada no carneiro.

Executadas as alterações descritas, procedeu-se aos ensaios e foram encontrados novos problemas.

Efectuou-se o ensaio com a colocação de uma porca (Figura 5-23) e rapidamente se verificou que o peso de uma ou de mais porcas não eram suficientes para reabrir a válvula.



Figura 5-23: Carneiro hidráulico com válvula de impulso com pesos.

Colocou-se então de forma improvisada um tarugo pesado no topo da válvula (Figura 5-24), não sendo esse ainda suficiente para a fazer actuar.

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional



Figura 5-24: Ensaio do carneiro com pesos.

Com a colocação de outro tarugo adicional a válvula abriu mas não voltou a fechar, demonstrando que possuía excesso de peso.

Na prática torna-se difícil e moroso encontrar o peso ideal a colocar no topo da válvula, pelo que se abandonou esta hipótese e se optou pela inclusão de uma mola (Figura 5-25).

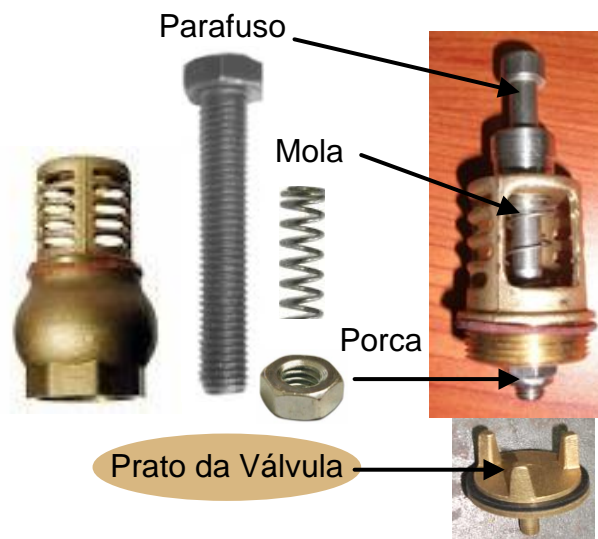


Figura 5-25: Válvula de impulso com mola a actuar com o deslocamento do parafuso.

Inseriu-se a mola no parafuso e com a porca garantiu-se a sua fixação. Quando a água vence a força elástica da mola, do peso do parafuso, da porca e do prato, dá-se o fecho.

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional

A mola é comprimida e assim que a força da água diminui com o decorrer do ciclo de aríete, esta reabre a válvula.

Quando se realizou o ensaio experimental verificou-se que o parafuso ressaltava a cada golpe por não estar unido ao prato fazendo com que a mola não actuasse a 100% na fase de descompressão, tornando o sistema ineficaz.

De forma a melhorar a influência da mola e evitar este problema realizou-se a montagem do esquema apresentado na Figura 5-26.

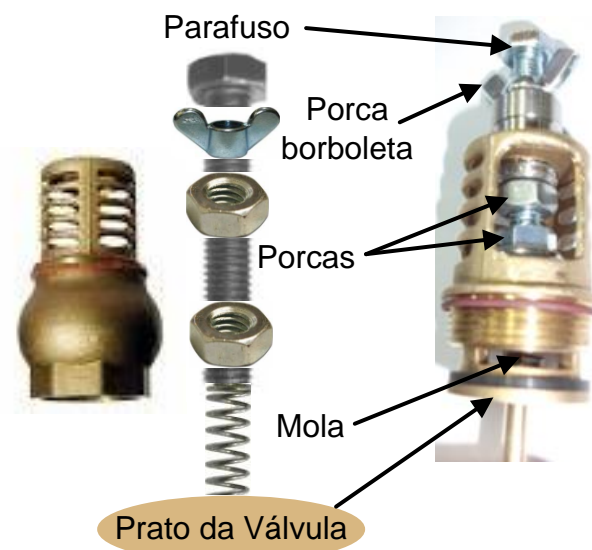


Figura 5-26: Esquema da válvula com mola a actuar no prato.

Com esta montagem a mola actua directamente no prato e acompanha o seu deslocamento ao mesmo tempo que comprime e descomprime (Figura 5-27).

A mola deve ter o diâmetro próximo do diâmetro do parafuso para permitir que seja roscada neste. A porca inferior permite fixá-la no parafuso.

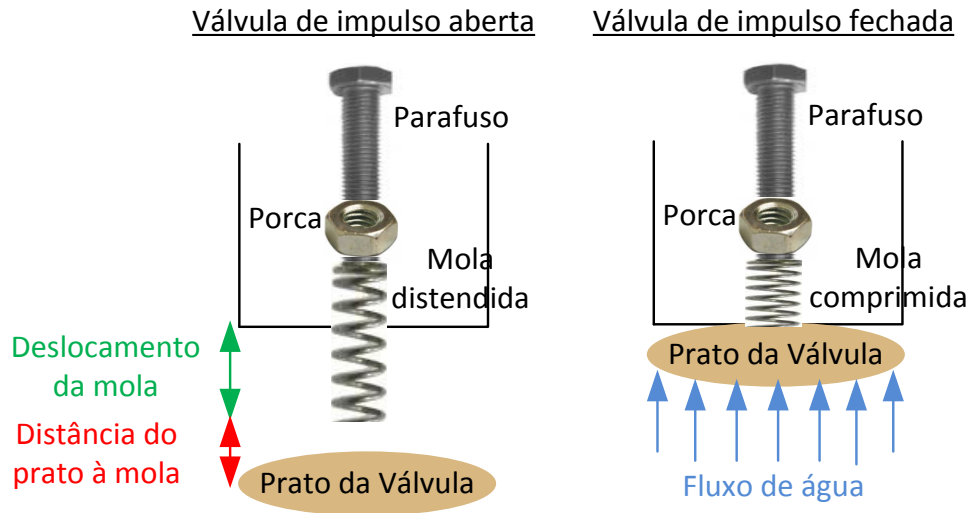


Figura 5–27: Esquema da válvula de aríete aberta/fechada.

Ao ser regulado o deslocamento da mola, quanto maior for a distância entre o prato e a mola, menor é a força produzida pela mola e vice-versa.

Ajustando a porca superior em conjunto com a borboleta regula-se a altura do parafuso que por sua vez influencia o curso desta.



Figura 5–28: Válvula de aríete com mola.

A mola pode ser afinada para cada situação de bombagem dependente da altura do reservatório inferior até ao carneiro. No capítulo seguinte é apresentada a influência desta na bombagem.

5. Montagem e ensaios do carneiro convencional



Figura 5–29: Teste do carneiro hidráulico.

Com a alteração efectuada na válvula de pé com crivo, conforme descrito nas secções anteriores, o carneiro hidráulico funciona sem problemas.

No capítulo 6 são apresentados os resultados experimentais efectuados.

6. Resultados experimentais

Neste capítulo expõem-se os ensaios realizados com o carneiro hidráulico convencional. Posteriormente, expõem-se os resultados obtidos com o protótipo concebido (carneiro + bomba de diafragma).

6.1 Criação artificial de condições

Para a realização dos ensaios foram definidas três alturas de queda (H_{fc}) e uma altura fixa de elevação (H_{cr}).



Figura 6-1: Altura de queda (H_{fc}).

6.Resultados experimentais

A altura de queda (H_{fc}) é medida desde o pavimento até ao topo do reservatório inferior, pelo que durante os ensaios foi necessário garantir o nível máximo de água. As cotas ensaiadas foram: 1,27 metros; 1,60 metros e 1,87 metros.

Relativamente à cota de envio (H_{cr}) foi escolhida uma altura de elevação a 3,30 metros.

6.2 Carneiro hidráulico

6.2.1 Influência do curso da mola

Pretendeu-se com este ensaio verificar a influência do deslocamento da mola no ciclo de bombagem do carneiro hidráulico (Figura 6-2). É de referir que foi utilizada a mesma mola em todos os ensaios.



Figura 6–2: Deslocamento da mola na válvula de impulso.

Assim, regulou-se o seu curso de deslocamento por forma a obter a máxima amplitude para as cotas de queda estabelecidas. Sendo que para as alturas de 1,60 metros e 1,87 metros o valor máximo foi de 5 milímetros, enquanto que para 1,27 metros este foi de 4 milímetros.

Neste ensaio foram testados os diversos cursos da mola e cronometrado o tempo que o carneiro demorou a encher o reservatório superior com um volume de 5 litros (t_{5L}). Com estes dados calculou-se o caudal médio de envio (Q_E). Foi também contabilizado o número de golpes de aríete por minuto.

Na Tabela 6-1 e na Figura 6-3, apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 6–1: Ensaio para diferentes afinções da mola.

Ensaio com garrafa PET (1,5L)					
H_{fc} (m)	H_{cr} (m)	Curso da Mola (mm)	Nº Golpes por minuto	t_{5L} (min)	Q_E (l/min)
1,27	3,30	2	84	9,58	0,52
		3	94	8,23	0,61
		4	80	4,10	1,22
		5	-	-	-
1,60	3,30	2	133	8,26	0,61
		3	140	8,13	0,62
		4	94	2,52	1,98
		5	80	1,14	4,39
1,87	3,30	2	135	9,39	0,53
		3	130	6,05	0,83
		4	118	2,21	2,26
		5	73	0,97	5,17

Analisando a Tabela 6-1, confirma-se que quanto maior for a altura de queda, maior é a quantidade de água bombeada, com excepção do curso de mola de 2mm. Este aumento também se deve ao facto da mola estar no seu curso máximo (peso máximo da válvula), que por sua vez afecta a frequência de pulsação da válvula.

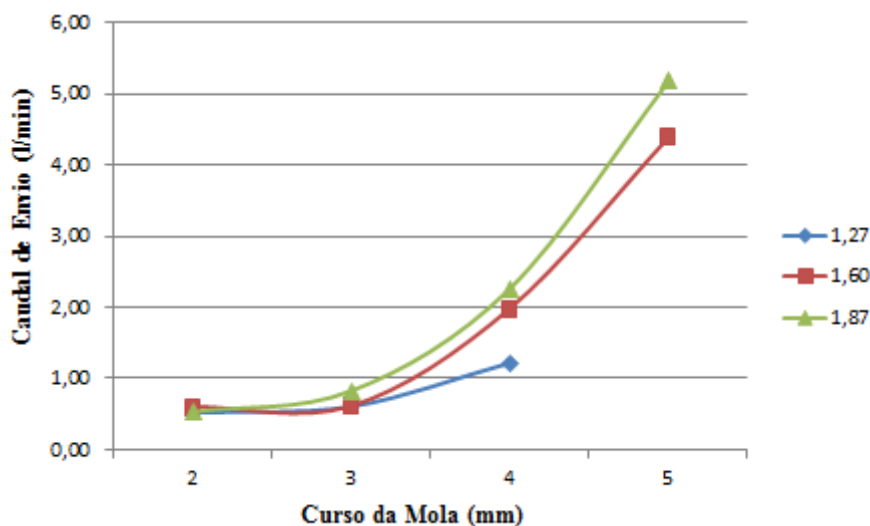


Figura 6–3: Relação entre o caudal de envio e o curso da mola.

Conforme se verifica na Figura 6-3, à medida que o curso da mola aumenta, o caudal de envio aumenta significativamente. Isto porque, a água necessita de mais energia para provocar o fecho da válvula, aumentando também a duração dos ciclos.

A água ao atingir uma maior velocidade no sistema de alimentação (maior energia cinética) até que ocorra o fecho da válvula, provoca um golpe de aríete mais intenso.

6.Resultados experimentais

Em contrapartida o rendimento volumétrico diminui devido ao aumento do caudal de desperdício resultante de uma maior duração do ciclo de bombagem.

Para um menor curso da mola (menor peso da válvula), o número de ciclos por minuto aumenta, sendo a pressão produzida inferior, logo menor é o volume de água elevada. Estes resultados corroboram a avaliação do desempenho realizada para um carneiro hidráulico construído em PVC, cujos dados foram apresentados na conferência científica internacional *Inovagri* [40].

6.2.2 Influência do volume da câmara de ar

Este ensaio teve por objectivo verificar a influência do volume da câmara de ar no funcionamento do carneiro hidráulico e no caudal bombeado.

Assim, substituiu-se a garrafa PET de 1,5 litros por uma de 0,5 litros e realizaram-se os ensaios para ambas as câmaras, ajustando-se para cada cota o máximo curso admissível da mola. Para encontrar esse valor, ajustou-se inicialmente a mola para o maior curso possível enquanto a água fluía para o carneiro e de seguida diminuiu-se gradualmente até se verificar o início dos golpes.

Na Tabela 6-2 apresentam-se os resultados obtidos para este ensaio, comparando-os com os melhores desempenhos alcançados na Tabela 6-1.

Tabela 6–2: Ensaio para diferentes volumes de câmara.

Ensaio com garrafa PET					
Vol. da Câmara	H _{fc} (m)	H _{cr} (m)	Nº Golpes / min	T _{5L} (min)	Q _E (l/min)
Garrafa de 1,5L	1,27	3,30	80	4,10	1,22
Garrafa de 0,5L			73	2,06	2,43
Garrafa de 1,5L	1,60		80	1,14	4,39
Garrafa de 0,5L			72	1,05	4,76
Garrafa de 1,5L	1,87		73	0,97	5,17
Garrafa de 0,5L			68	0,94	5,32

Conclui-se nestas condições de diâmetro e de altura de elevação, que o caudal de envio é maior para o volume de câmara inferior (0,5 litros). Verifica-se ainda que à medida que a altura de queda vai aumentando, a diferença na quantidade de água elevada entre as duas câmaras diminui, corroborando os resultados obtidos por Nuno Lavoura na sua dissertação [33].

Com a garrafa de 0,5 litros o caudal de envio aumenta uma vez que a pressão dentro desta é superior para o mesmo caudal de alimentação, devido ao efeito de compressão do ar num espaço mais limitado. Provavelmente para uma maior quantidade de água no

6.Resultados experimentais

sistema de alimentação a eficiência do sistema diminuiria, porque o volume de ar na câmara seria bastante inferior comparativamente ao volume de água, no entanto esta premissa terá que ser comprovada.

Para a altura de queda de 1,27 metros utilizando a garrafa de 0,5 litros, verifica-se um aumento do caudal de envio de aproximadamente 50% (1,22 l/min, contra 0,52 l/min). Para as restantes alturas 1,60 metros e 1,87 metros, este aumento é de 8% e 3% respectivamente.

Assim, conclui-se que a influência do volume da câmara, resulta da variação volumétrica do ar presente nesta, cuja função é absorver a pressão produzida pelo golpe de aríete. Esta variação causada pela compressão do ar exerce trabalho sobre o volume de água, razão pela qual é importante haver uma relação proporcional entre ambas de modo a produzir a pressão apropriada de elevação.

6.2.3 Influência do tipo de câmara

Como foi referido atrás, os carneiros hidráulicos comercializados actualmente são em ferro fundido para proporcionar elevada rigidez e evitar perdas de pressão. Com este ensaio pretendeu-se verificar a influência da deformação do material da câmara na eficiência do carneiro.

Assim, substituiu-se a garrafa PET por uma garrafa de alumínio de volume aproximado (0,7L). Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 6-3.

Tabela 6-3: Ensaio com garrafa PET e garrafa de alumínio.

Garrafa PET VS Garrafa Alumínio				
Tipo de Câmara	H _{fc} (m)	H _{cr} (m)	T _{SL} (min)	Q _E (l/min)
Garrafa PET	1,27	3,30	2,06	2,43
Garrafa Alumínio			1,75	2,86
Garrafa PET	1,60		1,05	4,76
Garrafa Alumínio			0,98	5,12
Garrafa PET	1,87		0,94	5,32
Garrafa Alumínio			0,75	6,67

Como era expectável, recorrendo à garrafa de alumínio apesar de possuir um volume ligeiramente superior, observou-se um maior caudal de envio em relação à garrafa de PET, pois as perdas de energia são inferiores, visto ser um material com maior rigidez e insensibilidade à pressão originada pelos golpes de aríete. O aumento de caudal bombeado para as cotas estabelecidas é de aproximadamente 14%.

6.2.4 Problemas encontrados

Quando se efectuava o fecho da válvula de corte manualmente e após alguns minutos se voltava a abrir, a água que fluía para o carneiro não originava de imediato o golpe de aríete. Este problema só se observava quando a mola estava regulada para exercer a força máxima admissível no prato da válvula.

Assim que se verificava que a água não exercia qualquer efeito na válvula de escape, ajustava-se o curso da mola diminuindo a sua força até que se desse início aos golpes. No entanto pretende-se o funcionamento autónomo do protótipo e um desempenho maximizado pelo que, de forma a contornar este problema, alterou-se a posição da válvula de corte para junto da entrada do carneiro.

Com esta configuração, a pressão da água desde o reservatório inferior até ao tubo de alimentação é suficiente para dar início imediato ao funcionamento a válvula de escape. Isto porque, o volume da coluna de água é superior (volume do reservatório inferior + volume no sistema de alimentação).

6.3 Bomba solar

Para a implementação do protótipo, adquiriu-se uma bomba diafragma com as características apresentadas na Tabela 6-4.

Tabela 6-4: Características da bomba solar.

Especificações da Bomba	
Diâmetro de Entrada	1/4"
Diâmetro de Saída	1/2"
Caudal Máximo	3 l/min ou 180 l/h
Tensão de Operação	12 VDC
Corrente Máx. Consumida	1,8 A

Na Figura 6-4 ilustra-se o interior da bomba. Esta é constituída pelo motor eléctrico e a câmara onde é efectuada a admissão e a expulsão da água.

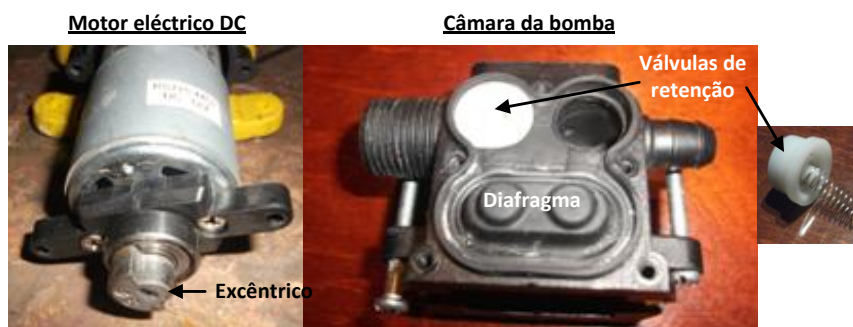


Figura 6-4: Bomba diafragma DC adquirida.

6.Resultados experimentais

Conforme explicado no Capítulo 4 e de acordo com a Figura 4-4, foi necessário adaptar a estrutura do carneiro para poder funcionar em paralelo com a bomba. O resultado desta adaptação pode ser observado na Figura 6-5.



Figura 6-5: Carneiro hidráulico.

Instalou-se uma válvula de retenção à saída da bomba para evitar que o fluxo de água bombeado pelo carneiro interferisse no circuito desta.

Na Figura 6-6, pode observar-se a instalação da bomba diafragma em paralelo com o carneiro hidráulico.

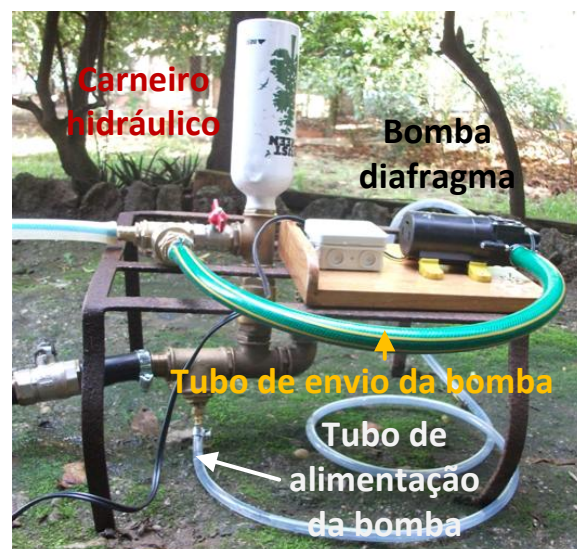


Figura 6-6: Carneiro hidráulico e bomba de diafragma.

6.Resultados experimentais

Concluída a instalação da bomba de diafragma, procedeu-se à realização do ensaio final, cujo objectivo foi verificar a capacidade de envio simulando o bombeamento diurno (bomba diafragma + carneiro) e o bombeamento nocturno (só carneiro hidráulico).

Tabela 6-5 – Ensaio do protótipo com bomba solar ligada e desligada.

	Altura de Queda (m)	Altura de Elevação (m)	Tempo Encher 5L (min)	Caudal Médio Envio (l/min)
Bomba OFF	1,27	3,3	2,51	1,99
Bomba ON			0,92	5,45
Bomba OFF	1,6	3,3	1,18	4,24
Bomba ON			0,78	6,38
Bomba OFF	1,87	3,3	0,85	5,88
Bomba ON			0,55	9,09

Como era esperado, quando a bomba de diafragma está ligada, o caudal de envio aumenta aproximadamente em 3 litros por minuto.

O caudal de alimentação médio medido foi de aproximadamente 20 litros por minuto. Este varia em função da altura de queda, pois para o mesmo comprimento de tubo quanto maior for o ângulo de inclinação, maior será a velocidade da água.

Na Tabela 6-6, analisa-se o desempenho do protótipo comparativamente às configurações testadas anteriormente. Recorrendo às equações 2-7 e 2-8 calculou-se o rendimento energético e volumétrico.

Tabela 6-6 – Comparação do desempenho do protótipo final com as restantes configurações.

Configuração	H _{fc} (m)	H _{cr} (m)	Q _E (l/min)	η _{energético}	η _{volumétrico}
Car.Hidr. c/ Garrafa de 1,5L	1,27	3,30	1,22	16%	4%
Car.Hidr. c/ Garrafa de 0,5L			2,43	32%	8%
Car.Hidr. c/ Garrafa Alumínio			2,86	37%	10%
Protótipo - Bomba OFF			1,99	26%	7%
Protótipo - Bomba ON			5,45	71%	18%
Car.Hidr. c/ Garrafa de 1,5L	1,60		4,39	45%	15%
Car.Hidr. c/ Garrafa de 0,5L			4,76	49%	16%
Car.Hidr. c/ Garrafa Alumínio			5,12	53%	17%
Protótipo - Bomba OFF			4,24	44%	14%
Protótipo - Bomba ON			6,38	66%	21%
Car.Hidr. c/ Garrafa de 1,5L	1,87	5,17	46%	17%	
Car.Hidr. c/ Garrafa de 0,5L		5,32	47%	18%	
Car.Hidr. c/ Garrafa Alumínio		6,67	59%	22%	
Protótipo - Bomba OFF		5,88	52%	20%	
Protótipo - Bomba ON		9,09	80%	30%	

6.Resultados experimentais

Analisando a tabela comprova-se o aumento do rendimento do carneiro hidráulico com a utilização da garrafa de alumínio relativamente à garrafa PET. No entanto, verifica-se a diminuição do rendimento do protótipo com a bomba desligada, em relação à instalação do carneiro hidráulico com garrafa de alumínio.

Verificou-se durante os ensaios do protótipo que para cada golpe de aríete a água fluía também pelo circuito da bomba diafragma (ver Figura 4-4 da página 33), levando a uma diminuição de rendimento devido a perda de pressão. O rendimento energético diminuiu em cerca de 9% enquanto o volumétrico diminuiu 3%.

Tendo em conta que grande parte do tempo a bomba de diafragma solar do protótipo irá estar desligada, elaborou-se a Tabela 6-7 para ilustrar a diferença entre o volume de água bombeada diariamente pelo protótipo e o funcionamento só do carneiro hidráulico com garrafa de alumínio. Supôs-se que a bomba solar estaria ligada durante 6 horas por dia.

Tabela 6-7 – Comparação entre o desempenho do protótipo e o desempenho do carneiro hidráulico convencional.

Configuração	H _{fc} (m)	H _{cr} (m)	Q _E (l/dia)	Diferença Q _E Diário
Garrafa Alumínio	1,27	3,30	4118,4	-3,4
Protótipo			4115,0	
Garrafa Alumínio	1,60		7372,8	-498,7
Protótipo			6874,1	
Garrafa Alumínio	1,87		9604,8	+20,9
Protótipo			9625,7	

Conforme se observa na Tabela 6-7, a diferença no volume de envio diário para a cota intermédia é grande, detendo o protótipo o pior desempenho. Para as restantes alturas de queda a diferença entre ambos não é significativa. Perante os resultados obtidos e mediante as condições consideradas, conclui-se que apenas para a cota mais elevada de alimentação o protótipo possui um caudal de envio diário ligeiramente superior face à utilização a solo do carneiro hidráulico.

Esta questão torna-se problemática, dado que o protótipo não representa uma alternativa com melhoria significativa do caudal elevado face ao carneiro convencional.

Para contornar este problema decidiu-se instalar uma electroválvula NF a montante do tubo de alimentação da bomba diafragma (Figura 6-7). Desta forma, quando a bomba diafragma é desligada por insuficiência de radiação solar, esta electroválvula fecha.

6. Resultados experimentais

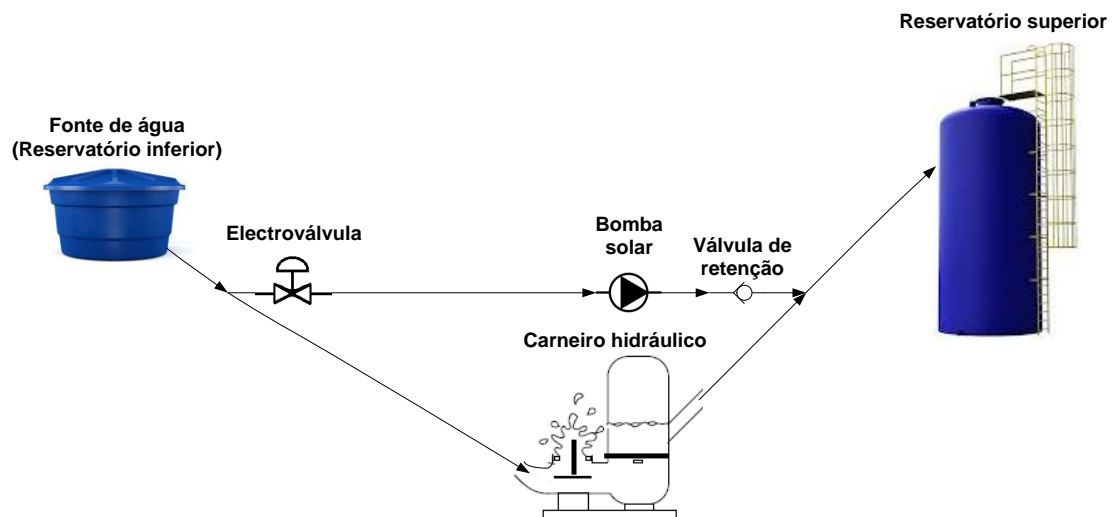


Figura 6–7: Esquema final do protótipo.

7. Metodologia de instalação

Neste capítulo é descrita a forma de como deve ser dimensionada uma instalação de bombagem. Considera-se a aplicação de um carneiro hidráulico comercial, de modo a poder utilizar valores de bombeamento fornecidos pelo fabricante, não obtidos com o protótipo de carneiro hidráulico construído.

Mediante o volume de água desejado diariamente e tendo em consideração outros parâmetros, analisam-se os critérios que devem orientar a selecção do carneiro e da bomba, apresentando-se ainda as características técnicas das mesmas.

7.1 Projecto do carneiro hidráulico

O tamanho do carneiro hidráulico está dependente de factores como, a quantidade de água disponível na fonte, o volume de água pretendido e a altura de elevação. Assim, o caudal diário desejado (Q_{Total}) corresponde à soma do caudal de envio do carneiro (Q_{Ec}) e da bomba solar (Q_{Eb}):

$$Q_{Total} = Q_{CH} + Q_{BS} \quad (7-1)$$

Q_{Total} – caudal diário pretendido, l/dia;

Q_{CH} – caudal diário bombeado pelo carneiro hidráulico, l/dia;

Q_{BS} – caudal diário bombeado pela bomba solar, l/dia.

7. Metodologia de instalação

A quantidade de água disponível a montante da instalação determina o modo de operação do carneiro. Em zonas onde a água é escassa o rendimento volumétrico torna-se um factor importante a ter em conta no dimensionamento.

Para cada situação deve ser definida previamente qual é a prioridade no dimensionamento, pois de acordo com os resultados experimentais obtidos, para uma maior quantidade de água elevada, maiores são as perdas de água por ciclo e para uma menor quantidade bombeada, menor é o desperdício de água. Assim, o carneiro deve ser escolhido em função do caudal de alimentação disponível, excepto se o objectivo for preservar o recurso hídrico.

Supondo que o curso de água possui pouco caudal no Verão, recomenda-se a instalação de um carneiro hidráulico de menor capacidade e uma bomba solar com maior capacidade. Isto porque, o carneiro hidráulico exige um caudal de alimentação elevado para o seu funcionamento (ver Tabela 7-1), ao contrário da bomba que opera sem desperdício. Nesse caso, aumenta-se o rendimento volumétrico global do sistema devido à diminuição do caudal de desperdício.

Para este estudo considerou-se o fabricante *Williamson Hi-Flo Ram Pumps*. Na Figura 7-1 apresentam-se as dimensões de carneiros hidráulicos comercializadas por esta empresa.



Figura 7–1: Carneiros hidráulicos fabricados pela *Williamson Hi-Flo Ram Pumps* [21].

Na Tabela 7-1 pode observar-se a capacidade de bombeamento destes modelos. Nesta tabela mediante o caudal de alimentação e uma relação entre a altura de elevação e a altura de queda da água, obtém-se o caudal de envio de um determinado modelo.

7. Metodologia de instalação

Tabela 7-1: Características técnicas dos carneiros hidráulicos da *Williamson* [21].

Modelo do Carneiro Hidráulico	Diâmetro do Tubo de Alimentação	Q _A [l/min]	Q _ε [l/dia] para 10:1	Q _ε [l/dia] para 12,5:1	Q _ε [l/dia] para 16:1	Q _ε [l/dia] para 20:1	Q _ε [l/dia] para 25:1	Q _ε [l/dia] para 32:1	Q _ε [l/dia] para 40:1	Nº Ciclos/min
RAMP0600	150mm	1620	135.000	86.400	52.730	33.750	21.600	13.175	8.435	30
	125mm	1080	90.000	57.600	35.150	22.500	14.400	8.785	5.625	35
RAMP0400	100mm [±4'']	660	55.000	35.200	21.450	13.750	8.800	5.370	3.435	40
	80mm	360	30.000	19.200	11.720	7.500	4.800	2.930	1.875	44
RAMP0250	65mm	246	20.500	13.120	8.000	5.125	3.280	2.000	1.280	47
	50mm [±2'']	132	11.000	7.040	4.295	2.750	1.760	1.075	685	50
RAMP0150	40mm	54	4.500	2.880	1.760	1.125	720	440	280	55
	32mm	36	3.000	1.920	1.170	750	480	295	185	60
	25mm [±1'']	18	1.500	963	590	375	240	145	95	70

*Nota: 10:1, 16:1, etc. é a relação entre a altura de elevação e a altura de queda.
Esta performance é para uma inclinação do tubo de alimentação de 1:4*

Para uma melhor *performance* o fabricante sugere uma inclinação do tubo de alimentação de 14° (Figura 7-2).

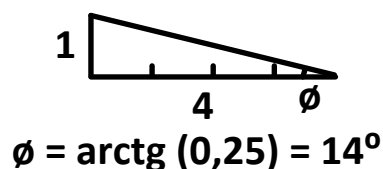


Figura 7-2: Ângulo de inclinação do tubo de alimentação.

Como referido anteriormente, este fabricante refere que a altura de elevação máxima de uma instalação real de um carneiro hidráulico, é de 420 metros, no entanto afirmam que é possível elevar a uma altura superior, apesar de até à data não tenha havido nenhuma instalação com essa necessidade. Já a máxima altura de queda de alimentação recomendada é de 20 metros.

7.2 Selecção da bomba de diafragma

Depois de escolhido o carneiro hidráulico projecta-se a bomba em função do caudal de bombeamento desejado, utilizando a equação 7-1.

De seguida expõem-se as características técnicas das bombas diafragma referidas na Tabela 4-3.

A. Shurflo - Aqua King Standard 3.0 Fresh Water Pump [12 VDC]



Figura 7-3: Bomba *Shurflo – Aqua King Standard 3.0* [22].

Na Tabela 7-2 apresentam-se as características de funcionamento desta bomba. Esta apresenta uma pequena particularidade face às restantes, uma vez que a potência máxima consumida não se regista para a máxima capacidade de elevação.

Tabela 7-2: Características técnicas da bomba *Shurflo – Aqua King* [22].

Capacidade de Elevação	Caudal de Envio	Corrente Consumida	Potência Consumida
7,14 m	8,7 l/min	4,1 A	49,2 W
14,28 m	7,5 l/min	4,8 A	57,6 W
21,41 m	6 l/min	5,1 A	61,2 W
34,67 m	2,6 l/min	4,8 A	57,6 W

O diâmetro do tubo de entrada e de saída deve ser de meia polegada. A pressão máxima de entrada é de 2,1 bar, cerca de 21 metros, ou seja, o reservatório inferior não deverá estar acima desta altura.

Tem a capacidade de operar sem água não sobreaquecendo. O fabricante recomenda a instalação de um fusível de 7,5A.

B. Shurflo - Extreme Series Smart Sensor 5.7 [12 VDC]



Figura 7-4: Bomba *Shurflo – Extreme Series Smart Sensor 5.7* [23].

7. Metodologia de instalação

O diâmetro do tubo de entrada e de saída é também de ½'' e a pressão máxima de entrada é de 2,1 bar, cerca de 21 metros.

Tem também a capacidade de operar sem água não sobreaquecendo. O fabricante recomenda a instalação de um fusível de 15A.

Na Tabela 7-3, apresentam-se outras características de funcionamento desta bomba.

Tabela 7-3: Características técnicas da bomba *Shurflo – Extreme S.S* [23].

Capacidade de Elevação	Caudal de Envio	Corrente Consumida	Potência Consumida
7,14 m	15,9 l/min	6,3 A	75,6 W
14,28 m	14,3 l/min	7,6 A	91,2 W
21,41 m	12,4 l/min	9,4 A	112,8 W
28,55 m	9 l/min	10 A	120 W
34,67 m	6,4 l/min	10 A	120 W
41,81 m	4,9 l/min	10 A	120 W

C. Aquatec - Booster Series 88X2 [12 VDC]



Figura 7-5: Bomba *Aquatec – Booster Series* [24].

O diâmetro do tubo de entrada e de saída poderá ser de ¼'' ou 3/8''. A pressão máxima de entrada é de 4,1 bar.

Tem a capacidade de operar sem água não sobreaquecendo.

O motor de 12VDC não tem um funcionamento intermitente, o fabricante garante que a bomba é capaz de sustentar um funcionamento contínuo para qualquer pressão, sem se desligar para arrefecimento e por isso não necessita de protecção contra sobrecarga térmica.

Na Tabela 7-4, apresentam-se outras características de funcionamento desta bomba.

Tabela 7-4: Características técnicas da bomba *Aquatec – Booster 88X2* [24].

Capacidade de Elevação	Caudal de Envio	Corrente Consumida	Potência Consumida
7,03 m	1,35 l/min	0,57 A	6,84 W
14,06 m	1,25 l/min	0,74 A	8,88 W
21,09 m	1,2 l/min	0,9 A	10,8 W
28,12 m	1,15 l/min	1,04 A	12,48 W
35,15 m	1,1 l/min	1,19 A	14,28 W
42,18 m	1,05 l/min	1,34 A	16,08 W
49,21 m	1 l/min	1,5 A	18 W
56,25 m	0,94 l/min	1,7 A	20,4 W

D. Aquatec - Delivery Pump 7800 Series 7864 [24 VDC]



Figura 7–6: Bomba *Aquatec – Delivery Pump 7800 Serie* [25].

O diâmetro do tubo de entrada e de saída poderá ser de 1/2'' ou 3/8''. A pressão máxima de entrada é de 4,1 bar, cerca de 41 metros.

Tem a capacidade de operar sem água não sobreaquecendo.

O motor de 24VDC deste modelo (7864) possui um funcionamento intermitente a partir de 34 W de potência consumida. Ao fim de 35 minutos de operação à potência máxima (54 W), a temperatura deste aproxima-se dos 63°C e a protecção térmica actual desligando-o. Findo esse tempo, a bomba elevou 31 litros para uma altura de elevação de 91,40 m. O tempo de arrefecimento ronda os 20 a 40 minutos.

Na Tabela 7-5, apresentam-se outras características de funcionamento desta bomba.

Tabela 7-5: Características técnicas da bomba Aquatec – Delivery 7864 [25].

Capacidade de Elevação	Caudal de Envio	Corrente Consumida	Potência Consumida
7,03 m	1,22 l/min	1,2 A	28,8 W
14,06 m	1,19 l/min	1,38 A	33,1 W
21,09 m	1,17 l/min	1,6 A	38,4 W
28,12 m	1,15 l/min	1,94 A	46,6 W
35,15 m	1,13 l/min	2,3 A	55,2 W
42,18 m	1,11 l/min	2,6 A	62,4 W
49,21 m	1,09 l/min	2,9 A	69,6 W
56,25 m	1,06 l/min	3,24 A	77,8 W
63,28 m	1,03 l/min	3,55 A	85,2 W
70,31 m	1 l/min	3,8 A	91,2 W
77,34 m	0,97 l/min	4,05 A	97,2 W
84,37 m	0,94 l/min	4,27 A	102,5 W
91,40 m	0,9 l/min	4,5 A	108 W

E. Dankoff - Solaram Surface Pump 8000 - 8221 [24 Vdc]



Figura 7-7: Bomba Dankoff – Solaram Surface Pump 8000 [17].

O diâmetro do tubo de entrada deverá ser de 1 1/4'' e o de saída de 1''.

Tem a capacidade de operar sem água não sobreaquecendo.

Para protecção contra sobrecargas térmicas o fabricante recomenda a instalação de fusível de calibre 10% superior à corrente máxima consumida.

Faz parte da constituição deste modelo (8221), um vaso de expansão. Para garantir um fluxo de água suave e uma operação fiável da bomba, deve-se pressurizá-lo com ar, a uma pressão igual a metade da pressão de operação desta. Por exemplo, se a pressão de operação for de 22 bar (220 m), o vaso deve ser pressurizado a 11 bar.

Na Tabela 7-6, apresentam-se outras características de funcionamento desta bomba.

Tabela 7-6: Características técnicas da bomba *Dankoff – Solaram 8221* [17].

Capacidade de Elevação	Caudal de Envio	Corrente Consumida	Potência Consumida
24 m	11,4 l/min	7,08 A	170 W
37 m	11 l/min	8,21 A	197 W
49 m	11 l/min	9,38 A	225 W
61 m	11 l/min	10,29 A	247 W
73 m	10,6 l/min	11,04 A	265 W
85 m	10,6 l/min	11,92 A	286 W
98 m	10,6 l/min	13,13 A	315 W
110 m	10,6 l/min	14,25 A	342 W
122 m	10,2 l/min	15,13 A	363 W
146 m	10,2 l/min	17,33 A	416 W
171 m	10,2 l/min	19,00 A	456 W
195 m	10,2 l/min	20,92 A	502 W
220 m	9,9 l/min	22,96 A	551 W
244 m	9,9 l/min	24,54 A	589 W
268 m	9,9 l/min	26,96 A	647 W
293 m	9,9 l/min	29,38 A	705 W

A *Dankoff* fabrica o LCB adequado para as suas bombas, aconselhando o modelo LCB20M-50V para esta bomba.

F. Dankoff - Solaram Surface Pump 8000 - 8543 [180 VDC]

Esta bomba é do mesmo tipo da anterior, mas com uma maior potencia consumida pois possui um caudal de envio de aproximadamente três vezes superior.

Para garantir a tensão nominal de funcionamento, podem ser instalados 15 painéis FV de 12VDC ou 8 painéis FV de 24VDC em série.

Na Tabela 7-7, apresentam-se as características de funcionamento desta bomba.

7. Metodologia de instalação

Tabela 7-7: Características técnicas da bomba *Dankoff – Solaram 8543* [17].

Capacidade de Elevação	Caudal de Envio	Corrente Consumida	Potência Consumida
24 m	35,6 l/min	19,38 A	465 W
37 m	34,5 l/min	22,46 A	539 W
49 m	33,7 l/min	25,79 A	619 W
61 m	33,7 l/min	28,88 A	693 W
73 m	32,6 l/min	30,17 A	724 W
85 m	31,8 l/min	33,38 A	801 W
98 m	31,5 l/min	36,21 A	869 W
110 m	31,1 l/min	38,63 A	927 W
122 m	33,0 l/min	46,75 A	1122 W
146 m	32,2 l/min	52,71 A	1265 W
171 m	31,8 l/min	58,21 A	1397 W
195 m	31,1 l/min	64,17 A	1540 W
220 m	30,7 l/min	70,13 A	1683 W
244 m	30,3 l/min	75,63 A	1815 W
268 m	30,3 l/min	81,58 A	1958 W
293 m	30,3 l/min	89,38 A	2145 W

A *Dankoff* fabrica o LCB adequado para as suas bombas, aconselhando o modelo *LCB6HV* para esta bomba. Outras considerações a ter em conta na instalação e operação desta bomba encontram-se em anexo no manual de operações desta.

Recorrendo às características técnicas das bombas diafragma apresentadas, elaborou-se a Figura 7-8, que serve de apoio ao dimensionamento em função da altura de elevação (até aos 105 metros) e do caudal desejado.

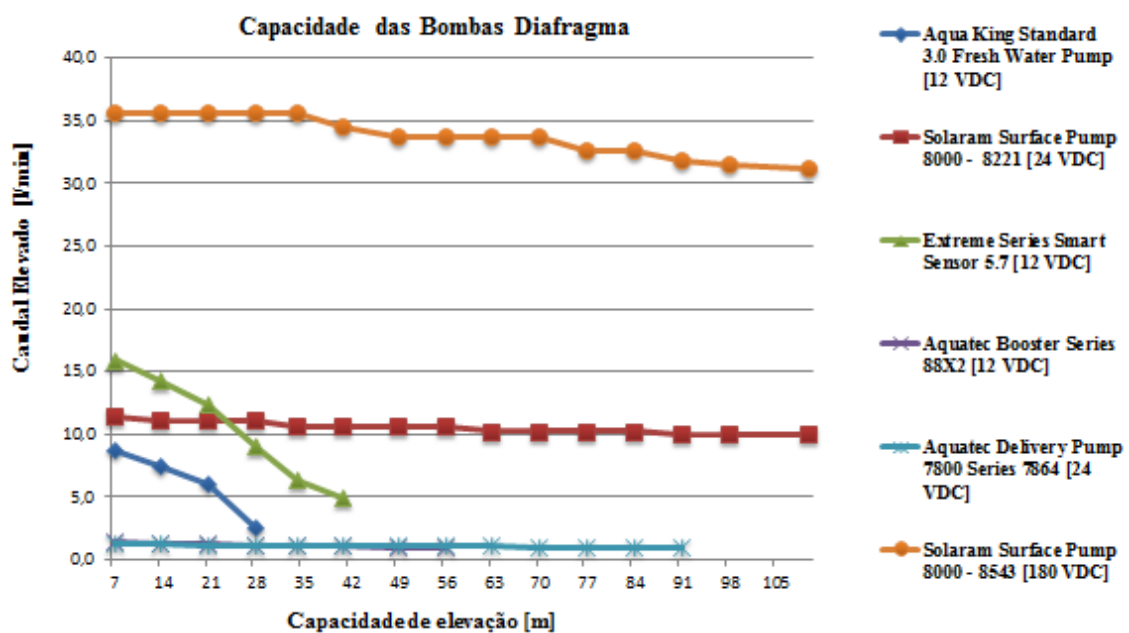


Figura 7-8: Características técnicas das bombas escolhidas.

A partir dos 91 metros apenas as bombas da *Dankoff* possuem capacidade de elevação, tendo estas como máximo os 293 metros.

7.3 Electroválvula NF de 2 vias

O objectivo da electroválvula é impedir a circulação de água no circuito da bomba solar quando esta está desligada, prevenindo a diminuição da eficiência de bombagem do sistema durante o período nocturno.

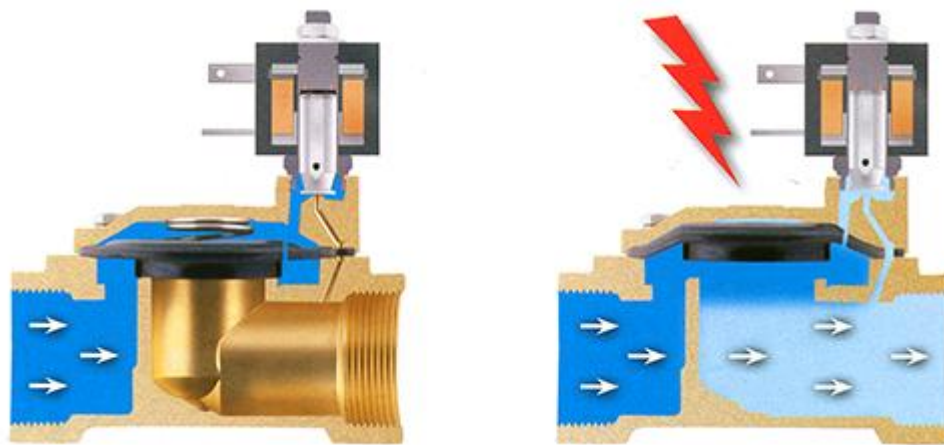


Figura 7-9: Electroválvula de duas vias [26].

O orifício principal do corpo da válvula abre-se devido ao desequilíbrio de pressão entre as superfícies superior e inferior da membrana diafragma. Quando a bobine não está alimentada, só há pressão na câmara superior da membrana sendo esta empurrada também pela acção da força da mola contra o corpo da válvula, mantendo-a fechada. Quando é alimentada a bobine da electroválvula (imagem da direita da Figura 7-9), o êmbolo é atraído e desloca-se para cima. Este movimento provoca a abertura do orifício piloto que causa a libertação da água da câmara superior. A diferença de pressão entre as superfícies diminui, sendo suficiente para a água vencer a força da mola e originar a abertura da válvula [26].

O modelo de electroválvula a instalar dependerá da secção do tubo de entrada da bomba solar. Optou-se pelas electroválvulas da marca *Zantia* cujo consumo é de 16 W (12VDC-24VDC) independentemente da secção.

7.4 Dimensionamento do gerador FV e escolha do LCB

LCB

Como explicado anteriormente, este equipamento permite adaptar o nível de tensão do painel FV às exigências da bomba. Por exemplo, a maioria dos painéis FV de 12 VDC produzem 18 a 20 VDC. Funcionando como uma fonte de alimentação com tecnologia de alta velocidade de comutação, o *input* de 11 A a 18 VDC (198W) pode ser convertido pelo LCB para um *output* de 15 A a 12 VDC (180W), considerando perdas de 10% na conversão.

A escolha do modelo do LCB depende da potência produzida pelo gerador FV ($P_{\text{PRODUZIDA g}}$) e da potência de conversão desejada ($P_{\text{LCB out}}$). Na Tabela 7-8, podem observar-se as especificações eléctricas habitualmente fornecidas pelos fabricantes deste equipamento.

Tabela 7-8: Características eléctricas típicas de um LCB.

LCB	
Tensão Nominal FV Input [V_{LCBin}]	12 / 24 VDC
Tensão Máxima FV Input [$V_{\text{LCBin máx}}$]	60 VDC
Tensão Máxima Output [$V_{\text{LCBout máx}}$]	15 / 30 VDC
Corrente Máxima Output [$I_{\text{LCBout máx}}$]	20 A
Eficiência	> 94%

No caso da instalação de painéis FV em série é necessário ter em conta a tensão máxima produzida pelo gerador FV, pois não pode ultrapassar esse valor.

Como foi referido no ponto 4.2.3, outra das variáveis importantes na escolha de um LCB é a tensão máxima de saída. Normalmente, como estes aparelhos são fabricados exclusivamente para bombas solares, o limite máximo é de 15 VDC para bombas com tensão nominal de 12 VDC e 30 VDC para bombas que trabalham a 24 VDC.

Gerador FV

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico autónomo é normalmente efectuado através do conhecimento prévio da intensidade da radiação solar disponível, correspondente ao mês de funcionamento com menor radiação incidente.

7. Metodologia de instalação

O tempo de operação da bomba solar é determinado pela quantidade de água a elevar que por sua vez depende da potência FV produzida.

No dimensionamento considera-se o consumo eléctrico da bomba solar e da electroválvula. Recorrendo à equação 4-4 calcula-se a potência produzida pelo gerador FV ao longo do dia. De seguida, determinam-se as perdas de conversão do LCB e obtém-se a potência à saída do LCB.

A tensão à saída do LCB é igual à tensão nominal da bomba e da electroválvula, uma vez que este funciona como um conversor DC, ajustando a tensão do painel FV à tensão nominal dos equipamentos.

Como exemplo, admitindo os pressupostos expostos na Figura 4-10 da página 36, supondo que a bomba diafragma a utilizar seria o modelo *Solaram* da *Dankoff* para uma altura de elevação de 122 metros vem:

$$P_{cons} = P_{BS} + P_{EV} \quad (7-3)$$

P_{cons} – potência total consumida pelo sistema, W;

P_{BS} – potência consumida pela bomba solar para as características de elevação, W;

P_{EV} – potência consumida pela electroválvula, W.

Consultando a Tabela 7-6 da p, obtém-se a potência consumida pela bomba solar:

$$P_{cons} = 363W + 16W = 379W$$

$$I_{cons} = \frac{P_{cons}}{V_{cons}} = \frac{379}{24} \approx 15,8A$$

Serão necessários dois painéis FV instalados em paralelo pois não existe nenhum no mercado que consiga produzir uma corrente desta grandeza. O fabricante da bomba recomenda que o gerador FV possua no mínimo uma potência total superior a 25% da potência consumida, ou seja, cerca de 475W. Assim, supõem-se o uso de dois painéis de 240W com as características apresentadas na Tabela 7-9.

Tabela 7-9: Características do painel FV a instalar.

Painel FV - 240W	
V_{MPP}	29,7 V
I_{MPP}	8,07 A
η	14,67%
Área	1,63 m ²

Fonte: altE store

7. Metodologia de instalação

Considerando as horas de maior exposição solar e recorrendo à equação 4-4 obtém-se a potência produzida pelo gerador FV (Tabela 7-10).

Tabela 7–10: Potência produzida pelo gerador FV.

Hora	I_{rad} [W/m ²]	$P_{\text{FV out}}$ [W]
10:37	731	350,77
11:37	852	408,83
12:37	918	440,50
13:37	926	444,34
14:37	874	419,39
15:37	766	367,56

Admitindo 6% de perdas na conversão do LCB, que se subtraem à potência produzida, determina-se a potência à saída do LCB (Tabela 7-11).

Tabela 7–11: Potência à saída do LCB.

Hora	I_{rad} [W/m ²]	$P_{\text{FV out}}$ [W]	P_{perdas} [W]	$P_{\text{LCB out}}$ [W]
10:37	731	350,77	21,05	329,72
11:37	852	408,83	24,53	384,30
12:37	918	440,50	26,43	414,07
13:37	926	444,34	26,66	417,68
14:37	874	419,39	25,16	394,23
15:37	766	367,56	22,05	345,51

Tendo em conta que a tensão nominal do sistema é de 24VDC, o LCB converte o excesso de tensão que recebe dos painéis ($V_{\text{LCB in}}$) até atingir o valor da corrente total consumida. A partir desse valor a tensão à saída do LCB vai aumentando, não ultrapassando a tensão máxima de conversão, que neste caso é de 30VDC.

Tabela 7–12: Tensão e corrente à saída do LCB.

Hora	I_{rad} [W/m ²]	$P_{\text{FV out}}$ [W]	P_{perdas} [W]	$P_{\text{LCB out}}$ [W]	$V_{\text{LCB out}}$ [Vdc]	$I_{\text{LCB out}}$ [A]
10:37	731	350,77	21,05	329,72	24	13,74
11:37	852	408,83	24,53	384,30	24,32	15,80
12:37	918	440,50	26,43	414,07	26,21	15,80
13:37	926	444,34	26,66	417,68	26,44	15,80
14:37	874	419,39	25,16	394,23	24,95	15,80
15:37	766	367,56	22,05	345,51	24	14,40

A bomba diafragma (*Dankoff Solaram* 24Vdc) seleccionada, permite elevar aproximadamente 1.836 litros durante as 3 horas de operação.

7. Metodologia de instalação

Comparando com um sistema sem LCB em que os painéis são directamente ligados à bomba e desprezando a temperatura dos painéis ao longo do dia (tensão praticamente constante e próximo do valor V_{MPP}), elaborou-se a Tabela 7-13.

Tabela 7-13: Tensão e corrente à saída do gerador FV.

Hora	I_{rad} [W/m²]	$P_{FV out}$ [W]	$V_{FV out}$ [Vdc]	$I_{FV out}$ [A]
10:37	731	350,77	29,20	12,01
11:37	852	408,83	29,40	13,91
12:37	918	440,50	29,60	14,88
13:37	926	444,34	29,65	14,99
14:37	874	419,39	29,45	14,24
15:37	766	367,56	29,30	12,54

Pode-se concluir neste exemplo que, sem a utilização do LCB a bomba e a electroválvula não funcionariam. Além disso, caso se aumentasse demasiado a potência dos painéis poderia haver uma altura em que a corrente ou a tensão produzida destruísse os equipamentos, situação que com a instalação de um LCB está salvaguardada.

8. Aplicação a um caso de estudo

Neste capítulo apresenta-se um caso de estudo que exemplifica a aplicação do protótipo numa propriedade, cujo objectivo é abastecer um depósito para posterior abastecimento de bebedouros de água para animais.

O dimensionamento realiza-se para os meses de Verão (Junho a Setembro), dada a diminuta precipitação e maior consumo de água.

Neste caso de estudo decidiu-se recorrer à selecção de um carneiro hidráulico comercial em detrimento do protótipo concebido, dado que não foi possível testar e estudar o seu desempenho para as características de implantação do local escolhido.

8.1 Local

A propriedade está localizada junto ao rio Dão como demonstra a Figura 8-1. A altura de elevação da água (H_{cr}) é de 75 metros, considerando o reservatório superior colocado a 2 metros do solo. Assim, independentemente da altura deste, cria-se pressão suficiente para o abastecimento.

Pretende-se implementar um sistema de abastecimento autónomo de água proveniente do curso de água mais próximo para alimentar aves, bovinos, suínos e equinos.

Em termos legais ainda que o rio atravessasse propriedade privada, a implantação de infra-estruturas hidráulicas de captação de água carece de autorização prévia assumindo forma de licença ou concessão em caso de parecer positivo [41].

8. Aplicação a um caso de estudo

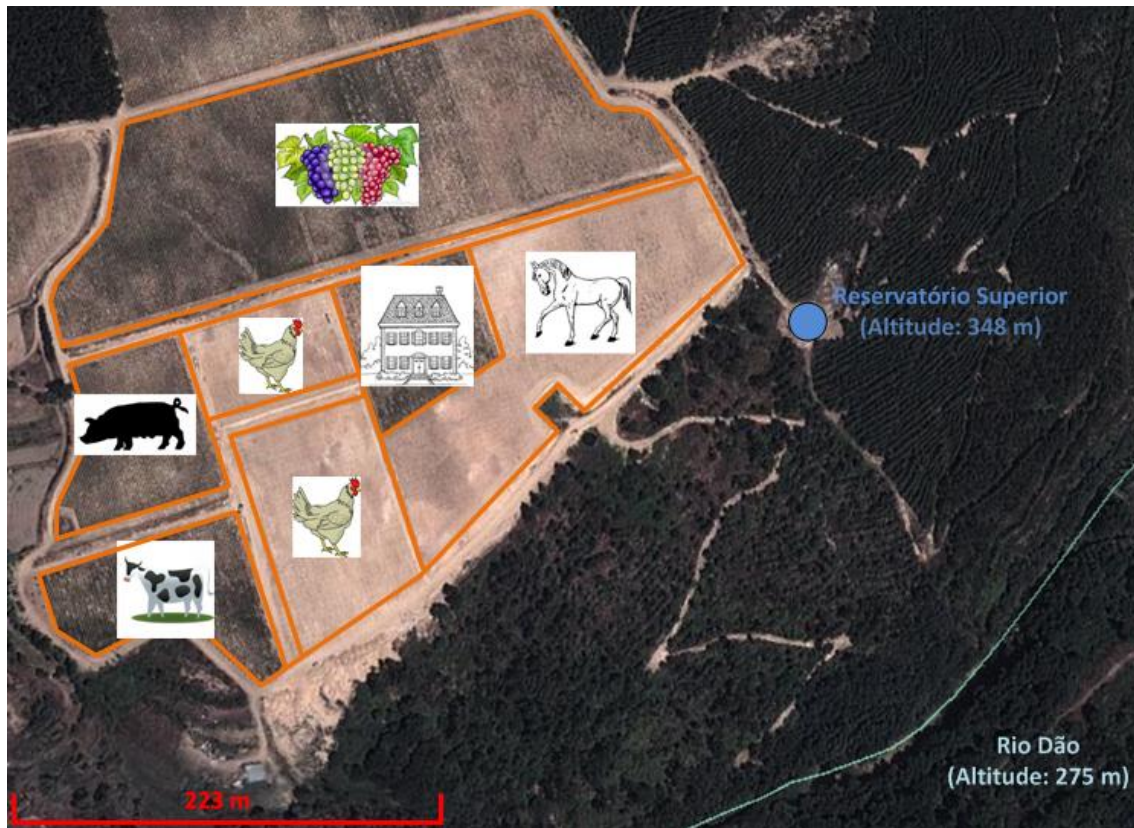


Figura 8–1: Características do local de instalação.

Na Tabela 8-1 expõe-se o consumo diário aproximado de água dos animais da propriedade.

Tabela 8–1: Consumo aproximado de água por cada animal da propriedade [30].

Especificação	Consumo de Água
Aves	0,2 l/dia
Bovinos	50 l/dia
Suínos	20 l/dia
Equinos	40 l/dia

Tendo em conta a quantidade de animais da propriedade e o abastecimento de água necessário calcula-se o caudal de envio diário desejado (Tabela 8-2).

De acordo com os cálculos efectuados o consumo total de água da propriedade é de 1.320 litros por dia.

Tabela 8–2: Consumo aproximado de água na propriedade.

Especificação	Consumo de Água (l/dia)	Quantidade	Consumo de Água (l/dia)
Aves	0,2	100	20
Bovinos	50	12	600
Suínos	20	15	300
Equínos	40	10	400
Consumo de Água Total			1.320 l/dia

Medição do caudal do rio

A medição do caudal do rio pode ser efectuada recorrendo a vários métodos, incluindo o método volumétrico quando o caudal é pouco elevado (Figura 8-2) [36].



Figura 8–2: Exemplo de medição do caudal através do método volumétrico [36].

Este método foi utilizado neste caso de estudo tendo sido medido o tempo necessário para encher um garrafão de 5 litros.

Sabendo que o caudal é dado pelo quociente entre o volume do recipiente e o tempo:

$$Q_{medido} = V / t \quad (8-1)$$

Q_{medido} – caudal medido, l/min;

V – volume do recipiente, l ou dm^3 ;

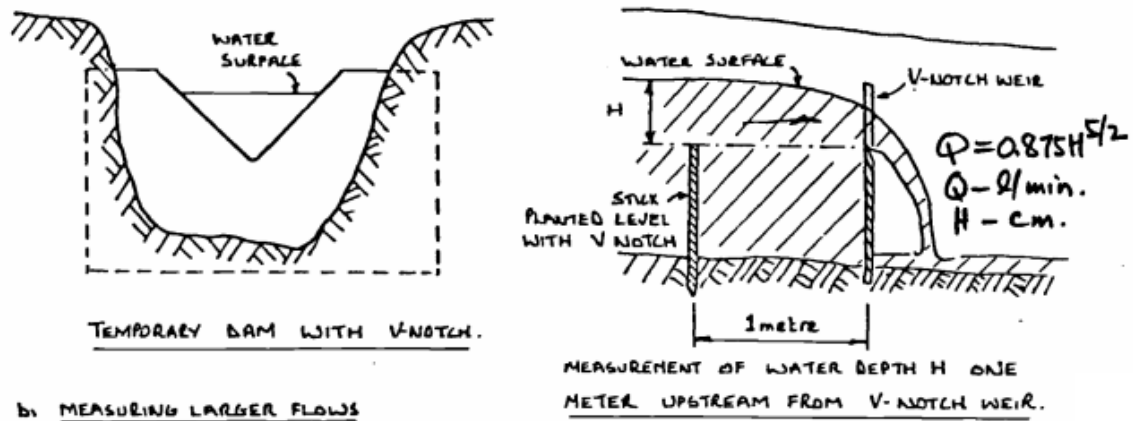
t – tempo que demora a encher o recipiente, min.

A aferição deste valor deve ser realizada no Verão quando o caudal é menor. No local de instalação o caudal medido foi de aproximadamente 36 l/min.

8. Aplicação a um caso de estudo

Quando o caudal do rio é elevado, a medição pode ser efectuada recorrendo a um método que consiste na criação temporária de uma represa cuja saída da água é realizada por um canal com forma em “V” (Figura 8-3).

Outra parede é instalada a 1 metro de distância da represa e com uma altura igual à altura de saída da água.



b) MEASURING LARGER FLOWS

Figura 8-3: Exemplo de medição do caudal de um rio através do método V [27].

Conforme apresentado na Figura 8-3, o caudal pode ser calculado através da equação 8-2.

$$Q_{medido} = 0,815 \cdot H^{\frac{5}{2}} \quad (8-2)$$

Q_{medido} – caudal medido, l/min;

H – altura de saída da água, cm.

Radiação solar

Como exposto anteriormente na página 36, em Viseu no Verão a inclinação óptima a adoptar para o gerador FV é de 25°.

Admitindo que o caudal diário desejado se mantém disponível durante todos os meses do Verão, dimensiona-se a instalação para operar durante o mês com pior radiação solar, ou seja, Setembro (Tabela 8-3).

Tabela 8–3: Estimativa da radiação solar do local no mês de Setembro numa superfície com inclinação de 25°.

Hora	I_{rad} [W/m ²]
07:07	65
07:37	84
08:07	353
08:37	450
09:07	541
09:37	621
10:07	690
10:37	746
11:07	787
11:37	814
12:07	825
12:37	821
13:07	802
13:37	768
14:07	720
14:37	657
15:07	582
15:37	497
16:07	402
16:37	302
17:07	75
17:37	54

Conforme se pode observar na Tabela 8-3, a radiação solar aumenta consideravelmente entre as 07h37m (84 W/m²) e as 08h07m (353 W/m²). A instalação está localizada entre duas colinas uma a Este e outra a Oeste, o que impossibilita que ao amanhecer, a luz solar que provém de Este atinja uma área de superfície maior devido à baixa inclinação do Sol. Já no final da tarde existe uma queda significativa de radiação solar entre as 16h37m (302 W/m²) e as 17h07m (75 W/m²).

8.2 Dimensionamento do carneiro hidráulico

No local, a altura de queda de água do açude é de aproximadamente 5 metros (Figura 8-4). Com a instalação de uma represa em madeira para reter uma parte do fluxo natural do rio, abdicasse do reservatório inferior (exemplo da Figura 2-17).

8. Aplicação a um caso de estudo

Conforme referido no Capítulo 2, outra das vantagens é o aproveitamento do caudal do rio. Assim, a velocidade com que esta chega ao protótipo é maior comparativamente ao sistema com reservatório.

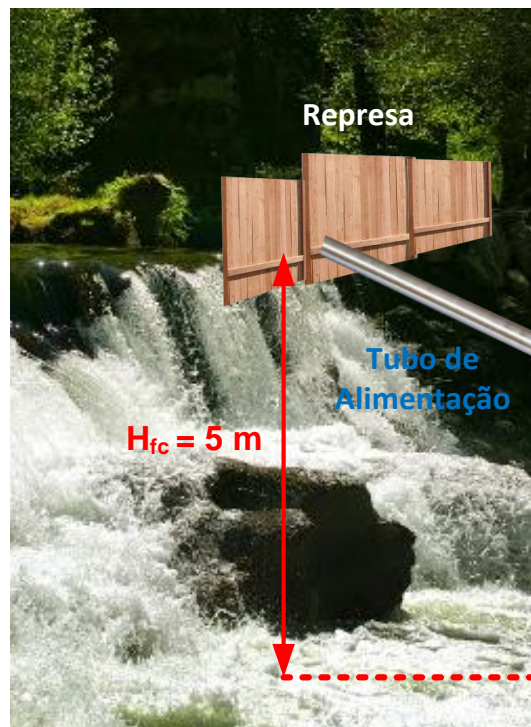


Figura 8-4: Exemplo da possível instalação no açude do rio (foto tirada no Inverno).

Tendo em conta a Tabela 7-1 do Capítulo 7, o caudal de alimentação medido, e sabendo que se pretende elevar a água a uma altura de 75 metros, é possível bombear 1.170 litros por dia (0,8125 l/min) com o modelo *RAMP0150* da *Williamson*.

Estes valores são válidos para um tubo de alimentação com 1:4 de inclinação. Assim, dado que a altura de queda é de 5 metros, o tubo de alimentação deverá ter cerca de 21 metros (Figura 8-5).

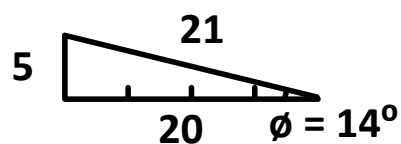


Figura 8-5: Determinação do comprimento do tubo de alimentação.

As características da instalação podem ser analisadas na Tabela 8-4.

Tabela 8-4: Dados da instalação.

Dados da instalação	
H_{fc}	5 m
H_{cr}	75 m
Q_A	36 l/min
Q_E	1.170 l/dia
D_{TA}	32 mm
L_A	21 m
θ	14°

8.3 Dimensionamento da bomba diafragma

Através da equação 7-1 apresentada na página 69, determina-se o caudal diário elevado pela bomba diafragma.

$$Q_{BD} = 1.320 - 1.170$$

$$Q_{BD} = 150 \text{ l/dia}$$

Examinando a Figura 7-8 previamente exposto, elege-se a bomba diafragma de acordo com a altura de elevação e o caudal a bombear. Para uma análise mais detalhada devem ser consideradas as tabelas apresentadas no capítulo anterior que contêm os dados técnicos das respectivas bombas.

A bomba diafragma modelo *Delivery Pump 7800* da *Aquatec* é a mais adequada, dada a pequena quantidade de água diária necessária a elevar. Esta instalação terá um funcionamento intermitente uma vez que a potência consumida faz actuar a protecção térmica ao fim de 35 minutos de operação. Assim considera-se um tempo de arrefecimento de 25 minutos.

A altura de elevação é de 75 metros, no entanto a pressão da água à entrada da bomba é de 0,49 bar (5 m.c.a), pelo que conforme apresentado na Figura 4-5, a pressão contra qual esta irá funcionar é 6,87 bar (70 m.c.a).

Analisando a Tabela 7-5, elaborou-se a Tabela 8-5 com as características técnicas da bomba na instalação deste caso de estudo.

Tabela 8–5: Características da bomba na instalação.

Aquatec - Delivery Pump 7800	
P_{cons}	91,2 W
T_{cons}	24 VDC
I_{cons}	3,8 A
Q_E	1 l/min

Assim, o caudal de envio é de 35 litros por hora, ou seja, para bombear os 150 litros diários, são necessárias 4,3 horas.

8.4 Dimensionamento do painel FV e LCB

O consumo de energia eléctrica da instalação é calculado na Tabela 8-6.

Tabela 8–6: Consumo de energia eléctrica da instalação.

Consumo da instalação [24 VDC]			
P_{bomba}	91,2W	I_{bomba}	3,8 A
P_{electr}	16 W	I_{electr}	0,67 A
Total	107,2 W	Total	4,47 A

Na instalação do gerador FV é essencial evitar a proximidade de árvores ou outros objectos que possam causar sombra e reduzir a potência produzida. Por outro lado, deve ter-se em conta a perda de potência devida a altas temperaturas, à sujidade e a diminuição do rendimento ao longo dos anos, pelo que o gerador FV deve ser sobredimensionado. No mínimo este deve ter uma potência 25% superior à potência consumida.

Dado que a bomba escolhida opera a 24VDC, optou-se pela instalação de dois painéis FV de 12 VDC em série, com uma potência de 90W cada (Tabela 8-7) ficando o sistema com uma potência instalada de 180W e uma área de superfície de 1,3 m².

Tabela 8–7: Características do painel FV escolhido.

Painel FV BP SOLAR 490 J- 90W	
V_{MPP}	17,9 V
I_{MPP}	5,03 A
η	13,9%
Área	0,65 m ²

Fonte: BP SOLAR 90W Photovoltaic modules

8. Aplicação a um caso de estudo

Na escolha de um painel FV é necessário efectuar uma análise ao seu desempenho em condições não estandardizadas, ou seja, para níveis mais baixos de radiação solar.

Analisando a sua ficha técnica, para uma radiação solar de $800\text{W}/\text{m}^2$ a potência máxima produzida é de $64,8\text{ W}$, insuficiente para o sistema em causa. Segundo a Tabela 8-3, um valor igual ou superior de radiação só se verifica das 11h22m às 13h07m.

Uma vez que a área de superfície incidente aumenta com a instalação do segundo painel, a potência produzida duplica para cerca de 130 W , permitindo manter o sistema ligado durante esse período de tempo.

A corrente máxima produzida pelo gerador FV é de $5,03\text{ A}$ e a tensão de operação dos equipamentos é de 24VDC , pelo que se optaria pela instalação de um LCB com as características apresentadas na Tabela 8-8.

Tabela 8–8: Características eléctricas do LCB.

LCB da Solar Converters Inc.	
Tensão Nominal	24Vdc
Tensão PV_{out}	24Vdc
Tensão Máxima de Input PV_{out}	60Vdc
Tensão Máxima LCB_{out}	30Vdc
Corrente Máxima LCB_{out}	7A
Eficiência	> 94%

Fonte: altE store LCB

Na Figura 8-6 apresenta-se o LCB escolhido. Este possui internamente um fusível de protecção de 10A .

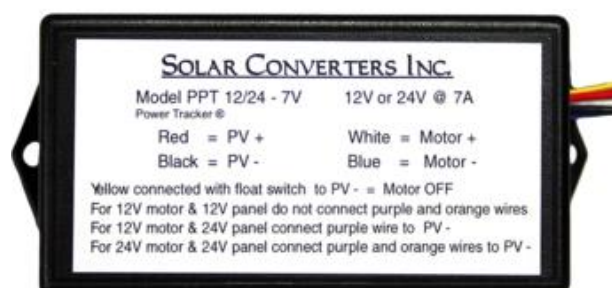


Figura 8–6: Aspecto do LCB da *Solar Converters Inc.*[28].

8. Aplicação a um caso de estudo

Na Figura 8-7 está representado um esboço do esquema eléctrico a adoptar neste caso de estudo.

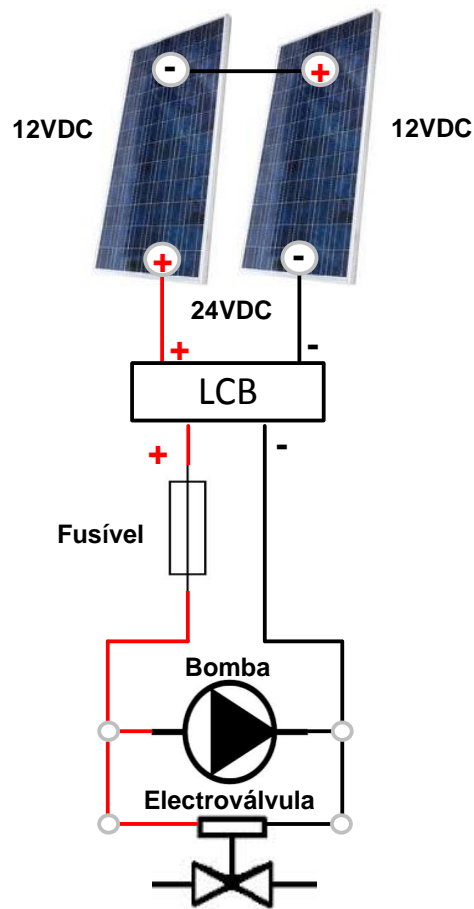


Figura 8-7: Esquema eléctrico a implementar.

A partir da Tabela 8-3, determinou-se a potência à saída do LCB (Tabela 8-9 da página seguinte) e aferiu-se durante quanto tempo permite manter o sistema a funcionar.

Tabela 8–9: Cálculo da potência de saída do LCB.

Hora	I_{rad} [W/m ²]	$P_{\text{out FV}}$	P_{perdas}	$P_{\text{out LCB}}$	$T_{\text{out LCB}}$	$I_{\text{out LCB}}$
09:07	541	91,9	5,52	86,4	24	3,60
09:22	582	98,9	5,93	93,0	24	3,87
09:37	621	105,5	6,33	99,2	24	4,13
09:52	657	111,6	6,70	104,9	24	4,37
10:07	690	117,2	7,03	110,2	24,7	4,47
10:22	720	122,3	7,34	115,0	25,7	4,47
10:37	746	126,8	7,61	119,2	26,7	4,47
10:52	768	130,5	7,83	122,7	27,4	4,47
11:07	787	133,7	8,02	125,7	28,1	4,47
11:22	802	136,3	8,18	128,1	28,7	4,47
11:37	814	138,3	8,30	130,0	29,1	4,47
11:52	821	139,5	8,37	131,1	29,3	4,47
12:07	825	140,2	8,41	131,8	29,5	4,47
12:22	825	140,2	8,41	131,8	29,5	4,47
12:37	821	139,5	8,37	131,1	29,3	4,47
12:52	814	138,3	8,30	130,0	29,1	4,47
13:07	802	136,3	8,18	128,1	28,7	4,47
13:22	787	133,7	8,02	125,7	28,1	4,47
13:37	768	130,5	7,83	122,7	27,4	4,47
13:52	746	126,8	7,61	119,2	26,7	4,47
14:07	720	122,3	7,34	115,0	25,7	4,47
14:22	690	117,2	7,03	110,2	24,7	4,47
14:37	657	111,6	6,70	104,9	24	4,37
14:52	621	105,5	6,33	99,2	24	4,13
15:07	582	98,9	5,93	93,0	24	3,87
15:22	541	91,9	5,52	86,4	24	3,60
15:37	497	84,5	5,07	79,4	24	3,31

Na Tabela 8-8 estão expostos apenas os períodos de maior radiação solar. Assim, conclui-se que o sistema é alimentado durante 4 horas e 15 minutos, o que significa um bombeamento de 155 litros de água considerando os tempos de arrefecimento do motor da bomba.

O fusível a instalar seria de 5 A.

Na Tabela 8-10 efectuou-se o estudo da quantidade de água elevada para os restantes meses do Verão.

Tabela 8–10: Água bombeada pelo protótipo durante o Verão.

Quantidade de água elevada	
Junho	175 l/dia
Julho	175 l/dia
Agosto	175 l/dia
Setembro	155 l/dia

Apesar da variação de potência produzida, nos meses de Junho, Julho e Agosto o caudal bombeado é igual, uma vez que a bomba escolhida necessita do período de arrefecimento.

8.5 Dados gerais da instalação

Na Figura 8-8 apresenta-se o traçado e a localização dos componentes da instalação.

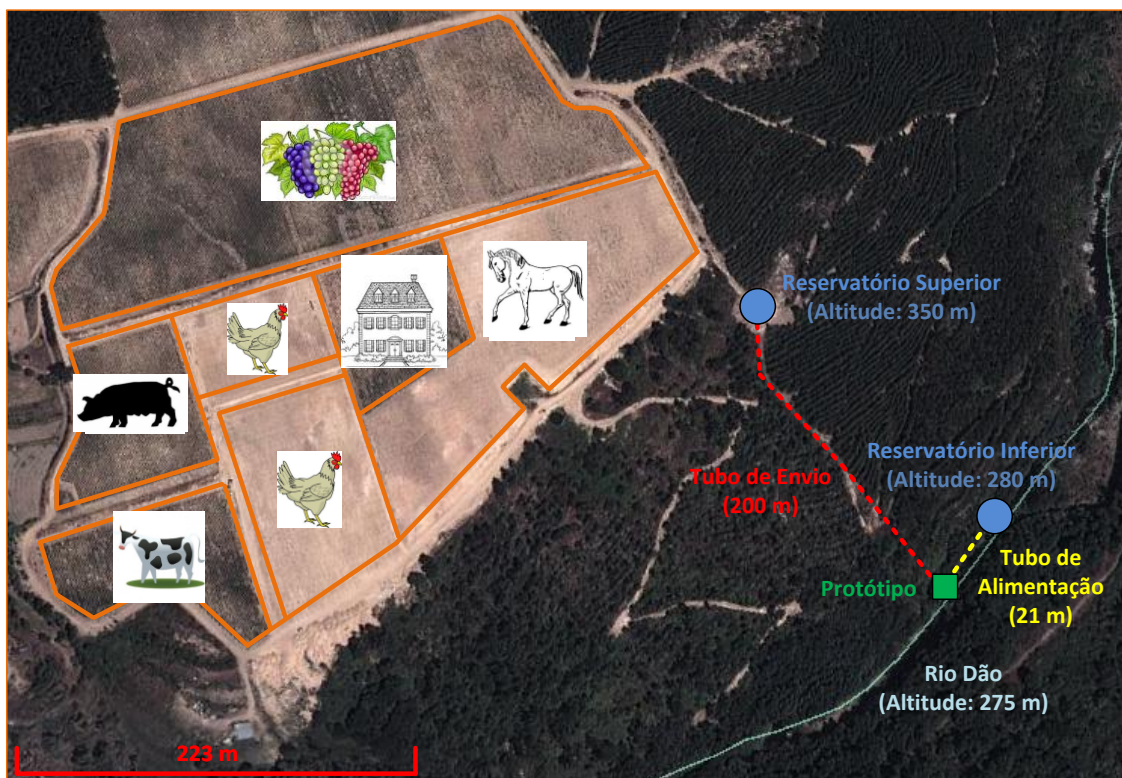


Figura 8–8: Características do local de instalação e do sistema implementado.

Na Figura 8-9 podem observar-se os dados gerais da instalação.

8. Aplicação a um caso de estudo

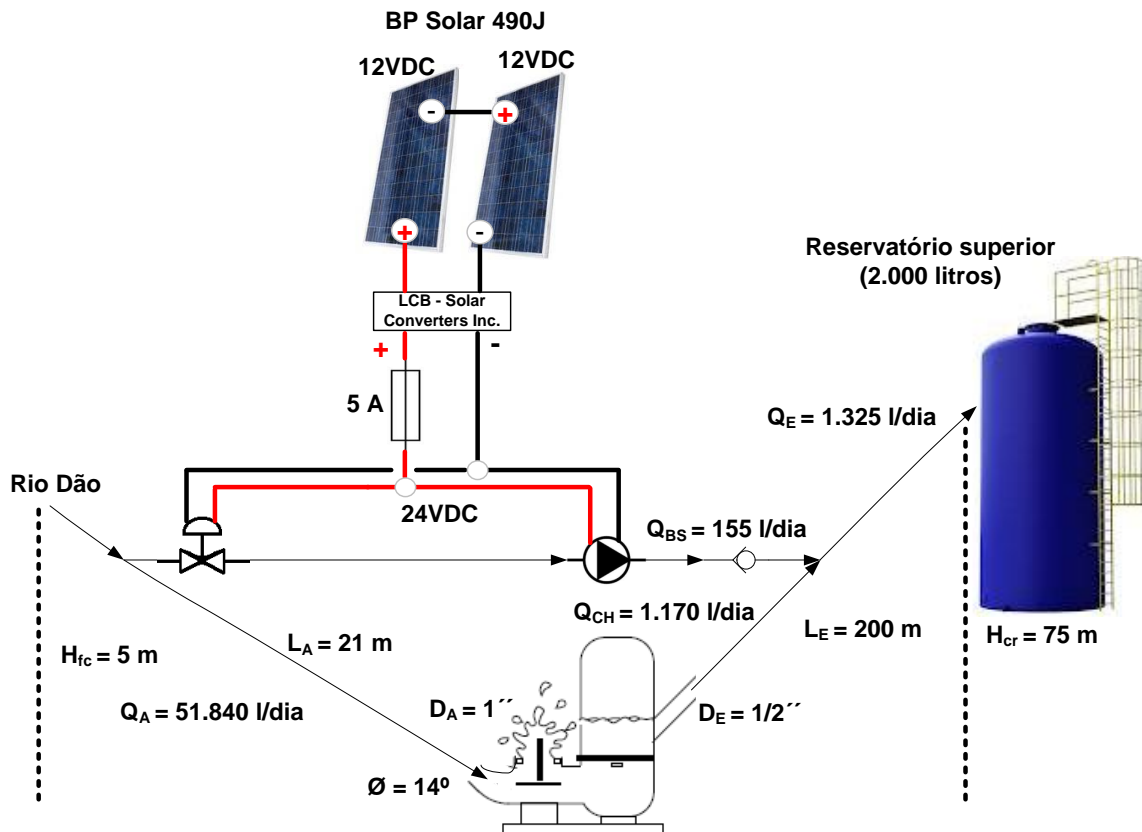


Figura 8–8: Dados da instalação.

Calculou-se o rendimento do sistema durante o período de funcionamento a solo do carneiro hidráulico:

$$\eta_{energético} = \frac{1170 \cdot 75}{51840 \cdot 5} \times 100\% \approx 33,85 \%$$

$$\eta_{volumétrico} = \frac{1170}{51840} \times 100\% \approx 2,26 \%$$

Quando existe o apoio da bomba solar durante as 4 horas do período diurno o rendimento aumentou:

$$\eta_{energético} = \frac{1325 \cdot 75}{51840 \cdot 5} \times 100\% \approx 38,34 \%$$

$$\eta_{volumétrico} = \frac{1325}{51840} \times 100\% \approx 2,56 \%$$

Com a instalação do protótipo garante-se o abastecimento de água de acordo com as necessidades da propriedade, através do aproveitamento das fontes de energia hídrica e solar, preservando deste modo o meio-ambiente.

9. Conclusão

O desconhecimento da maioria da população acerca das potencialidades do carneiro hidráulico torna-se um grande obstáculo no seu emprego. A escolha mais comum recai nas bombas que consomem produtos derivados do petróleo e energia eléctrica da rede pública.

Ao longo deste trabalho verificou-se que este dispositivo utiliza a energia cinética e potencial da água em conjunto com o golpe de aríete para desenvolver trabalho tendo um baixo rendimento. Neste contexto, o objectivo desta dissertação foi o de aumentar a eficiência de bombagem, principalmente no Verão, quando os caudais são reduzidos, dado que exigem grande volume de água para produzir o trabalho necessário para a elevação de uma pequena quantidade.

A tarefa de conceber e construir um carneiro hidráulico de modo a ter um desempenho satisfatório teve alguma complexidade, pois são inúmeros os factores que influenciam o seu funcionamento e, portanto o seu desempenho enquanto dispositivo de elevação de água. Durante esse processo foram encontradas dificuldades principalmente de cariz mecânico. Todavia, estas foram ultrapassadas, tendo constituído um desafio que contribuiu para um melhor conhecimento do seu funcionamento e ao mesmo tempo para o seu aperfeiçoamento.

A possibilidade de captação de energia solar em qualquer lugar do planeta foi uma das razões da sua escolha como fonte renovável. Esta energia convertida em energia eléctrica permite alimentar o dispositivo concebido durante o dia aumentando o volume de água elevado.

O custo de funcionamento do protótipo é apenas o custo de capital, além disso este possui uma operação autónoma e requer pouca manutenção. Deste modo, a nível económico é uma solução vantajosa face a dispositivos mais complexos e que requerem energia de origem fóssil.

Verificou-se que para o mesmo caudal de alimentação o protótipo permite bombear um maior volume de água, representando um aumento em média de 23% no rendimento energético e um aumento de 8% no rendimento volumétrico devido a uma menor quantidade desperdiçada. A capacidade de elevação do protótipo é uma mais-valia e em termos de *performance* adequa-se facilmente a cada instalação desde que existam as condições necessárias.

Com base no trabalho desenvolvido foi demonstrado que o protótipo constitui uma alternativa para a elevação de água.

9.1 Desenvolvimentos futuros

Em primeiro lugar seria importante testar no terreno a máxima capacidade de elevação do protótipo construído, de modo a analisar o seu desempenho em condições que não foram possíveis criar.

Numa fase mais avançada poderia ser concebido em ferro fundido ou aço inox o conjunto de peças que constituem o carneiro hidráulico: câmara de ar, válvula de escape e válvula de entrega.

Em trabalhos futuros poderá ser melhor estudada e implementada uma das ideias não concretizadas neste trabalho, cujo objectivo seria o de controlar electricamente a válvula de escape através de impulsos sincronizados com os golpes de aríete. Estes permitiriam fechar a válvula no instante em que o valor de pressão é mais elevado. Existe uma investigação realizada neste âmbito onde se verificou o aumento da eficiência quando o tempo de fecho da electroválvula foi o mais célere quanto possível [41].

REFERÊNCIAS

- [1] “Golpe de aríete nas instalações hidráulicas.” [Online]. Available: <http://multipros.wordpress.com/2014/08/04/servicos-de-encanador-conserto-de-vazamentos-residenciais-multipros/>.
- [2] “Ariete,” *Ariete*. [Online]. Available: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ar%C3%ADete>.
- [3] J. Whitehurst, *The Philosophical Transactions of the Royal Society of London, from their commencement in 1665 to the Year 1800*, vol. 13. Blackfriars, London: Abbrided, 1775.
- [4] “Montgolfier,” *Montgolfier, Joseph and Etienne*. [Online]. Available: http://www.memo.fr/en/article.aspx?ID=PER_MOD_164. [Accessed: 20-Dec-2012].
- [5] “Ram Pump.” [Online]. Available: <http://laurenroyal.com/3.0/bookshelf/books/lit/pump>. [Accessed: 20-Dec-2012].
- [6] “Meribah Ram Pump Installation & User Manual.” .
- [7] “Blake Hydram.” [Online]. Available: <http://www.allspeeds.co.uk/products-services/blake-hydram/>.
- [8] “Bomba Carneiro Marumby.” [Online]. Available: http://www.agroads.com.br/bomba-carneiro-marumby_54842.html.
- [9] Phylo Min Than, “Construction and Performance Testing of the Hydraulic Ram Pump,” presented at the GMSARN International Conference on Sustainable Development: Issues and Prospects for the GMS, 2008.
- [10] Jonh Blake Limited, “Water Supply for Farms, Country-Houses, Villages.”
- [11] “Designing a Hydraulic Ram Pump.” [Online]. Available: <https://www.lifewater.org/resources/rws4/rws4d5.htm>.
- [12] Dr.R.K.Bansal, *A Textbook of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines*. .
- [13] “Bomba diafragma.” [Online]. Available: http://pt.wikipedia.org/wiki/Bomba_de_diafragma.
- [14] “Electroimanes de accionamiento NAFSA S.L.” .
- [15] FAULHABER, “Linear DC-Servomotor.” .
- [16] F. A. de S. Pereira and M. Â. S. Oliveira, *Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaico*. Publindústria.
- [17] “Dankoff Solaram Surface Pump.” [Online]. Available: <http://www.dankoffsolarpumps.com/solaram-surface-pump/>.
- [18] “Shurflo Water Pumps.” [Online]. Available: <http://www.shurflo.com/rv-products/rv-pumps/default.html>.
- [19] “Installation Manual for the Shurflo 902-100 LCB - GO Pump Controller.” .
- [20] “Válvula de retenção vertical.” [Online]. Available: <http://www.minasbombas.com/produto/VALVULA-DE-RETENCAO-VERTICAL-Minas-Bombas/224/>.
- [21] “Williamson HI-FLO Ram Pumps.” [Online]. Available: <http://williamsonrampump.co.nz/index.php/pumping-capacity>.
- [22] “Shurflo - Aqua King Standard 3.0 Fresh Water Pump.” .
- [23] “Shurflo - Extreme Series Smart Sensor 5.7.” .
- [24] “Aquatec - Booster Series.” .
- [25] “Aquatec - Delivery Pump 7800 Series.” .
- [26] “Electroválvulas, funcionamiento general.” [Online]. Available: <http://www.pasaisa.com/blog/electrovalvulas/>.

- [27] “Solar Converters.” [Online]. Available: <http://www.altestore.com/store/Solar-Water-Pumps/Linear-Current-Boosters-For-Pumps/Solar-Converters-7A-1224V-Linear-Current-Boost-for-Solar-Pumps-PPT-1224-7/p1353/>.
- [28] “Bombas carneiro Walton.” [Online]. Available: <http://www.walton.fr/hydraulic-ram>.
- [29] E. Suínos e Aves, “Estimando o consumo de água de suínos, aves e bovinos em uma propriedade.”
- [30] W. T. Weerakoon and V. Liyanage, “Hydraulic Ram Pump Technology and Practice In Zambia.”
- [31] N. S. Lavoura, “Concepção, construção e estudo de uma unidade de demonstração de escoamento variável sob pressão: aríete hidráulico,.” Instituto Politécnico de Bragança, 2008.
- [32] João C. A. Ferreira Mendes, “Mecânica dos Fluidos.” Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.
- [33] Eng^oLuiz A. Camargo, “O golpe de aríete em tubulações de recalque. Análise simplificada,.” Joinville/SC, 1989.
- [34] P. Moisés, “Sistemas Fotovoltaicos - Mercados de Energia, Otimização Energética e Microgeração.” MEE-EAI.
- [35] M. Simão, “Hidrodinâmica e desempenho em turbinas de baixa potência: concepção, modelação e ensaios,.” Instituto Superior Técnico.
- [36] A. O. Taufik, M. Anwari, and M. Taufik, “Modeling and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System,.” presented at the Third Asis International Conference on Modelling & Simulation, 2009.
- [37] “Linear Current Boosters for Pumps How They Work & What They Do.” [Online]. Available: <http://www.sunshineworks.com/linear-current-boosters.htm>.
- [38] D.B. Nogueira, A.M. de Sousa, J. I. Pinheiro, O.C. da R. Neto, and A. dos S. Teixeira, “Avaliação de Carneiro Hidráulico de Custo Acessível,.” presented at the II Inovagri International Meeting, Fortaleza - Brazil, 2014.
- [39] Alexandra Leitão, “A utilização do domínio público hídrico por particulares,.” Universidade de Lisboa, 2012.
- [40] E. . Schiller, “Practical Aspects of Hydrum Operation.”
- [41] R. Nicolás Zárate Rojas, “Modelagem, otimização e avaliação de um carneiro hidráulico,.” Estado de São Paulo - Brazil, 2002.

