Abordagem para o balanço energético em aproveitamentos hidroagrícolas

Energy balance approach in collective irrigation systems

Henrique Cunha[1], Aisha Mamade[1], Dália Loureiro[1], Gonçalo Sousa[2], Helena Alegre[1], Dídia Covas[@, 3]

[@] Autor correspondente: didia.covas@tecnico.ulisboa.pt

[1] LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

[2] ARBVS – Associação de Regantes e Beneficiários do Vale do Sorraia

[3] CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

RESUMO: A modernização dos sistemas de abastecimento para regadio em Portugal tem conduzido a um uso mais eficiente da água, mas também a um aumento substancial do consumo de energia para uma operação mais flexível. Assegurar um uso eficiente e sustentável do binómio água-energia é fundamental para a sustentabilidade económica e ambiental do setor agrícola. Este artigo tem como objetivo a proposta de uma nova metodologia para avaliação da eficiência energética em sistemas de transporte e distribuição de aproveitamentos hidroagrícolas. Esta metodologia tem por base a existente para sistemas de abastecimento de água. Para além das ineficiências dos equipamentos, esta permite a quantificação da dissipação de energia por perdas de água, em perdas de carga contínuas e localizadas e a energia supérflua associada ao traçado da rede. Este balanço considera novas componentes pelo facto de poderem coexistir redes de transporte e de distribuição em superfície livre e em pressão. O balanço energético proposto permite também quantificar a fração de energia fornecida ao sistema que é recuperada. A metodologia foi aplicada a um aproveitamento hidroagrícola com uma rede mista, composta por canais e por condutas em pressão. A energia mínima necessária para garantir o consumo representa apenas 16% e a principal ineficiência energética do sistema é devida a perdas de água e representa 35% da energia fornecida. Soma da energia dissipada na rede por perdas de carga contínuas e localizadas com a energia supérflua representa 32% e as centrais hidroelétricas existentes já permitem recuperar 14% da energia fornecida ao sistema. Embora existam bombas e turbinas com baixo rendimento, a energia dissipada nesta componente representa apenas 9% da energia fornecida.

Palavras-chave: eficiência energética; balanço energético; aproveitamentos hidroagrícolas

ABSTRACT: The modernization of irrigation systems in Portugal has led not only to a more efficient use of water, but also to a substantial increase in energy consumption for more flexible operation. Ensuring the efficient and sustainable use of water-energy is critical to the economic and environmental sustainability of the agricultural sector. A new methodology, based on the existing one for urban water supply systems, is proposed for the assessment of energy efficiency in collective irrigation systems. In addition to equipment inefficiencies, energy dissipation due to water losses, continuous and singular head losses and the superfluous energy associated with the network layout are also quantified. This balance considers new components because open channel and pressurized transport and distribution networks can coexist as opposed to urban water supply systems. The proposed energy balance also allows quantifying the fraction of energy supplied to the system that is recovered. The methodology is applied to a collective irrigation system composed of channels and low-pressure pipes. In this system, the minimum energy required to ensure consumption represents only 16% and the main energy inefficiency in the system is due to water losses and represent 35% of the energy supplied. The energy dissipated due to continuous and singular head losses added to the surplus energy represents 32% and existing hydroelectric stations already allow 14% of the energy supplied to the system to be recovered. Although low-efficiency pumps and turbines are available, the energy dissipated in this component represents only 9% of the supplied energy.

Keywords: energy efficiency; energy balance; collective irrigation systems

Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 40, N.º 2, 9-17, dezembro de 2019.

© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh40n2-cti1

1. INTRODUÇÃO

O setor agrícola é responsável pelo maior consumo de água a nível nacional (cerca de 80%), sendo também o setor com maiores ineficiências no uso da água, com perdas no armazenamento, transporte e distribuição a atingirem valores na ordem dos 40% (APA, 2012). Nos últimos anos tem-se assistido a uma crescente consciencialização para a melhoria na eficiência no uso da água, sobretudo ao nível da parcela do agricultor. A nível nacional têm sido tomadas algumas medidas para melhoria de eficiência, que ao nível dos aproveitamentos hidroagrícolas, quer ao nível da parcela dos agricultores no sentido de reduzir os consumos de água, nomeadamente através da reabilitação ou modernização dos sistemas de rega (DSC, 2019). No entanto, esta modernização tem também levado a um aumento substancial dos consumos de energia utilizada na operação dos sistemas (Abadia *et al.*, 2010; Rocamora *et al.*, 2013; Tarjuelo *et al.*, 2015). O consumo de energia no regadio (*i.e.*, nos aproveitamentos hidroagrícolas e nas respetivas parcelas agrícolas) entre a 1960 e 2014 aumentou de 200 para 1500 kWh/ha (DGADR, 2017). A questão da eficiência energética nos aproveitamentos hidroagrícolas tem vindo a ganhar relevância, surgindo como princípio orientador da estratégia nacional para o regadio (DGADR, 2014). Em termos de investimentos, prevê-se que até 2022 mais de 40% do investimento no regadio seja direcionado a intervenções em regadios existentes tendo em vista a melhoria do seu desempenho (Resolução do Conselho de Ministros nº133/2018). Com a crescente preocupação de gerir o meio hídrico de forma mais sustentável, surge a necessidade de reduzir perdas de água e, consequentemente, o consumo de energia, nos sistemas de transporte e distribuição de água (Pardo *et al.*, 2013).

Existem várias metodologias para avaliação da eficiência energética dos equipamentos de bombeamento e da energia total fornecida ao sistema através do cálculo de indicadores eficiência energética (Abadia *et al.*, 2008, Abadia *et al.*, 2010, Moreno *et al.*, 2010). No entanto, é necessário o desenvolvimento de ferramentas que permitam quantificar estas ineficiências de forma sistemática, apoiar no cálculo de indicadores de avaliação de desempenho e apoiar a tomada de decisão sobre medidas de melhoria nestes sistemas.

Nos sistemas urbanos de abastecimento de água foram desenvolvidas ferramentas para avaliação do desempenho deste sistema, das quais se destaca o balanço hídrico, uma ferramenta fundamental para a avaliação das perdas de água nestes sistemas (Alegre *et al.*, 2004). O cálculo do balanço hídrico permite quantificar a água entrada no sistema, procurando-se distinguir, e estimar, as componentes de consumo autorizado e as componentes de perdas de água. Inspirado no balanço hídrico, surgiu o balanço energético para uma avaliação global da eficiência dos sistemas, englobando a energia consumida por ineficiências em equipamentos de bombeamento e de produção de energia a partir do escoamento (turbinas), mas também a energia consumida e associada a outras ineficiências como as perdas de água, as perdas de carga ou a energia supérflua devida a traçados de rede que foram concebidos sem atender ao consumo e à eficiência energética. O balanço energético é uma ferramenta na qual se procura discretizar a energia fornecida a um sistema nas suas variadas componentes (Cabrera *et al.*, 2010), permitindo a realização de diagnósticos globais, assim como a identificação de áreas de rede com maiores ineficiências energéticas através de diagnósticos setoriais (Mamade *et al.*, 2017).

No caso do balanço hídrico proposto para sistemas urbanos de abastecimento de água (Alegre *et al.* 2004), a sua adaptação às especificidades dos aproveitamentos hidroagrícolas levou à necessidade de considerar novas subcomponentes, tais como a entrada de água por precipitação, por escoamento superficial e a perdas por evaporação, em repassos e por descargas em canais e reservatórios (Cunha *et al.*, 2019). Neste artigo, discutem-se as principais alterações propostas para o cálculo do balanço energético em aproveitamentos hidroagrícolas face à abordagem proposta por Mamade *et al.* (2017) para sistemas urbanos de água.

2. METODOLOGIA

2.1 Estrutura do balanço proposto

Em complemento às abordagens tradicionais de avaliação de consumo e da eficiência em equipamentos de bombeamento, o cálculo do balanço energético permite um diagnóstico global de um sistema de abastecimento de água em termos energéticos. Recorrendo ao seu cálculo, evidencia-se que a análise do consumo e da eficiência energética, realizadas maioritariamente aos equipamentos, não é suficiente para uma correta avaliação da forma como a energia é usada e dissipada nos sistemas. Correspondem a diferentes formas de dissipação de energia, a dissipação por perdas de água, por perdas de carga, por práticas menos adequadas de operação ou por opções questões de traçado em que a minimização do

consumo de energia não foi atendida. O balanço energético proposto para avaliação da eficiência energética em aproveitamentos hidroagrícolas em canal, mistos ou em pressão é apresentando no Quadro 1.

A aplicação do balanço energético deve ser feita a um sistema que contenha o conjunto de elementos que asseguram o transporte e distribuição de água aos seus utilizadores e sobre os quais se pretende melhorar o respetivo desempenho. A fronteira do sistema para cálculo do balanço energético deve coincidir com a fronteira previamente definida para cálculo do balanço hídrico, uma vez que os volumes de água provenientes do balanço hídrico devem ser considerados como dados de base para o cálculo das componentes do balanço energético. Por sua vez, o período de referência para cálculo do balanço energético deve também coincidir com o período de funcionamento do sistema em estudo, estando em concordância com o período de referência adotado no cálculo do balanço hídrico. O período de referência coincide assim com o período durante o qual decorre a campanha de rega, o qual é variável de ano para ano e entre os aproveitamentos hidroagrícolas.

Antes de iniciar o cálculo das diferentes componentes, é necessário determinar a cota de referência do sistema (z0). A cota a considerar deve ser a cota mínima do sistema, podendo ser o nível hidrodinâmico mínimo de uma captação (*i.e.*, captação subterrânea) ou o ponto de abastecimento localizado à cota mínima (Mamade *et al.*, 2017).

A energia fornecida a um sistema inclui a energia potencial gravítica e energia de pressão para bombeamento. A primeira componente refere-se à energia potencial fornecida através do nível de água disponível em barragens, da carga hidráulica em reservatórios de entrada e em pontos de entrega da rede que estejam na entrada do sistema. A segunda componente refere-se a todas as instalações elevatórias do sistema independentemente da sua localização: furos de captação, associadas a reservatórios ou a sobrepressoras.

Seguindo o racional do balanço hídrico (Alegre *et al.* 2004), a energia total subdivide-se em energia associada ao consumo autorizado e energia associada às perdas de água. Por sua vez, a energia associada ao consumo autorizado subdivide-se em três parcelas: energia entregue aos consumidores, energia dissipada e energia recuperada associada a consumo. A primeira parcela inclui a energia mínima e a energia supérflua. A energia mínima corresponde à energia mínima teoricamente necessária para satisfazer os consumidores numa situação ideal sem perdas de carga no sistema; a energia supérflua corresponde à energia entregue em excesso aos consumidores relativamente à energia mínima necessária. A segunda parcela inclui a energia dissipada nas condutas por perdas de carga contínuas, a energia dissipada devido a perdas de localizadas em órgãos de controlo e a energia dissipada nos grupos eletrobomba e nas turbinas. A terceira parcela refere-se à fração de energia recuperada a partir do consumo autorizado. A energia associada às perdas de água divide-se em: energia nos pontos onde ocorrem as perdas,

Quadro 1. Proposta de balanço energético para aplicação em aproveitamentos hidroagrícolas.

A	B	C	D
Energia fornecida	Energia associada a consumo autorizado	Energia entregue aos consumidores	Energia mínima
			Energia supérflua
		Energia dissipada	por perdas de carga nas condutas e canais *
			por perdas de carga nas válvulas e comportas *
			por ineficiências nas bombas
			Por ineficiências nas turbinas
		Energia recuperada	associada a consumo
			associada a perdas de água
	Energia associada a perdas de água	Energia dissipada	nos pontos onde ocorrem as perdas de água
			por perdas de carga nas condutas e canais *
			por perdas de carga nas válvulas e comportas *
			por ineficiências nas bombas
			por ineficiências nas turbinas

■ componentes que requerem modelação hidráulica
* componentes novas

energia dissipada por perdas de carga contínuas e localizadas em órgãos de controlo e a dissipada nos grupos eletrobomba e nas turbinas e a energia recuperada associada a perdas. A energia nos pontos onde ocorrem as perdas inclui todas as perdas nos pontos de consumo, sejam perdas reais (fugas e roturas), ou perdas aparentes (consumos ilícitos e erros de medição). As componentes de energia dissipada e de energia recuperada são equivalentes às parcelas já referidas na energia associada ao consumo autorizado. Dependendo dos dados iniciais existentes e do objetivo podem adotar-se duas abordagens de cálculo distintas:

- **Análise agregada**: requer menos dados e pode ser aplicada, quer ao nível do sistema, quer ao nível de setores de rede, para diagnosticar as principais componentes de consumo energético; é útil para entidades gestoras que não possuem modelos hidráulicos das redes e permite identificar as principais ineficiências do sistema.
- **Análise detalhada**: requer um modelo hidráulico calibrado e permite um diagnóstico completo do consumo de energia em cada componente do balanço energético.

Recomenda-se que se inicie o diagnóstico do sistema com uma análise agregada, para identificar as suas principais ineficiências, e que nos casos em que as componentes de ineficiência possam ser significativas (e.g., perdas de carga continuas em condutas e canais) se prossiga para uma análise detalhada recorrendo à modelação hidráulica. No Quadro 1 assinalam-se as componentes que requerem modelação hidráulica do sistema para a sua determinação e as novas componentes necessárias para efetuar o balanço energético nos aproveitamentos hidroagrícolas.

2.2 Energia fornecida

À semelhança do balanço energético proposto por Mamade *et al.* (2017), o cálculo inicia-se com a contabilização da energia fornecida ao sistema. Tendo em conta as subcomponentes de energia fornecida por gravidade, E_G, e por bombeamento, E_B, como apresentado no Quadro 2:

$$E_t = E_G + E_B \tag{1}$$

No caso do fornecimento de água gravítico a partir de albufeira, de ponto de entrega ou de reservatório de entrada, devem ser levantados os níveis de água, H_{ri}, e os volumes de água fornecidos ao sistema captados em cada albufeira, V_{ri}.

Quadro 2. Componentes de energia fornecida em aproveitamentos hidroagrícolas.

Energia fornecida	
Energia gravítica	**Energia por bombeamento**
• Energia associada a volume de água entrado no sistema através de albufeiras, reservatórios de entrada ou pontos de entrega • Energia associada a volume de água entrado no sistema por precipitação em canais e reservatórios intermédios • Energia associada a volume de água entrado no sistema por escoamento superficial em reservatórios intermédios • Energia associada a volume de água entrado/saído do sistema através de reservatórios intermédios	• Energia associada a volume de água entrado que é captado através de instalações elevatórias de entrada • Energia associada aos reforços de energia para elevação ao longo do sistema através de estações elevatórias intermédias

O cálculo da energia potencial gravítica, E_G, para as *n* entradas num dado sistema, é dada pela seguinte equação:

$$E_G = \frac{\gamma}{3600} \sum_{i=1}^{n} V_{ri} \left(H_{ri} - z_0 \right) \tag{2}$$

Nesta equação e nas seguintes, a componentes de energia são expressas em kWh/ano, os volumes em m^3, as cotas em m e o peso volúmico da água em kN/m^3.

A subcomponente relativa à contribuição dos reservatórios intermédios é diferenciadora do balanço energético aplicado aos sistemas de urbanos de abastecimento de água, dado que o funcionamento e as práticas de operação dos aproveitamentos hidroagrícolas são distintos. Nos sistemas urbanos de abastecimento de água, que prestam o serviço continuamente ao longo do ano, o período de cálculo do balanço energético é anual. Dado que a variação de nível nos reservatórios intermédios durante esse período é praticamente nula, o eventual contributo energético que os mesmos possam ter no sistema é desprezável (Cabrera *et al.*, 2010). O mesmo não acontece nos aproveitamentos hidroagrícolas, onde o período de funcionamento tenderá a coincidir com o período de campanha de rega. É expectável que no início da campanha de rega, os reservatórios intermédios (em geral albufeiras de pequena ou média dimensão) se encontrem com níveis de armazenamento superiores aos níveis em final de campanha, por forma a maximizar a sua capacidade de armazenamento. Assim, ao contrário dos sistemas

urbanos, o volume de água armazenado nestes reservatórios pode variar significativamente, dadas as funções de regularização e de compensação dos mesmos e o peso que componentes como a precipitação, o escoamento superficial e a evaporação tenham durante a campanha de rega. No final da campanha é expectável que o reservatório se encontre em níveis mínimos. De acordo com as hipóteses acima apresentadas é necessário avaliar o contributo energético que reservatórios intermédios possam ter na energia fornecida ao sistema. As restantes componentes de energia fornecida (*i.e.*, por precipitação e por escoamento superficial) encontram-se ainda em desenvolvimento para os aproveitamentos hidroagrícolas.

Para aferição da energia de pressão para bombeamento devem ser consideradas todas as estações elevatórias sob responsabilidade da entidade gestora que foram previamente tidas em conta para o cálculo do volume entrado através de bombeamento no balanço hídrico. São classificadas como estações elevatórias de entrada todas as estações elevatórias que se localizam na fronteira do sistema, ou seja, que sejam responsáveis pela elevação da água que é fornecida ao sistema. As restantes estações elevatórias que se encontrem ao longo do sistema são classificadas como estações elevatórias intermédias. As expressões para cálculo da energia fornecida por bombeamento por estas duas vias encontram-se descritas nas equações seguintes e distingue-se pelo facto de nas estações elevatórias de entrada se considerar uma parcela adicional relativa à energia potencial associada à cota de entrada no sistema.

$$E_B^{'} = \sum_{i=1}^{n}\left[E_{fact_i} + \frac{\gamma}{3600}V_{bi}\left(H_{bi} - z_0\right)\right] \quad (3)$$

$$E_B^{''} = \sum_{i=1}^{n} E_{fact_i} \quad (4)$$

em que $E^{'}_B$ é a energia fornecida por bombeamento na estação elevatória de entrada, $E^{''}_B$ é a energia fornecida por bombeamento na estação elevatória intermédia, E_{fact_i} é a energia consumida pela estação elevatória, V_{bi} é o volume bombeado e H_{bi} é a carga hidráulica na conduta de compressão.

2.3 Energia associada a consumo autorizado e a perdas de água

Seguindo o racional do balanço hídrico (Alegre *et al.* 2004), a energia total subdivide-se em energia associada ao consumo autorizado, E_{CA}, e energia associada às perdas de água, E_{PA}. Na análise agregada, estas componentes são calculadas de acordo com as seguintes equações:

$$E_{CA} = E_T \frac{V_{CA}}{V_{AE}} \quad (5)$$

$$E_{PA} = E_T \frac{V_{PA}}{V_{AE}} \equiv E_T - E_{CA} \quad (6)$$

2.4 Energia entregue aos consumidores

A parcela da energia entregue aos consumidores (coluna C do Quadro 1) inclui a energia mínima e a energia supérflua. A energia mínima é um valor mínimo teórico que procura traduzir a energia necessária para abastecer os utilizadores do sistema sem considerar perdas de carga que ocorrem ao longo do sistema. A energia supérflua é o excesso de energia entregue aos consumidores relativamente à energia mínima requerida e requer a modelação hidráulica para a sua estimativa (Mamade *et al.*, 2017). Para a determinação da energia mínima a fornecer ao sistema, é necessário dividir o sistema em áreas de análise o mais homogéneas possíveis em termos de consumos e de pressões mínimas requeridas (Mamade *et al.*, 2017). Dentro de cada área de análise deve ser calculada a cota do centro de gravidade de consumos. Os dados a levantar em cada área de análise são volumes de consumo autorizado, V_{CAi}, cotas do centro de gravidade dos consumos, Z_{GCi}, e pressões mínimas requeridas, $P_{min\,i}$. O cálculo da energia mínima é dado pelo somatório das energias mínimas de todas as áreas de análise (n), como ilustrado na equação (7).

$$E_{\min} = \frac{\gamma}{3600}\sum_{i=1}^{n}\left[V_{CAi}\left(z_{CGi} + p_{\min i} - z_0\right)\right] \quad (7)$$

2.5 Energia dissipada associada a consumo

Em todos os sistemas existe dissipação de energia por perdas de carga, o que faz com que a energia associada ao consumo autorizado difira da energia entregue aos consumidores. A dissipação de energia na rede inclui as perdas de carga contínuas, pelo atrito que se gera com o escoamento em canais e condutas, e perdas de carga localizadas em órgãos de regulação e operação, tais como comportas e válvulas. Na componente de dissipação de energia em equipamentos encontra-se contemplada a dissipação de energia que ocorra em bombas e turbinas. O cálculo da energia dissipada associada a consumo autorizado em bombas, $E_{diss,B_{CA}}$, e

turbinas, $E_{diss,T_{CA}}$, é dado pelas equações (8) e (9), respetivamente.

$$E_{diss,B_{CA}} = \sum_{i=1}^{n}\left[E_{fact_i}\left(1-\eta_{Bi}\right)\frac{V_{CA}}{V_{AE}}\right] \quad (8)$$

$$E_{diss,T_{CA}} = \sum_{i=1}^{n}\left[E_{Ti}\left(1-\eta_{Ti}\right)\frac{V_{CA}}{V_{AE}}\right] \quad (9)$$

em que V_{AE} é o volume de água entrado no sistema, E_{Ti} é a energia fornecida pelo circuito hidráulico às turbinas, η_{Bi} é o rendimento da bomba e η_{Ti} é o rendimento da turbina. Como nota, energia dissipada devida a perdas de água em bombas, $E_{diss,B_{PA}}$, e em turbinas, $E_{diss,T_{PA}}$, obtém-se ponderando a respetiva energia total dissipada pela proporção entre o volume de perdas de água e o volume de água entrado, em analogia com as equação (8) e (9).

2.6 Energia recuperada

Dada a possibilidade da produção de energia nestes sistemas, surge uma componente relativa à contabilização da recuperação de energia, $E_{T_{CA}}$. Nesta componente deve ser contabilizada toda a produção de energia hidroelétrica a partir do volume de água entrado durante o período de referência, de modo a respeitar as condições de fronteira previamente estabelecidas.

$$E_{T_{CA}} = \sum_{i=1}^{n}\left(\gamma V_{T_i} H_{ui}\frac{V_{CA}}{V_{AE}}\right) \quad (10)$$

em que V_{T_i} é o volume turbinado e H_{ui} é a queda útil na turbina. Ponderando a energia total fornecida pelo circuito hidráulico às turbinas pela proporção entre o volume de consumo autorizado e o volume de água entrado obtém-se a energia recuperada associada a consumo e pela proporção entre o volume de perdas de água e o volume de água entrado a energia recuperada associada a perdas de água.

3. RESULTADOS

A metodologia apresentada foi aplicada a um aproveitamento hidroagrícola localizado na Região Hidrográfica do Tejo e Ribeiras do Oeste, cujo transporte de água é assegurado por uma rede em canal e a distribuição é assegurada por uma rede de canais e de condutas sujeitas a baixa pressão (*i.e.*, pressão na tomada entre 1 e 2 m c.a). A rede de transporte e distribuição totaliza mais de 300 km, beneficiando uma área superior a 16 000 ha. As principais culturas regadas são o arroz, o milho e o olival, constituindo este conjunto de culturas mais de 70% da área regada em 2017.

Em relação às fontes de energia que alimentam o sistema, existem três albufeiras que fornecem água à rede de transporte sem recurso a bombeamento e 13 estações elevatórias. Dentro das estações elevatórias existem captações a partir da linha-de-água para reforço de caudais no sistema, designadas por estações elevatórias de entrada, e outras cujas funções são a elevação de volumes para transposição de desníveis topográficos ao longo do sistema, designadas por estações elevatórias intermédias. Na Figura 1 apresenta-se um esquema simplificado do sistema principal de abastecimento neste caso estudo.

Incluem-se dentro da fronteira do sistema todas as infraestruturas destinadas ao fornecimento de água aos utilizadores do sistema e sobre as quais se pretende melhorar o seu desempenho. Os reservatórios e as estações elevatórias de entrada são elementos localizados na fronteira do sistema que termina no ponto de entrega de água aos regantes (*i.e.*, nos hidrantes). A cota mínima do sistema corresponde à menor de toda a rede, que no caso do sistema em análise coincide com a cota da estação elevatória localizada na zona mais a jusante (z0 = 4.0m). Determinada a cota mínima do sistema, procede-se ao cálculo das diversas

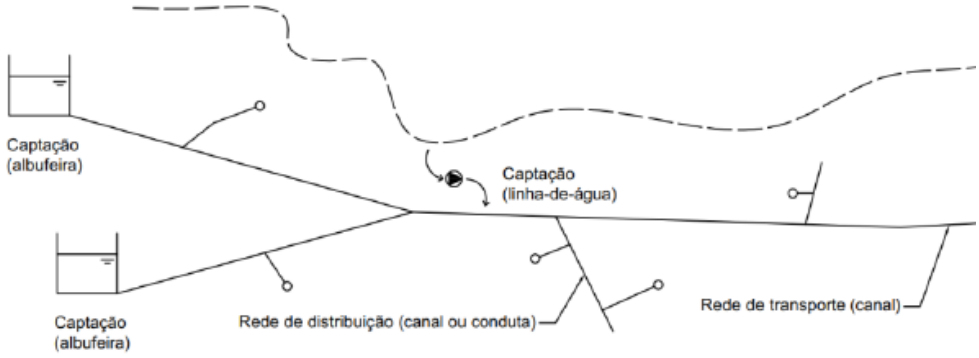

Figura 1. Representação esquemática do sistema principal de abastecimento do aproveitamento hidroagrícola em estudo.

componentes de energia fornecida ao sistema relativamente a esta cota de referência. O período de referência do balanço energético coincide com o período de referência estabelecido para cálculo do balanço hídrico (*i.e.*, o período da campanha de rega de 2017).

No cálculo da energia fornecida pelas albufeiras, e tendo-se verificado variações de nível durante a campanha na ordem dos 5% face ao valor médio, optou-se por considerar como cota de entrada no sistema o nível médio de água na albufeira durante o período de referência. Dado que a água entrada no sistema é maioritariamente proveniente das albufeiras, o peso da energia gravítica representa aproximadamente 96% da energia total fornecida ao sistema. A contribuição do reservatório intermédio não foi possível aferir dada a falta de informação relativa ao nível de água ao longo da campanha. Todavia, dada a reduzida capacidade de armazenamento do reservatório em questão e a cota a que se encontra, a contribuição para a energia fornecida será bastante reduzida (Cunha *et al.*, 2019). Neste aproveitamento, a energia fornecida por bombeamento é responsável por apenas cerca de 3% da energia fornecida ao sistema, sendo a maior proporção de energia por bombeamento devida às estações elevatórias intermédias, para transposição de desníveis topográficos ao longo do sistema, e não às estações elevatórias para bombeamento de água entrada.

Apresenta-se na Figura 2 o consumo de energia obtido através da fatura de energia e o rendimento de cada estação, distinguindo-se as estações elevatórias de entrada (EE1 a EE6) das estações elevatórias intermédias (EE7 a EE13).

As estações elevatórias assinaladas com (*) são estações nas quais os grupos eletrobomba instalados já ultrapassaram o seu período de vida útil, definido de acordo com Covas *et al.* (2018), e nas quais se verificam também baixos rendimentos, em geral inferior a 40%. De acordo com os critérios mencionados, identificam-se estas estações como sendo prioritárias em termos de reabilitação. Salienta-se ainda que os volumes bombeados nas estações elevatórias de entrada EE3, EE4 e EE6 foram obtidos por estimativa, o que conduziu a valores de rendimento pouco plausíveis que não foram representados. Recomenda-se que no futuro estes locais sejam equipados com medição de caudal. Importa também referir que os consumos de energia indicados foram obtidos a partir das faturas de energia elétrica e resultam da medição do consumo na estação elevatória, o que nalguns casos não inclui só os grupos eletrobomba, mas também outros equipamentos que se encontrem instalados (e.g., equipamentos auxiliares, iluminação, ventilação ou limpa-grelhas). Sempre que o consumo destes outros equipamentos não seja desprezável, este deve ser individualizado do consumo para bombeamento.

A energia associada a consumo autorizado e a perdas de água, calculados de acordo com a equações (5) e (6), representam aproximadamente 65% e 35% da energia fornecida, respetivamente, o que é indicativo de um elevado peso das perdas água na eficiência deste sistema. Para o cálculo da energia mínima necessária para satisfazer os consumidores (equação 7) foi necessário definir áreas de análise. Nesse sentido, as parcelas regadas com água do aproveitamento encontram-se agrupadas por blocos de rega, tendo sido adotadas as mesmas áreas para o cálculo da energia mínima. A entidade gestora fornece água aos seus utilizadores nos vários blocos de rega a baixa pressão (≤ 1-2 m c.a.), ficando a cargo do utilizador assegurar as condições necessárias para o funcionamento do sistema de rega que tenha instalado.

Relativamente à energia recuperada a partir da

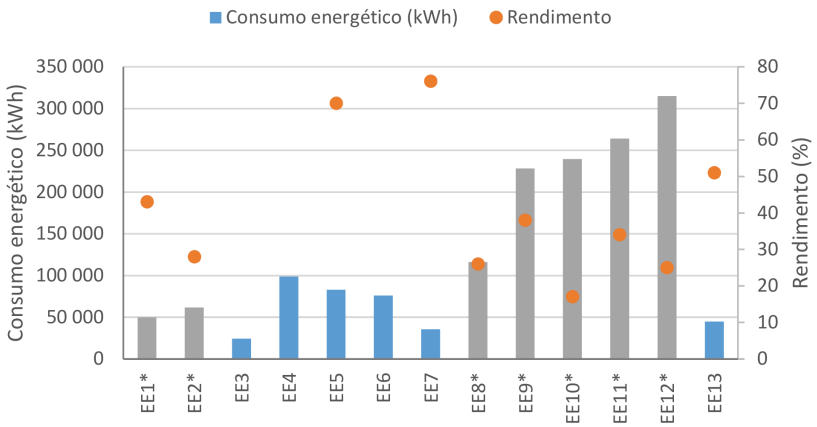

Figura 2. Consumo energético nas estações elevatórias durante a campanha de 2017.

energia fornecida ao sistema, a existência de três centrais hidroelétricas (CH1, CH2 e CH3) no sistema permite a recuperação de parte da energia gravítica em energia elétrica, sendo contabilizada no balanço energético apenas a recuperação de energia que ocorra de acordo com as condições de fronteira previamente definidas. Para o cálculo da energia recuperada nas três centrais foram consultadas as faturas de energia vendida durante o período da campanha de rega. Na Figura 3 apresentam-se os valores de energia recuperada durante a campanha de rega de 2017 e do ano anterior.

De acordo com a informação apresentada na Figura 3, a recuperação de energia neste sistema é expressiva, mas pode variar significativamente de uma campanha para outra. Esta variação deve-se sobretudo à variação interanual das disponibilidades hídricas. De facto, no ano de 2017, em consequência de ter sido um ano onde a precipitação média na zona de influência do aproveitamento hidroagrícola foi inferior à do ano anterior ($\bar{P}_{2016}$ = 658 mm; $\bar{P}_{2017}$ = 422 mm), as disponibilidades em albufeira durante a campanha foram menores e consequentemente a produção de energia. No que se refere ao rendimento, em 2017 estes foram variáveis entre as três estações hidroelétricas (CH1=66%, CH2=48%, CH3=60%), o que pode ser devido em parte também à elevada variabilidade nas disponibilidades hídricas.

O cálculo do balanço energético foi realizado adotando um balanço simplificado, uma vez que não existia um modelo hidráulico do sistema, não tendo sido calculadas as componentes que requerem modelação hidráulica (Quadro 3). A componente de energia dissipada na rede engloba todas a componentes de energia associada a consumo autorizado que requerem modelação hidráulica, ou seja, a energia supérflua e a dissipação da energia associada a consumo que ocorre em condutas, canais, válvulas e comportas.

Quadro 3. Balanço energético simplificado aplicado ao aproveitamento hidroagrícola em estudo em 2017.

Energia fornecida 44 693 MWh	**Energia associada a consumo autorizado 29 275 MWh (65%)**	Energia mínima: 7 327 MWh (16%)
		Energia dissipada na rede 14 144 MWh (32%)
		Energia dissipada em equipamentos 3 850 MWh (9%)
		Energia recuperada 6 036 MWh (14%)
	Energia associada a perdas de água 15 417 MWh (35%)	Energia dissipada por perdas de água 13 335 MWh (29%)

Os resultados obtidos evidenciam duas componentes principais em termos de energia dissipada no sistema: a energia dissipada na rede, que representa 32% da energia fornecida e é devida a energia supérflua, a perdas de carga nas condutas e em órgãos de controlo; e a energia dissipada por perdas de água, que representa 29% da energia fornecida. Estes resultados indicam que é necessário melhorar o conhecimento sobre as componentes de energia dissipada na rede, para especificar melhor as medidas de melhoria (e.g., reabilitação de canais com elevadas perdas de carga). Medidas para controlo de perdas de água (e.g., reabilitação da rede, automatização do controlo operacional) também podem contribuir significativamente para uma maior eficiência energética deste sistema. Embora a dissipação de energia em equipamentos de bombeamento e turbinas seja apenas 9% da energia fornecida, o estudo identificou equipamentos prioritários para reabilitação e necessidades de melhorar a monitorização de caudais nalgumas estações elevatórias. A componente de recuperação de energia que representou 14% da energia fornecida em 2017, tem um impacto relevante na sustentabilidade económica e energética da entidade gestora.

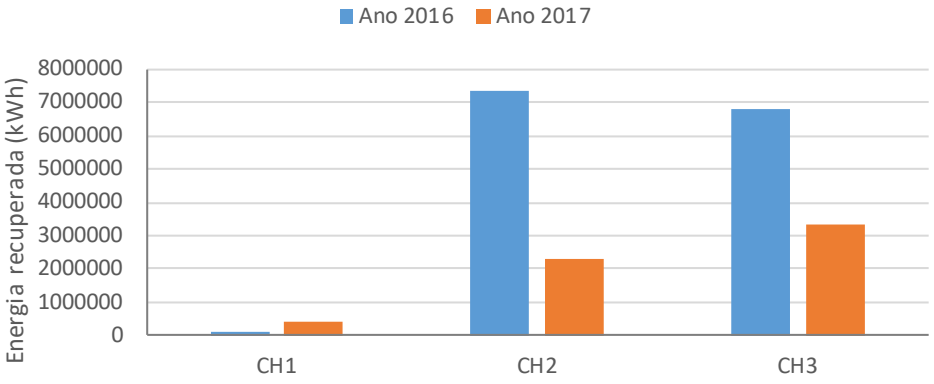

Figura 3. Recuperação de energia durante as campanhas de 2016 e 2017.

CONCLUSÕES

A metodologia apresentada para avaliação da eficiência energética em aproveitamentos hidroagrícolas, baseada na abordagem existente para os sistemas urbanos de abastecimento de água, foi testada num sistema misto, composto por canais e condutas sujeitas a baixa pressão, tendo sido possível efetuar um diagnóstico global. Com base nos resultados obtidos, a redução das perdas de água constitui-se como um caminho crítico para a melhoria da eficiência energética. Apesar de alguns equipamentos de bombeamento não se encontrarem nas melhores condições de funcionamento, a energia dissipada pelos mesmos é relativamente reduzida quando em comparação com as restantes componentes contempladas no balanço energético. Estes resultados evidenciam o potencial de prosseguir com a aplicação e consolidação da metodologia proposta noutros aproveitamentos hidroagrícolas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento do projeto de investigação HORTO AQUAM SALUTAREM, PTDC/HAR-HIS/28627/2017 e ao Programa Grupos Operacionais – Operação – 1.0.1 – do PDR2020 pelo financiamento do Projeto AGIR – Sistema de Avaliação da Eficiência do Uso da Água e da Energia em Aproveitamentos Hidroagrícolas.

REFERÊNCIAS

Abadia, R., Rocamora, M. C., Corcole, J. I., Ruiz-Canales, A., Maryniez-Romero, A. E Moreno, M. A. (2010) - Comparative analysis of energy efficiency in water users associations. Spanish Journal of Agricultural Research, 8 (S2), pp. 134-142.

Abadia, R., Rocamora, M. C., Ruiz, A., Puerto, H. (2008) - Energy efficiency in irrigation distribution networks I: Theory. Byosystems Engineering, 101, pp. 21-27.

Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J., Parena, R. (2004) - Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água, Guia Técnico n.º 1, ERSAR, LNEC.

APA (2012) - Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água - Implementação 2012-2020, APA.

Cabrera, E., Pardo, M., Cobacho, R., Cabrera Jr., E. (2010) - Energy audit of water networks. Journal of Water Resources Planning and Management, 136 (6).

Covas, D., Cabral, M. Pinheiro, A., Marchionni, V., Antunes, S., Lopes, N., Mamouros, L., Brôco, N. (2018) - Custos de construção de infraestruturas associadas ao ciclo urbano da água, Guia Técnico n.º 23, ERSAR.

Cunha, H., Loureiro, D., Sousa, G., Covas, D., Alegre, H. (2019) - A comprehensive water balance methodology for collective irrigation systems, 223 (20), Agricultural Water Management.

DGADR (2014) - Estratégia para o regadio público 2014-2020, Lisboa: Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Regional.

DGADR (2017) - Sistema de Informação do Regadio, Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural, Lisboa.

DSC (2019) - Programas Operacionais Ações Ambientais - Ação 7.1, Direção de Serviços de Competitividade.

Mamade, A., Loureiro, D., Alegre, H. & Covas, D. (2017) - A comprehensive and well-tested energy balance for water supply systems, 14(8), Urban Water Journal.

Moreno, M., Ortega, J. F., Córcoles, J. I., Martinez, A., Tarjuelo, J. M (2010) - Energy analysis of irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency, Irrigation Science, 28 (5) pp. 445-460.

Pardo, M., Manzano, J., Cabrera, E. & García-Serra, J. (2013) - Energy audit of irrigation networks. Biosystems Engineering, 115 (1), pp. 89-101.

Resolução do Conselho de Ministros nº133/2018, Diário da República, 1.ª série, n.º 197, 12 de outubro de 2018.

Rocamora, C., Vera, J., Abadía, R. (2013) - Strategy for Efficient Energy Management to solve energy problems in modernized irrigation: analysis of the Spanish case. Irrigation Sciences, Volume 31, pp. 1139-1158.

Tarjuelo, J. M., Rodriguez-Diaz, J. A., Abadía, R., Camacho, E., Rocamora, C., Moreno, M. A. (2015) - Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. Agricultural Water Management, Volume 162, pp. 67-77.