



# AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA POTÊNCIA DE UMA RODA HIDRÁULICA SUBAXIAL

Guilherme Macara<sup>1</sup>, Miguel Capelo<sup>2</sup>, Dídia Covas<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> CERIS, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal.

<sup>1</sup> [guilherme.d.macara@tecnico.ulisboa.pt](mailto:guilherme.d.macara@tecnico.ulisboa.pt)

<sup>2</sup> [miguelcapelo@tecnico.ulisboa.pt](mailto:miguelcapelo@tecnico.ulisboa.pt)

<sup>3</sup> [didia.covas@tecnico.ulisboa.pt](mailto:didia.covas@tecnico.ulisboa.pt)

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo a análise experimental da potência mecânica de uma roda hidráulica subaxial. Construiu-se uma instalação experimental com uma roda de água com 0,5 m de diâmetro instalada num canal horizontal com 0,11 m de largura, 0,20 m de altura e 1,5 m de comprimento. A instalação está equipada com um caudalímetro ultrassónico, dois transdutores de pressão, um sensor de binário e um sensor de velocidade de rotação para realização de ensaios com vários caudais e velocidades de rotação. O sistema de aquisição de dados é composto por duas placas de aquisição de dados da National Instruments™ associadas a um computador portátil. Foram realizados ensaios em rodas com número variável de pás e com pás planas e curvas. Determinaram-se as curvas características do binário, de potência e de rendimento em função da velocidade de rotação para vários caudais. A análise dos resultados obtidos mostrou que (i) os rendimentos mecânicos obtidos (55-65%) são da mesma ordem de grandeza dos determinados por outros autores e tendem a aumentar com o número de pás, (ii) a potência mecânica aumenta com o número de pás, e (iii) a curvatura da pá analisada piora o rendimento da roda.

Palavras-Chave

Roda hidráulica, potência, rendimento.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia hídrica é a maior fonte de energia renovável [1], armazenada em reservatórios ou albufeiras, estando sempre disponível para fazer face às pontas de consumo de eletricidade e sendo muito mais fiável do que as fontes eólica e solar que apresentam variabilidade diária e requerem capacidade adicional de armazenamento (e.g. albufeiras ou reservatórios) [2]. No entanto, nos últimos anos, houve apenas um pequeno aumento na geração de energia hidroelétrica, principalmente porque os locais que reúnem as condições para um grande aproveitamento desta energia já se encontram em exploração [3]. As pequenas centrais hidroelétricas são, hoje, uma solução muito procurada em particular quando instaladas em infraestruturas existentes, face aos baixos investimento envolvidos e aos menores impactos ambientais [4]. Muitas vezes, a utilização de uma tecnologia simples (e.g. uma turbina hélice ou bomba a funcionar como turbina) associada a pequenas obras resulta numa alternativa sustentável com rápida recuperação dos investimentos, em particular em zonas rurais [5]. Em Portugal, estima-se que a energia total anual produzida pelas microhídricas varie entre 60 e 90 GWh [6].

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

As atuais preocupações com as mudanças climáticas, o meio ambiente e a redução das emissões de CO<sub>2</sub> têm levado as entidades gestoras dos serviços de água e as indústrias a melhorar o uso da água e da energia em suas atividades. Muitas medidas de melhoria da eficiência energética têm sido adotadas em equipamentos e processos, embora muito pouca atenção tenha sido dada à recuperação de energia nas infraestruturas existentes de água e saneamento, em particular, quando associadas a elevados caudais e baixas quedas e que podem ser consumidas diretamente por essas instalações. A instalação de tecnologias de recuperação de energia hídrica tem múltiplos benefícios para as infraestruturas e suas entidades gestoras, permitindo, assim, com a dissipação de energia excessiva, uma melhor gestão de pressões e controlo do caudal e, com a recuperação dessa energia, a geração de eletricidade para autoconsumo ou para injeção do excedente na rede elétrica nacional, reduzindo a fatura energética. Apesar de existirem inúmeros casos de recuperação energética no setor da água e da rega a nível mundial, existe ainda um elevado potencial para a instalação microhídricas para a recuperação da energia em excesso de sistemas de abastecimento de água [7-8] e sistemas de águas residuais [9-11].

Existem várias tecnologias de recuperação de energia hídrica disponíveis no mercado [12]. Classificam-se em turbinas de ação (ou de impulsão) e turbinas de reação, consoante a roda seja atuada, ou não, pelo escoamento à pressão atmosférica, respetivamente. A seleção da solução mais adequada depende do valor e da variação temporal do caudal e da queda disponível, do modo de operação dos sistemas, das condições locais de instalação e do custo da solução. As soluções adotadas, tipicamente no mercado das mini-hídricas, para quedas elevadas são as turbinas Pelton (40-800 m), Francis (7-120 m) e Ossberger (até 200 m). Para caudais elevados e quedas médias, usam-se turbinas Kaplan e hélice e, em alguns casos, as turbinas Ossberger [13]. Para quedas baixas, recorre-se ao parafuso de Arquimedes invertido [14-17], rodas de água [18-19] ou turbinas de vórtice [20].

As rodas de água são uma das soluções recomendadas para quedas baixas (<2-3 m). As primeiras rodas hidráulicas foram desenhadas no século XIX por Sagebien [21] e Zuppinger [22]. Posteriormente, foram desenvolvidos vários trabalhos experimentais e numéricos para analisar o comportamento das mesmas. Muller estudou experimentalmente rodas de águas axiais [23-24]. Quaranta, no âmbito do seu trabalho de doutoramento[3], desenvolveu um estudo experimental muito completo sobre a utilização de vários tipos de rodas, designadamente subaxiais (undershot)[25], axiais (breastshot)[26-29] e sobreaxiais (overshot)[30]. Outros autores desenvolveram estudos numéricos de rodas de água, recorrendo a simulação computacional avançada [31-32].

A verdade é que ainda não existem soluções de rodas de água disponíveis mercado, pelo que o IST decidiu iniciar um estudo experimental complementar com os existentes para desenhar uma roda de água subaxial, procurando analisar o efeito do número de pás, da curvatura das pás e da configuração do fundo no rendimento da roda.

## **2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

Construiu-se uma instalação experimental no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos, do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico. A instalação é constituída por uma pequena roda de água com cerca de 0,5 m de diâmetro instalada num canal horizontal de acrílico com seção transversal retangular com 0,11 m de largura, 0,20 m de altura e 1,5 m de comprimento (Figura 1). O canal é alimentado

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

a partir de um reservatório inferior com 120 L através de uma bomba centrífuga (modelo Filtra N 24D da KSBTM), com potência nominal igual a 1,8 kW ( $Q_N=8$  L/s;  $H_N=19$  m) e de uma conduta elevatória de polietileno de alta densidade (HDPE) de classe de pressão PN10, com comprimento de 3,60 m e diâmetro nominal de 40 mm (diâmetro interno de 34 mm). A água que sai do canal retorna ao reservatório inferior.

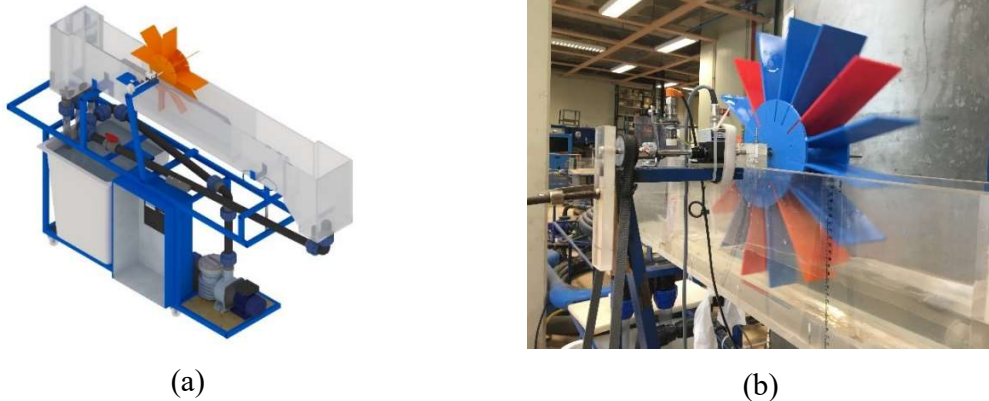


Figura 1. Instalação experimental: (a) desenho 3D da instalação; (b) foto da roda.

A instalação está equipada com instrumentação diversa para medir parâmetros hidráulicos do escoamento e parâmetros mecânicos associados ao movimento de rotação da roda, incluindo um caudalímetro ultrassônico não intrusivo, dois transdutores de pressão para medir a profundidade da água a montante e a jusante, um sensor de binário e um sensor de velocidade de rotação (Figura 2). As medições são adquiridas utilizando um sistema de aquisição de dados constituído por placas da National Instruments™, um computador portátil e um software de interface gráfico desenvolvido em LabView.

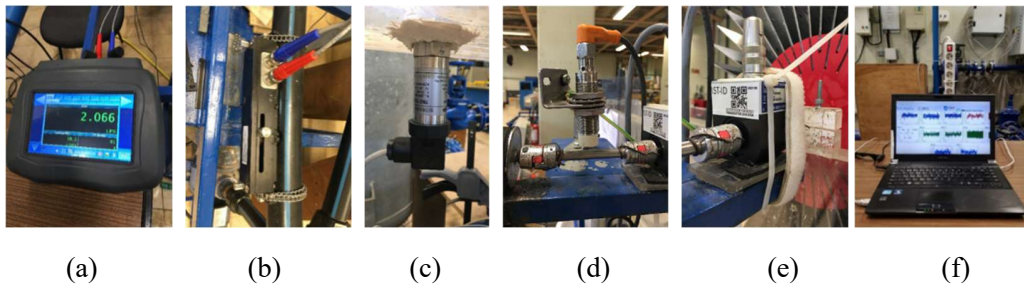


Figura 2. Instrumentação: (a-b) caudalímetro ultrassônico; (c) sensor de pressão; (d) sensor de velocidade de rotação; (e) binário; (f) Computador e software de interface.

Foram realizadas duas campanhas de ensaios. A campanha I compreendeu os ensaios de quatro rodas com pás planas, com diferentes números de pás (i.e. 16, 24, 36 e 48). A campanha II incidiu apenas no teste de uma roda com 24 pás curvas. Foram utilizadas rodas com dimensões idênticas, construídas a partir do mesmo núcleo (impresso em material polimérico numa impressora 3D), adicionando ou retirando pás. A rodas têm um diâmetro de 0,50 m, uma largura de 0,105 m e uma espessura de 0,002 e 0,003 m nas campanhas I e II, respetivamente, e são colocadas a uma distância de 0,04 a 0,05 m do fundo do canal. Todas as rodas passaram por uma verificação para garantir que suas dimensões eram semelhantes.

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

A realização dos ensaios experimentais teve como objetivo determinar as curvas características das rodas testadas, incluindo o torque,  $T$ , a potência mecânica,  $P$ , e a eficiência,  $\eta$ , em função do caudal,  $Q$ , da velocidade de rotação,  $N$ , e do número de pás. O veio da roda foi equipado com um sistema de travagem para controlar a velocidade de rotação, aplicando um binário resistente recorrendo a pesos ajustáveis. Este binário em conjunto com o caudal escoado no canal estabelece um equilíbrio de profundidades de água a montante e a jusante, que, por sua vez, determina a velocidade de rotação da roda.

Foram realizados um total de 269 ensaios experimentais, sendo 48 ensaios para cada roda da campanha I, e 26 ensaios para a roda da campanha II. Na campanha I, foram ensaiados seis caudais diferentes para cada uma das quatro rodas e na campanha II foram analisados apenas quatro caudais. Para cada caudal e roda, são realizados testes, no mínimo, para sete velocidades de rotação entre duas situações limites: a situação de roda livre (15-21 r.p.m.), onde não é aplicado nenhum binário resistente no veio da roda, e a situação correspondente à altura de água máxima no canal igual a 0,20 m (3-8 r.p.m.). Foram excluídos da análise todos ensaios em que: (i) a altura de água ultrapassasse a altura das pás (0,16 m), i.e., escoasse por dentro da roda; (ii) ensaios em que o binário atingisse o valor máximo do sensor (2 N.m).

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A título exemplificativo, apresenta-se na Figura 3, os resultados dos ensaios realizados para uma roda com 24 pás planas em termos de curvas de potência mecânica e de rendimento mecânico em função da velocidade de rotação (3-22 r.p.m) para seis caudais distintos (1,83; 2,23; 2,57; 2,91; 3,24; 3,56 L/s). A análise desta figura permite tecer as seguintes conclusões.

O binário mecânico ( $T$ ) diminui com o aumento da velocidade de rotação ( $N$ ) e com o aumento do caudal (Figura 3a). As velocidades de rotação máximas (15-22 r.p.m) correspondem a binários quase nulos. As velocidades de rotação mínimas (4-10 r.p.m.) correspondem aos binários mais elevados (1,75-2 N.m), não tendo sido possível medir valores acima de 2 N.m, uma vez que este era o limite do sensor. Acresce que, para os caudais mais elevados, o binário máximo medido foi 1,75 N.m, uma vez que a altura de água a montante era superior à altura da pá, e, portanto, a água circulava por dentro na roda.

A potência mecânica (obtida por  $P = \omega T$ ) diminui com o aumento da velocidade de rotação ( $N=2\pi\omega/60$ ), para cada caudal (Figura 4b), uma vez que a diminuição do binário resistente ( $T$ ) não é compensada pelo aumento da velocidade de rotação da roda ( $N$ ). Por outro lado, a potência aumenta com o caudal para uma mesma velocidade de rotação, uma vez que, para maiores caudais, registam-se maiores altura de água a montante da roda e alturas similares a jusante, e, conseqüentemente, maiores forças de pressão a provocar binário mecânico. Para o menor caudal ensaiado (1,83 L/s) regista-se um pico máximo de potência para uma velocidade de rotação superior à mínima ensaiada, valor este que não se observa nas restantes curvas. Seria expectável que a curva da potência tivesse um valor máximo (pico) para todos os caudais e uma potência nula para a situação de roda parada ( $N=0$ ).

A curvas do rendimento com a velocidade de rotação (Figura 4c), para cada caudal, apresentam um valor máximo (55-62%), para velocidades de rotação entre 8-12 r.p.m.. O rendimento máximo aumenta com o caudal, sendo o valor máximo observado 62%. Para velocidades de rotação inferiores a 6 r.p.m., o rendimento da roda tende a ser

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

independente do caudal uma vez que a turbulência do escoamento a montante da roda dissipa muita energia e reduz o rendimento, sendo menos evidentes as diferenças de eficiência.

Os ensaios realizados para as restantes rodas de pás planas (i.e. 16, 36 e 48) mostram resultados semelhantes conforme se pode observar na Figura 4 correspondente à roda com 48 pás planas. Comparando os resultados das duas rodas (24 e 48 pás), regista-se uma tendência para o binário, a potência e o rendimento aumentarem ligeiramente com o número das pás para o mesmo caudal e a mesma velocidade de rotação. Contudo, para a roda de 48 pás verifica-se uma redução de rendimento máximo com o aumento do caudal, uma sua vez, que o aumento do caudal combinado com o aumento do número de pás induz maior a turbulência no escoamento e, portanto, maiores perdas.

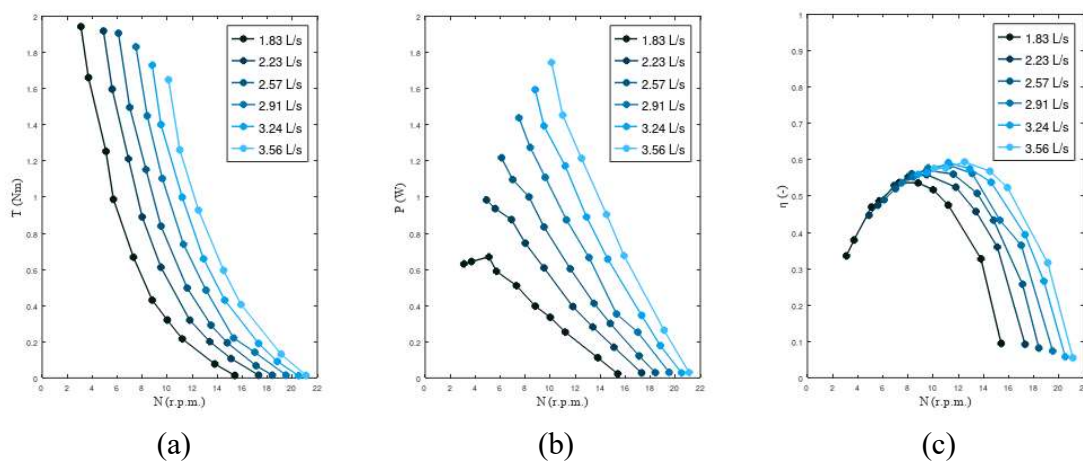


Figura 3. Roda com 24 pás planas: (a) binário, (b) potência e (b) rendimento em função da velocidade de rotação, para diferentes caudais.

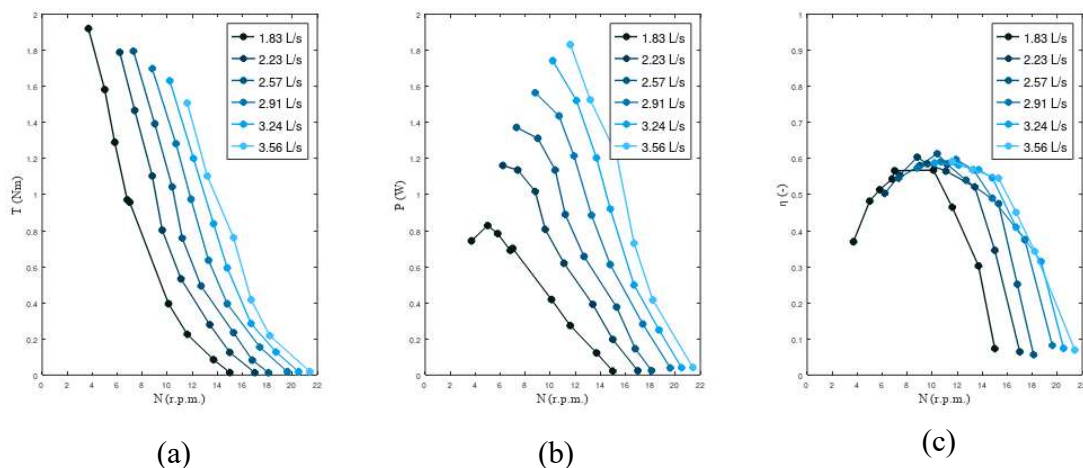


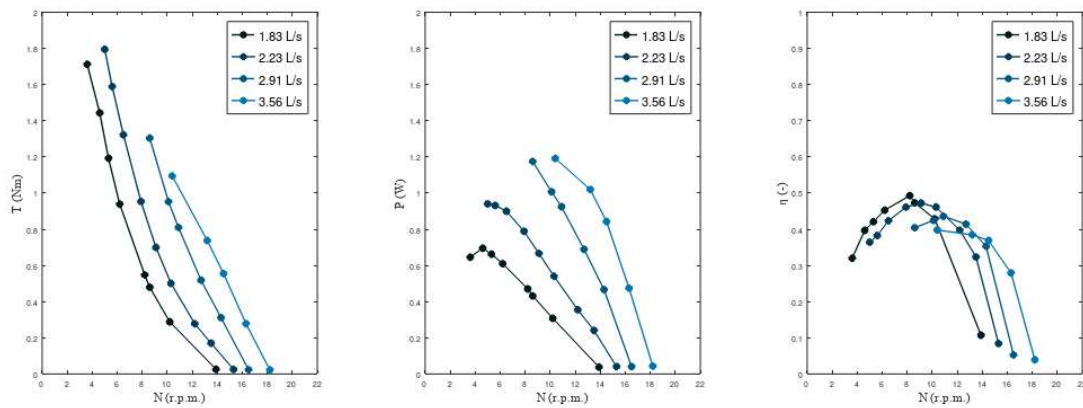
Figura 4. Roda com 48 pás planas: (a) binário, (b) potência e (c) rendimento em função da velocidade de rotação, para diferentes caudais.

Apresenta-se na Figura 5 os resultados obtidos para a roda com 24 pás curvas. Observa-se que o binário mecânico e, por consequência, a potência e o rendimento, diminuem relativamente à roda homóloga de pás planas (Figura 3) para as mesmas condições de caudal

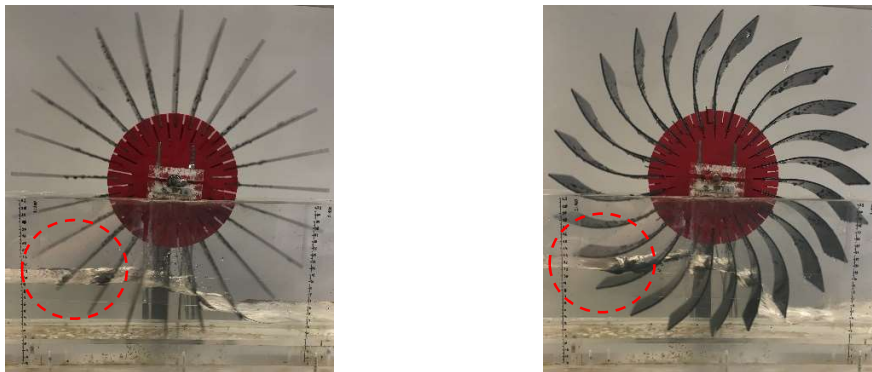
SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

e velocidade de rotação. Este resultado deve-se ao aumento da turbulência do escoamento a montante induzido pela imersão das pás na água. A extremidade de cada pá curva embate na superfície da água com um ângulo de ataque muito reduzido, contrariamente à roda de pás planas (compare-se Figura 6a,b). No caso de a pá ter outra curvatura ou forma, este fenómeno pode não se observar e a roda pode ser mais eficiente.



(a) (b) (c)  
 Figura 5. Roda com 24 pás curvas: (a) binário, (b) potência e (c) rendimento em função da velocidade de rotação, para diferentes caudais.



(a) (b)  
 Figura 6. Imagem das rodas com (a) 24 pás planas e (b) 24 pás curvas.

4. CONCLUSÕES

Construiu-se uma instalação experimental para o estudo da potência mecânica e do rendimento de rodas hidráulicas subaxiais com diferentes números e curvaturas de pás. Ensaíram-se quatro rodas de pás planas (16, 24, 36 e 48 pás) e uma de pás curvas (24 pás). Determinaram-se as curvas do binário resistente, potência mecânica e rendimento em função da velocidade de rotação para diferentes caudais. Os resultados obtidos mostram que o binário, a potência e o rendimento aumentam, de uma forma geral, com o número de pás, para as mesmas condições de escoamento (caudal) e de velocidade de rotação. A curva de rendimento com a velocidade de rotação tem um valor máximo (ótimo) que varia com o caudal: na roda com 24 pás planas, o rendimento é máximo ( $\eta=60\%$ ) para  $Q=3,56$  L/s e  $N=14$  r.p., enquanto que, na roda com 48 pás planas, o rendimento é máximo ( $\eta=62\%$ ) para  $Q=2,57$  L/s e  $N=10$  r.p.m.

Em relação ao efeito da curvatura das pás, verifica-se que a roda ensaiada com pás curvas é menos eficiente do que a roda homóloga de pás planas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento UIDB/04625/2020 ao CERIS (Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability).

## REFERÊNCIAS

- [1] Association, I.H. (2019). *Hydropower status report. Sector trends and Insights*.
- [2] Bódis, K., F. Monforti, and S. Szabó (2014). *Could Europe have more mini hydro sites? A suitability analysis based on continentally harmonized geographical and hydrological data*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **37**: p. 794-808.
- [3] Quaranta, E. (2017). *Investigation and optimization of the performance of gravity water wheels. PhD thesis*.
- [4] Elbatran, A., O. Yaakob, Y.M. Ahmed, and H. Shabara (2015). *Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote areas: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **40–50**.
- [5] Laghari, J.A., H. Moklis, A.H.A. Bakar, and H. Mohammad (2013). *A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **20**: p. 279-293.
- [6] Mitrovic, D., M.C. Chacón, A.M. García, J.G. Morillo, J.A.R. Diaz, H.M. Ramos, K. Adeyeye, A. Carravetta, and A. McNabola (2021). *Multi-Country Scale Assessment of Available Energy Recovery Potential Using Micro-Hydropower in Drinking, Pressurised Irrigation and Wastewater Networks, Covering the EU*. **13(7)**: p. 899.
- [7] Delgado, J., J.P. Ferreira, D.I.C. Covas, and F. Avellan (2019). *Variable speed operation of centrifugal pumps running as turbines. Experimental investigation*. *Renewable Energy*. **142**: p. 437-450.
- [8] Monteiro, L., J. Delgado, and D. Covas (2018). *Improved Assessment of Energy Recovery Potential in Water Supply Syst. with High Demand Variation*. *Water*. **10(6)**.
- [9] Saket, R.K. (2013). *Design aspects and probabilistic approach for generation reliability evaluation of MWW based micro-hydro power plant*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **28**: p. 917-929.
- [10] Jorge, C., M.d.C. Almeida, and D. Covas (2021). *Energy Balance in Wastewater Systems with Energy Recovery: A Portuguese Case Study*. *Infrastructures*. **6(10)**.
- [11] Ramos, H., C. Teyssier, I. Samora, and A.J. Schleiss (2013). *Energy recovery in SUDS towards smart water grids: A case study*. *Energy Policy*. **62**: p. 463-472.
- [12] Breeze, P. (2018). *Hydropower*. Elsevier, London, U.K.
- [13] ESHA and Mhylab (2010). *Energy recovery in existing infrastructures with small hydropower plants. Multipurpose schemes – Overview and examples*.
- [14] Syuhada, A., M.I. Maulana, and I. Syam (2019). *Design and Performance of Archimedes Single Screw Turbine as Micro Hydro Power Plant with Flow Rate Debit Variations (Case Study in Air Dingin, Samadua - South Aceh)*. *Jurnal Inotera*. **4(1)**.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [15] Waters, S. and G.A. Aggidis (2015). *Over 2000 years in review: Revival of the Archimedes Screw from Pump to Turbine*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **51**: p. 497-505.
- [16] Dellinger, G., P.A. Garambois, M. Dufresne, A. Terfous, J. Vazquez, and A. Ghenaim (2016). *Numerical and experimental study of an Archimedean Screw Generator*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **49**.
- [17] Simmons, S., G. Dellinger, M. Lyons, A. Terfous, A. Ghenaim, and W.D. Lubitz (2021). *Effects of Inclination Angle on Archimedes Screw Generator Power Production with Constant Head*. Journal of Hydraulic Engineering. **147**(3).
- [18] Cleynen, O., S. Engel, S. Hoerner, and D. Thévenin (2021). *Optimal design for the free-stream water wheel: A two-dimensional study*. Energy. **214**.
- [19] Quaranta, E. (2018). *Stream water wheels as renewable energy supply in flowing water: Theoretical considerations, performance assessment and design recommendations*. Energy for Sustainable Development. **45**: p. 96-109.
- [20] Rahman, M.M., J.H. Tan, M.T. Fadzlita, and A.R. Wan Khairul Muzammil (2017). *A Review on the Development of Gravitational Water Vortex Power Plant as Alternative Renewable Energy Resources*. IOP Conf. Series: Materials Science and Eng.. **217**.
- [21] Sagebien, M. (1866). *Expériences sur la roue hydraulique Sagebien*. Librairie Scientifique, Industrielle et Agricole, Paris.
- [22] Quaranta, E. and G. Müller (2018). *Sagebien and Zuppinger water wheels for very low head hydropower applications*. Journal of Hydraulic Research. **56**(4): p. 526-536.
- [23] Muller, G. and C. Wolter (2004). *The breastshot waterwheel: design and model tests*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, The breastshot waterwheel: design and model tests.
- [24] Muller, G. and K. Kauppert (2004). *Performance characteristics of water wheels*. Journal of Hydraulic Research. **42**(5): p. 451–460.
- [25] Quaranta, E. and G. Müller (2019). *Optimization of undershot water wheels in very low and variable flow rate applications*. Journal of Hydr. Research. **58**(5): p. 845-849.
- [26] Quaranta, E. and R. Revelli (2015). *Performance characteristics, power losses and mechanical power estimation for a breastshot water wheel*. Energy. **87**: p. 315-325.
- [27] Quaranta, E. and R. Revelli (2016). *Optimization of breastshot water wheels performance using different inflow configurations*. Renewable Energy. **97**: p. 243-251.
- [28] Vidali, C., S. Fontan, E. Quaranta, P. Cavagnero, and R. Revelli (2016). *Experimental and dimensional analysis of a breastshot water wheel*. Journal of Hydraulic Research. **54**(4): p. 473-479.
- [29] Quaranta, E. and R. Revelli (2017). *Hydraulic Behavior and Performance of Breastshot Water Wheels for Different Numbers of Blades*. Journal of Hydraulic Engineering. **143**(1).
- [30] Quaranta, E. and R. Revelli (2015). *Output power and power losses estimation for an overshoot water wheel*. Renewable Energy. **83**: p. 979-987.
- [31] Quaranta, E. and R. Revelli (2017). *CFD simulations to optimize the blade design of water wheels*. Drinking Water Engineering and Science. **10**(1): p. 27-32.
- [32] Castro-García, M., J.I. Rojas-Sola, and E. de la Morena-de la Fuente (2015). *Technical and functional analysis of Albolafia waterwheel (Cordoba, Spain): 3D modeling, computational-fluid dynamics simulation and finite-element analysis*. Energy Conversion and Management. **92**: p. 207-214.