

Levadas e moinhos de água na ilha da Madeira – Utilização da água com fins múltiplos - gestão históricaⁱ

Levadas and watermills on the island of Madeira - Multi-purpose water use – historical management

Hartmut WITTENBERG^{1,*}, Christiane RHODE²

* Autor para a correspondência: wittenberg@uni.leuphana.de

¹ Prof. Dr. jub., Hidrologia e Engenharia Hidráulica, Leuphana Universität Lüneburg, Universitätsallee 1, C13.115, D21335 Lüneburg, Alemanha

² Eng^o civil, SHW-Consultores, Oetzendorf 35, D29599 Weste, Alemanha

RESUMO: Há seiscentos anos, Portugal tomou posse da ilha da Madeira, então desabitada e densamente arborizada. Enquanto a precipitação é maior nas zonas altas do Norte, o sul subtropical é mais adequado para a agricultura irrigada. O cultivo da cana e a produção de açúcar, além da queima de florestas, mudaram a ilha nos primeiros cem anos, devido ao alto consumo de água e energia. Os colonos construíram seus próprios canais chamados levadas para desviar a água dos córregos e fontes para seus campos. Quando o estado assumiu o controlo, levadas de mais de 100 km de extensão foram construídas para fornecer água de norte a sul. Técnicas de escavação de canais em topografia rugosa e em formações rochosas íngremes foram desenvolvidas. Nas secções íngremes das levadas construíram moinhos de água, onde convertiam a energia de queda em energia hidráulica útil para cortar madeira, moer cereais e produzir açúcar. Os moinhos eram acionados por rodas de água a jato livre horizontais rodízio, antecessoras das modernas turbinas Pelton, com quedas entre 4 e 35 m. Construídos e operados desde a colonização, os moinhos foram abandonados ou convertidos no século passado, enquanto a maioria das levadas ainda transporta água de irrigação. Hoje, os trilhos de manutenção ao longo das levadas abrem paisagens para caminhadas e trekking de valor turístico único. O foco deste estudo é o funcionamento hidráulico e a tecnologia de levadas e moinhos e a sua interação, sobre o qual se encontra pouco na literatura. A exploração dos restos de 21 moinhos de água e suas levadas permite conclusões sobre caudais, irrigação, mecânica e operação dos moinhos, rendimento energético e produção de farinha. Hoje, os modernos esquemas hidroelétricos e de armazenamento de bombas da Madeira seguem o mesmo espírito de uso otimizado da água para a produção de energia antes de ser gasto em irrigação e uso público.

Palavras-chave: Madeira, história e tecnologia da água, levadas, irrigação, moinhos de água.

ABSTRACT: Six hundred years ago, Portugal took possession of the island of Madeira, then uninhabited and densely wooded. While rainfall is higher in the northern heights, the subtropical south is more suitable for irrigated agriculture. Sugarcane cultivation and sugar production, in addition to burning forests, changed the island in the first hundred years, due to the high consumption of water and energy. The colonists built their own channels called levadas to divert water from streams and sources to their fields. When the state took control, over 100 km long streams were built to supply water from north to south. Techniques for excavating channels in rough topography up to steep rock formations were developed. Watermills were built in descending locations or at topographic stages of the levadas, where they converted the fall energy into hydraulic energy useful for cutting wood, grinding cereals and producing sugar. The mills were driven by horizontal rodízio free jet water wheels, predecessors of modern Pelton turbines, with falls between 4 and 35 m. Built and operated since colonization, the mills were abandoned or converted in the last century, while most levadas still carry irrigation water. Today, the maintenance trails along the levadas open up landscapes for hiking and trekking of unique tourist value. The focus of this study is on hydraulic functioning and technology of levadas and mills and their interaction, of which little is found in the literature. The exploration of the remains of 21 water mills and their levadas allows conclusions about flows, irrigation, mechanics and operation of the mills, energy efficiency and flour production. Today, Madeira's modern hydroelectric and pump storage schemes follow the same spirit of optimized use of water for energy generation before using it for irrigation and public supply.

Keywords: Madeira, water history, water technology, levadas, irrigation, watermills.

ⁱ O presente artigo é uma versão revisada dum artigo antecedente (Wittenberg e Rhode 2021).

1.CONTEXTO HISTÓRICO

Em 1419, o infante Dom Henrique “o Navegador”, ordenou aos capitães João Gonçalves Zarco e Tristão Vaz Teixeira que tomassem posse da ilha já conhecida, mas ainda não povoada, no Oceano Atlântico, para a coroa de Portugal e que iniciassem a colonização. Como a ilha era coberta por densas florestas de louro (Laurissilva), foi nomeada Ilha da Madeira. Os primeiros colonos portugueses foram os capitães “donatários” com as suas famílias, criados e agricultores sem terra e prisioneiros que receberam terras para subsistência e para cortar árvores para Portugal (Moore 2009). Para acelerar a remoção da floresta, foram acionados incêndios, “que andou sete anos apegado pelas árvores, e troncos, e raízes debaixo do chão, que se não podia apagar” (Frutuoso 1590/2018).

Em 1425, tendo em vista o alto custo da colonização, Dom Henrique deu ordem para plantar cana-de-açúcar trazida da Sicília como um cultivo lucrativo (Frutuoso 1590/2018). Após a fase inicial, ocorreu uma rápida expansão das plantações de cana na Madeira desde 1455, com assessores e capital italianos (Vieira 1999, Moore 2009), particularmente das repúblicas mercantis de Génova e Veneza.

A Revolução do Açúcar da Madeira foi o primeiro *cash crop boom* (Moore 2009) no mundo moderno. Na década de 1490, o “ouro branco” da Madeira era procurado em toda a Europa e no Mediterrâneo. No entanto, após uma produção máxima de 2480 toneladas de açúcar em 1506, houve uma rápida queda de 90% em 1530. O colapso não foi causado pela competição ou superprodução, nem pelo declínio da fertilidade do solo, mas pelo esgotamento dos stocks de madeira gastados para cozinhar o sumo de cana e convertê-la em açúcar cristalino. As florestas economicamente acessíveis foram consumidas e a produção de açúcar diminuiu drasticamente (Moore 2009). O ecossistema tinha mudado significativamente. Depois de visitar a Madeira na década de 1560, o poeta nacional

português Luís de Camões (1572/1988) escreveu no Canto 5, verso 5: «*Passámos a grande Ilha da Madeira, Que do muito arvoredado assi se chama; Das que nós povoámos a primeira, Mais célebre por nome que por fama*”.

Agricultura rentável precisava de irrigação. A cana-de-açúcar, em particular, tem uma grande necessidade de água, que teve de ser transportada por gravidade a partir de córregos próximos e nascentes das zonas altas, através de estreitos canais abertos, as chamadas levadas. Os primeiros trabalhadores a escavar esses canais incluíram escravos, primeiros guanches não-cristãos das Canárias, depois prisioneiros de guerra mouros e africanos negros, que eram usados principalmente para trabalhos exigentes e perigosos. Também, o trabalho árduo no cultivo, colheita e processamento da cana-de-açúcar dependia do trabalho forçado. Moore (2009) vê a revolução açucareira da Madeira com a sua combinação de investimento de capital e exploração de recursos humanos e naturais para um lucro rápido, como exemplo do capitalismo inicial e pré-industrial.

2. GEOGRAFIA E PRECIPITAÇÃO

Devido à sua localização, a cerca de 32,5° N no meio do Oceano Atlântico, a ilha possui um clima subtropical bem equilibrado, favorável à agricultura, particularmente nas regiões mais baixas do Sul. Numa área total da ilha de só 742 km², a topografia acidentada varia de 0 a mais de 1800 m acima do mar e os ventos predominantes do Norte causam chuvas abundantes nas zonas altas do Norte, enquanto no Sul os cultivos precisam de irrigação no verão. A Figura 1 mostra os valores médios mensais das chuvas no Funchal (Sul) e Santana (Norte) e a temperatura do ar no Funchal com valores médios anuais de 649 e 1336 mm e 18,7°C, respetivamente. A distribuição regional da precipitação anual na Figura 2 mostra a forte correlação com a altitude e a situação em direção ao norte.

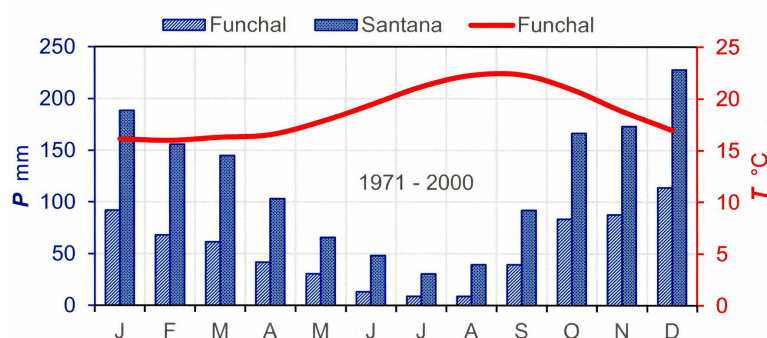


Figura 1. Valores médios mensais da precipitação no Funchal e em Santana e da temperatura do ar no Funchal, 1971-2000, (dados derivados de <http://aprenderamadeira.net/clima-e-meteorologia/>).

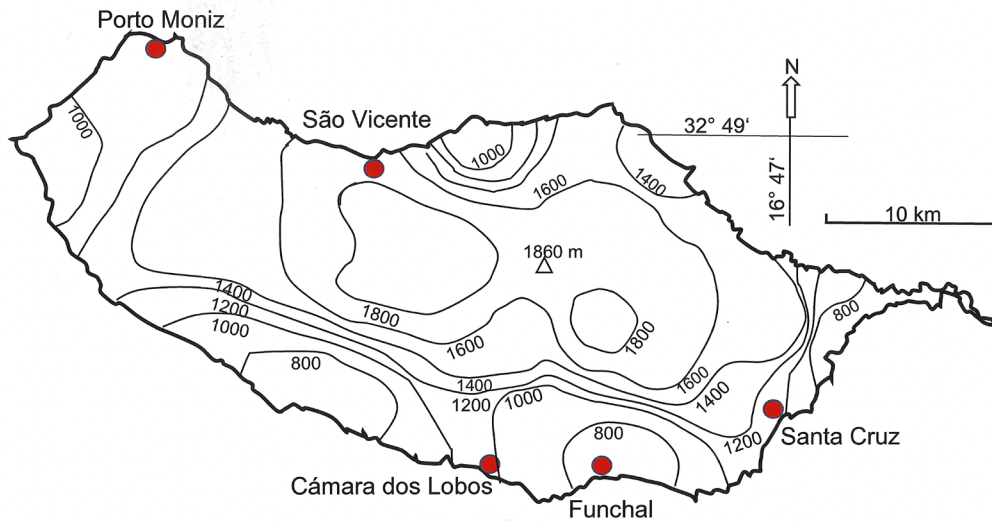


Figura 2. Distribuição da precipitação média anual, Madeira 1971-2000 (isoietas), após Prada *et al.* (2018).

3. IRRIGAÇÃO E CONSUMO DE ÁGUA

Ainda hoje, a rega é efetuada de março a setembro, pelo princípio de rotação, em intervalos determinados (giros), por exemplo de sete ou 15 dias. O levadeiro é o responsável pela operação do sistema, abrindo os reservatórios e caixas divisórias (tornadouros) em tempo útil. O fornecimento de água para os diferentes campos e parcelas através de comportas laterais (adufas) nas levadas e seus ramais é contado em horas após um cronograma elaborado. Durante uma entrega (regadeira), o caudal por uma saída de campo varia entre 12 e 30 l/s ou 12 e 15 l/s, equivalendo a 43,2 e 108 m³/h. Os caudais nas levadas e parcelas não são medidos. Nenhum dos agricultores questionados pelos autores sabia os volumes de água de rega recebidos, que são pagos por hora. Na literatura encontram-se umas informações sobre o consumo de água de rega na Madeira.

CAAHM (2015) indica a área irrigada da Madeira de 4128 ha com um volume médio de irrigação de 42 hm³/a ou 1017 mm/a, dos quais a parte “útil”, ou seja, o volume absorvido e transpirado pelas plantas, é de apenas 4337 m³/ha (433,7 mm). O PRAM (2013) reporta resultados semelhantes com uma área irrigada de 4710 ha, uma alocação de água de 50,8 hm³/a ou 1079 mm/a e uma dotação “útil” média de 593 mm/a. Os volumes “úteis” foram obviamente calculados a partir de dados meteorológicos e parâmetros do solo e das plantas, enquanto as perdas de água no sistema de abastecimento são estimadas.

Aparentemente, a alocação prática da água de rega na ilha da Madeira é efetuada segundo

regras empíricas. O biólogo da Divisão Regional de Agricultura, o Dr. Bruno Silveira do Centro de Bananicultura do Lugar de Baixo (comunicação pessoal por e-mail do 27 de fevereiro de 2019), estimou a alocação real de água em cerca de 20.000 m³/ha (2000 mm) para irrigação por aspersão e 30.000 m³/ha (3000 mm) para irrigação simples por submersão, num ano médio. No método de submersão a água é aduzida até cobrir o solo. A alta dotação causa consideráveis perdas de infiltração, mas uma parte das perdas reaparece como “fluxo de retorno” beneficiando os campos localizados num nível inferior. A irrigação de alguns milhares de hectares de campos distribuídos em diferentes altitudes, principalmente no Sul da ilha, requer um sistema ambicioso de adução.

4. AS LEVADAS – CANAIS DE IRRIGAÇÃO HISTÓRICOS DA MADEIRA

As levadas são canais abertos com seção retangular ou trapezoidal, com até 1 m de largura e 30 a 80 cm de profundidade, que canalizam a água de ribeiros ou fontes das zonas altas para as zonas mais baixas de cultivo. Elas são revestidas de pedra e lima (Pereira 1967) ou esculpidas na rocha. As primeiras levadas foram construídas nas décadas de 1430 e 1440 (Moore 2009), segundo métodos trazidos do norte de Portugal, que foram adaptados às condições da topografia rugosa da Ilha da Madeira. Muitos canais estão localizados nos flancos de formações rochosas íngremes, às vezes quase ao longo de uma linha de nível com uma inclinação mínima de 1:1000, mas geralmente mais íngremes se a topografia exigir.

Todas as levadas são acompanhadas por um caminho no lado do vale chamado esplanada para permitir manutenção e transporte (Figura 3). Hoje, esses trilhos são uma importante atração turística e permitem caminhadas relativamente seguras por paisagens bonitas, mas difíceis. De facto, o caminhante sente-se confortável e seguro ao longo do caminho com um declive relativamente moderado em comparação com as encostas íngremes à esquerda e à direita.

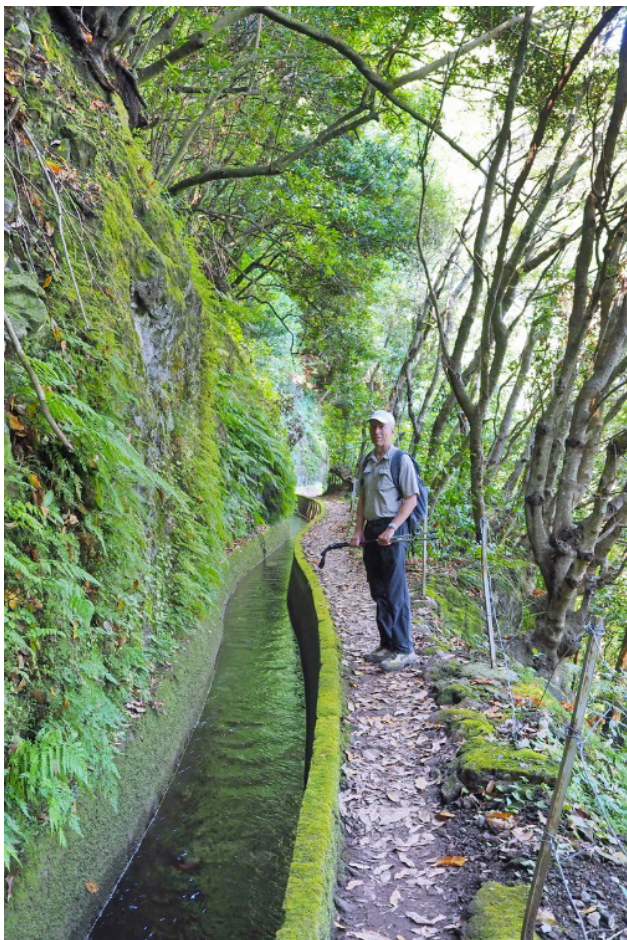


Figura 3. Levada típica com sendeiro no lado do vale.

As inclinações médias de 192 levadas foram calculadas com base nos valores das altitudes no início (madre) e no final, bem como nos comprimentos apresentados numa lista elaborada por Köhl (2012). Dessas 192 levadas, apenas uma (0,5%) tem com uma inclinação média de 0,001; 154 levadas (80%) têm inclinações médias superior a 0,01; 100 levadas (52%) são mais íngremes que 0,03 e 30 levadas (16%) têm inclinações superior a 0,1. A velocidade média e o caudal num canal aberto podem ser estimados pela fórmula de Manning e Strickler:

$$V_m = k_{St} \cdot S^{0.5} \cdot R^{2/3} \text{ m/s e caudal } Q = v_m \cdot A \text{ m}^3/\text{s} \quad (1, 2)$$

onde k_{St} coeficiente de rugosidade Strickler (valor inverso do coeficiente de Manning) R raio hidráulico $R = A/U$, A secção, U perímetro molhado, S declive. Um canal retangular duma largura b e profundidade d tem uma área de secção de $A = b \cdot d$ e o perímetro $U = b + 2d$. O caudal máximo Q para secções transversais retangulares é obtido quando a profundidade da água é metade da largura, $d = b/d$. As levadas são construídas nessa proporção.

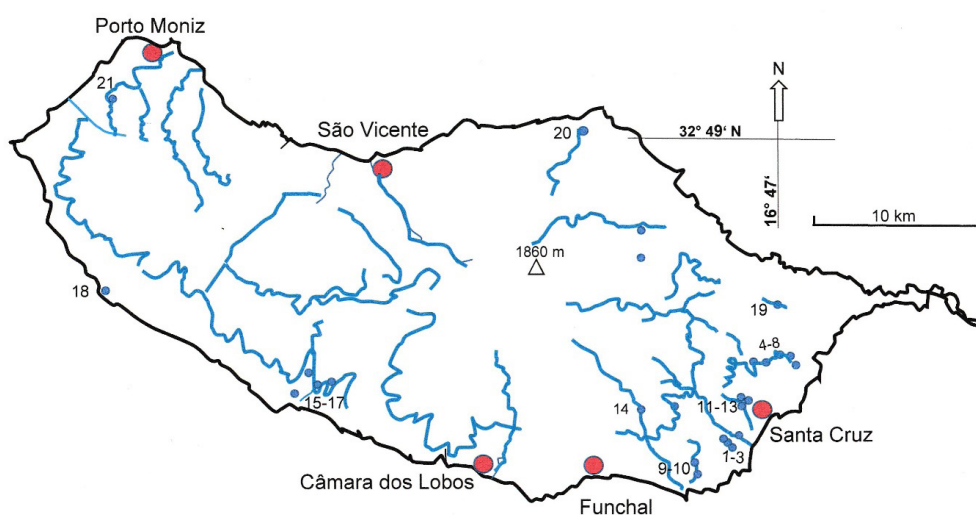
Para obter valores k_{St} realistas, os autores mediram as velocidades do escoamento numas levadas típicas acima dos moinhos com uma hélice de medir. O declive S do canal foi medido com um laser horizontal, e os coeficientes foram calculados por conversão da Equação 1: $k_{St} = v_m / \sqrt{S} / R^{2/3}$. Resultaram valores de $k_{St} \approx 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para canais em rocha cortada, alvenaria antiga e betão bruto e de $k_{St} \approx 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para canais em betão liso e argamassa. Um declive mais acentuado pode ser vantajoso porque significa uma velocidade maior que precisa uma secção transversal do canal menor para um caudal dado e por consequência menores quantidades de escavação, material, mão de obra e, portanto, custos menores. A Tabela 1 mostra os volumes de escavação vertical e de material para uma levada de secção retangular de 10 cm de alvenaria ($k_{St} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, ver eq.1), com 10 cm de borda livre e um caudal de $Q = 68 \text{ l/s}$ para inclinações de $S = 0,002$ e $0,02$. A maior velocidade também reduz a sedimentação de areia e outros sólidos e então as despesas de limpeza e manutenção.

Δ é a diferença: para $S = 0,02$, apenas 54% (na levada mais íngreme) da escavação e 74% (na levada menos íngreme) do material são necessários. Nos dois casos, o escoamento ainda é subcrítico, $h > h_{crit}$. No entanto, há também desvantagens relativas a declives acentuados em que o escoamento acelera e a altura da água diminui. Quando a água desce abaixo da altura crítica de $h_{crit} = (Q^2/b^2/g)^{1/3}$, o escoamento muda para regime rápido, com maior potencial erosivo. A passagem a regime lento por diminuição do declive do fundo da levada origina um ressalto hidráulico com uma conversão de energia altamente turbulenta, onde o canal precisa de reforço estrutural adequado. Dependendo também da rugosidade e da secção transversal, o regime rápido nas levadas acontece em gradientes acima de 0,02 a 0,03, na sua maioria. Nas secções íngremes das levadas, o trilho costuma ser projetado como uma simples escada.

Durante três séculos, as levadas foram construídas apenas por iniciativa, planeamento e investimento privados. Essas levadas particulares ou de heréus são tratadas como propriedades legítimas e os heréus são responsáveis pela sua manutenção.

Tabela 1. Comparação dos volumes de escavação e de material numa levada com diferentes declives.

b	h	A	U	R	S	v	Q	h_{crit}	Escav	Materi	Δ
m	m	m ²	m	m	-	m/s	l/s	m	l/m	l/m	%
0.600	0.300	0.180	1.200	0.150	0.002	0.379	68	0.110	320	160	100
0.390	0.195	0.076	0.780	0.098	0.020	0.899	68	0.146	174	118	54 /74

**Figura 4.** Principais levadas da Madeira; os pequenos pontos são os locais dos moinhos de água estudados neste artigo. Os números dos moinhos correspondem aos da Tabela 2 abaixo.

Com a aprovação da administração, os novos colonos podiam construir as suas próprias levadas ou comprar água.

A base legal eram as Cartas Régias de 7/8 de maio de 1493 em que o rei João II declarava as levadas como instituição pública. Os proprietários das terras tinham de tolerar a construção e a operação de levadas entre as fontes e as terras irrigadas. Somente em 1813 o Estado começou a contribuir diretamente na construção de levadas vencendo longas distâncias e com requisitos técnicos e financeiros altos. Desde então, há Levadas de Herús e Levadas do Estado, construídas às custas do governo português e administradas pelo Distrito. Em 1867, os regulamentos de 1493 foram abolidos e substituídos por novas leis civis cuja aplicação mostrou-se difícil, pois tratavam a água e o solo não mais como uma entidade (Vieira 2015). Uma nova era para a política de irrigação e água começou em 1943, com a criação da Comissão Administrativa de Aproveitamentos Hidráulicos da Madeira CAAHM.

Ao longo dos séculos formou-se uma densa rede de levadas sobre a ilha. Ribeiro (1985) relata 200 levadas em meados do século XX, com um comprimento total de cerca de 1000 km, logo aumentado pelas ações da CAAHM. O comprimento total de todas as levadas parece um assunto de estimação e interpretação, já que números bastante diferentes

são encontrados na literatura (Pereira (1967) 1000 km com 3,3 km de túneis; Vieira (1996) 2500 km com túneis de 40 km; PRAM Plano Regional (2003) 1400 km; Moore (2009) 2100 km e Sequeira (2016) de 3100 km com túneis de 80 km).

Esse impressionante comprimento inclui levadas públicas primárias, públicas secundárias e primárias privadas, atravessando toda a ilha, enquanto o sistema de levadas públicas e privadas primárias totaliza aproximadamente 800 km de extensão (UNESCO 2017). Não é possível desenhar todas as levadas num pequeno mapa como na Figura 4, onde apenas as principais são mostradas para dar uma ideia.

O planeamento e a construção de levadas foram trabalhos árduos: pelo alinhamento, para encontrar o caminho certo e a inclinação do canal ao longo de um flanco íngreme do vale. Foram necessárias experiências em engenharia, geodesia e montanhismo. O nivelamento sem instrumento ótico provavelmente foi realizado usando balanças de mangueira. Todos os trabalhos de escavação e construção foram feitos pelos braços de homens usando equipamentos básicos: picaretas, martelos, formões, pás, barras de ferro etc. Quando não havia espaço para estar em pé, o trabalho era feito pendurado em cordas ou em cestos pendurados. O trabalho não ficou isento de mortes. Apesar dos

métodos simples, a ampla experiência na criação de levadas em terreno difícil fez dos madeirenses seus mestres construtores. A Figura 5 mostra uma cena de trabalho na Levada do Norte, perto da Encumeada, à esquerda, e uma visão de hoje, à direita.

5. OS MOINHOS DE ÁGUA E A SUA TECNOLOGIA

A necessidade de energia para cortar madeira e moer cereais levou logo à construção de moinhos de água, preferencialmente em sítios descendentes ou em degraus topográficos das levadas, onde a energia de queda da água era convertida em energia hidráulica útil e, ao mesmo tempo, a erosão das levadas era reduzida. Os cereais formaram uma importante base alimentar dos madeirenses. Para este estudo, 36 sítios de moinhos foram visitados e 21 investigados com mais detalhe.

Os moinhos de água da Madeira são fáceis de detetar se os seus cubos monumentais, que lembram às vezes chaminés, estão ainda de pé na paisagem. O cubo é a torre de pressão cilíndrica maioritariamente vertical, feita de alvenaria de pedra grossa, posteriormente feita de betão, com

um diâmetro interno de cerca de 1 m, e de altura até 10 m.

As mós eram acionadas por rodas de água horizontais do tipo Rodízio com eixos verticais. A roda de impulso a jato livre é particularmente adequada para caudais pequenos com quedas maiores e, portanto, predominava nos moinhos de água das regiões secas do Oriente Médio, em toda a região do Mediterrâneo, nas Ilhas Canárias, na Madeira e no ultramar. A Figura 6 mostra o moinho de água no sítio da Terça, no Sul, perto da Ribeira Brava. O cubo de seis metros de altura atrás da casa do moinho é alimentado com água transportada pelo aqueduto do lado esquerdo.

Figura 7 mostra uma secção transversal esquemática de perspectiva de um moinho de água madeirense típico. Descrições detalhadas sobre os aspetos hidráulicos técnicos gerais são fornecidos em Moog (1994). Detalhes técnicos específicos sobre os moinhos de água madeirenses foram encontrados apenas em Calvert (1978).

Sob a influência da água e do ar, as rodas de água de madeira deterioraram-se rapidamente e

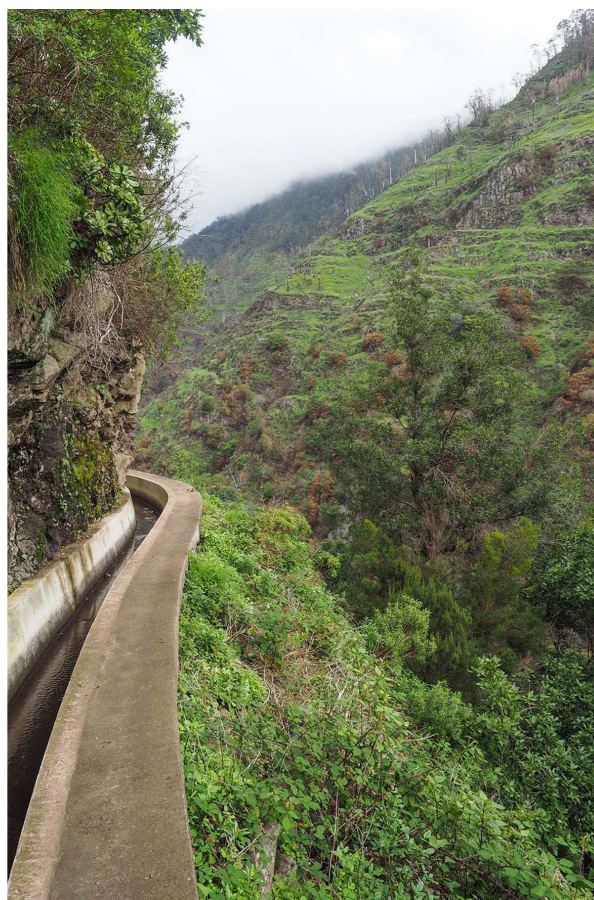


Figura 5. à esquerda: Construção da Levada do Norte, o engenheiro e os operários, foto; E.N. Pereira, Arquivo Regional e Biblioteca da Madeira ABM; PT / ABM / ENP / C / 007-007 / 24-83 Levada do Norte - abertura da esplanada no local da Tapaginha, próximo da Encumeada, vendo-se os operadores amarrados com cordas na encosta; à direita: vista de hoje da levada.



Figura 6. Moinho de água na Terça, perto da Ribeira Brava.

desapareceram das ruínas. Só no último dos 36 moinhos examinados, os autores encontraram o que procuravam. A Figura 8 mostra um par de rodízios clássicos da Madeira no moinho de água da Fonte Vermelha, perto de Marçoços. Estas rodas relativamente bem preservadas são provavelmente as únicas que ainda existem na ilha, pelo que seria aconselhável resgatá-las. As rodas com diâmetros de 1,25 m são feitas inteiramente de madeira com um eixo de madeira com um diâmetro de 200 mm. Vinte e quatro segmentos dum ângulo de 15 graus com uma pá na extremidade externa se encaixam e formam um disco fixo que é integrado ao eixo. As pás de 25 cm de longitude têm uma forma côncava para deflexão do jato.

As rodas correspondem ao descrito por Calvert (1978), que ainda viu algumas delas em ação. Foram as antecessoras das modernas turbinas Pelton.

O eixo de madeira continua para cima por um eixo de aço que atravessa o teto da câmara de rodas e da mó fixa dormente e é diretamente conectado na mó andadeira que é acionada com a mesma velocidade de rotação. O eixo está na sua bandeja de rolamentos, numa trave (*ponte*), apoiada num lado, cuja outra extremidade pode ser elevada ou diminuída através de uma rosca de manivela, o aliviadouro, para regular a distância entre as mós. Além de algumas peças menores, como rolamentos e eixos, tudo era feito de madeira. As rodas de aço foram introduzidas apenas no final do século XIX.

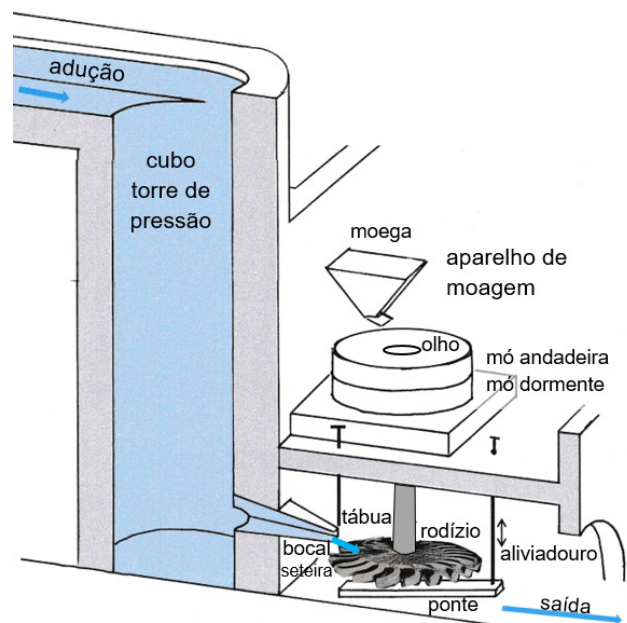


Figura 7. Seção transversal esquemática de perspectiva de um moinho de água madeirense típico.

Acima do aparelho encontra-se a moega, uma caixa afunilada de onde os cereais caem no olho da mó andadeira. As mós estão numa caixa de tábua de madeira com uma abertura para a saída da farinha. A maioria dos moinhos estava equipada com duas rodas e dois conjuntos de mós dedicados para moer trigo e milho respetivamente. Provavelmente foram usados ao mesmo tempo apenas durante a alta demanda de moagem e caudal suficiente. O

segundo conjunto era importante como reserva, quando as ranhuras da mó andadeira do outro estavam sendo trabalhadas ou afiadas. Para essa manutenção, a mó andadeira precisava de ser elevada e girada.

O bocal desempenha um papel importante na operação da roda. Segundo Torricelli a velocidade do jato v é função da queda hidráulica h , isto é, a distância vertical do nível da água na torre até à saída do bocal.

$$v = \mu \cdot \sqrt{2g \cdot h} \quad (3)$$

onde μ é o coeficiente de vazão, aqui assumido como $\mu = 0,91$, uma vez que o bocal tem uma forma de funil favorável e g é a aceleração da gravidade, $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$.

Na Madeira, assim como em Espanha, a abertura tinha o formato de um retângulo vertical com uma largura de 3 a 4 cm (Calvert 1973, Garrido Aranda 2002, Díaz Rodríguez 2004, Headworth 2004). A altura de até 10 cm é ajustada conforme o caudal com uma pequena tábua deslizante por meio de uma alça na câmara das mós. Para caudais menores, o orifício deve ser reduzido, caso contrário, o nível da água no cubo diminuiria. O mecanismo não regula o caudal que é determinado pela água que chega, nem pode aumentar a pressão, como às vezes é mal-entendido, mas ajusta o orifício para manter sensivelmente constante a queda hidráulica e a velocidade do jato.

Para parar o moinho sem interromper o caudal que chega, existiam desvios, em forma de defletores, placas empurradas na frente do bocal para retirar o jato da roda ou por um açude de desvio da adução. Rodas de impulso ou ação típicas recebiam caudais de apenas alguns decalitros por segundo (digamos 20 - 60 l/s). Um fator limitante é a força de impulso exercida pelo jato de água que atinge as pás da roda numa área pequena:

$$F_I = \rho \cdot Q \cdot (v - u) \quad (4)$$

onde ρ é a densidade da água, 1000 kg/m^3 , caudal Q em m^3/s , v velocidade do jato em m/s e u a velocidade periférica do círculo do jato da roda. Sob condições ideais, a velocidade periférica de uma roda de água é de $u = 0,5 v$ (como na turbina Pelton). Na realidade, devido ao efeito de deslizamento, pode ser $u = \xi \cdot v$ com $\xi = 0,45$ e menos ainda quando moendo com uma folga estreita entre as pedras. A frequência rotacional em rotações por minuto (1/min) da pedra andadeira é então

$$r = \xi \cdot 0,91 \cdot \frac{\sqrt{2g h}}{\pi \cdot D} \cdot 60 = \xi \cdot 77 \cdot \frac{\sqrt{h}}{D} \text{ 1/min} \quad (5)$$

onde D é o diâmetro do círculo do jato da roda. Aplicando as Equações 3 a 5 aos parâmetros de um moinho de água madeirense, para um caudal de $Q = 35 \text{ l/s}$ e a queda de $h = 9 \text{ m}$ (Moinho 3 da Tabela 2), resulta a velocidade do jato de $v = 12,1 \text{ m/s}$,



Figura 8. Rodízios clássicos de madeira, Moinho da Fonte Vermelha ou do Abel, Marçoços. Na parede os dois bocais por onde saiam os dois jatos de água que moviam as rodas.

assumindo um valor de $\zeta = 0,35$. Segundo a Equação 4, o jato exerceria uma força de impulso de $FI = 1000 \times 0,035 \times (1-0,35) \times 12,1 = 275$ N sobre as pás atingidas. Um caudal de $Q = 52$ l/s (Moinho 8) produziria já uma força de 334 N, alta para pás de madeira. Conclui-se, que os moinhos de água da Madeira tinham caudais inferiores a 60 l/s por roda o que se confirma nos valores de caudal na Tabela 2.

6. PRODUÇÃO DE ENERGIA E CAPACIDADE DE MOAGEM

Na literatura portuguesa sobre rodas horizontais de água, nada é encontrado sobre eficiência mecânica η , potência e produção de energia, enquanto uma gama de valores possíveis é sugerida nalgumas fontes internacionais com ênfase técnica. Segundo Rühlmann (1875) as pás em forma de colher bem trabalhadas atingem eficiências de 30 a 35%. Também Moog (1994) reporta valores médios de 30 a 35% para rodas de ação e cita valores de 29 e 49% para dois moinhos no Valais. O assunto é discutido em Wittenberg (2011) e, suportado pelos resultados da operação de ensaio de um moinho de maré restaurado, foi determinada a eficiência de 35%. O valor é confirmado na sua ordem de magnitude pelas quantidades de produção de farinha, reportadas por Miranda (2008), em moinhos de maré em Portugal. Concluindo, assume-se uma eficiência de $\eta = 0,35$ para a avaliação da produção de energia das rodas de ação históricas em madeira dos moinhos de água madeirenses. As rodas de ferro usadas desde o final do século XIX provavelmente tiveram eficiências até 55%.

A potência hidráulica P produzida por uma roda de água é dada pela equação geral:

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \quad W(Watt) \quad (6)$$

com eficiência $\eta = 0,35$, densidade da água $\rho = 1000$ kg/m³, aceleração da gravidade $g = 9,81$ m/s², caudal Q em m³/s e queda h em m. A queda hidráulica é a diferença entre o nível da água no cubo e a cota do plano da roda.

A Tabela 2 mostra os principais parâmetros dos moinhos de água madeirenses investigados. Os nomes dos moinhos e das levadas são dados em forma abreviada. As coordenadas, latitude e longitude foram medidas pelos autores por GPS, e as altitudes das câmaras de rodas e dos topos dos cubos por GPS e altímetro barométrico, para obter as quedas hidráulicas aproximadas.

Os caudais de projeto Q das levadas com seções retangulares são calculados pelas Equações 1 e 2 para profundidades de água com metade das larguras da

levada ($d = b/2$, veja acima) e $k_{st} = 30$ m^{1/3}/s (assumida alvenaria áspera), exceto para o moinho 21. O moinho de água das Achadas da Cruz, construído apenas em 1898, é um caso especial (ver abaixo). A parte a montante da levada de alimentação provavelmente foi revestida com argamassa lisa, pelo que se assumiu $k_{st} = 70$ m^{1/3}/s. Para as rodas de colher de madeira tradicionais dos moinhos 1-20, foi estabelecida uma eficiência de $\eta = 35\%$, para a roda de aço do Moinho No. 21 de $\eta = 55\%$.

Segundo Moog (1994), a moagem de trigo com finura de $d_{97} = 144$ μ m requer uma taxa de energia média de 74 J/g, ou seja 20,6 kWh/tonelada. Pode-se concluir que um consumo de energia de 20 kWh/ton era típico para rodas horizontais, dependendo do cereal e da finura da moagem. Sob esse pressuposto, um moinho típico com $P = 0,6$ kW poderia moer uma tonelada de trigo em cerca de 33 horas.

7. CASCATAS DE MOINHOS

Como mostrado no mapa da Figura 4, vários moinhos de água foram instalados em muitas levadas em cascata, um após o outro, e também em ramais de levadas, de modo que o caudal fosse usado repetidamente para produção de energia, antes de finalmente chegar aos campos de irrigação. Na Tabela 2, os grupos de moinhos 1-3, 4-8, 9-10, 11-13 e moinho 21 com os seus moinhos adjacentes representam essas cascatas. A Figura 9 mostra uma parte da Levada dos Moinhos da Serra (Santa Cruz) num mapa e numa seção longitudinal. Os moinhos 7 e 8 são em canais ramais.

A ideia de usar o caudal de um canal várias vezes através de cascatas de moinhos é óbvia. Um exemplo histórico comparável é a sequência de onze moinhos de água no principal canal de irrigação (Acequia mayor) do Palmeral de Elche, Espanha (Meléndez-Pastor *et al.* 2015).

8. CASO ESPECIAL Nº 21 - MOINHO DAS ACHADAS DA CRUZ

Este moinho construído em 1898 difere dos demais em vários aspetos. Neste sítio, a Levada Grande ou do Moinho tem uma descida repentina de 795 a 760 m s.m. (medida por altímetro barométrico), portanto, de 35 m, o que é de longe a queda hidráulica mais alta de todos os moinhos da Madeira. O moinho não possui torre de pressão (cubo), mas a partir de uma pequena câmara de carga na qual a levada chega, a água é conduzida através de um tubo de betão enterrado de 300 mm até ao moinho. Este tubo está totalmente cheio e toma o lugar da torre.

Tabela 2. Moinhos de água investigados - principais parâmetros.

Moinho de água	Levada	Latitude	Longitude	Altitude	Queda	Caudal	Potência	
Nos. v. Fig.4		°N	°E	m s.m.	m	l/s	W	
1	Escuna	dos Moinhos	32.6639	-16.8262	330	10	30	1014
2	Feliciano		32.6629	-16.8248	318	10	31	1075
3	S. Pedre		32.6628	-16.8246	308	9	35	1081
4	sem nome	dos Moinhos da Serra	32.6995	-16.8015	354	8	34	933
5	Eiras		32.7002	-16.7985	310	7	24	577
6	Janeiro		32.7015	-16.7846	268	7	24	577
7	sem nome	Ramal	32.7018	-16.7926	320	4	24	330
8	Faias	Ramal	32.7015	-16.7824	240	6	52	1065
9	Vitoria	Azenha	32.6572	-16.8441	300	5	25	430
10	Vargem		32.6527	-16.8424	255	7.5	25	644
11	Roda 1	da Roda	32.6895	-16.8128	355	3.5	24	289
12	Roda 2		32.6895	-16.8127	340	6	24	495
13	Regadinhas		32.6875	-16.8129	340	6	24	495
14	Tia Jesuaina	do Blandy	32.6855	-16.8732	950	7.5	24	618
15	Terça	Rib. Tabua	32.6941	-17.0685	250	6	24	495
16	Miradouro	da Serra	32.6992	-17.0834	605	5	24	412
17	Lombada da Ponta do Sol	do Moinho	32.6893	-17.0922	290	5.5	52	976
18	das Roseiras		32.7393	-17.2106	65	8	24	659
19	Do Abel	Maroços	32.7350	-16.8043	235			
20	São Jorge		32.82011	-16.9151	482	9	43	2071
21	Achadas da Cruz	Grande ou d. Moinhos	32.8376	-17.2947	760	34	84	15322

Assumindo uma perda hidráulica de 1 m no tubo de betão, uma queda hidráulica de 34 m está disponível para as duas rodas.

Essas rodas estão encontradas parcialmente cobertas por detritos na saída da câmara de rodas (Figura 10). São fabricadas em aço com um diâmetro de 1,25 m e 24 pás curvas duplas de cerca de 25 cm de largura, com seguramente uma eficiência muito mais alta de pelo menos $\eta = 55\%$ do que os rodízios de madeira e as simples rodas de aço encontradas em moinhos de água “reabilitados” como o da Lombada da Ponta do Sol.

As duas seteiras são uma ao lado da outra, portanto as duas rodas giram em sentidos diferentes

Embora a potência dos outros moinhos de água estivesse entre meio e três quilowatts, esse moinho extraordinário produziu cerca de 15 kW. Os idosos que moram nas Achadas da Cruz lembram que o trigo e a farinha eram transportados de e para o moinho nos ombros dos homens a mais de 100

metros de altitude. A operação terminou no final dos anos cinquenta.

9. DE MOINHOS DE ÁGUA A ENERGIA HIDRO-ELÉTRICA

Até meados do século XX, a maioria dos moinhos da Madeira parou a sua produção. As grandes empresas de moagem elétrica tinham a vantagem da concentração económica e do mercado. Além disso, os moinhos de água foram abandonados devido à regularização do mercado de cereais em Portugal, juntamente com o baixo custo de energia. Ainda em 1863, 365 moinhos foram contados na Madeira, 79 deles no Funchal (Vieira 2015). Hoje, apenas o moinho de água de São Jorge, no norte da ilha, está moendo e vendendo farinha; alguns outros moinhos foram reformados para fins turísticos e educacionais.

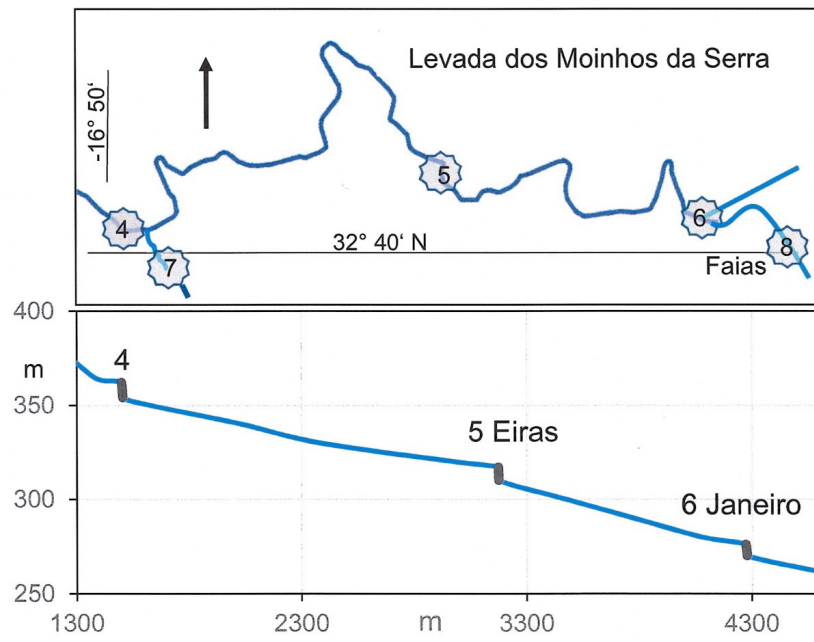


Figura 9. Cascata de moinhos na Levada dos Moinhos da Serra, mapa e seção.



Figura 10. Moinho das Achadas da Cruz, câmara de roda, em primeiro plano rodízio de aço danificado com pás curvas duplas, segundo rodízio ao fundo, poderia ser desmontado e transportado para um museu.

O consumo de eletricidade aumentou rapidamente, incluindo o da moagem elétrica. Conforme previsto no plano de 1943 da CAAHM para o melhor uso dos recursos hídricos da Madeira, as duas primeiras centrais hidroelétricas começaram a funcionar em 1953, Serra de Água (então Salazar) e Calheta I (então F. Ulrich) com potências instaladas de 4,8 e 2 MW, respetivamente. Desde então, o sistema de energia hidroelétrica da Madeira cresceu para 9 centrais, localizadas na Figura 11. As quedas hidráulicas variam entre 181 e 637 m, portanto são compatíveis com turbinas Pelton, que têm o mesmo princípio de jato de água livre que os rodízios, os seus antecessores. Obviamente, não apenas a elevada eficiência, mas principalmente as quedas altas, permitem uma produção de energia muito maior. Com uma potência instalada total de 46,5 MW, o sistema produziu 73,9 GWh em 2017 (EEEdM 2018).

A Figura 11 mostra que longos túneis foram construídos para transportar água do Norte e de áreas mais altas para o Sul, passando por diferentes centrais hidroelétricas, até finalmente ser usada para irrigação, abastecimento doméstico e industrial. O princípio básico dos moinhos e das levadas mantém-se hoje em dia nas centrais hidroelétricas. Um passo adicional é a ampliação dos sistemas hidroelétricos da Calheta e Socorridos por componentes de armazenamento de bombas. Reservatórios e estações de bombeamento permitem usar excedentes temporários de energia, especialmente de energia eólica e à noite, para bombear água para os reservatórios localizados

num nível mais alto e usá-la para a produção do pico de energia firme. As levadas são reconcionadas para transportar água para os reservatórios, por exemplo, a Levada do Alecrim até a barragem do Pico da Urze. A menor altitude, os reservatórios de restituição permitem fornecer os volumes de irrigação e água doméstica no devido tempo. A descrição desse projeto múltiplo sobrecarregaria este artigo pelo que não procedeu à mesma.

10. CONCLUSÃO

A tecnologia de seiscentos anos de idade, combinando a operação de moinhos de água e levadas, tinha as características de um projeto de fins múltiplos. A ideia básica era a produção de energia com um dado caudal conduzido para irrigação e demandas comuns de água.

Os esquemas hidroelétricos modernos e muito maiores seguem o mesmo espírito de uso otimizado e sustentável dos recursos hídricos da Madeira.

AGRADECIMENTOS

Pelas informações e conselhos:

aos revisores anónimos por suas valiosas indicações e propostas;

ao Dr. Bruno Silveira, do Centro de Bananicultura, sobre necessidades de irrigação; ao Prof. Miguel Sequeira, da Universidade da Madeira, sobre o sistema das Levadas, ao pessoal de vários serviços da Madeira e a numerosos agricultores e moradores dos sítios onde existiam moinhos por responder às perguntas.

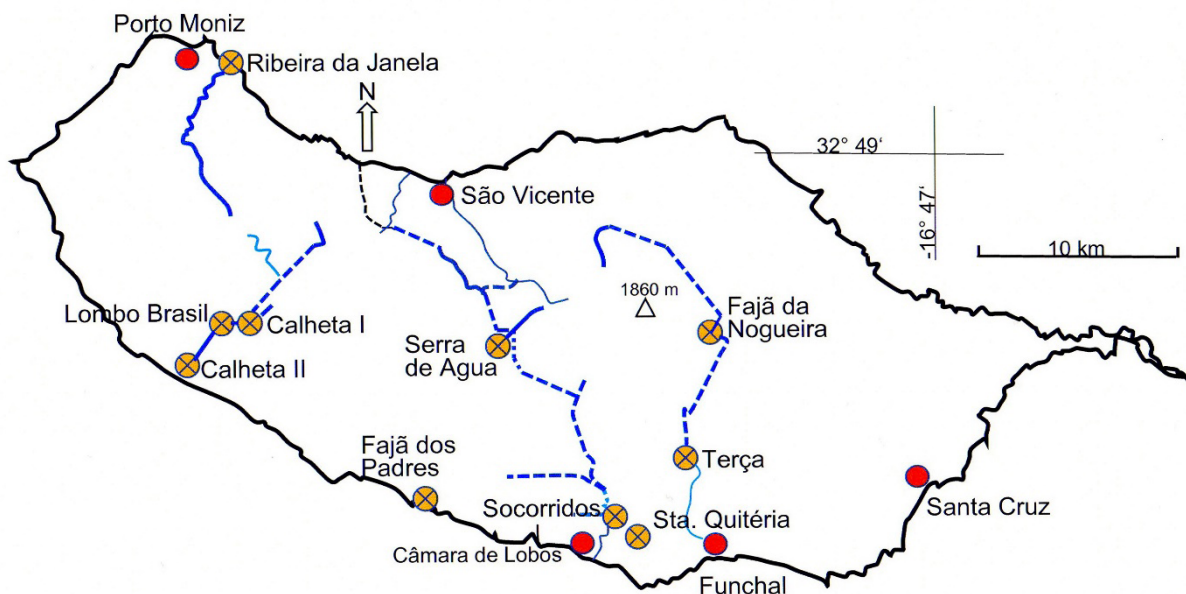


Figura 11. Esquemas modernos de energia hidráulica da Madeira. As linhas tracejadas são túneis.

O estudo foi parcialmente financiado por SHW Engenheiros Consultores, Alemanha.
Diagramas e fotos, exceto Fig. 5 à esquerda, pelos autores

REFERÊNCIAS

- CAAHM (Comissão Administrativa dos Aproveitamentos Hidráulicos da Madeira, Pimenta de França J. de, Matos, J. Oliveira, R.) (2015): Recursos hídricos, qualidade da água e saneamento de águas residuais. AprenderaMadeira.
- Calvert, N.G. (1978): Water Mills on the Levadas of Madeira. *Industrial Archaeology Review*, 3, 45-53.
- Camões, L. de (1572/1988): Os Lusíadas. livros de bolso europa-américa 227:190
- Díaz Rodríguez J.M. (2004): Molinos de Agua en Gran Canaria. La Caja de Canarias, Las Palmas.
- EEdM, Empresa de Electricidade da Madeira (2018): Annual Report 2017, Technical Information.
- Frutuoso, Gaspar (1590/2018): As saudades da terra. Manuscrito 1590, printed 1873, reprint 2018.
- Garrido Aranda, J. M. (2002): Molinos de Andalucía. Actas de III Jornadas de Molinología, Murcia, 283-299.
- Headworth, H.G. (2004): Los molinos hidráulicos de Huebro revisitados: sus características técnicas. *Revista de Humanidades y Ciencias Sociales del IEA*, 19, 331-348.
- Köhl, D. (2012): www.Danishome.ch
- Miranda, J.A. (2008): Tide Mill of Cais (Montijo) – Rebirth of a Memory. *Transactions of the 12th TIMS Symp.*, 243-265.
- Meléndez-Pastor, I., Navarro Pedreño, J., Wittenberg, H. (2015): Watermills in the historic irrigation system “Palmeral de Elche”, Spain – an example of early hydropower exploitation. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15.5, 1140-1151.
- Moog, B. (1994): The horizontal watermill – history and technique of the first prime mover. *The International Molinological Society*.
- Moore, J. (2009): Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century: Part I: From “Island of Timber” to Sugar Revolution, 1420–1506. *Review*, 32, 4,345-390.
- Moore, J. (2010): Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century, Part II: From Regional Crisis to Commodity Frontier, 1506–1530. *Review*, Vol. 33, 1,1-24.
- Pereira, E. C. N. (1967): *Ilhas de Zarco*, Câmara Municipal do Funchal, Madeira
- Pereira, J. (1998): *Gestão de Água da Madeira*. Revista Industria da Água, nº 28, IPE-Águas de Portugal, Lisboa
- Prada, S., Gaspar, M.A., Silva, M.O., Cruz, J.V., Portela, M.M., Hora, G.R. (2018): Recursos Hídricos da Ilha da Madeira. Departamento de Biologia e Centro de Estudos da Macaronésia da Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, Funchal
- PRAM *Plano Regional da Água da Madeira* (2013): Investimentos e Gestão de Água / Instituto da Água, Funchal
- Ribeiro, O. (1985): *A Ilha da Madeira até Meados do século XX*. Estudo Geográfico. Instituto de Cultura e Língua Portuguesa, Lisboa
- Rühlmann, M. (1875): *Allgemeine Maschinenlehre*. 1., Schwetschke und Sohn, Braunschweig
- Sequeira, M. (2016): Application of Levadas da Madeira for UNESCO World Heritage. 4th IWA International Symposium on Water and Wastewater Technologies in Ancient Civilizations, University of Coimbra.
- UNESCO (2017): Levadas of Madeira, <https://whc.unesco.org/en/tentativelists/6230/>
- Vieira, A. (1996): A rota do açúcar na Madeira. Centro de Estudos de História do Atlântico, Funchal
- Vieira, A. (1999): Os italianos na Madeira: séculos XV-XVI. Centro de Estudos de História do Atlântico, Funchal.
- Vieira, A. (2015) As levadas. Os caminhos da água na Madeira. *Cadernos de divulgação do CEHA*. N.º 9, Funchal.
- Wittenberg, H. (2011): Portuguese Tide Mills and their Operation. *Int. Molinology*, 82, 11-18.
- Wittenberg, H., Rhode, C. (2021): Levadas e Moinhos de Água na Ilha da Madeira como Projetos Históricos de Fins Múltiplos. *Arquivo Histórico da Madeira, Nova Série*, No. 3, Direção Regional do Arquivo e Biblioteca da Madeira.