

Levadas e Moinhos de Água na Ilha da Madeira como Projetos Históricos de Fins Múltiplos¹

Levadas and Watermills on the Island of Madeira as Historical Multi-Purpose Projects

Hartmut Wittenberg²

Christiane Rhode³

Resumo

Há seiscentos anos, Portugal tomou posse da Ilha da Madeira, então desabitada e densamente arborizada. Além do corte e queima de florestas, o cultivo da cana de açúcar mudou a Ilha nos primeiros cem anos, devido ao alto consumo de água e energia. Desde o início, os povoadores construíram canais para conduzir água dos córregos e fontes aos campos. Hoje, os históricos canais de irrigação, chamados levadas, são famosos pelos seus percursos ousados por terrenos montanhosos rugosos e pelas suas características de construção. Os trilhos de manutenção ao longo das levadas abrem paisagens para caminhadas e *trekking* de valor turístico único. Nas secções íngremes das levadas encontram-se restos de moinhos de água que converteram a energia da queda hidráulica em energia mecânica para cortar madeira, moer cereais e esmagar cana-de-açúcar. Foram investigados as levadas e os restos de 21 moinhos de água que

¹ Agradecimentos – pelas informações e conselhos: ao pessoal do Arquivo e Biblioteca da Madeira; a Susana Fontinha, Adjunta do Gabinete, Secretaria Regional de Ambiente, Recursos Naturais e Alterações Climáticas, Funchal, por contactos e discussão; a Bruno Silveira, do Centro de Bananicultura, Lugar de Baixo, sobre a irrigação; a peritos de vários departamentos do Governo Regional da Madeira cuja carga de trabalho nem sempre permitiu uma discussão mais aprofundada; a muitos agricultores e residentes de antigos sítios de moinhos de água que partilharam as suas experiências em conversas amigáveis; e a Idalina Brito pela verificação linguística do texto.

² Professor Jubilado de Hidrologia e Engenharia Hidráulica da Leuphana Universidade de Lueneburg, Alemanha; doutor em Engenharia; projetos de pesquisa e publicações em particular na área de recursos hídricos; consultor em projetos internacionais de água; trabalho e cooperação na área de História e Arqueologia: moinhos de maré em Portugal, uso da água subterrânea no reino dos hititas (Turquia). Contacto: wittenberg@uni.leuphana.de.

³ Engenheira civil e hidráulica; experiência em avaliação e desenho de obras e infraestruturas hidráulicas em diferentes países; funcionária de SHW Consultores, Alemanha. Contacto: c_rhode@t-online.de.

eram acionados por rodas de água a jato livre horizontais (rodízio), as antecessoras das modernas turbinas Pelton, com quedas entre 4 e 35 m. No contexto histórico, este estudo está focado nos aspetos hidráulicos, mecânicos, energéticos, operacionais e construtivos das levadas e moinhos, pouco considerados na literatura. Também hoje, os modernos sistemas hidroelétricos e de irrigação da Madeira seguem o mesmo princípio de uma utilização otimizada da água para múltiplos fins.

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. In addition to cutting and burning forests, the cultivation of sugar cane changed the island in the first hundred years, due to the high consumption of water and energy. From the beginning, the settlers built canals to convey water from streams and sources to fields. Today, the historic irrigation canals, called *levadas*, are famous for their bold routing through rugged mountainous terrain and their construction features. The maintenance trails along the levadas open landscapes for hiking and trekking of unique tourist value. In the steeper sections of the levadas, there are remains of water mills that converted the energy of the hydraulic fall into mechanical energy to cut wood, grind cereals and crush sugar cane. The levadas and the remains of 21 water mills that were driven by horizontal free jet water wheels (*rodízios*), the predecessors of modern Pelton turbines, with falls between 4 and 35 m, were investigated. In the historical context, this study is focused on the hydraulic, mechanical, energetic, operational, and constructive aspects of the levadas and mills, little considered in the literature. Today, Madeira's modern hydroelectric and irrigation systems also follow the same principle of optimized water use for multiple purposes.

Keywords: Madeira; Water History; Water Technology; *Levadas*; Irrigation; Watermills.

Contexto Histórico

Em 1419, o infante D. 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 o povoamento. Os primeiros povoadores portugueses foram os capitães do donatário com as suas famílias, criados, agricultores sem terra e prisioneiros que receberam terras para a sua subsistência e para enviarem madeira para Portugal⁴. Para acelerar a remoção da floresta, foi acionado um incêndio, «que andou sete

⁴ MOORE, 2009, «Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the "First" Sixteenth Century, Part I [...]», p. 354.

annos apogado pelas árvores, e troncos, e raízes debaixo do chão, que se não podia apagar»⁵.

Em 1425, tendo em vista o alto custo do povoamento, D. Henrique deu ordem para plantar cana-de-açúcar trazida da Sicília como um cultivo lucrativo⁶. Após a fase inicial, ocorreu uma rápida expansão das plantações de cana na Madeira desde 1455, com assessores e capital italianos⁷, particularmente das repúblicas mercantis de Génova⁸ e Veneza.

A Revolução do Açúcar da Madeira foi o primeiro *cash crop boom*⁹ 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 término da reserva de madeira gasta para cozer o sumo de cana e convertê-lo em açúcar cristalino. As florestas economicamente acessíveis foram consumidas e a produção de açúcar diminuiu drasticamente¹⁰. O ecossistema tinha mudado significativamente. Depois de visitar a Madeira na década de 1560, Luís de Camões escreveu em 1572 na epopeia nacional portuguesa *Os Lusíadas*, ironicamente, que a Ilha, assim chamada por causa de sua densa população arbórea, agora só tem madeira no nome¹¹.

A 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 foram escravos, primeiro 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

⁵ FRUTUOSO, 1873, *As Saudades da Terra* [...], p. 64.

⁶ FRUTUOSO, 1873, *As Saudades da Terra* [...], p. 663.

⁷ VIEIRA, 1999, «Os italianos na Madeira: séculos XV-XVI», p. 12ff.

⁸ MOORE, 2009, «Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century, Part I [...]», p. 357.

⁹ MOORE, 2009, «Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century, Part I [...]», p. 345.

¹⁰ MOORE, 2009, «Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century, Part I [...]», p. 359.

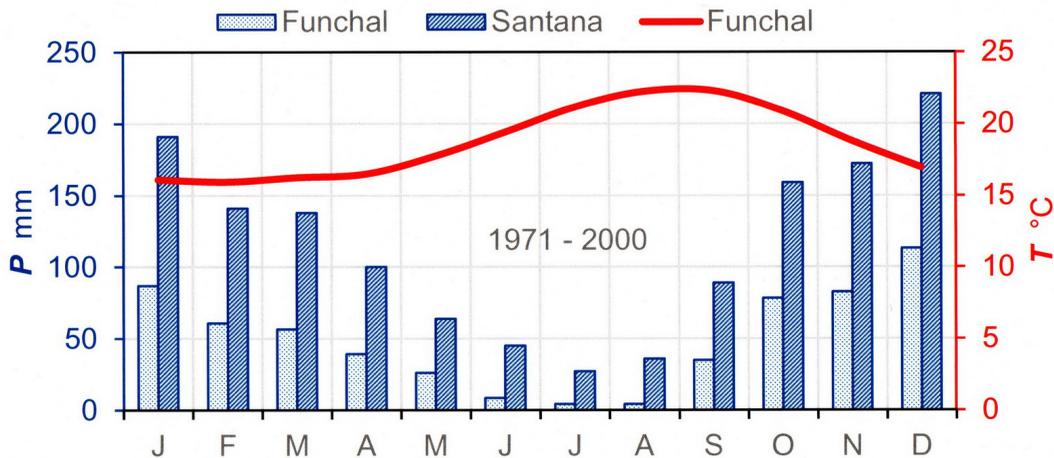
¹¹ CAMÕES, 1988, *Os Lusíadas*, canto 5, verso 5, p. 190: «Passámos a grande Ilha da Madeira, Que do muito arvoredado assi se chama; Das que nós povoámos a primeira, Mais célebre por nome que por fama».

processamento da cana-de-açúcar dependia do trabalho forçado. Moore¹² 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.

Geografia e Clima

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 de só 742 km², a topografia acidentada varia de 0 a 1841 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 n.º 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, respetivamente¹³. A distribuição regional da precipitação média anual¹⁴ na Figura n.º 2 mostra a forte correlação com a altitude e a situação em direção ao Norte.

Figura n.º 1 – Média Pluviométrica Mensal e Temperatura do Ar, 1971-2000, Funchal e Santana



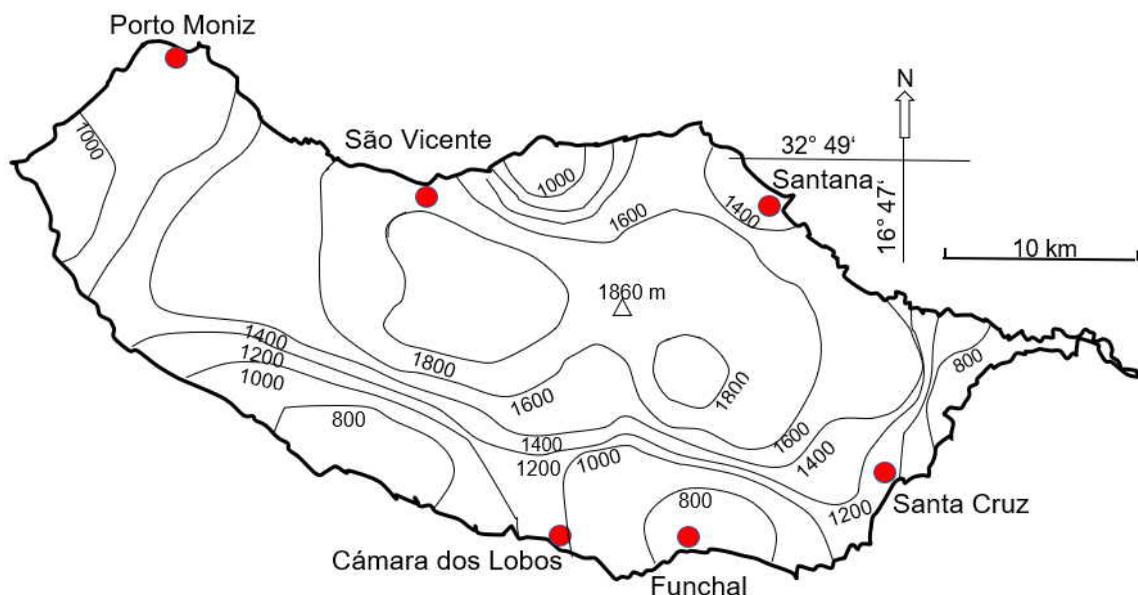
Fonte: PRIOR, 2020, «clima e meteorologia».

¹² MOORE, 2009, «Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century, Part I [...]», p. 352.

¹³ Dados derivados de PRIOR, 2020, «clima e meteorologia», Fig. 7.

¹⁴ Adotado de PRADA *et al.*, 2003, «Recursos Hídricos da Ilha da Madeira», Fig. 3.

Figura n.º 2 – Distribuição Regional da Precipitação Média Anual, Madeira, 1971-2000 (isoietas)



Fonte: PRADA *et al.*, 2003, «Recursos Hídricos da Ilha da Madeira».

Irrigação e Consumo de Água

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 fluxo por uma saída de campo varia entre 12 e 30 l/s¹⁵ ou 12 e 15 l/s¹⁶, equivalendo a volumes entre 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.

França *et al.*¹⁷ indicam 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 (434 mm).

¹⁵ PEREIRA, 1967, *Ilhas de Zarco*, vol. I, p. 687.

¹⁶ PEREIRA, 1998, «*Gestão de Água da Madeira*», p. 4.

¹⁷ FRANÇA *et al.*, 2016, «recursos hídricos, qualidade da água e saneamento de águas residuais».

O Plano Regional da Água da Madeira (PRAM)¹⁸ 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 de 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 Agricultura¹⁹, Bruno Silveira, do Centro de Bananicultura do Lugar de Baixo, 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 causará 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.

As Levadas – Canais de Irrigação Históricos da Madeira

As levadas são canais abertos de forma retangular ou trapezoidal, com largura máxima até 1 m e profundidade entre 30 a 80 cm, que canalizam a água de ribeiros ou fontes das zonas altas para as zonas mais baixas de cultivo. São revestidas de pedra e lima²⁰ ou esculpidas na rocha. As primeiras levadas foram construídas nas décadas de 1430 e 1440²¹, segundo métodos trazidos do norte de Portugal, que foram adaptados às condições da topografia rugosa. Muitos canais estão localizados nos flancos de formações rochosas íngremes, às vezes quase ao longo de uma linha de contorno 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 n.º 3). Hoje, esses trilhos são uma importante atração turística e permitem caminhadas versáteis por paisa-

¹⁸ PRAM, 2003, *Relatório Técnico* [...], p. 8.

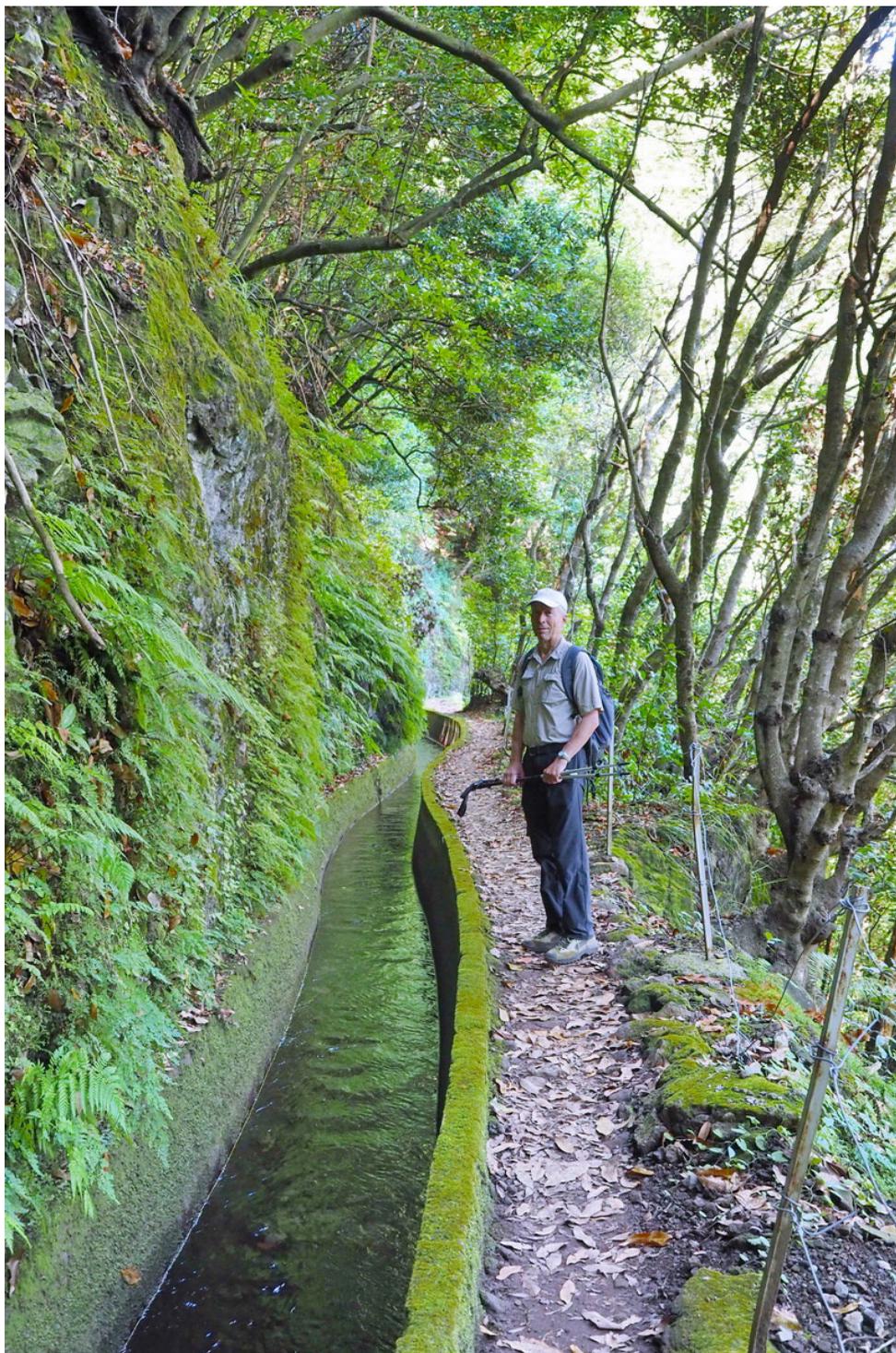
¹⁹ Comunicação pessoal, Bruno Silveira, Centro de Bananicultura, Lugar de Baixo.

²⁰ PEREIRA, 1967, *Ilhas de Zarco*, vol. I, p. 680.

²¹ MOORE, 2009, «Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century, Part I [...]», p. 366.

gens impressionantes. De facto, os gradientes destes caminhos são moderados em comparação com as encostas íngremes à esquerda e à direita.

Figura n.º 3 – Levada Típica com Sendeiro no Lado do Vale



Fonte: fotografia dos autores.

As inclinações médias de 192 levadas foram calculadas dos valores das altitudes no início (madre) e no final, bem como no comprimento de uma lista elaborada por Köhl²². Das 192 levadas, apenas uma (0,5%) foi encontrada com uma inclinação média de 0,001; 154 levadas (80%) têm uma inclinação média maior que 0,01; 100 levadas (52%) são mais íngremes que 0,03; 60 levadas (31%), mais íngremes que 0,06; e 30 levadas (16%), acima de 0,1.

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. 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 D. 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 de longas distâncias e com requisitos técnicos e financeiros altos. Desde então, há Levadas de Heréus 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 entidade²³. 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. Pereira²⁴ conta mais de 1000 km com 3,3 km de túneis. Ribeiro²⁵ faz referência a 200 levadas em meados do século XX, com um comprimento total de cerca de 1000 km, logo aumentado pelas ações da CAAHM. Vieira²⁶ e Clode, em 1996, falam de 2500 km

²² KÖHL, 2012, *Levadaverzeichnis*.

²³ VIEIRA, 2015, *As levadas. Os caminhos da água na Madeira*, p. 17.

²⁴ PEREIRA, 1967, *Ilhas de Zarco*, vol. I, p. 682.

²⁵ RIBEIRO, 1985, *A Ilha da Madeira até Meados do século XX [...]*, cit. em VIEIRA, 2015, *As levadas. Os caminhos da água na Madeira*, p. 17. VIEIRA, CLODE, 1996, *A rota do açúcar na Madeira*.

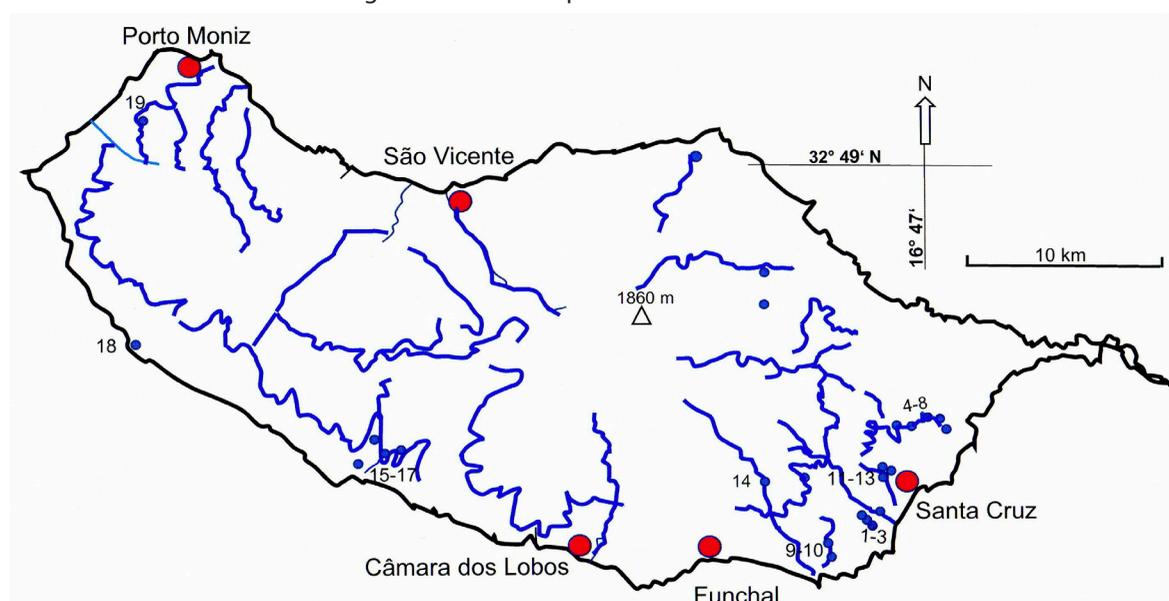
²⁶ VIEIRA, CLODE, 1996, *A rota do açúcar na Madeira*.

com túneis de 40 km. O PRAM²⁷, em 2003, menciona 1400 km. Moore²⁸, em 2009, fala em 2100 km. E Sequeira²⁹, em 2016, relata 3100 km com túneis de 80 km.

Esse impressionante comprimento inclui levadas públicas primárias, levadas públicas secundárias e levadas privadas primárias, atravessando toda a Ilha, enquanto o sistema de levadas primárias totaliza aproximadamente 800 km de extensão³⁰. A inscrição na Lista do Património Cultural Mundial (UNESCO) foi solicitada para estes 800 km de levada.

Não é possível desenhar todas as levadas num pequeno mapa como o da Figura n.º 4, onde apenas as principais são mostradas para dar uma ideia.

Figura n.º 4 – Principais Levadas da Madeira



Nota: os pequenos pontos são os locais dos moinhos de água estudados neste artigo; os números dos moinhos correspondem aos da Tabela n.º 1 abaixo.

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

²⁷ PRAM, 2003, *Relatório Técnico* [...], p. 80. MOORE, 2009, «Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century, Part I [...]», p. 356. SEQUEIRA, 2016, *Application of Levadas da Madeira for UNESCO World Heritage*.

²⁸ MOORE, 2009, «Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century, Part I [...]», p. 356.

²⁹ SEQUEIRA, 2016, *Application of Levadas da Madeira for UNESCO World Heritage*.

³⁰ UNESCO, 2017, *Levadas of Madeira*, p. 3.

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 pelos homens presos por cordas ou dentro de 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 n.º 5 mostra uma cena de trabalho na Levada do Norte, perto da Encumeada, à esquerda, e uma visão de hoje, à direita.

Figura n.º 5 – Construção da Levada do Norte – o Engenheiro e os Operários (à esquerda); Vista Atual da Levada (à direita)



Fontes: Arquivo e Biblioteca da Madeira, Eduardo Nunes Pereira, pt. 24, n.º 83; fotografia dos autores.

Considerações Hidráulicas e Cálculos – Levadas

Caudais

A velocidade média v e o caudal Q num canal aberto calculam-se pela fórmula de Manning³¹ e Strickler³² (1) e pela equação de continuidade (2):

$$v_m = k_{st} \cdot S^{0.5} \cdot R^{2/3} \quad \text{m/s} \quad (1)$$

$$\text{e } Q = v_m \cdot A \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (2)$$

onde k_{st} é o coeficiente de rugosidade de Strickler (valor recíproco do coeficiente

de Manning), S a pendente, R o raio hidráulico, $R = A/U$, com A área da secção e U o perímetro molhado.

Secções Transversais

Um canal retangular duma largura b e profundidade d tem uma área de secção de $A = b \cdot d$ e o perímetro $U = b + 2d$. A capacidade máxima de vazão Q para uma secção transversal retangular é obtida com o máximo raio hidráulico possível, o que ocorre quando a profundidade de água d é a metade da largura b ; $d = b/2$. Obviamente, as levadas são desenhadas nesta proporção. Por exemplo, diz o *Elucidário Madeirense* «que não chegam em geral a atingir um metro de largura e cuja profundidade poucas vezes vai além de 50 a 70 centímetros»³³, então $b = 1\text{ m}$, $d = 0,5\text{ m}$ com 0,2 m de bordo livre para evitar desbordado.

Coefficientes de Rugosidade ou de Fluxo

Para obter valores k_{st} realistas, os autores mediram as velocidades do caudal numas levadas típicas acima dos moinhos com uma hélice de medir. O gradiente S do canal que chega foi medido com um laser horizontal, e os coeficientes foram calculados por conversão da Equação n.º 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.

³¹ Robert Manning, 1816-1897, engenheiro irlandês.

³² Albert Strickler, 1887-1963, engenheiro suíço.

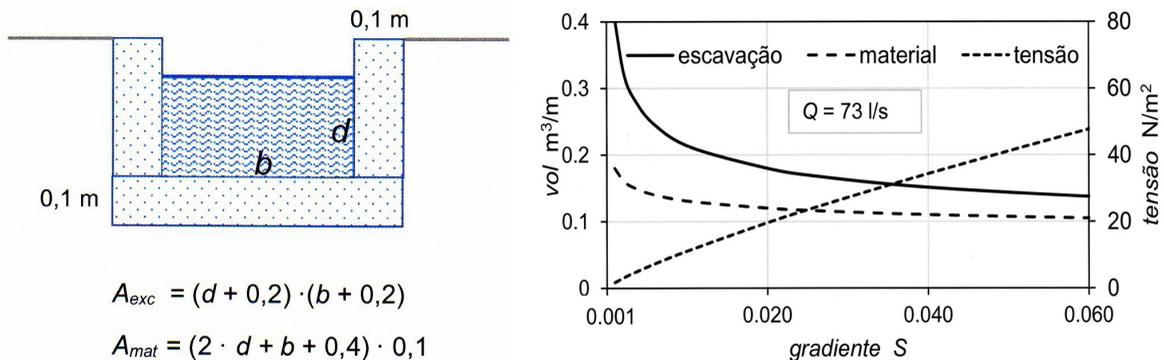
³³ SILVA e MENEZES, 1978, «Levadas», in *Elucidário Madeirense*, vol. 2, p. 227.

O Gradiente e os Volumes de Escavação e de Material

Um gradiente mais íngreme tem vantagens. Significa uma velocidade de fluxo mais alta e uma secção transversal necessária menor do canal para o fluxo fornecido, ou seja, resultam volumes mais baixos de escavação, de material e de mão de obra, portanto, os custos são mais baixos, conforme mostrado no exemplo seguinte.

Para uma levada com secção retangular forrada com alvenaria grossa de 10 cm ($k_{St} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, ver Equação n.º 1), bordo livre de 10 cm e vazão $Q = 73 \text{ l/s}$, os volumes da escavação e do material são calculados para gradientes de $S = 0,001$ até 0,06. A Figura n.º 6 mostra a diminuição considerável dos volumes necessários à medida que o gradiente aumenta.

Figura n.º 6 – Secção Protótipo de uma Levada (esquerda); Volumes de Escavação e de Material e Tensão de Cisalhamento em Função do Gradiente (direita)



O Gradiente e o Potencial Erosivo

Em contraste, a turbulência do fluxo e a tensão de cisalhamento do leito do canal aumentam. A curva de tensão de cisalhamento média em função do gradiente S , estimada por $T = \rho \cdot g \cdot R \cdot S \text{ N/m}^2$, descreve a força por metro quadrado que pode mover sólidos. Mesmo uma tensão de, por exemplo, só 4 N/m^2 pode suspender e transportar areia de 1 a 2 mm de espessura, portanto, diminui a sedimentação de areia e outros sólidos e as despesas de limpeza e manutenção, mas também pode danificar a levada com o seu potencial erosivo.

O Salto Hidráulico

Ainda mais cuidado é necessário com o fenómeno do salto hidráulico.

Em secções íngremes, a corrente acelera e o nível da água baixa. Quando a água cai abaixo do nível crítico de $d_{crit} = (Q^2/b^2/g)^{1/3}$, o fluxo muda para o modo

supercrítico rápido. Se no final do trecho íngreme o fluxo chegar a um trecho com menor declive, a velocidade baixa e o nível de água sobe ao valor correspondente no assim chamado salto hidráulico. A energia, que corresponde à diferença de altura entre o ponto inicial e final da secção íngreme, é dissipada aqui com forte turbulência. O canal precisa de reforço adequado ou uma bacia de dissipação neste ponto.

Dependendo também da rugosidade e da secção transversal, o modo supercrítico nas levadas acontece em gradientes acima de 0,04 a 0,06, na sua maioria. No caso do exemplo, foi com o gradiente de 0,05 (5%).

Nas secções íngremes das levadas, o trilho costuma ser projetado como uma simples escada.

Os Moinhos de Água e a sua Tecnologia

A necessidade de energia para cortar madeira, moer cereais e esmagar cana-de-açúcar levou logo à construção de moinhos de água, preferencialmente em sítios descendentes ou degraus topográficos das levadas, onde a energia de queda da água foi convertida em energia hidráulica útil e, ao mesmo tempo, a erosão das levadas foi reduzida. Para este estudo, 36 moinhos (ou sítios onde existiam 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. Esta roda de impulso ou de ação a jato livre é particularmente adequada para caudais pequenos com quedas maiores e, portanto, predominava nos moinhos de água nas regiões secas do Oriente Médio, em toda a região do Mediterrâneo, nas Ilhas Canárias, na Madeira e no ultramar. A Figura n.º 7 mostra o moinho de água no sítio da Terça, no Sul, perto da Ribeira Brava. O cubo de 6 metros de altura atrás da casa do moinho é alimentado com água pelo aqueduto do lado esquerdo.

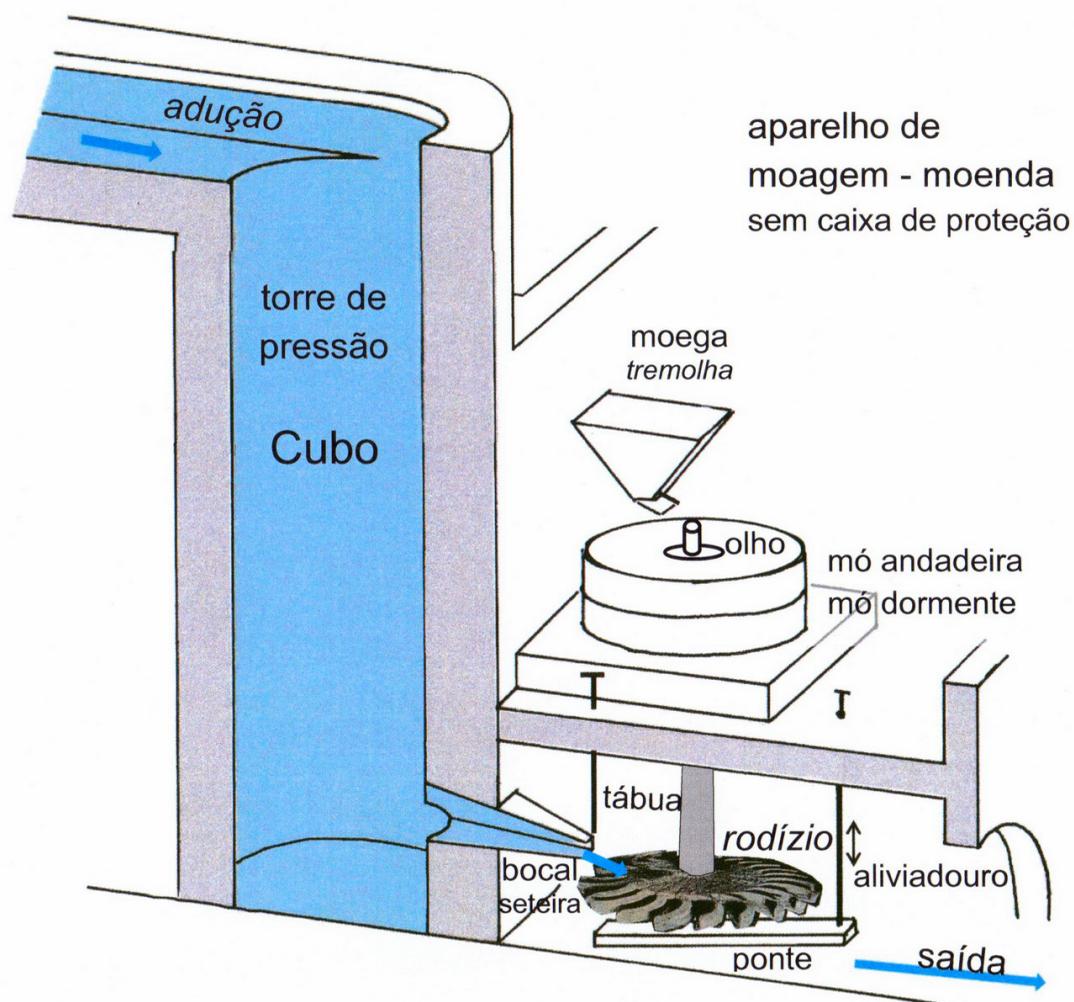
Figura n.º 7 – Moinho de Água na Terça, perto da Ribeira Brava



Fonte: fotografia dos autores.

A Figura n.º 8 mostra uma secção transversal esquemática de perspetiva de um moinho de água madeirense típico. A água da levada flui por um aqueduto quase horizontal (adução) até a torre de pressão (cubo), na qual não “cai” nem “mergulha”, como muitas vezes é descrito em falso; em vez disso, o influxo mantém a torre plenamente cheia. Devido à pressão da água, uma saída lateral próxima ao piso com um bocal (seteira) liberta um jato de água que atinge as pás da roda tangencialmente e faz girar a roda devido ao impulso e forças de deflexão do jato.

Figura n.º 8 – Secção Transversal Esquemática de Perspetiva de um Moinho de Água Madeirense Típico



Nota: a maioria dos moinhos estava equipada com dois conjuntos de moendas.

O bocal desempenha um papel importante na operação da roda. Na Madeira, assim como na Espanha, a abertura tinha o formato de um retângulo vertical³⁴, com uma largura de 3 a 4 cm. A altura com máximo de 10 cm é ajustada para o fluxo atual por 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 cairia. O mecanismo não regula o fluxo que é determinado pela água que chega, nem pode aumentar a pressão, como às vezes é mal-entendido, mas ajusta o orifício para manter a queda hidráulica e a velocidade do jato.

Descrições detalhadas sobre os aspetos hidráulicos técnicos gerais são fornecidos em Moog³⁵; detalhes técnicos específicos sobre os moinhos de água madeirenses foram encontrados apenas em Calvert³⁶.

Sob a influência da água e do ar, as rodas de água de madeira duraram apenas alguns anos. Elas desapareceram dos moinhos abandonados, por decomposição ou queimadas para uso doméstico. Em só dois dos 36 moinhos examinados, ainda se encontraram rodízios clássicos de madeira como descrito por Calvert³⁷, que ainda viu algumas delas em ação. Estas rodas relativamente bem preservadas são provavelmente as únicas que ainda existem na Ilha, inclusive em museus, portanto seria importante salvá-las. A Figura n.º 9 mostra os rodízios no moinho de água da Fonte Vermelha, perto de Maroços. Vinte e quatro segmentos (setores circulares) com um ângulo de 15 graus e uma pá na extremidade externa se encaixam e formam um disco fixo dum diâmetro total de 1,25 m em que é integrado o eixo dum diâmetro de 20 cm. As pás de 25 cm de longitude têm uma forma côncava para a deflexão do jato. Do mesmo tipo, mas mais pequenas, são as rodas do moinho da Tia Jesuína (moinho n.º 14 da Tabela n.º 1), perto da Camacha, com diâmetros de 1 m e pás de 18 cm nos 20 segmentos de 18 graus. As rodas foram as antecessoras das modernas turbinas Pelton.

³⁴ CALVERT, 1978, «Water Mills on the Levadas of Madeira», p. 52; GARRIDO ARANDA, 2002, «Molinos de Andalucía», Fig. 5.

³⁵ MOOG, 1994, *The horizontal watermill* [...].

³⁶ CALVERT, 1978, «Water Mills on the Levadas of Madeira».

³⁷ CALVERT, 1978, «Water Mills on the Levadas of Madeira», p. 52.

Figura n.º 9 – Rodízios Clássicos de Madeira, Moinho da Fonte Vermelha ou do Abel, Marroços



Fonte: fotografia dos autores.

Nota: na parede os dois bocais de onde os jatos de água saíam a mover as rodas.

O eixo de madeira continua para cima, por um eixo de aço que atravessa o teto da câmara de rodas e a mó fixa dormente, e é diretamente conectado na mó andadeira que é acionada na 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 para regular a distância entre as mós (*aliviadouro*). Além de algumas peças menores, como rolamentos e eixos, tudo foi feito de madeira. As rodas de aço foram introduzidas apenas no final do século XIX.

Para parar o moinho sem interromper o fluxo que chega, existiam desvios, formados por defletores (placas empurradas na frente do bocal para retirar o jato da roda) ou por um açude de desvio da adução.

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 alta demanda de moagem e aquando a existência de 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 ser elevada e invertida.

Considerações Hidráulicas e Cálculos – Moinhos de Água

Velocidade do Jato

O jato de água pelo bocal da torre desempenha um papel importante na operação da roda. Segundo a lei de Torricelli³⁸, 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, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Frequência Rotacional (Revoluções por Minuto)

Sob condições ideais, a velocidade periférica de uma roda de água é de $\mu = 0,5 v$ (turbina de Pelton: $\xi \approx 0,48$). Pelos rodízios e suas pedras um valor de $\xi = 0,35$ é assumido devido ao efeito de deslizamento, quando moendo com uma folga estreita entre as pedras. A frequência rotacional da pedra andadeira é então $r = \xi \cdot v / (\Pi \cdot D) \cdot 60 \text{ min}^{-1}$ (revoluções por minuto), onde D é o diâmetro do círculo do jato da roda. A substituição de v pela Equação n.º 3 dá:

$$r = \xi \cdot 0.91 \cdot \frac{\sqrt{2g h}}{\Pi \cdot D} \cdot 60 = \xi \cdot 77 \cdot \frac{\sqrt{h}}{D} \text{ min}^{-1} \quad (4)$$

Por exemplo, com uma queda de $h = 5 \text{ m}$ e um diâmetro do círculo de jato da roda $D = 1 \text{ m}$, a velocidade do jato é $v = 9 \text{ m/s}$ (Equação n.º 3) e a frequência de rotação $r \approx 60 \text{ min}^{-1}$ (Equação n.º 4), o que é confirmado na ordem de magnitude por Calvert³⁹.

³⁸ Evangelista Torricelli, 1608-1647, físico e matemático italiano.

³⁹ CALVERT, 1978, «Water Mills on the Levadas of Madeira», p. 53.

Força de Impulso do Jato às Pás da Roda

Rodas de impulso ou ação típicas tiveram influxos 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:

$$F_I = \rho \cdot Q \cdot (v - u) \quad (5)$$

onde $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ é a densidade da água, $Q =$ o caudal em m^3/s , $v =$ velocidade do jato em m/s e $u =$ a velocidade periférica do círculo do jato da roda.

O jato de um moinho de água madeirense de uma queda de $h = 6 \text{ m}$ tem a velocidade de $v = 9,9 \text{ m/s}$ (Equação n.º 1). No caso do moinho n.º 15 da Tabela n.º 1 com o caudal $Q = 24 \text{ l/s}$, o jato daria uma força de impulso de $F_I = 1000 \cdot 0,024 \cdot (1-0,35) \cdot 9,9 = 154 \text{ N}$ sobre as pás atingidas. Um caudal de $Q = 52 \text{ l/s}$ (moinho 8) produziria já uma força de 334 N, alta para pás de madeira. Conclui-se, e de acordo com as estimativas na Tabela n.º 1, que os caudais dos moinhos de água madeirenses estavam abaixo de 60 l/s por roda.

Eficiência

Uma máquina como a roda do moinho só pode converter uma parte da energia hidráulica em energia mecânica, enquanto que a outra parte se difunde, em forma de turbulência e finalmente em forma de calor. Na literatura científica 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, as pás em forma de colher bem trabalhadas atingem eficiências⁴⁰ de 30 a 35%. Também Moog⁴¹ reporta valores médios de 30 a 35% para rodas de ação e cita valores de 29 e 49% para dois moinhos no Valais. Suportado pelos resultados da operação de ensaio de um moinho de maré restaurado das Fontes, Município de Lagoa, a eficiência de 35% foi determinada⁴². O valor é confirmado na sua ordem de magnitude pelas quantidades de produção de farinha, reportadas de moinhos de maré em Portugal⁴³. Concluindo, assume-se uma eficiência de $\eta = 0,35$ para a avaliação da produção de energia das rodas de ação históricas de madeira dos moinhos de água

⁴⁰ RÜHLMANN, 1875, *Allgemeine Maschinenlehre* 1, p. 362.

⁴¹ MOOG, 1994, *The horizontal watermill* [...], p. 45.

⁴² WITTENBERG, 2011, «Portuguese Tide Mills and their Operation», p. 17.

⁴³ MIRANDA, 2008, «Tide Mill of Cais [...]», p. 250.

madeirenses. As rodas de ferro usadas desde o final do século XIX provavelmente tiveram eficiências até um máximo de 55%.

Produção de Energia e Capacidade de Moagem

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

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

com eficiência $\eta = 0,35$, densidade da água $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, gravitação $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, caudal Q em m^3/s e queda h em m. A queda hidráulica é a diferença entre o nível da água no cubo e o nível da roda.

A Tabela n.º 1 mostra os principais parâmetros dos moinhos de água madeirenses investigados. As coordenadas, latitude e longitude, foram medidas 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.

Tabela n.º 1 – Moinhos de Água Investigados – Principais Parâmetros

Moinho de Água		Levada	Latitude	Longitude	Altitude	Queda	Fluxo	Potência
N.ºs – ver Figura n.º 4			ºN	ºE	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. Pedro		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	Vitória	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 Jesuína	do Blandy	32,6855	-16,8732	950	7,5	24	618
15	Terça	Rib. ^a da 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 dos Moinhos	32,8376	-17,2947	760	34	84	15 322

Os fluxos de projeto Q das levadas com secções retangulares são calculados com as Equações n.ºs 1 e 2 para profundidades de água com metade das larguras da levada ($d = b/2$, ver acima) e $k_{st} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (alvenaria áspera assumida), exceto para o moinho n.º 21. O moinho de água das Achadas da Cruz é construído apenas no final do século XIX é um caso especial (ver abaixo). A parte a montante da levada de alimentação provavelmente foi revestida com argamassa lisa, portanto, assumiu-se um $k_{st} = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. 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 n.º 21 de $\eta = 55\%$.

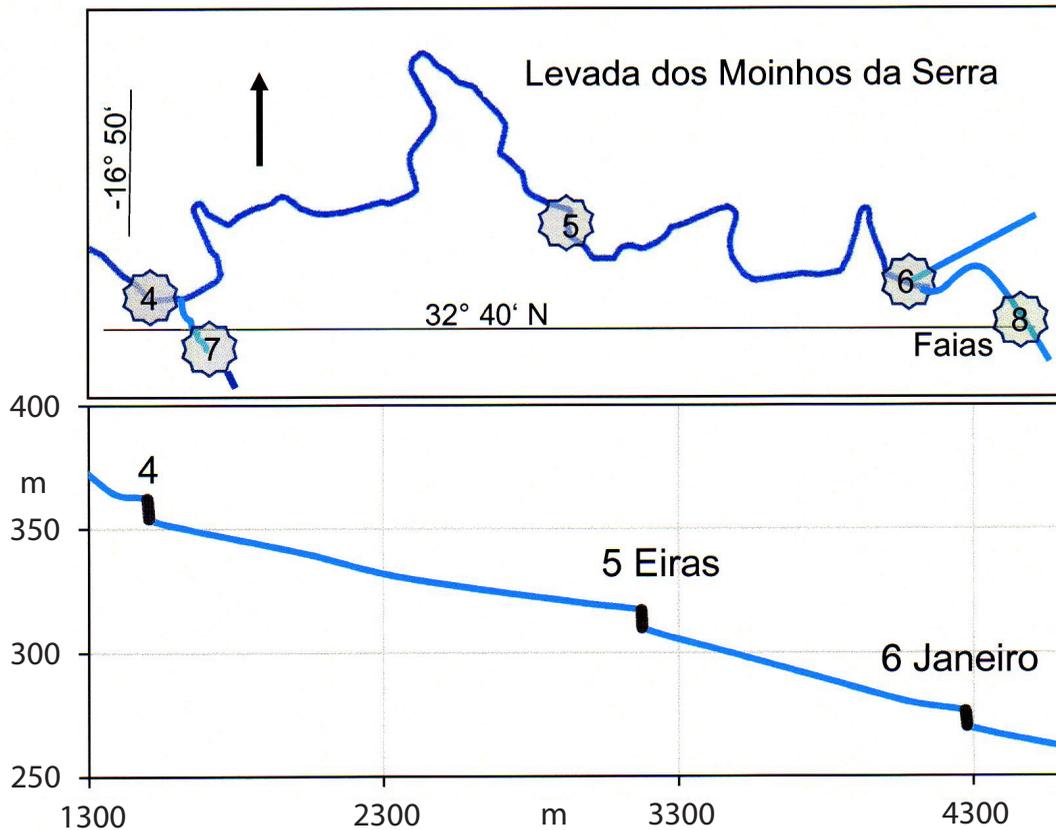
De acordo com várias derivações⁴⁴, pode-se supor que, ao moer trigo com uma finura de $d_{97} = 154 \mu\text{m}$, dependendo do grão e da finura da moagem, um consumo de energia de 21 kWh/ton era típico para rodas horizontais. Supondo isso, um moinho por exemplo de $P = 0,6 \text{ kW}$ podia moer uma tonelada de trigo em cerca de 35 horas.

Cascatas de Moinhos

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

⁴⁴ MOOG, 1994, *The horizontal watermill* [...], p. 45; WITTENBERG, 2011, «Portuguese Tide Mills and their Operation», p. 17.

Figura n.º 10 – Cascata de Moinhos na Levada dos Moinhos da Serra, Mapa e Secção



A ideia de usar o fluxo de um canal várias vezes, através de cascatas de moinhos, é óbvia. Um exemplo histórico comparável é a sequência de 11 moinhos de água no principal canal de irrigação (Acequia mayor) do Palmeral de Elche⁴⁵, Espanha.

Caso Especial do Moinho N.º 21 – Moinho das Achadas da Cruz

A idade da Levada do Moinho é desconhecida dos utilizadores ou das autoridades competentes do Funchal ou do Porto Moniz. O moinho, construído no final do século XIX, 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 acima, a água é conduzida através de um tubo de betão enterrado de 300 mm até ao moinho.

⁴⁵ MELÉNDEZ-PASTOR *et al.*, 2015, «Watermills in the historic irrigation system “Palmeral de Elche” [...]».

Este tubo está totalmente cheio e toma o lugar da torre. Assumindo uma perda hidráulica de 1 m no tubo de betão, uma queda líquida de 34 m está disponível para as duas rodas.

Essas rodas são encontradas parcialmente cobertas por detritos na saída da câmara de rodas (Figura n.º 11). 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.

Figura n.º 11 – Moinho das Achadas da Cruz, Câmara de Roda



Nota: em primeiro plano, rodízio de aço danificado com pás curvas duplas; segundo rodízio ao fundo que poderia ser desmontado e transportado para um museu.

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 kW, 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 50.

De Moinhos de Água a Energia Hidroelétrica

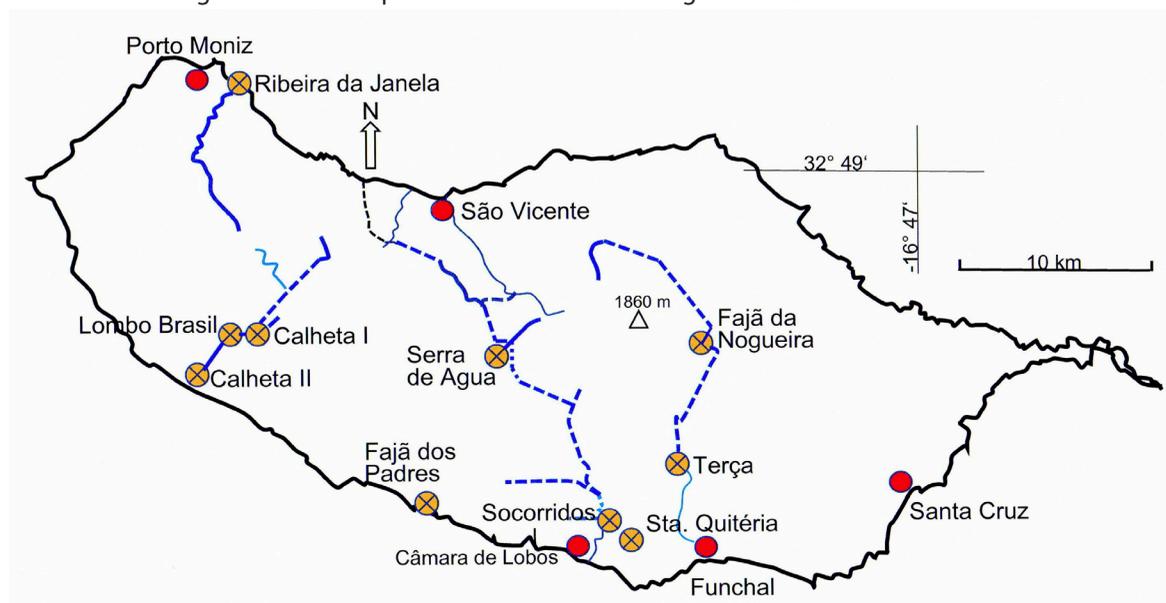
Até meados do século XX, a maioria dos moinhos da Madeira parou a sua produção. As grandes empresas de moagem elétrica tinham a vantagem da concentração económica e do *marketing*. Além disso, os moinhos de água foram abandonados devido à regularização do mercado de cereais em Portugal, juntamente com o baixo custo de energia. Ainda em 1863, 365 moinhos foram contados na Madeira, 79 deles no Funchal⁴⁶. Hoje, apenas o moinho de água de São Jorge, no norte da Ilha, está moendo e vendendo farinha; alguns outros moinhos foram restaurados para fins turísticos e educacionais.

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 capacidades de potência instalada de 4,8 e 2 MW, respetivamente. Desde então, o sistema de energia hidroelétrica da Madeira cresceu para nove centrais, mostradas na Figura n.º 12. As quedas hidráulicas (alturas de queda) são entre 181 e 637 m, portanto são instaladas rodas Pelton (turbinas) 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 capacidade instalada total de 46,5 MW, o sistema produziu 73,9 GWh em 2017⁴⁷.

⁴⁶ VIEIRA, 2015, *As levadas. Os caminhos da água na Madeira*, p. 25.

⁴⁷ EEdM, 2018, *Annual Report 2017, Technical Information*, p. 18.

Figura n.º 12 – Esquemas Modernos de Energia Hidroelétrica da Madeira



Nota: as linhas tracejadas são túneis.

A Figura n.º 12 mostra que longos túneis foram construídos e transportam água do Norte e de áreas mais altas para o Sul, passando por diferentes centrais elétricas, 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 recondiçionadas para transportar água para os reservatórios, por exemplo, a Levada do Alecrim até a barragem do Pico da Urze. O equipamento das centrais foi adaptado. A menor altitude e os reservatórios de restituição permitem dotar os volumes de irrigação e de água doméstica no devido tempo. A descrição desse projeto múltiplo, porém, sobrecarregaria este artigo.

Conclusão

A tecnologia aplicada e mais desenvolvida em seiscentos anos, 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 o mesmo fluxo 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.

Fontes e Bibliografia

- CALVERT, N. G., 1978, «Water Mills on the Levadas of Madeira», in *Industrial Archaeology Review*, 3, pp. 45-53.
- CAMÕES, L. de, 1988 (original 1572), *Os Lusíadas*, Mem Martins, livros de bolso Europa-América 227.
- EEdM (Empresa de Electricidade da Madeira), 2018, *Annual Report 2017, Technical Information*, Funchal.
- FRANÇA, J. Pimenta de, MATOS, J. Saldanha, OLIVEIRA, R. Proença, 2016, «recursos hídricos, qualidade da água e saneamento de águas residuais», in *Aprender Madeira*, disponível em <http://aprendermadeira.net/article/recursos-hidricos-qualidade-da-agua-e-saneamento-de-aguas-residuais>, consultado em 2021-01-11.
- FRUTUOSO, Gaspar, 1873 (manuscrito 1590), *As Saudades da Terra, História das Ilhas do Porto-Sancto, Madeira, Desertas e Selvagens*, Funchal, Typ. Funchalense.
- GARRIDO ARANDA, José M., 2002, «Molinos de Andalucía», in *Actas de III Jornadas de Molinología*, Murcia, pp. 283-299.
- KÖHL, Daniel, 2012, *Levadaverzeichnis*, disponível em www.danishome.ch/Levadaverzeichnis.htm, consultado em 2021-01-15.
- MELÉNDEZ-PASTOR, Ignacio, NAVARRO PEDREÑO, J., WITTENBERG, H., 2015, «Watermills in the historic irrigation system “Palmeral de Elche”, Spain – an example of early hydropower exploitation», in *Water Science and Technology: Water Supply*, 15.5, pp. 1140-1151.
- MIRANDA, J. A., 2008, «Tide Mill of Cais (Montijo) – Rebirth of a Memory», in *Transactions of the 12th TIMS Symp.*, pp. 243-265.

- MOOG, Berthold, 1994, *The horizontal watermill – history and technique of the first prime mover*, The International Molinological Society.
- MOORE, Jason, 2009, «Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century, Part I, From “Island of Timber” to Sugar Revolution, 1420–1506», in *Review, A Journal of the Fernand Braudel Center*, 32, 4, pp. 345-390.
- MOORE, Jason, 2010, «Madeira, Sugar, and the Conquest of Nature in the “First” Sixteenth Century, Part II, From Regional Crisis to Commodity Frontier, 1506–1530», in *Review, A Journal of the Fernand Braudel Center*, 33, 1, pp. 1-24.
- PEREIRA, Eduardo C. N., 1967, *Ilhas de Zarco*, vol. I, Funchal, Câmara Municipal do Funchal.
- PEREIRA, Jorge, 1998, «Gestão de Água da Madeira», in *Revista Indústria da Água*, n.º 28, IPE-Águas de Portugal, Lisboa, pp. 3-11.
- PRADA, Susana, GASPAR, M. A., SILVA, M. O., CRUZ, J. V., PORTELA, M. M., HORA, G. R., 2003, «Recursos Hídricos da Ilha da Madeira», in *Comunicações do Instituto Geológico e Minero*, Funchal, 90, pp. 125-152.
- PRAM (*Plano Regional da Água da Madeira*), 2003, *Relatório Técnico – Versão para Consulta Pública*, Funchal, Instituto da Água.
- PRIOR, Victor, 2020, «clima e meteorologia», in *Aprender Madeira*, disponível em <http://aprendermadeira.net/article/clima-e-meteorologia>, consultado em 2021-01-11.
- RIBEIRO, Orlando, 1985, *A Ilha da Madeira até Meados do século XX, Estudo Geográfico*, Lisboa, Instituto de Cultura e Língua Portuguesa.
- RÜHLMANN, Moritz, 1875, *Allgemeine Maschinenlehre 1*, Braunschweig, Schwetschke und Sohn.
- SEQUEIRA, Miguel, 2016, *Application of Levadas da Madeira for UNESCO World Heritage*, 4th WA International Symposium on Water and Wastewater Technologies in Ancient Civilizations, Universidade de Coimbra.
- SILVA, Fernando Augusto da, MENEZES, Carlos Azevedo de, 1978, «Levadas», in *Elucidário Madeirense*, vol. 2, Funchal, Secretaria Regional de Turismo e Cultura, pp. 227-259.
- UNESCO, Permanent Delegation of Portugal, 2017, *Levadas of Madeira*, disponível em <https://whc.unesco.org/en/tentativelists/6230/>, consultado em 2021-01-11.
- VIEIRA, Alberto, CLODE, Francisco, 1996, *A rota do açúcar na Madeira*, Funchal, Associação dos Refinadores de Açúcar Portugueses.

- VIEIRA, Alberto, 1999, «Os italianos na Madeira: séculos XV-XVI», in *Arquipélago – História*, 2.^a série, III, pp. 11-28.
- VIEIRA, Alberto, 2015, *As levadas. Os caminhos da água na Madeira*, Cadernos de divulgação do CEHA, n.º 9, Funchal.
- WITTENBERG, Hartmut, 2011, «Portuguese Tide Mills and their Operation», in *Int. Molinology*, 82, pp. 11-18.