



Rodes hidràuliques de la vall d'Ordino: càlcul de la potència instal·lada

*Alan Ward i Koeck**

Català

Les rodes d'aigua a Ordino: càlcul de la potència instal·lada

En el curs del riu Valira del Nord a la parròquia d'Ordino es poden trobar les restes o instal·lacions conservades de no menys d'onze rodes hidràuliques. En alguns casos, hi ha indicis de la seva presència des de principi de l'èdat mitjana. Les seves aplicacions incloïen la mòlta del blat, serradores de fusta i altres aplicacions en les fargues de ferro. L'estudi del lloc i de les tecnologies emprades dona peu a un càlcul de la seva potència, notable per l'època i els recursos disponibles.

Castellano

Ruedas hidráulicas en el valle de Ordino: cálculo de la potencia instalada

En el curso del río Valira del Nord de la parroquia de Ordino se pueden encontrar restos o instalaciones conservadas de no menos de once ruedas hidráulicas. En algunos casos, existen indicios de su presencia des de principios de la edad media. Sus aplicaciones incluían moler el trigo, las serradoras de madera y otras aplicaciones en las fraguas de hierro. El estudio del lugar así como de las tecnologías usadas da lugar al cálculo de su potencia, notable por la época y los recursos disponibles.

Français

Roues hydrauliques de la vallée d'Ordino: calcul de la puissance installée

Au long de la rivière Valira del Nord à la Parròquia d'Ordino se trouvent restes et installations conservées d'au moins 11 roues hydrauliques. Dans certains cas, il existe des indices de leur présence depuis le début du Moyen Âge. Leurs applications incluent moudre le blé, les scieries et d'autres applications dans les forges de fer. L'étude du lieu et des technologies utilisées permet le calcul de leur puissance, remarquable pour l'époque et les ressources disponibles.

Abans de la Revolució Industrial i la posterior generalització de l'ús dels combustibles fòssils, l'ús dels recursos hídrics per subministrar força motriu era gairebé l'única manera per aproximar-se a una industrialització. I és un domini en què el Pirineu podia tenir un cert avantatge sobre llocs a la plana, per la relativa abundància de recursos hídrics. La presència de moles, serradores i fargues hidràuliques és ben documentada en molts indrets de les Valls –no és en va que existeix la Baixada del Molí, a Andorra la Vella– però a Ordino hom en pot trobar una certa concentració de documentades i, en alguns casos, encara presents.

Des del Serrat fins a la Massana, i en poc més d'11 quilòmetres del curs del riu Valira del Nord, tenim constància de:

- les fargues al Serrat (Serrat 1, Serrat 2 i Puntal)
- les moles de Llorçs
- la mola del Mas de Solà i la serradora a la Cortinada
- la serradora del Nicolau a Ordino
- la farga Areny
- la farga Rossell.

A més, es poden constatar algunes restes d'altres obres hidràuliques pels voltants de la confluència del riu de Segudet a la capella de Santa Bàrbara.

Tipologia i funcionament de les rodes

Una roda hidràulica pot aprofitar l'energia de l'aigua en dues formes:

- L'energia *cinètica*, és a dir la forma d'energia que emmagatzema l'aigua a través de la seva velocitat. Si l'aigua entra en una roda amb una velocitat elevada, i en surt amb una de més baixa, ha perdut energia cinètica –que la roda ha recuperat.

- L'energia *potencial*. Aquesta és una forma d'energia que no s'ha realitzat a través de la velocitat de l'aigua, però que hi roman de manera potencial a través de la seva alçada. Si una quantitat d'aigua està a un metre de terra, té una certa quantitat d'energia potencial que pot transformar en energia cinètica al moment de caure-hi. Si la mateixa quantitat d'aigua està a dos metres de terra, tindrà, potencialment, el doble d'energia –i per tant al caure aconseguirà una velocitat més elevada.

En tots els casos, una part de l'energia que la roda ha rebut de l'aigua es perdrà a través de la fricció (dels eixos), però una gran part serà disponible per a l'aplicació final d'aquesta roda: serrar fusta, fer girar una roda de mola, etc.

Els romans coneixien prou bé la tecnologia de la roda vertical, en les seves dues formes: atacada per l'aigua a la part superior o bé en la part inferior.

La roda vertical en què l'aigua circula per baix és la més fàcil de construir. Per aquest

motiu sovint es troba en molins i ponts-molins en rius de la plana de l'època medieval. Fins i tot han existit algunes instal·lacions en què el suport de la roda era flotant, i eliminava així tota necessitat per una canalització de l'arribada d'aigua.

Per contra, és menys eficient que altres instal·lacions, ja que no s'aprofita l'energia potencial d'una caiguda d'aigua: l'aigua entra i surt a la mateixa alçada. Però com que l'aigua accelera el moviment de la roda, aquesta frena una part de l'aigua, i és aquesta pèrdua de velocitat –i per tant, d'energia cinètica– que recupera la roda pel seu moviment.

La roda vertical amb adducció d'aigua a la seva part superior pot aprofitar volums més reduïts d'aigua, en rebre energia no només de la velocitat de l'aigua (energia cinètica) sinó també per la seva caiguda (energia potencial). Per contra, requereix una canalització sobreelevada per adduir l'aigua, cosa que en complica la construcció. Com més sobreelevada sigui la canalització, més energia potencial és disponible, cosa que vol dir que les rodes de grans dimensions pro-

dueixen una energia útil proporcional al seu diàmetre, fins al punt que sovint l'energia potencial és preponderant respecte de la cinètica.

Aquests dos factors fan que sigui particularment apropiat en instal·lacions de muntanya, amb rius de menys cabal que a la plana però amb més desnivell.

L'aprofitament de les rodes verticals és directe en usos en què el moviment útil ha de ser vertical, com una serradora o una farga. Per contra, en aplicacions com la mòlta de blat –en què la mola sol ser d'eix vertical– cal intercalar un sistema d'engranatges entre la roda hidràulica i la mola, amb la qual cosa perd una part de l'energia per l'efecte de la fricció.

En el cas d'un molí, la tecnologia de la roda horitzontal o *rodet*, té dos avantatges:

- la senzillesa, ja que no requereix cap mecanisme d'engranatges per a un molí, i la roda de la mola pot ser muntada directament sobre l'eix de la roda hidràulica, i
- l'eficiència.

Cal destacar que en màquines modernes que empren rodes Pelton o els seus derivats l'eficiència sobrepassa fàcilment el 90% –més del 90% de l'energia de l'aigua és

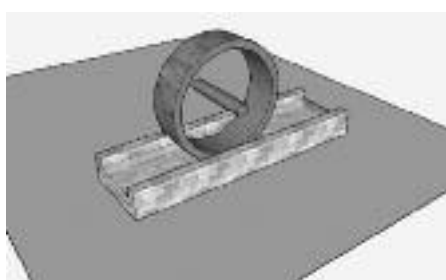


Figura 1: Roda vertical, amb adducció inferior de l'aigua.

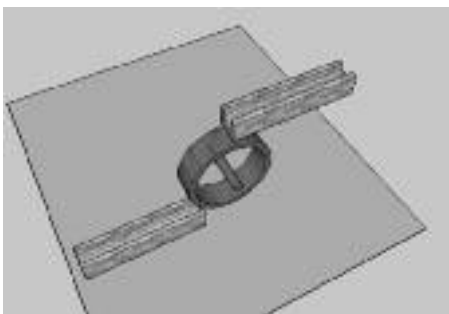


Figura 2: Roda vertical, amb adducció superior d'aigua.

transmesa a l'arbre de sortida de la roda-. Fins i tot emprant tecnologies més antigues i materials com la fusta una eficiència de més del 50% és possible.

Un segon punt al seu favor és la compacitat: emplaçant la mola en un primer pis i la roda hidràulica en la planta baixa arran del riu, es poden construir instal·lacions amb menys de 10 m² de superfície al sòl.

Pel que fa a l'energia, de fet l'aigua entra i surt de la roda a nivells molt poc

diferents –la diferència d'alçada correspon tan sols al gruix de la roda, és a dir unes desenes de centímetres en el millor dels casos-. Això vol dir que l'energia rebuda per la roda ha de ser en forma cinètica, no potencial. Per aquest motiu, cal que l'últim tram de la canalització d'adducció d'aigua –que es troba sobrelevada respecte a la roda- estigui en pendent, per transformar així l'energia potencial de l'alçada de l'aigua respecte a la roda en energia cinètica directament aprofitable. De fet, durant el seu funcionament es veu molt clarament l'acceleració que pateix l'aigua en aquesta canalització.

Però tampoc no cal que aquest últim conducte sigui massa llarg, ja que si no es dissiparia una part de l'energia a través de la fricció entre l'aigua i les parets del conducte. És per aquest motiu que aquest últim tram sol ser relativament curt, i inclinat, amb valors d'entre 30° i 45° sota l'horitzontal.

Datació de les rodes de la vall d'Ordino

Pot ser difícil datar la construcció inicial d'algunes d'aquestes instal·lacions, ja que la versió més recent –i que es pugui datar per mitjans documentals- pot haver aprofitat en part una instal·lació anterior, com per exemple les canalitzacions d'adducció d'aigua.

Alguns elements ens poden, però, fer sospitar de la seva antiguitat. Pel que fa a les moles de blat, en l'acta de consagració de la catedral de Santa Maria de la Seu, l'any 839, ja se n'esmenta la presència, entre els terrenys amb què es dota:

*Condotamus eciam [...] fontibus, molendiniis, piscariis,...*¹

Aquesta figura es fa relativament comuna en totes les donacions posteriors a la catedral, cosa que atestaria la presència d'un cert nombre de moles a les terres del bisbat d'Urgell.

A Ordino, un primer reflex documental n'és el nom propi *Ross de Moles*, un dels signataris de la Concòrdia de l'any 1162 entre els homes d'Andorra i el bisbe Bernat Sanç:

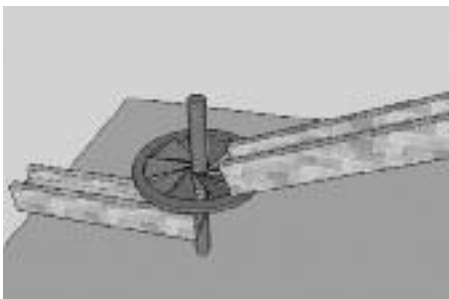


Figura 3: Roda horitzontal (o rodet), atacat per una canalització inclinada.

1. BARAUT, C. *Cartulari de la Vall d'Andorra*. Govern d'Andorra, 1988. Vol. I, pàgina 99.

*De villa Ordinau: P. Mir et R. Mir et Ross de Moles, A. Suger, A. Petri de Cortinada et Mir Isarni de Lorc.*²

Sabem, doncs, que almenys arribats al segle XII hi havia un lloc a la parròquia d'Ordino que era conegut per la presència de moles, i que pot o no tenir relació amb l'actual pont de les Moles, a Llorts.

Per altra banda, Bonales³ dóna la data d'aparició de la forja hidràulica entre els anys 1290 i 1310. L'última farga construïda a Ordino, la farga Rossell, l'any 1845, disposava de dues rodes verticals pel mecanisme del mall i del martinet, a més d'un sistema complementari per insuflar aire al foc.⁴

Podem presentar, doncs, una doble tipologia de rodes hidràuliques, segons la seva aplicació:

- Rodes per a la mòlta de blat, amb roda horitzontal. Sembla que la seva forma actual sigui relativament recent –data, en tot cas, després de la introducció de la roda horitzontal– i per tant no es pot descartar una reconstrucció d'una forma primitiva equipada amb roda vertical, en el mateix lloc i aprofitant una part de les instal·lacions annexes.
- Rodes per a serradores i fargues, i que fins al final han mantingut la forma vertical amb adducció superior de l'aigua.

Factors que intervenen en la localització d'una roda hidràulica

Existeixen dos tipus de factors que es tenien en compte a l'hora de decidir la localització d'una roda hidràulica:

- factors tècnics, referents a les característiques desitjables per al lloc, i
- altres factors externs, com podien ser la proximitat del material a tractar en la instal·lació.

Entre els factors tècnics, el més important era el pendent del riu, ja que com més important era, més permetia escurçar la llargada del canal d'adducció per alimentar la roda.

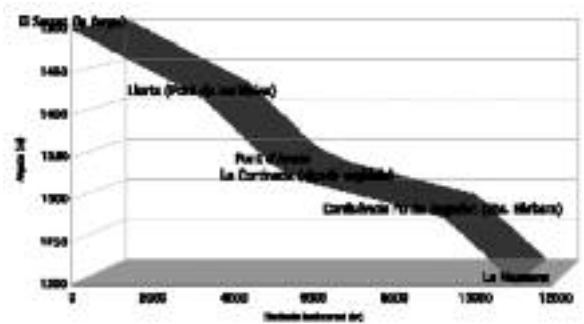


Figura 4: Perfil del riu Valira del Nord.

2. *Op. cit.*, pàgina 195.

3. BONALES, J. *Entre Ordino i la Massana: una història d'homes, terres i límits*. Comú d'Ordino, 2007. Pàgina 56.

4. CODINA, O. et al. *La Farga Rossell: el zenit de l'obtenció del ferro pel sistema directe, 1842-1876*. Govern d'Andorra. Ministeri de Turisme i Cultura, 2001. Monografies del Patrimoni Cultural d'Andorra.

El pendent del Valira del Nord oscil·la, segons el tram, entre l'11 i el 45%. Això no obstant, es tracta d'una mitjana i poden existir pendents locals més forts, i per tant més apropiats per a la instal·lació de rodes. Aquest seria el cas del revolt del riu entrant a la Cortinada, en què es troben tant la mola del Mas del Solé com la serradora.

El pendent mínim dels canals d'adducció havia d'assegurar el flux en bones condicions. En Vitruvi⁵, s'indiquen els valors emprats pels enginyers romans per als seus aqüeductes, entre el 2,5 i el 5%. Els canals que resten a la vall d'Ordino poden tenir pendents al voltant del 5%. Tenint en compte aquest valor, es poden calcular les llargades necessàries del canal d'adducció en funció de l'alçada de la caiguda necessària a la roda:

- Es pot constatar que un pendent del riu localment superior al 40% és gairebé una necessitat pràctica per permetre la construcció d'una instal·lació sense incórrer en costos de construcció elevats.

- Un segon punt que calia tenir en compte era la velocitat de l'aigua. Ara bé, el flux dels rius de muntanya es caracteritza per ser altament turbulent, amb la qual cosa perd fàcilment l'energia que rep de la pèrdua d'alçada mentre baixa. Si bé es poden mesurar velocitats del flux superiors a 1 m/s al centre d'un riu amb poques roques⁶, la velocitat mitjana baixa considerablement en el context d'un riu tumultuós com el Valira del Nord.

Pendent riu (%)	Alçada caiguda (m)		
	2	3	5
10	400,0	600,0	1000,0
30	133,3	200,0	333,3
30	80,0	120,0	200,0
40	57,1	85,7	142,9
100	21,1	31,6	52,6
200	10,3	15,4	25,8

Figura 5: Llargada del canal d'adducció (m) en funció del pendent del riu i alçada de caiguda.

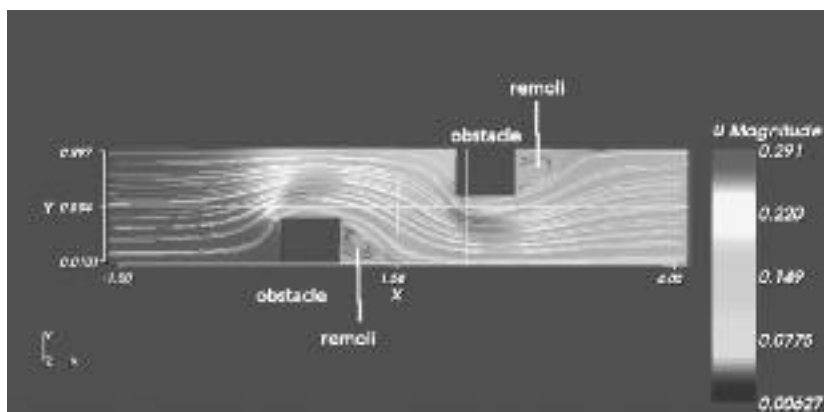


Figura 6: Model informàtic d'un flux, entrant per l'esquerra del model i pertorbat per dos obstacles. Noteu la presència de remolins darrere dels obstacles, així com la compressió del flux al seu pas –amb pèrdua d'energia associada. Font: Elaboració pròpia.

5. VITRUVI *De Architectura*. Llibre VIII, epígraf VI.

6. Per exemple, en la part canalitzada del riu Valira a l'altura del pont de la Rotonda a Andorra la Vella.

De fet, sovint s'observa una velocitat mitjana superior en els canals d'adducció a les rodes hidràuliques que en el mateix riu, a causa de la seva construcció amb parets més llises i de l'absència d'obstacles al pas de l'aigua.

Càlcul de la potència disponible

La potència disponible és la quantitat d'energia disponible per unitat de temps, o el que es diria en termes matemàtics, la seva *derivada respecte al temps*. D'altra banda, l'energia disponible serà la diferència entre l'energia entrant i l'energia sortint. De fet, estem fent una mena de comptabilitat amb, a la columna *Ingressos*, l'energia entrant, i a la columna *Despeses*, la sortint. El que ens quedi dins el sistema és pur benefici.

En una instal·lació hidràulica, aquest càlcul es pot resumir en:

$$P_a = P_e - P_s = \frac{dE_e}{dt} - \frac{dE_s}{dt}$$

en què l'energia entrant E_e depèn a la vegada de la velocitat de l'aigua entrant – energia cinètica– i de l'energia potencial que guanya a través de la seva caiguda. L'energia sortint E_s del líquid seria nul·la en el cas òptim –l'energia cinètica és nul·la si l'aigua manté una velocitat mínima a la seva sortida, i l'energia potencial també és gairebé nul·la ja que la sortida de l'aigua és com més baixa millor.

En el cas d'una roda vertical, amb caiguda h , densitat d'aigua d , cabal d'aigua q , velocitat d'entrada de l'aigua v_e , velocitat radial de rotació v_r , i radi r , aquesta equació es pot escriure com:

$$P_a = \frac{1}{2} d q v_e^2 + d q g h - \frac{1}{2} d q v_r^2$$

Se suposa la sortida de l'aigua a una alçada aproximada de la meitat de la roda. En un cas real, possiblement es podria guanyar una mica sobre aquest valor, però la diferència seria marginal. Tal com ens ho podríem suposar, això implica que la potència disponible disminueix amb la velocitat de rotació de la roda, ja que amb velocitats massa elevades l'aigua de fet en surtiria accelerada. En el gràfic següent, es representa el resultat en el supòsit d'un cabal de $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ amb densitat 1.000 kg/m^3 , velocitat d'entrada 1 m/s , alçada de caiguda 3 m i radi $1,25 \text{ m}$.

En una aplicació real, la resistència de la càrrega (roda de mola o una altra) pot ser variable. Com a simplificació, podem suposar una resistència proporcional a la velocitat, cosa que implica una equació de la forma per la potència absorbida per la càrrega:

$$P_r = k v_r^2$$

A partir del gràfic de potència podem arribar a dues constatacions:

- La velocitat de rotació de la roda s'estabilitza a un valor en què les dues potències s'equilibren. En funció del valor de k , pot ser inferior o bé superior a la velocitat d'entrada de l'aigua.

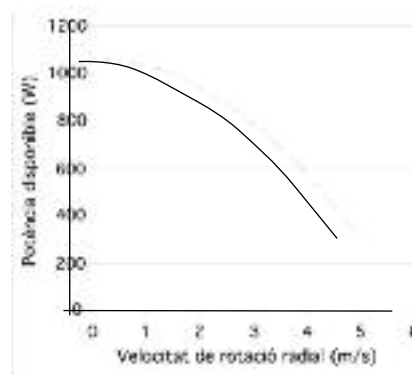


Figura 7: Potència disponible segons la velocitat de rotació d'una roda vertical.

- Si el constructor de la roda la dissenya de manera que tingui velocitat d'equilibri relativament lenta, és possible recuperar una fracció elevada de la potència disponible. En el cas dels supòsits anteriors, la potència absorbida a l'equilibri era el 97% de la potència màxima disponible, a una velocitat radial de la roda de 0,9 m/s –inferior, doncs, a la velocitat d'entrada de l'aigua.

Cal tenir en compte que una part de la càrrega és deguda a la fricció dels diferents elements de construcció de la roda, essencialment entre l'eix i els seus suports. Un altre enfocament seria dir que, sigui quina sigui la tècnica de construcció emprada, de totes formes existiren aquestes pèrdues.

El càlcul del cas de la roda horitzontal és semblant, i dóna lloc a les mateixes equacions. El seu radi pot ser considerablement inferior, però, i així la pèrdua d'energia cinètica generada per velocitats de rotació superiors és més petita –per això el seu avantatge comparatiu si la seva aplicació final ho permet.

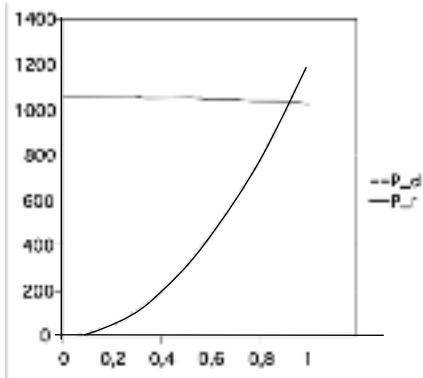


Figura 8: Potència disponible i absorbida en funció de la velocitat de rotació de la roda.

Un exemple típic: la mola del Mas del Solé a la Cortinada

Aquesta instal·lació es pot veure com a típica, per la seva distribució, del molí de blat català. Ens pot servir doncs per entendre el funcionament d'una mola d'època tardana. L'aigua del riu era canalitzada més amunt, en aquest cas, com sovint, amb l'ajut d'una presa que permetia aixecar una mica més el seu nivell, al voltant del 0,5 metre d'alçada suplementària.

L'aigua era conduïda al molí mitjançant un canal d'adducció en pedra, encara que en èpoques posteriors a la seva construcció aquests canals es podien tornar a fer, fins i tot emprant ciment a principi del segle XX per a la seva reparació total o parcial.

En el cas del Mas del Solé, el canal d'adducció té una entrada de 83x29 centímetres a l'alçada de la comporta de la presa, i es fa més estret, fins

a 55x40 cm aproximadament, en gran part del seu recorregut. La seva llargada és de 77 m. L'últim tram d'aquest conducte, de fusta, és inclinat per transformar l'energia



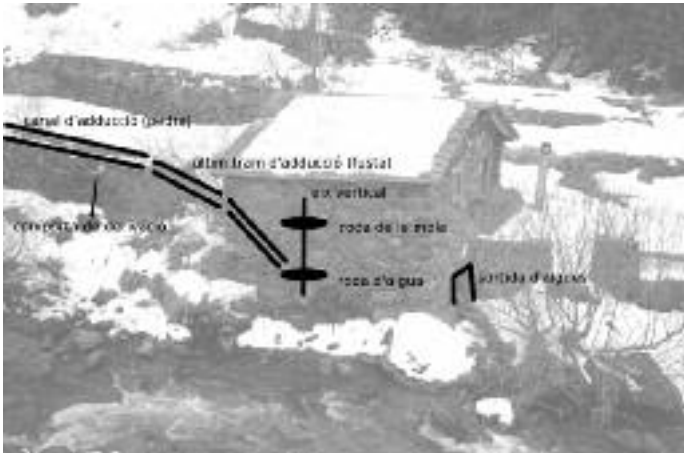
Imatge 1: Presa de la mola del Mas del Solé.

potencial de l'alçada de l'aigua en velocitat i atacar així el rodet, i té tan sols 23 cm d'amplada per 25 d'alçada. Cal dir que en aquesta instal·lació, com en d'altres, hi ha una comporta de derivació just abans de l'últim tram d'adducció. Té dues funcions:

- Desviar l'excés d'aigua que pugui baixar pel canal d'adducció en èpoques de molta aigua. Així a la vegada es garanteix suficient cabal per a la roda quan el nivell d'aigua entrant per la presa és baix, i es desvia l'excés d'aigua quan el riu baixa molt (massa) fort.
- Permetre regular de manera més fina l'arribada d'aigua a la roda en tot moment.



Imatge 2: Últim tram d'adducció en fusta al Mas del Solé. Noteu el pendent.



Imatge 3: Elements funcionals de la mola del Mas del Solé.

Aplicant el càlcul amb les dades següents:

$$P = \frac{1}{2} \rho g h v^2 + \rho g h v^2 (h - v) - \frac{1}{2} \rho g h v^2$$

$$q = 0,23 \cdot 0,125 \cdot 1 = 0,029 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$$

$$v = 1 \text{ m s}^{-1}$$

$$h = 2 \text{ m}$$

$$r = 0,4 \text{ m}$$

$$v_r = 0,3 \text{ m s}^{-1}$$

ens dona una potència disponible de 738 W.

És clar que aquest càlcul correspon a condicions prou bones de funcionament, en què el canal en fusta de l'últim tram estaria omplert a la meitat de la seva alçada. Si es pogués fer funcionar amb una alçada superior de 0,2 m d'aigua en aquesta canalització, aleshores es podria arribar a valors de potència del voltant dels 1.181 W.

A títol de comparació, s'admet⁷ que un cavall pot subministrar una potència d'uns

500 W, de manera contínua a raó de 10 hores de treball per dia. Aquesta instal·lació pot fer doncs la mateixa feina que dos cavalls, ocupant menys superfície física.

Conclusions

En aquest treball hem vist que les rodes hidràuliques de la vall del Valira del Nord a Ordino solien ser de dos tipus:

- rodes verticals per a les instal·lacions en què l'aplicació requeria la transmissió d'un moviment vertical, com les serradores i les fargues;
- rodes horitzontals, més compactes i eficients, per a les instal·lacions com les moles en què el moviment horitzontal corresponia a la de la roda de la mola.

En tots dos casos, la potència disponible depenia de dos factors: el principal era l'alçada de la caiguda d'aigua a l'alçada de la roda. Escollir un indret del riu en què el seu pendent natural era com més elevat possible contribuïa aleshores a reduir la llargada necessària del canal d'adducció d'aigua.

En condicions normals de funcionament, una mola com la del Mas del Solé podia produir valors a l'entorn de 0,7 kW, amb possibles puntes de fins a 1,1 kW. Aplicant el càlcul a instal·lacions amb caigudes més conseqüents, com la serradora del Nicolau, s'arribaria a potències disponibles de fins a 1,99 kW. Així, tenint en compte el nombre d'instal·lacions i el nombre de rodes en cada instal·lació, es pot estimar que la potència total instal·lada en aquesta vall podia arribar al moment de màxima producció entre 10 i 20 kW.

Aquests valors són bastant comparables amb la potència màxima consumida per una casa moderna. Pel que fa a instal·lacions industrials, a títol comparatiu la central hidroelèctrica de FEDA actual té instal·lades dues rodes de tipus Pelton –un model derivat, a certa distància, del rodet horitzontal en fusta– amb una potència útil de 14.000 kW cada una⁸. Si s'ha pogut arribar a aquests valors emprant una font d'energia que és a la base la mateixa que a la vall d'Ordino, va ser a la vegada a través de la recollida de volums d'aigua força importants, però sobretot l'aprofitament del desnivell important entre l'estany d'Engolasters i la mateixa central. Així podem mesurar de manera tangible l'augment de la potència disponible que va causar la *petita revolució industrial* de la instal·lació de Fhasa a Andorra.

Cal recordar, però, que la producció preindustrial a la vall del Valira del Nord era de potències prou elevades per a un entorn en què la mesura de l'esforç era el que podria fer una persona o una bèstia. Amb, a més, l'avantatge de no consumir recursos agrícoles durant el seu funcionament.

7. Segons un càlcul, a vegades discutit, de James Watt.

8. Segons dades de la web de FEDA. [URL: <https://www.feda.ad/Cat/DadesInteres/ProduccioHidraulica.aspx>]. Data de consulta: 25/04/2008.