

Stefano Giovanni Loffi

Piccola
Storia dell'Idraulica

libera traduzione, ridotta ma integrata, di

"History of Hydraulics" di Hunter Rose e Simon Ince
dell'Istituto di Ricerca Idraulica dell'Università Statale dell' IOWA – U.S.A.,
édita, nel 1954, come supplemento, su *"LA HOUILLE BLANCHE"* .

Cap. 10 – Gli studi sulla forza dell'acqua: le ruote idrauliche

Cremona - 23 settembre 2006

Cap. 10 – Gli studi sulla forza dell'acqua: le ruote idrauliche

Abbiamo visto, nel precedente Capitolo 9, che Edme Mariotte per primo si pose il problema di misurare la forza che l'urto di un getto d'acqua poteva imprimere sulla superficie urtata, traendone le prime corrette indicazioni sulla strada per giungere alla definizione della legge fisica che governa questo fenomeno.

Dopo di lui, come vedremo, ben presto altri seguirono le sue valutazioni, procedendo nell'analizzare il comportamento della macchina idraulica che, da millenni, rappresentava – perché lo produceva - il pane quotidiano di tutti gli esseri umani: il mulino 'ad acqua'.

L'importanza, che avvertiamo anche quasi affettiva, dei mulini mossi dalle ruote idrauliche ed anche le implicazioni che il loro studio portò, nel XVII secolo, al cammino della Scienza Idraulica, rendono necessario il dedicarvi questo specifico Capitolo per tracciarne, con gli usuali criteri e modi, la storia.

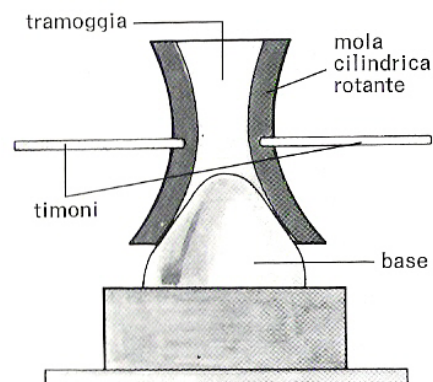
Non sapremo mai quando e dove, meno ancora ad opera di chi, si iniziò a sfruttare l'energia dell'acqua che scorre o che cade per produrre movimento e quindi lavoro; movimento che non poteva che essere rotatorio, continuo, attraverso un'attrezzatura che, per l'appunto, è chiamata 'ruota idraulica', più comunemente, nell'immaginario di tutti, la 'ruota del mulino ad acqua'.

Il mulino è unanimemente percepito quale emblema della produzione del pane, ma la sua storia inizia certamente assai dopo la scoperta di questo importantissimo alimento, prodotto dalla cottura della farina impastata con acqua.

La produzione di farina, infatti, per millenni fu condotta con l'ausilio della sola forza muscolare di persone o di animali, ottenuta schiacciando i semi tra due pietre, con movimenti alternati o circolari, oppure in mortai.

Nelle piccole antiche comunità, le donne potevano, ogni giorno, preparare la razione di farina per il pane quotidiano; nei centri più grandi, già novanta secoli prima di Cristo, in Medio Oriente ed in Asia Minore (come abbiamo visto nel Capitolo 1), la maggior esigenza collettiva poteva essere soddisfatta attraverso le fatiche di animali oppure di prigionieri o di schiavi, . . . questi ultimi ancor più a 'buon mercato'!

Nella Bibbia leggiamo che Sansone, imprigionato dai Filistei, “ . . . dovette girare la macina nella prigione.” (Giudici - 16,21).



Il primo cenno ad un mulino mosso dall'acqua è noto nei versi del poeta greco Antipatro di Tessalònica, databile attorno all'85 a.C., che ci offre una conferma della tesi sopraesposta: il componimento celebra, infatti, le lodi di questa macchina perché solleva le donne dalla fatica di macinare il grano a mano!

Anche lo storico greco Strabone (Amasia, Ponto ca 64 a.C. – 20 d.C), nella sua *Geografia*, riferisce del mulino ad acqua fatto costruire dal re del Ponto, Mitridate VI, nel 65 a.C..

Marco Vitruvio Pollione, attorno al 20 a.C., ci parla di un mulino, mosso dall'acqua, con una descrizione così dettagliata da farci capire che si trattava del tipo a ruota verticale, mentre Plinio il Vecchio, nel 75 d.C., parla della grande diffusione di mulini a ruota orizzontale.

Possiamo concludere che, al tempo in cui Cristo visse in Terra, le ruote idrauliche, utilizzate per macinare il grano, erano, nei domini di Roma ma non solo, una realtà la cui diffusione trovava un robusto ostacolo soltanto nella disponibilità di una grande popolazione di schiavi, dai

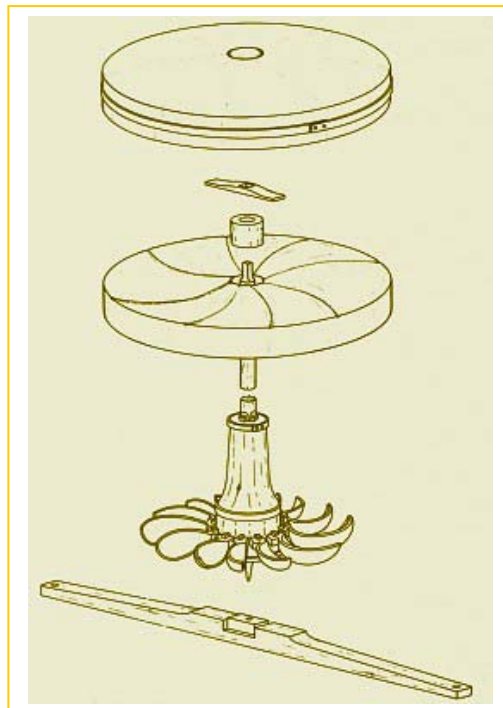
costi particolarmente vantaggiosi, che rendeva quindi inutile realizzare macchine che ne sostituissero le fatiche.

A questo proposito alcuni ritengono che la crisi del IV secolo, inizio della fine dell'impero di Roma, fu motivo di stimolo alla realizzazione dei nuovi mulini, in proporzione alla progressiva riduzione di forza lavoro costituita dai 'forzati della macina'.

Concettualmente la ruota idraulica, almeno in apparenza, è quantomai semplice; forse anche per questo ha destato, per secoli, lo scarso interesse nello studio dei principi fisici che ne governano il movimento.

Nella sua forma più elementare, e più diffusa (secondo le poche antiche testimonianze citate) attorno al nostro 'anno zero', il mulino era costituito da una ruota orizzontale, che oggi chiamiamo *ritrécine* (sostantivo maschile, dice il vocabolario, di origine toscana, quindi 'italiano d.o.c.!',) terminante con tante palette, contro il quale era indirizzato un getto d'acqua, attraverso una tubazione o un condotto in lieve pressione.

Il getto provocava la rotazione della ruota solidale ad un albero verticale; quest'ultimo si prolungava in un locale soprastante dove, attraversata una pietra fissa, trasmetteva il moto rotatorio ad un'altra pietra anch'essa, come la ruota idraulica, ancorata all'albero e così costretta a strisciare sulla pietra fissa sottostante: ecco fatto il mulino.

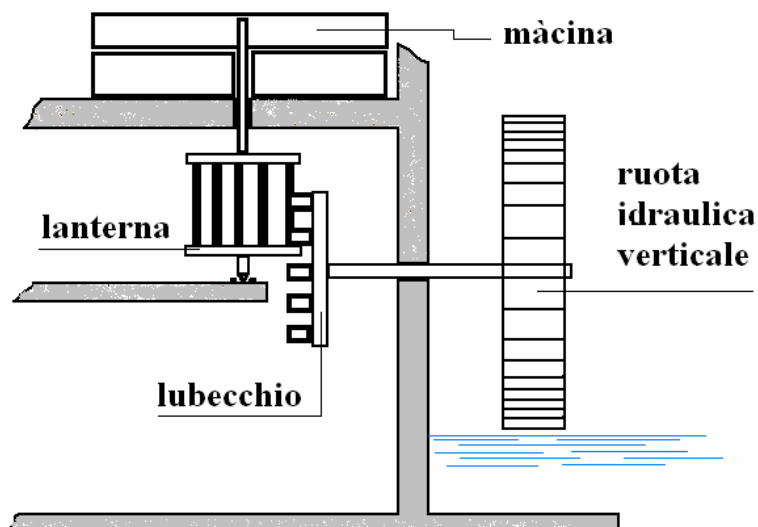


Il grano, fatto cadere tra le due pietre, ne usciva, attraverso il *palmento*, in forma di farina pronta per l'impasto.

La semplicità di questo meccanismo ne provocò la preponderante diffusione.

Accanto al 'mulino a ruota orizzontale', nella stessa epoca, come riferisce Vitruvio, erano già presenti i 'mulini a ruota verticale', più complessi ma dotati di un vantaggio che, alla lunga (cinque / sei secoli!), ne avrebbe garantito il prevalere.

La maggior complicazione tecnica della ruota idraulica verticale era dovuta al fatto che, per ovvia conseguenza, l'albero di rotazione restava orizzontale, mentre la macina doveva mantenersi ad asse verticale.



La perpendicolarità dell'albero della ruota rispetto all'asse di rotazione della macina venne risolta con l'introduzione di due ingranaggi: il *lubecchio* e la *lanterna*. Il primo, solidale all'albero della ruota idraulica, era fornito di denti sporgenti che andavano ad inserirsi nei *fuselli* della lanterna, che ruotava secondo un asse verticale. Da quest'ultima partiva un secondo albero solidale con la soprastante macina.

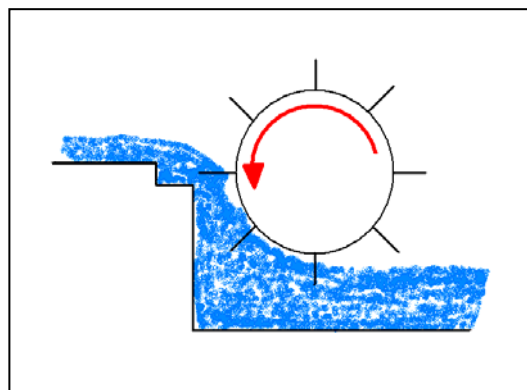
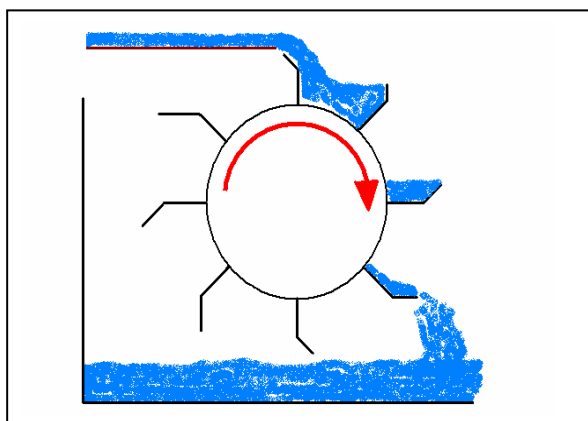
Lubecchio e lanterna non soltanto assolsero il compito di deviare di novanta gradi la rotazione, ma anche di fungere da moltiplicatori del numero di giri della macchina rispetto alla velocità di rotazione della ruota idraulica, semplicemente variando le dimensioni dei due ingranaggi ed il numero dei *denti* e dei *fuselli*.

L'aumento della velocità di rotazione della macchina, cosa non applicata al mulino *a ruota orizzontale*, consentiva di migliorare le prestazioni produttive della macchina idraulica, adattando la più adeguata velocità alla massa della macchina, sempre in pietra, non disponendo di una teoria che la potesse valutare in fase di progetto. L'esperienza dei costruttori suppliva egregiamente.

Per contro, gli ingranaggi, originariamente di legno, costituivano una complicazione aggiuntiva, rispetto al *ritrécine*, con frequenti interventi di riparazione e sostituzione per rottura o per semplice usura; di conseguenza questo tipo di macchina fu caratterizzata da dimensioni maggiori, fornendo un servizio destinato a comunità più consistenti, con evidenti economie di scala per i maggiori costi di gestione.

Del mulino *a ruota verticale*, se ne svilupparono due versioni:

a ruota verticale per di sotto (o *ruota a impatto*): la ruota idraulica aveva, all'estremità, delle palette che l'acqua urtava quando queste si trovavano, durante la rotazione, nella zona più bassa della ruota stessa, che era, così, investita dalla corrente;



a ruota verticale per di sopra (o *'a gravità'*): la ruota al posto delle palette era dotata di contenitori, detti *cassette*, che ricevevano il getto d'acqua, che così li riempiva, quando si trovavano al punto più alto della rotazione, per poi scaricarsi quando giungevano in prossimità del punto opposto.

Del primo tipo, *per di sotto*, abbiamo una prova diretta della sua esistenza in tempi remoti, prova che ne è così la testimonianza più antica: nello strato solidificato di cenere e lapilli, a Pompei, prodotto dall'eruzione del 25 agosto del 79 dopo Cristo è stata trovata l'impronta di una ruota di mulino per di sotto, della quale si possono ancora distinguere molti particolari costruttivi.

Si hanno elementi per ritenere che comunque il mulino alimentato *per di sopra* sia comparso alcuni secoli dopo quello *per di sotto*, costituendone una variante migliorata perché in grado di assicurare, secondo l'esperienza, un maggior rendimento; a parità di acqua utilizzata e di dimensioni della ruota, cioè, il *per di sopra* assicurava una maggior potenza, sfruttando oltre all'impatto dell'acqua anche il peso delle cassette che, piene d'acqua nella fase discendente, sbilanciavano la ruota aumentando la spinta di rotazione; ecco perché questo tipo di ruota idraulica è anche chiamata *a gravità*.

Il *per di sopra* però aveva un limite territoriale: si doveva portare l'acqua all'altezza della ruota, utilizzando un canale di alimentazione, detto *'gora'*, e quindi era necessario disporre di un adeguato dislivello; per i mulini *per di sotto*, invece, il dislivello necessario era minimo ed essi potevano essere realizzati ovunque vi fosse acqua disponibile e corrente, anche in pianura.

Una versione particolare di ruota idraulica *per di sotto* muoveva le macchine nei mulini galleggianti, montati su grosse chiatte ancorate nel mezzo della corrente di un fiume. Una o più ruote, poste in fianco o all'interno del natante, si immergevano nell'acqua nella loro parte più bassa, ricevendo la spinta dal moto relativo dell'acqua rispetto allo scafo . . . per poi muovere ingranaggi e macchine come . . . sulla terra ferma.

Di mulini galleggianti ci parla lo storico bizantino Procopio di Cesaréa (Cesaréa ? – Costantinòpoli 563 d.C.), nella sua opera “*Sulle guerre*”, riferendone la realizzazione, sul Tevere, da parte del generale Belisario (Tracia ? – Costantinòpoli 565), impegnato, su comando dell'imperatore Giustiniano, nel tentativo di strappare Roma agli Ostrogoti nel 537.

Un passo importante nello sviluppo dei mulini si registrò nel Medio Evo, sia nella tecnologia costruttiva che nella realizzazione di strutture di adeguamento della situazione territoriale, come canali di alimentazione, opere di derivazione dai fiumi, bacini artificiali, sbarramenti e dighe.

In questo non possiamo non immaginare, senza temere d'essere troppo lontani da un'ipotesi realistica, lo zampino della civiltà dell'Islam, la cui cultura, come abbiamo visto nel Capitolo 5, già si diffondeva, in quel tempo, in tutta Europa.

È infatti nell'Islam che la costruzione di grandi dighe venne finalizzata non soltanto ad immagazzinare e poi distribuire l'acqua, ma anche allo sfruttamento energetico per muovere le ruote idrauliche dei mulini. Oltre alla già ricordata, nel Capitolo 5, diga Band-i Amīr, che serviva ben dieci mulini, possiamo citare, tra le tante, la diga Pūl-i Bulaytī, in Iran sul fiume Karun nei pressi di Shustar, che garantiva l'energia necessaria a muovere numerosi mulini scavati nella roccia in fianco al canale di derivazione, anch'esso in galleria.

Nella letteratura araba dell'antico Islam si conoscono numerose citazioni sia della meccanica di queste macchine, sia delle istruzioni per la miglior individuazione dei punti del territorio più idonei dove poter sfruttare l'energia dell'acqua.

Gli Arabi seppero, inoltre, dare un nuovo impulso alla tecnologia costruttiva, portando in Europa versioni delle ruote idrauliche perfezionate: ruote più leggere, cassette e pale più efficienti, ingranaggi soggetti a minor usura, . . . la ricerca araba, in questo campo, portò addirittura ad elaborare un nuovo tipo di ruota idraulica, rappresentata in un trattato del IX secolo, costituita da una ruota, già assai simile ad un'elica, inserita in una tubazione cilindrica che accoglieva l'intero flusso delle acque: la progenitrice delle moderne turbine; una macchina idraulica di tale impostazione fece la sua comparsa in Europa soltanto nel XVIII secolo.

La tecnica araba era quantomai evoluta: mentre in Europa i mulini erano ancora rudimentali opifici a servizio di poche famiglie o piccole comunità, nel X secolo le grandi e popolate città dell'Islam erano regolarmente rifornite di farina da complessi molitorî multipli, a carattere quasi-industriale, capaci di produrre decine di tonnellate al giorno di macinato, lavorando senza sosta, a ciclo continuo.

Come abbiamo visto nel Capitolo 6, molte conoscenze della civiltà araba giunsero in Europa, se non attraverso i contatti diretti con le terre dell'Islam in Spagna ed in Sicilia, durante l'incontro, violento ma assai coinvolgente, dell'avventura delle Crociate.

Nel campo dello sfruttamento dell'energia dell'acqua (ed anche del vento) gli Arabi portarono anche una importante novità: l'utilizzo della ruota idraulica per scopi diversi dalla sola molitura.

Nel 751 (anno 134 dell'Ègira), dopo la battaglia di Atlakh, i prigionieri cinesi realizzarono, nella città araba di Samarcanda, la fabbricazione della carta con stracci di lino, cotone

e canapa, utilizzando magli mossi da ruote idrauliche. Nel 1044, lo storico al-Bīrūnī riferisce che macchine analoghe erano utilizzate per macinare le rocce aurifere.

Battere il ferro, follare la lana, segare il legno, tritare la roccia, preparare la carta . . . nell'Islam dell'XI e del XII secolo divennero lavorazioni realizzate attraverso macchine mosse dalle ruote idrauliche; macchine frequenti anche nella penisola iberica, quando gli europei la riconquistarono.

Lo sfruttamento dell'energia dell'acqua si diffuse, così, ovunque, per assolvere a differenti funzioni e, per secoli, fu la principale forza motrice del sistema produttivo.

Parallelamente, ma, è ovvio, con minor distribuzione territoriale, si diffusero le ruote che utilizzavano l'energia del vento, penalizzate non solo dalla necessità di disporre di zone adeguatamente battute dal vento ma anche da una tecnologia costruttiva più complessa.

Sino al XVII secolo, però, pochi si preoccuparono di studiare il fenomeno con il quale l'acqua riusciva a imprimere l'impulso alla ruota, al fine di conoscerlo e, quindi, migliorare le prestazioni della ruota idraulica che rimase, nelle diverse tipologie, praticamente immutata per così tanto tempo, in alcuni casi sino al XX secolo. Ancora a metà del Novecento, infatti, si ricorda il funzionamento dei 'vecchi mulini', dalla immutata antica fisionomia, con l'unica variante di avere ingranaggi, lubecchio e lanterna in metallo e non più in legno.

Di questo apparente congelamento di una tecnologia che, invece, in altre applicazioni compì progressi strabilianti (basti pensare all'evoluzione delle turbine idrauliche e dei motori), ce ne si può fare una ragione pensando al limite intrinseco che caratterizzava il mulino con la macina: la macina stessa. La pietra rotante, che macinava in farina il grano, non poteva che essere costituita da un grosso disco di pietra, del peso di alcune centinaia di chilogrammi, che ruotava, strisciando, su un altro disco gemello: la massima velocità alla quale esso poteva girare era già raggiunta nel Medio Evo: aumentarla era impossibile e la ricerca, necessaria per riuscirci, inutile.

Mentre le altre applicazioni delle ruote idrauliche - magli, folli, sollevamenti, triturazione, impasto - furono 'preda', nella nascente era industriale del XIX secolo, delle nuove e potenti energie (vapore, elettricità, combustione interna - il cosiddetto, impropriamente, motore 'a scoppio'), la molitura restò fedele all'energia dell'acqua sino in epoca assai recente; la macina, prima 'sposa' della ruota idraulica, ne fu anche la più 'fedele': ancor oggi persone non anziane ricordano il movimento degli ultimi mulini, negli anni Cinquanta del secolo scorso.

Ma, nella Storia dell'Idraulica, un passo importante, che riguarda proprio lo studio dell'energia dell'acqua corrente (lo abbiamo visto nel precedente Capitolo 9) si compì con il francese Edme Mariotte, che studiò, per la prima volta, la forza che un getto d'acqua può generare quando urta contro una superficie.

Fu, dunque, l'apertura di un nuovo argomento della scienza dei fluidi.

Nel suo lavoro "*Traité du mouvement des eaux*", dato alle stampe nel 1686, due anni dopo la sua morte, lo scienziato francese determinò, tra altre considerazioni interessanti già richiamate, due aspetti fondamentali:

- quando un getto d'acqua urta su una superficie, una parte rilevante dell'energia che il getto stesso 'contiene' di disperde, quindi non partecipa alla forza che la superficie riceve;
- la forza che un getto d'acqua produce quando urta contro una superficie è proporzionale al quadrato della velocità dell'acqua.

Due corrette deduzioni, tratte da numerosi esperimenti nei quali getti di differenti velocità, dimensioni ed anche di differente liquido, erano diretti contro superfici collegate, a mezzo di una leva, ad un contrappeso, dal quale, raggiunto l'equilibrio, si poteva individuare la forza prodotta dall'urto.

Due corrette deduzioni che portano ad altrettante considerazioni:

- esiste una grandezza fisica, caratteristica di qualsiasi massa fluida in movimento, in grado di produrre una forza, ma anche soggetta ad una parziale dispersione; cioè non è interamente utilizzata nella produzione della forza prodotta dall'urto; parte di essa si disperde;
- questa grandezza fisica, espressione della capacità di compiere un lavoro (cioè esprimere una forza che può essere utilizzata), è proporzionale al quadrato della velocità.

Questi primi esperimenti e misurazioni di Edme Mariotte, per valutare la forza trasmessa dall'acqua ad una ruota idraulica, trovarono in Antoine Parent (Parigi 1666 – 1716) lo scienziato che si impegnò sulla medesima strada, riuscendo a condurre un'analisi matematica rigorosa.

Di professione medico ma dedito anche alla Matematica, membro della *Académie royale des sciences*, Parent compose complesse formule matematiche, utilizzando anche il calcolo infinitesimale (del quale diremo nel prossimo Capitolo 12), sia nel caso di ruote ad acqua che nello studio delle ruote dei mulini a vento.

Nel discutere le prestazioni delle ruote ad acqua, Parent stabilì:

“Una ruota mossa da una corrente produce differenti effetti se l'acqua scorre più o meno rapidamente, perché essa non può muoversi con la velocità della corrente ed anche essa incontra resistenza nel produrre una azione e, d'altra parte, l'effetto sarà nullo se essa non ha movimento. Deve esistere tra le velocità della ruota e della corrente un rapporto che corrisponde all'effetto massimo.”

In altri termini, Parent intuì che il fenomeno della spinta dell'acqua contro una ruota ad impatto presentava due situazioni estreme:

1. la velocità di rotazione della ruota è tale da generare una velocità delle pale pari alla velocità dell'acqua: in questo caso, quindi, l'acqua non esercita alcuna pressione, non c'è alcuna spinta (impulso zero) ma la velocità di rotazione è massima;
2. la ruota oppone un carico tale da bilanciare l'urto della corrente: c'è la massima spinta (massimo impulso) ma la velocità di rotazione è nulla.

Tra queste due posizioni deve esistere una, intermedia, nella quale la spinta e la velocità di rotazione producono la massima potenza trasmessa dall'albero della ruota idraulica.

Per individuare questo punto, che si può chiamare 'di massimo rendimento', Parent aveva a disposizione lo strumento matematico adeguato, appena sviluppato da Leibniz e da Newton: il calcolo infinitesimale.

Lo scienziato francese assunse, quale massima energia producibile dalla corrente, il prodotto tra la forza P , generata dall'urto della corrente contro una superficie ferma, e la velocità V del flusso stesso. Per la ruota, la prestazione era espressa dal prodotto del peso p che la ruota poteva sollevare e la velocità radiale v delle pale della ruota stessa.

Seguendo i risultati di Mariotte, che davano l'impulso P dell'acqua proporzionale al quadrato della velocità V^2 dell'acqua, ed osservando che in realtà la velocità efficace del flusso era

data dalla velocità relativa dell'acqua rispetto alle pale in movimento, cioè $(V - v)$, Parent poté scrivere la relazione:

$$\frac{P}{p} = \frac{V^2}{(V - v)^2}$$

Ricavando, da questa espressione, il prodotto $'pv'$, Parent, a mezzo del calcolo infinitesimale, poté concludere che l'efficacia di una ruota ad impatto poteva al massimo raggiungere il 15% della potenza $'PV'$ della corrente. Questo massimo rendimento si manifestava quando la velocità delle pale fosse stata pari ad $1/3$ della velocità della corrente e lo sforzo applicato all'albero pari ai $4/9$ della massima forza esprimibile dalla corrente stessa.

Purtroppo questa analisi, sebbene tracciata nella giusta direzione, non ebbe grandi sviluppi, anche perché sostenuta dal nuovo método di calcolo che, all'inizio, stentò a trovare grande diffusione.

Del lavoro di Antoine Parent, prima che sulle sue sopracitate conclusioni 'scoppiasse la tempesta', dobbiamo ancora ricordare che, nel 1702, egli pubblicò la prima dettagliata analisi matematica delle pale mosse dal vento nel trattato "*Sur la position de l'axe des moulins à vent l'égard du vent*". La sua più rilevante conclusione, che ebbe, stavolta, molto séguito, fu l'aver individuato l'angolo ottimale che le pale del mulino a vento dovessero avere rispetto al piano di rotazione, pari a 35 gradi; con tale inclinazione l'energia del vento era trasformata in rotazione per circa cinque tredicesimi. Per quasi mezzo sécolo tale indicazione dominò nella costruzione di queste macchine.

Le difficoltà applicative dell'analisi matematica di Parent, sul funzionamento della ruota idraulica, furono superate da Henri Pitot (Aramon, Gard 1695 – Tolosa 1771) - lo incontreremo ancora nel Capitolo 15 - che, nel 1729, tradusse le formulazioni infinitesimali di Parent in una più semplice forma algebrica, giungendo alla conclusione che, nelle ruote idrauliche *a impatto* (cioè *per di sotto*) le pale davano il miglior rendimento se restavano radiali, cioè senza alcuna inclinazione 'a cucchiaio' rivolto verso il getto; dimostrò inoltre che la distanza ideale tra due pale successive dovesse essere tale per cui, quando una pala era perpendicolare e completamente immersa nella corrente, la successiva iniziasse ad entrare in acqua.

Pitot compilò tabelle paramétriche dei risultati ottenuti, per facilitarne la diffusione e l'applicazione.

Bernard Forest de Bélidor (Parigi 1697 – 1761), realizzando uno dei primi manuali di ingegneria, utilizzò i risultati di Parent e di Pitot riportandoli nei primi due volumi del trattato *Architecture Hydraulique*, éditi nel 1737 e nel 1739, che ebbero una grande diffusione nelle scuole francesi. Volendo estendere il método di Parent anche alle ruote *per di sopra*, cioè *a gravità*, Bélidor giunse alla conclusione (che si rivelerà opposta al vero!) che questo tipo di ruota idraulica avesse un rendimento pari ad un sesto di quello delle ruote *per di sotto* o *a impatto*, esprimendo grande meraviglia che, in Francia, le prime fossero così grandemente più diffuse delle seconde . . . grande era, in quel tempo, la sicurezza dei matematici, anche di fronte alla realtà!

Molti altri scienziati condivisero e migliorarono le analisi di Parent e, tra questi, anche Daniel Bernoulli (. . . tra poche pagine farà il suo trionfale ingresso) che, utilizzando il prodotto della massa per la velocità al quadrato, mv^2 detta *'vis viva'*, invece che il PV di Parent, giunse a risultati pressochè uguali.

Anche Leonhard Euler, altro gigante 'in arrivo' in questa Storia, si occupò del problema, giungendo alle stesse conclusioni.

Ecco, ancora, Charles Bossut (Tartaras – Saint Étienne 1730 - Parigi 1814), che si impegnò a tradurre in un'unica formula tutte le grandezze che dominavano il fenomeno: numero delle pale, velocità e impulso variabili in ogni punto della pala, perdita d'acqua ai lati, oltre, naturalmente, a tutte le altre misure variabili dell'acqua in movimento. Ne uscì una formula di tali dimensioni da occupare lo spazio di un'intera pagina . . . praticamente inutilizzabile!

Tutti questi studiosi erano accomunati da due caratteristiche: i risultati ottenuti, pressochè identici, e la mancanza di conferme sperimentali.

Il non aver pensato di verificare, nella realtà, le risultanze dei calcoli teorici può essere dovuto a due fattori:

- la grande eleganza dell'analisi matematica originaria, elaborata da Parent; eleganza che ai Matematici spesso è sufficiente a giustificare la massima fiducia nel risultato;
- lo scarso interesse dei costruttori di mulini, in possesso di una tecnica che dava, come abbiamo già visto, il miglior risultato in termini di massima prestazione della macchina, ed anche di una scarsa preparazione culturale per comprendere . . . le 'analisi matematiche perfette'!

In realtà i risultati di Parent erano sbagliati così, di conseguenza, anche quelli di coloro che li ottennero per altra via.

Possiamo certo concludere che i costruttori di mulini ben fecero nel continuare sulla loro strada . . . di secolare pratica esperienza!

Nello stesso periodo che vide Antoine Parent 'risolvere' la ruota idraulica *ad impatto* attraverso la sola analisi matematica, Christopher Polhem (Visby 1661 – Stoccolma 1751), ingegnere membro dell'Accademia Svedese delle Scienze, prese la strada opposta, conducendo, assieme ad alcuni collaboratori, tra il 1702 ed il 1704, numerosissime prove sperimentali, in un numero compreso tra 20000 e 30000 (!), grazie ad un modello nel quale poteva variare cinque grandezze: tipo di ruota, velocità, altezza dell'acqua, inclinazione del canale, carico sulla ruota.

Il metodo seguito era assai rigoroso, prevedendo il rilevamento sistematico, omogeneo ed accurato di tutti i dati di ogni esperimento.

Lungo questa via soltanto sperimentale Polhem trovò, come Parent sulla strada della sola teoria, che la ruota idraulica aveva rendimenti diversi, a seconda della configurazione, ma con un unico punto nel quale il rendimento assumeva valore massimo.

Purtroppo, come avvenne per Parent, anche lo scienziato svedese aveva, in realtà, . . . sbagliato tutto, ma, a differenza del francese, il destino gli riservò la terribile responsabilità di rendersene conto direttamente!

Dopo aver presentato i risultati, nel 1705, li riprese, per riordinarli, cinque anni dopo, rendendosi conto, solo allora, che, nelle oltre ventimila prove, la valutazione del rapporto velocità/rendimento e dell'inclinazione del canale di alimentazione erano stati misurati in modo errato!



“I nostri esperimenti sono inùtili quanto la quinta ruota del carro!”; così Christopher Polhem commentò questa amara e sconsolante scoperta ad uno dei suoi più stretti collaboratori!

Le ruote idrauliche sembravano quasi prendersi gioco dei pochi che ne scrutavano i segreti!

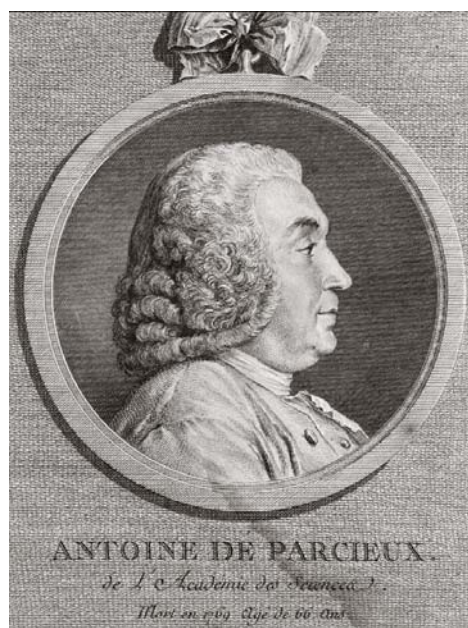
Non tutto il lavoro di Polhem, però, si perse, anche se, ovviamente, i documenti delle sue sperimentazioni non trovarono alcuna forma di pubblicazione definitiva. Egli, quantomeno, attraverso l'Accadèmia Svedese delle Scienze, poté diffondere alcune considerazioni in merito all'esperienza comunque accumulata: era ormai dimostrato, senza più dubbi, che le ruote idrauliche *a gravità*, cioè *per di sopra*, erano assai più efficienti di quelle *ad impatto* (o *per di sotto*) e che la velocità ottimale di una ruota ad impatto era pari alla metà della velocità della corrente e non ad un terzo come aveva indicato Parent.

La via sperimentale, nello studio delle ruote idrauliche, nonostante il disastroso esito del lavoro di Polhem, fu seguita anche da coloro che continuarono questa ricerca, evidentemente, e finalmente!, persuasi che la complessità dei fenomeni in gioco non poteva che trovare dati e verifiche in modelli reali prima che nella teoria.

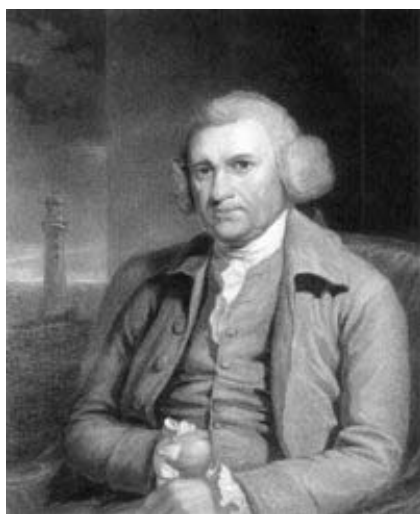
Il francese Antoine de Parcieux (Clotet-de-Cessous 1703 – Parigi 1768), convinto che “*Il ragionamento astratto spesso lascia la mente annebbiata.*”, e l'inglese John Smeaton (Austhorpe, Leeds 1724 – 1792), condussero, separatamente, esperimenti con modelli a scala ridotta, dimostrando quanto le teorie conosciute fossero errate.

In particolare de Parcieux poté affermare che l'analisi di Parent non poteva essere estesa alla ruota *a gravità* e che le valutazioni di Henri Pitot sul numero ed inclinazione ideali delle pale erano anch'esse sbagliate.

Nulla di Parent ‘si salvò’ di fronte alle corrette prove sperimentali: John Smeaton, infatti, demolì la teoria del francese anche nel caso delle ruote *a impatto*, dimostrandone l'errore.



L'inglese giunse a concludere che:



- il rendimento di una ruota idraulica *per di sotto* poteva variare dal 33% al 50%, e non pari al 15% determinato da Parent;
- la velocità ideale di una ruota *per di sotto* era pari ai $\frac{2}{5}$ della velocità del getto d'acqua, ma poteva aumentare sino ad $\frac{1}{2}$ nel caso di ruote immerse in corsi d'acqua di grande portata;
- il rendimento di una ruota idraulica *per di sopra* era invece compreso tra il 52% ed il 76%, ma in grado di crescere ancora in caso di aumento del raggio della ruota e di diminuzione della velocità di rotazione.

-
Dagli studi e soprattutto dagli esperimenti, Smeaton trasse indicazioni progettuali utili quali riferimenti

per quanti, da allora, si cimentarono nella costruzione di mulini; la più importante era l'indicazione di preferire, quando possibile, la ruota *per di sopra* a quella *per di sotto*, avendone ormai dimostrato, in modo certo, di quest'ultima il ben più ridotto rendimento.

La memoria “*Una ricerca sperimentale sulla naturale potenza dell'acqua e del vento per muovere i mulini ed altre macchine, dipendenti dal moto circolare*” fu premiata, nel 1759, dalla *Royal Society*; la citeremo ancora nel prossimo Capitolo 15.

John Smeaton confermò quanto già evidenziato da Christopher Polhem sulla maggior efficacia della ruota idraulica *a gravità*, dando ragione della sua prevalente diffusione che tanta sorpresa aveva destato, come abbiamo visto, in Bernard Forest de Bélidor, fiducioso della sola analisi matematica, rivelatasi completamente errata!

Altri, poi, continuarono a studiare la ruota idraulica, senza ottenere grandi novità ma, piuttosto, confermando i risultati di de Parcieux e di Smeaton e confutando, ogni volta, le iniziali teorie di Parent, in questo posto in buona compagnia assieme ad Henri Pitot!

Intorno alla metà del Settecento, vennero condotti nuovi tentativi per conciliare l'analisi teorica e le prove sperimentali.

Tra i primi a tentare di ottenere questo accordo fu Johann Albrecht Euler (S. Pietroburgo 1734 – Basilea 1800), figlio del grande Leonhard.

J. A. Euler si rese conto che la ruota verticale *a gravità* e quella orizzontale (il *ritrécine*, detto anche *ruota idraulica a reazione*) funzionavano in base a principi in tutto differenti da quelli che dominavano la ruota *a impatto*, quindi formulò, per le prime due, nuove espressioni matematiche.

Più incisivo nella nuova analisi teorica, questa volta non disgiunta dai risultati sperimentali, fu l'ingegnere militare Jean-Charles de Borda (Dax, Landes 1733 – Parigi 1799) che limitò ancor più il campo di azione (se mai ne era rimasto!) delle ricerche di Parent ai soli corsi d'acqua di grande ampiezza rispetto alla larghezza della ruota, ovviamente del solo tipo *per di sotto*.

Quando la ruota era alimentata da un canale della stessa larghezza, cioè alimentata ‘ad alveo chiuso’, Borda si rese conto che la forza dell'acqua era proporzionale alla velocità e non al suo valore al quadrato . . . povero Parent!

Nella sua òpera ‘*Memoire sur les roues hydrauliques*’, èdita nel 1797, egli dimostrò che si poteva, ottenendo gli stessi risultati, misurare la potenza esprimibile dalla corrente non più con il prodotto della massa per la velocità (*mV*) ma con la *vis viva*, pari al prodotto della massa per la metà

del quadrato della velocità: $m \cdot \frac{V^2}{2}$.

Wilhelm Leibniz, nel 1686, aveva affermato che questa grandezza meglio rappresentava la forza dei corpi in movimento rispetto a quella, allora usuale, della massa per la velocità.



La *vis viva* scatenò grandi confronti tra sostenitori e contrari: tra i primi, già lo abbiamo visto, Daniel Bernoulli, che della conservazione della *vis viva* (cioè dell'energia del movimento) fece la premessa sostanziale della sua ricerca in Idraulica che gli valse una fama imperitura.

Jean-Charles Borda, studiando questa nuova grandezza, si rese conto che non sempre essa si conserva nel moto dei fluidi, come quando, ad esempio, una corrente percorreva una tubazione che, ad un tratto, subiva un allargamento della sezione, con la conseguente riduzione della velocità da V ad un minor valore v . Di conseguenza, in quel punto, la *vis viva* diminuiva della quantità $m \cdot \frac{(V - v)^2}{2}$.

La scoperta che parte della *vis viva* si dissipava, come nell'urto del getto d'acqua contro le pale di una ruota idraulica, fu concettualmente di straordinaria importanza, perché consentiva di 'far tornare i conti' dell'energia iniziale e finale del fenomeno, quindi avvicinava grandemente i risultati della teoria alle prove sperimentali.

Rendiamo il giusto mérito a Edme Mariotte che, come abbiamo visto all'inizio di questo Capitolo, aveva intuito che una parte rilevante dell'energia del getto, ma che non riuscì ad esplicitare in alcuna forma, non fosse utilmente trasformata nella forza dell'urto, quindi si perdeva.

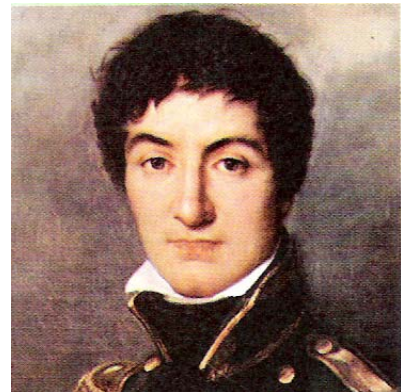
Ecco allora che la ricerca sulle ruote azionate dall'acqua portò ad un risultato fondamentale per tutta l'Idraulica: la nuova prospettiva, nello studio dei fluidi in movimento, rivolta all'analisi ed allo studio del relativo contenuto energetico e della sua dispersione o conservazione.

Questo nuovo orizzonte della ricerca aprì le menti di tanti, tra i quali colui che ne fu, ben presto, il campione: Daniel Bernoulli.

Un'ultima notazione su Borda: nel 1791 egli partecipò alla *Commission des poids et des mesures*, incaricata di definire un sistema di misura standardizzato. La *Commission* scelse, per l'unità di misura delle lunghezze, la decimilionesima parte di un quadrante di meridiano, che Jean-Charles de Borda propose di chiamare *metro* . . . così fu, per sempre!

I risultati raggiunti da Smeaton, de Parcieux e Borda furono ampliati e perfezionati dal francese Lazare-Nicolas-Marguerite Carnot (Nolay 1753 – Magdeburgo 1823), ingegnere militare, generale, uomo politico, matematico e fisico.

Carnot proseguì nell'analisi teorica del moto delle macchine idrauliche e, nella sua opera di Meccanica "*Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*", edita nel 1783, propose di dimostrare le condizioni ottimali di funzionamento di una qualsiasi macchina introducendo il *Principio di continuità*. Secondo tale principio la massima efficienza di una macchina idraulica si ottiene quando la potenza viene trasmessa senza urti o turbolenze, ma *per gradi insensibili*, definendo i criteri per trovare il massimo rendimento di qualsiasi ruota idraulica conosciuta.



Pierre-Louis-Georges Du Buat (Tortisambert 1734 – Vieux-Condé 1809), anch'egli ingegnere militare, definì, in modo sistematico, i coefficienti correttivi da applicarsi alle formule teoriche, secondo l'esperienza sperimentale condotta con ruote idrauliche a scala reale o con modelli. L'impostazione dell'attività sperimentale di Du Buat influenzò grandemente, per la metodologia seguita e per l'analitica chiarezza, gli esperimenti in Idraulica condotti sino al XIX secolo.

Anche le pubbliche autorità si interessarono, nella prima metà del XIX secolo, allo sviluppo delle ruote idrauliche; l'iniziativa più completa fu quella del *Franklin Institute* di Filadelfia USA, che, tra il 1829 ed il 1831, analizzò il funzionamento di quattro ruote idrauliche, con diametro da 1,8 a 6,1 metri, deducendo precise indicazioni su rendimenti, forme e dimensioni.

Proprio mentre le ruote idrauliche stavano subendo un significativo progresso, sia nella teoria che nelle pratiche costruttive, giunse la novità che, in tempi brevissimi, le portò ad essere soltanto 'pezzi da museo', velocemente relegate alla sola funzione di muovere la macina in pietra dei mulini da grano.

L'ingegnere francese Claude Burdin (Lepin, Savoia 1790- Clermont 1873), professore della *Ecole des Mines* a Saint Étienne, e Benoit Fourneyron (Saint Étienne 1802 - Parigi 1867), studente di Burdin, portarono l'attenzione di tutti su un nuovo tipo di macchina idraulica dalle prestazioni sbalorditive.

Nel 1824 Burdin sottopose alla *Académie royale des sciences* la memoria "*Des turbines hydrauliques ou machines rotatoires à grande vitesse*", che descrive la nuova tipologia di apparecchiatura, che indicò con il termine '*turbina*'; nome divenne subito comune nella terminologia dell'ingegneria e di tutta la scienza.

Questo dispositivo, sin dai primi modelli in grado di raggiungere elevate velocità di rotazione, convogliava il flusso in un condotto, costringendolo ad assumere un moto rotatorio, attorno ad un asse verticale, scendendo all'interno di una condotta alla quale era solidale un primo ordine di palette, che assolvevano alla funzione di imprimere alla corrente un moto rotatorio.

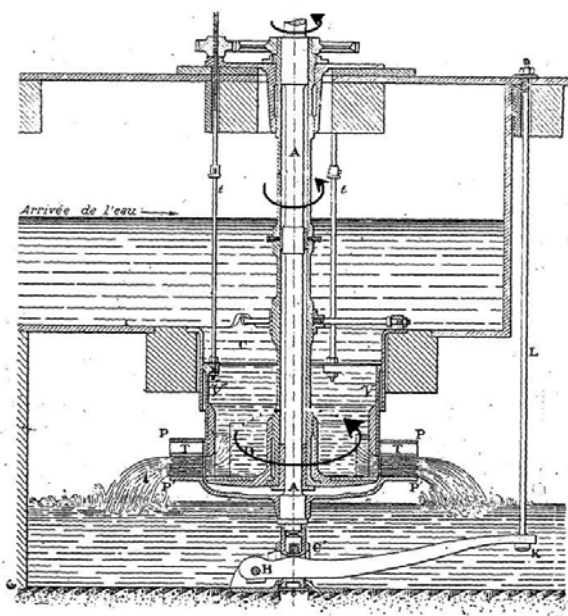
Solidale all'albero ecco una ruota munita di pale, già molto simile ad un'elica, sagomate secondo una particolare curvatura ed una piccola inclinazione, calcolate, in via sperimentale, per rendere minimi urti, turbolenze e velocità di uscita dal dispositivo stesso; quindi con un moto che rendesse minimi gli urti e le turbolenze. La memoria di Burdin non fu accolta con il meritato favore, sebbene il suo autore ricevette molti incoraggiamenti nel continuare le ricerche.

Presto la *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale* (alla quale Burdin aveva sottoposto la propria memoria) offrì un premio al primo " . . . che avesse avuto successo nell'applicare a larga scala in modo soddisfacente, nei mulini e nelle industrie, le turbine idrauliche o le ruote idrauliche con le pale ricurve . . .". Purtroppo Burdin era tanto predisposto negli studi teorici quanto poco nelle applicazioni pratiche e mai avrebbe avuto successo nella realizzazione di un modello di accettabile fattura ed efficienza.

Benoit Fourneyron, dotato, a differenza del suo professore Claude Burdin, di una grande abilità pratica, proseguì nello sviluppo dell'idea originale di Burdin, sfruttando la sua ampia esperienza in metallurgia e, nel 1827, poté realizzare una prima turbina sperimentale che, a dispetto dell'imperfetto disegno delle palette rotanti in aspirazione, si dimostrò già affidabile ed efficiente; la chiamò '*Ruota a pressione universale e continua*'.

Scrisse di lui Claude Burdin:

"Perlomeno se io non costruii buone macchine si potrà dire che almeno abbia costruito un buon costruttore di macchine, che è di ancor più maggior merito!"



Le prime realizzazioni di Fourneyron gli valse, nel 1833, il premio offerto, e non ancora assegnato, dalla *Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*; la sua "*Mémoire sur l'application en grand dans les usines et manufactures, des turbines hydrauliques ou roues à palettes courbes de Bélidor.* », che descrive la teoria generale e la sua applicazione nella realizzazione di tre installazioni, fu pubblicata dalla *Société* nel 1834.

Fourneyron costruì più di cento turbine in varie parti del mondo che divennero così il nuovo ed unico mezzo per tradurre l'energia dell'acqua in forza motrice per le industrie.



Intanto . . . le 'nostre' ruote idrauliche, collegate alla macina di pietra, continuarono ad essere costruite in modo sostanzialmente uguale.

Cambiarono i materiali, dal legno al metallo, ma le grandi ruote continuarono a girare, lente e sicure, al ritmo dell'acqua che ad esse era condotta; placide e tranquille, come sagge custodi di un sapere antico e paziente; un po' sonnion e forse, a volte, quasi divertite nell'assistere all'affanno, in alcuni casi maldestro, di



coloro che ne volevano carpire i segreti più profondi.

* * *