

INDICE ARTICOLI

I	Prefazione <i>B. Brunone, M. Ferrante & S. Meniconi</i>
	Relazioni su invito
3	With Alice through a [double] looking glass <i>M. Fanelli</i>
11	Il calcolo diretto del coefficiente di velocità per le pompe a velocità variabile <i>E. Todini, M. E. Tryby, Z. Y. Wu & T. M. Walski</i>
23	Un modello per la riabilitazione delle reti di distribuzione idrica <i>G. De Marinis, R. Gargano & C. Tricarico</i>
33	Predicibilità dei cambiamenti climatici e variazioni nelle precipitazioni <i>S. Corti</i>
43	Strumenti innovativi per la simulazione del funzionamento di una rete di condotte ed analisi di affidabilità <i>O. Giustolisi</i>
	Memorie
55	Analisi di una procedura per l'ottimizzazione dell'inserimento e taratura delle valvole di riduzione della pressione nelle reti di distribuzione <i>S. Liberatore & G.M. Sechi</i>
65	Regolazione delle pressioni in una rete distrettualizzata mediante algoritmi genetici <i>A. Di Nardo, M. Di Natale, C. Gisonni, M. Iervolino & D. Musmarra</i>
73	Sistema di supporto alle decisioni negli interventi di manutenzione delle reti di distribuzione idrica in condizioni di informazioni limitate <i>A. Criminisi, M.R. Mazzola & G. Scordo</i>
81	La diffusione di contaminanti in rete: integrazione della simulazione pressure-driven con un modello di perdita <i>F. Primativo, A. Doglioni, D. Laucelli & L. Berardi</i>

- 95 | Funzionamento di contatori in presenza di manovre rapide
A. Carravetta, R. Martino & G. Milone
- 103 | Utilizzo di gruppi di pompaggio nel ciclo integrale delle acque
M. Gavina
- 107 | Gestione delle perdite idriche: sviluppi recenti ed esperienze pratiche di applicazione della metodologia IWA
M. Fantozzi
- 121 | Gestione del sistema di distrettualizzazione permanente negli acquedotti della provincia di Reggio Emilia
F. Calza & M. Fantozzi
- 129 | Valutazione del non misurato e stima delle perdite dovute all'obsolescenza del parco contatori acqua
F. Paolitti & S. Robustelli
- 143 | L'integrazione di sistemi per il calcolo automatizzato del bilancio idrico
A. Borzì, F. Scarpulla, G. Cristalli & D. Trapanotto
- 151 | Sull'impiego di transitori per la diagnosi di sistemi di condotte con valvole di linea
B. Brunone, M. Ferrante & S. Meniconi
- 159 | Individuazione delle perdite idriche nelle reti di distribuzione mediante ottimizzazione della domanda in funzione della pressione
Z.Y Wu & P. Sage
- 167 | Analisi dei fenomeni di riempimento di reti di distribuzione idrica con il metodo delle caratteristiche
G. Curto, M. De Marchis & E. Napoli
- 175 | Uso del georadar per un miglior rendimento delle reti idriche. Verifica in laboratorio della sua efficacia come tecnica per la ricerca perdite
M. Tavera, R. Pérez G., N. Belda C. & M. Herrera F.
- 185 | Un modello di simulazione dei transitori di un sistema di pompaggio
S. Mambretti & E. Orsi
- 193 | Effetti di scala nella modellazione probabilistica delle reti di distribuzione idrica
R. Guercio
- 201 | Un approccio stocastico per la disposizione ottima di stazioni per la rilevazione delle contaminazioni intenzionali nelle reti di distribuzione idrica
L. Cozzolino, R. Della Morte, A. Palombo & D. Pianese

- 209 Valutazione delle perdite idriche in una rete d'acquedotto oggetto di calibrazione
A. Marinelli & M. Resenterra
- 217 Funzioni di pozzo in acquiferi a conduttività variabile in direzione verticale
R. Ugarelli, M. Pinelli & V. Di Federico
- 225 Distrettualizzazione della rete idrica del quartiere di Monterusciello 2 in Pozzuoli:
il progetto europeo Hydranet e la realizzazione del sito pilota
A. Di Nardo, M. Di Natale, C. Gisomni, M. Iervolino & D. Musmarra
- 233 Integrazione di sistemi per il monitoraggio e la gestione dei sistemi idrici come
supporto alla gestione ottimizzata per la riduzione delle perdite idriche. Il caso di
studio di ATO3 Sarnese Vesuviano
E. Gerbino, A. Borzì, C. Bianchi & F. Rodriguez
- 241 Analisi delle perdite in un sistema di distribuzione idrica in pressione. Relazione
tra leggi di efflusso locale e globale
V. Bovolín, M. Lubritto & P. Villani
- 249 La distrettualizzazione del sistema di distribuzione idrica "Napoli est": risultati
preliminari
M. Giugni, N. Fontana, D. Portolano & D. Romanelli
- 257 Valutazione automatizzata del rischio di inadeguatezza delle portate antincendio
A. Gallina
- 265 Analisi delle singolarità con filtri di wavelet armoniche
C. Cattani
- 271 Caratterizzazione dello stato strutturale di una rete acquedottistica attraverso la
georeferenziazione delle rotture e l'analisi statistica
M. Resenterra, S. Grata, S. Alvisi & M. Franchini
- 281 Metodologie per la valutazione dell'incertezza nella previsione dei consumi idrici
urbani
P. Cutore, A. Campisano, A. Cancelliere & C. Modica
- 289 Efficienza complessiva degli impianti di sollevamento nelle reti idriche e fognarie
P. Gianoglio
- 297 Fenomeni di cavitazione nelle valvole
G. Balacco, U. Fratino, A. F. Piccini & F.M. Renna
- 311 Sulla distribuzione di velocità in correnti turbolente uniformi e sua analogia con
la distribuzione del potenziale elettrico in una vasca elettrolitica
C. Di Nucci, M. T. Todisco, E. Fiorucci & G. Bucci

- 319 | Impatto delle perdite idriche sul consumo energetico di un sistema alimentato con pompaggio diretto in rete
S. Artina, C. Lenzi, A. Marchi, C. Bragalli, R. Bissoli, T. Liserra & F. Ruggeri
- 327 | Valutazione dei costi di distrettualizzazione di una rete idrica ai sensi del D.M. n°99 del 1997 nel rispetto delle prestazioni idrauliche di progetto
A. Di Nardo, M. Di Natale & R. Greco
- 335 | Gestione attiva dei distretti acquedottistici: una soluzione efficiente per la riduzione delle perdite nelle reti di distribuzione dell'acqua
G. Ducci, A. Ferretti & G. della Luna
- 341 | Un "innocente" transitorio
B. Brunone, M. Ferrante, S. Meniconi, A. Carravetta & A. Cirimbilli
- 353 | Tecniche innovative per il controllo degli effetti della corrosione delle tubazioni in rame sulla qualità dell'acqua potabile
M. Fabbicino, A. Panico & F. Pirozzi
- 363 | La disinfezione delle acque destinate ad uso potabile: ricrescita batterica e sottoprodotti della disinfezione
L. Rizzo & V. Belgiorno
- 371 | Diversità spaziale del cloro residuo nelle reti di approvvigionamento idrico
F. Morga, D. Termini & G. Viviani
- 379 | Calibrazione di reti idriche e localizzazione teorica delle perdite in acquedotto mediante particle swarm optimization (PSO)
I. Montalvo A., M. Tavera, J. Izquierdo S. & R. Pérez G.
- 387 | Monitoraggio delle reti idriche: modellazione idraulica della rete e modellazione stocastica della domanda
G. Belardi & P. Villani
- 397 | Pumping tests and monitoring data towards well-field management. The Valle-memoria (I) case-study
B. Brunone, M. Ferrante & V. Pagnoni

PREFAZIONE

A testimonianza del rinnovato interesse suscitato dalle problematiche relative ai sistemi acquedottistici, nel corso del 2007 si sono tenuti in Italia tre convegni sul tema. Una di tali iniziative, *Acqua e città '07 – Il Convegno Nazionale di Idraulica Urbana* è stata organizzata nel mese di settembre a Chia (CA) dal Centro Studi Idraulica Urbana (CSDU). Le altre due, invece, fanno riferimento al Centro Studi Sistemi Acquedottistici (CSSA), presieduto dal prof. Paolo Bertola. Si tratta, rispettivamente, del Convegno su *Approvvigionamento e Distribuzione Idrica: Esperienze, Ricerca ed Innovazione*, tenutosi a Ferrara nel mese di giugno su iniziativa del prof. Marco Franchini, e della terza edizione del Seminario su *La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto*, del quale il presente volume costituisce l'atto conclusivo. Più recentemente, nello scorso gennaio, si è tenuto a Sorrento, organizzato dal prof. Giovanni De Marinis in collaborazione con GORI S.p.A., il primo Forum sulla *Sicurezza dei sistemi idrici* nell'ambito del progetto DISWIP (Development of an Integrated System for Water Infrastructures Protection against Intentional Attacks), finanziato dall'Unione Europea.

Rispetto alle due precedenti edizioni, svoltesi rispettivamente nel 2003 e nel 2005, il Seminario su *La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto*, incluso fra gli eventi celebrativi del 7° centenario dalla fondazione dell'Ateneo perugino, ha avuto per la prima volta una durata di un giorno e mezzo e si è tenuto presso la Facoltà di Ingegneria (Foto 1). Elemento di continuità con il passato (Tabella 1) è invece rappresentato dai corsi di aggiornamento professionale che il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (DICA) dell'Università di Perugia ha organizzato – immediatamente prima del Seminario – in collaborazione con Federutility e la società Astea di Osimo (AN). Anche per i corsi del 2007, alle nozioni impartite durante le lezioni frontali sono seguite le indispensabili applicazioni su impianti reali (Foto 2). Appare opportuno sottolineare in questa sede come i “corsi Federutility” del 2007 hanno rappresentato la naturale conclusione di un anno in cui particolare attenzione è stata rivolta presso il DICA alla formazione post lauream. Nei mesi precedenti, infatti, si era tenuta la prima edizione del Master in “Urban Water Engineering – UWE”, cofinanziato dal Ministero degli Affari Esteri, e rivolto a tecnici dell'Africa Subsahariana. Il Master, della durata di 7 mesi, ha visto la partecipazione di 13 ingegneri provenienti da Egitto, Zambia e Mozambico e il contributo di docenti di prestigiose Università italiane e straniere (per maggiori informazioni si può consultare la relativa pagina al sito <http://www.unipg.it/h2o>).



Foto 1. Aula Magna della Facoltà di Ingegneria. Partecipanti al Seminario.

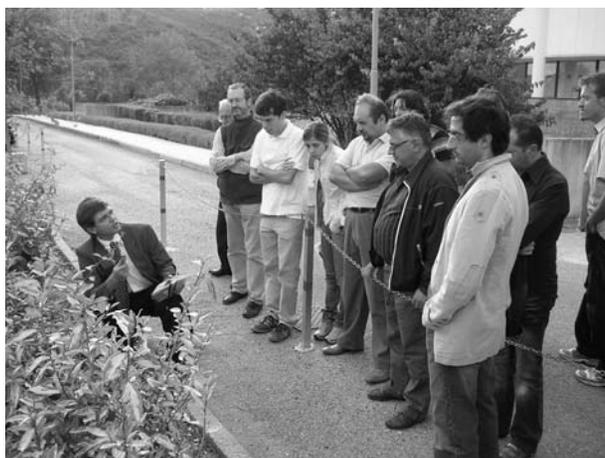


Foto 2. Un'applicazione di campo a cura dell'ing. W. Brand durante il corso *Prelocalizzazione e localizzazione delle perdite nelle reti di acquedotto*.

I lavori del seminario – aperti dall'intervento del prof. Corrado Corradini, preside della Facoltà di Ingegneria – hanno visto l'alternarsi di relazioni su invito, affidate a Michele Fanelli, Ezio Todini, Giovanni De Marinis, Susanna Corti, Orazio Giustolisi e Furio Cascetta, e gruppi di presentazioni che hanno dato luogo, nel complesso, alle 45 memorie incluse nel presente volume. A tale riguardo, particolare attenzione è stata rivolta agli interventi dei giovani ricercatori anche in relazione al premio istituito dal Comitato Organizzatore per la migliore presentazione ed assegnato dal Comitato Scientifico del Seminario.

Anno Corso	Docente/Affiliazione
2003 <i>Ricerca delle perdite nelle reti idriche</i>	W. Brand <i>Hans Brand S.r.l., Milano</i> C. Casale Saster – Genova Acque S.p.A. B. Brunone, M. Ferrante <i>Università di Perugia</i>
2005 <i>Modelli numerici e sistemi informativi (GIS) per la gestione delle reti di condotte</i>	S. Bellio <i>AMGA S.p.A., Genova</i> B. Brunone, M. Ferrante <i>Università di Perugia</i>
<i>Monitoraggio e riabilitazione delle reti di condotte</i>	F. Cascetta <i>Seconda Università di Napoli</i> R. Chirulli
2006 <i>Gestione e monitoraggio dei campi-pozzi</i>	A. Bellin <i>Università di Trento</i> B. Brunone, M. Ferrante <i>Università di Perugia</i> A. Fiori <i>Università di Roma Tre</i>
2007 <i>Efficienza energetica delle reti di acquedotto</i>	E. Cardelli <i>Università di Perugia</i> A. Carravetta <i>Università di Napoli Federico II</i> G. B. Conte <i>Studio Legale Conte, Roma</i>
<i>Prelocalizzazione e localizzazione delle perdite nelle reti di acquedotto</i>	S. Artina <i>Università di Bologna</i> W. Brand <i>Hans Brand S.r.l., Milano</i> B. Brunone, M. Ferrante <i>Università di Perugia</i> A. Fiorini Morosini, P. Veltri <i>Università della Calabria</i>

Tabella 1. Corsi di aggiornamento professionale organizzati dal DICA in collaborazione con Federutility dal 2003 al 2007.

Nel concludere queste brevi note introduttive, e nel dare appuntamento a Perugia per il 31° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, che

si terrà fra il 9 e il 12 settembre 2008, sentiamo il dovere di ringraziare, oltre a tutti i partecipanti, quanti hanno contribuito in vario modo all'iniziativa: le Associazioni – IAHR, CSSA, ANDIS, Wincomers e Fondazione Amga – per il loro patrocinio scientifico, e le Società e gli Enti – ATO Umbria2, Bentley Systems Italia Srl, CAPRARI SpA, GRUNDFOS Pompe Italia Srl, ISOIL Industria SpA e PROTEO SpA – per il loro concreto sostegno.

Perugia, marzo 2008

Bruno Brunone, Marco Ferrante e Silvia Meniconi

Relazioni

su

invito

WITH ALICE THROUGH A [DOUBLE] LOOKING GLASS

Michele Fanelli¹

ABSTRACT

Lewis CARROL writes – if I remember it correctly – that Alice, after stepping through the glassy, yet pliant, surface of the mirror, turns around to look back. What she sees is the strangely skewed space which she has entered – the reflection of her own room – now reflected back, in the reverse side of the looking glass, into its real, familiar shape. This might be taken to mean that if the boundary between real and imaginary could become ‘flou’, then to be crossed back and forth at will, the mutual reflections of the one into the other – reflections that could only be appreciated after the crossing - would offer unusual insights.

In this mathematical ‘scherzo’ I propose to effect a similar double reflection, which will not fail to horrify the bona fide mathematicians, but – I hope – will be considered with a more benevolent eye by the dilettante-minded, among which not a few of my fellow engineers do not mind to be counted themselves. And aptly enough, for those wary of embarking with me on this jocular trip, uphill and downhill, through unorthodox currents, I cannot think of a better defence than Lewis CARROL’s own words: “Let’s pretend...””.

1 THE “WORLD” TO BE REFLECTED IN A MATHEMATICAL MIRROR

Let us pretend... er, I mean let us consider a pressurised pipe through which water flows and water-hammer waves propagate back and forth.

To begin with, I will assume zero head losses and no water leaks. (I will tackle with this later on).

The stationary flow on which the water-hammer waves are superposed has average velocity v_0 and piezometric head h_0 (constant in time and uniform throughout); the water-hammer perturbation is characterised by velocity increase $v(x,t)$ and piezometric head increase $h(x,t)$.

In this simple case, the differential equations assumed to represent the waves are:

$$\begin{aligned}\frac{\partial h}{\partial x} &= -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -\frac{c^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x}\end{aligned}\tag{1}$$

c being a line capacity parameter (later to be identified with the celerity of propagation of the water-hammer waves).

¹ e-mail: michele.fanelli@infinito.it

2 THROUGH THE LOOKING GLASS (THE WORLD BEYOND THE MIRROR)

Now I propose to effect the following transformation of variables:

$$\begin{aligned} h &= \varphi \\ -i \cdot \frac{c\nu}{g} &= \psi \end{aligned} \quad (2)$$

obviously, ν being a real variable, ψ should be an imaginary one, but for our little conjuring trick to work let us choose to ignore formally this fact and go on “as if” ψ were real. It is evident that φ and ψ are homogeneous with *lengths*.

Moreover, let us move also time to the world of complex variables, by adopting the substitution:

$$i \cdot c \cdot t = y \quad (3)$$

also y is homogeneous with a *length*.

With these substitutions, eqs. (1) assume the form:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi}{\partial y} &= -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \end{aligned} \quad (4)$$

Or, indifferently, we can obtain the same set (4) of eqs. adopting the alternative transformations:

$$\begin{aligned} h &= \varphi \\ i \cdot \frac{c\nu}{g} &= \psi \\ -i \cdot c \cdot t &= y \end{aligned} \quad (2^*), (3^*)$$

Let us file away, for later use, the following correspondence table:

$$\begin{aligned} y = i \cdot c \cdot t &\rightarrow \psi = -\frac{i \cdot c \cdot \nu}{g} \\ y = -i \cdot c \cdot t &\rightarrow \psi = \frac{i \cdot c \cdot \nu}{g} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{or, more succinctly, } y = \pm i \cdot c \cdot t \rightarrow \psi = \mp \frac{i \cdot c \cdot \nu}{g}$$

Eqs. (4), if φ and ψ were *bona fide* real variables –and not a complex travesty of real ones–, would allow formally to build up, as their solution, an analytic function

$$F = \varphi + i \cdot \psi \quad (6)$$

of the complex variable $z = x + i \cdot y$:

$$F(z) = \varphi(x, y) + i \cdot \psi(x, y) = F(x + i \cdot y) \quad (7)$$

and F could be chosen in any arbitrary way, provided that it be differentiable, i. e. that at any point $z = x + i \cdot y$ there exists a unique value of the derivative

$$\frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + i \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} - i \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (8)$$

irrespective, thanks to (4), of the direction dy/dx along which the differentiation path is chosen on the plane (x,y) .

If we impose the condition:

$$z = x + i \cdot y = \text{constant} = A + i \cdot B \quad \text{with } A = \text{constant}, B = \text{constant} \quad (9)$$

that would imply, were A, B, x and y real variables, the inescapable conclusion of the story:

$$\begin{aligned} x &= A \quad \text{and} \quad y = B \\ F &= \varphi + i \cdot \psi = M + i \cdot N = \text{COMPLEX} \quad \text{CONSTANT}, \\ \varphi &= M = \text{REAL} \quad \text{CONSTANT}, \\ \psi &= N = \text{REAL} \quad \text{CONSTANT}, \end{aligned} \quad (10)$$

and –because real quantities such as x, φ cannot mingle with imaginary ones such as $i \cdot y, i \cdot \psi$ – this conclusion would be utterly useless.....but....

3 ... “CURIUSER AND CURIUSER !” (THE BACKWARDS REFLECTION)

... but let us now remember the actual nature of the pseudo-real variables φ, ψ, t :

$$\begin{aligned} y = i \cdot c \cdot t &\quad \rightarrow \quad \psi = -\frac{i \cdot c \cdot v}{g} \\ y = -i \cdot c \cdot t &\quad \rightarrow \quad \psi = \frac{i \cdot c \cdot v}{g} \quad \text{[see (2), (3), (2*), (3*), (5)]} \\ \varphi &= h \end{aligned}$$

by introducing these definitions into (10) the following results are obtained:

$$\begin{aligned} \text{IF } z = x + i \cdot (\pm i \cdot c \cdot t) = x \mp ct = \text{CONSTANT}, \text{ THEN} \\ F = \varphi + i \cdot \psi = h + i \cdot (\mp \frac{i \cdot c \cdot v}{g}) = h \pm \frac{c \cdot v}{g} = \text{CONSTANT} \end{aligned} \quad (11)$$

and these equations, in physical terms, coincide with the familiar statements valid for water-hammer waves:

$$h + \frac{c \cdot v}{g} = \text{constant along a characteristic path } x - c \cdot t = \text{constant} \text{ (“direct waves”) (11*)}$$

$$h - \frac{c \cdot v}{g} = \text{constant along a characteristic path } x + c \cdot t = \text{constant} \text{ (“retrograde waves”).}$$

At a price of a little cheating with the meaning of symbols, this result has been obtained in a rather smooth way.

4 HEAD LOSSES (“OFF WITH HIS HEAD!”)

For the sake of simplicity, let us assume that the water-hammer waves are of small amplitude and are superposed on a strong average flow of velocity

$$v_0 \gg v(x,t) \quad (12)$$

Under this assumption, the additional head losses associated with the water-hammer waves can be linearised:

$$\Delta h_0 = \Delta x \cdot \frac{v_0^2}{\mathcal{X}^2 \cdot R} \quad , \quad \Delta h \equiv \Delta x \cdot p \cdot v \quad \text{with} \quad p = \frac{2 \cdot v_0}{\mathcal{X}^2 \cdot R} \quad (13)$$

The differential equations are modified as follows:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial x} &= -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} - p \cdot v \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -\frac{c^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (14)$$

which after transformations (2*), (3*), (5) become in the complex world:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= \frac{\partial \psi}{\partial y} \pm \frac{i \cdot p \cdot g}{c} \cdot \psi \\ \frac{\partial \psi}{\partial x} &= -\frac{\partial \varphi}{\partial y} \end{aligned} \quad (15)$$

indicating that now no analytical function $F(x + i \cdot y)$ can be a solution of (15).

But let's try a perturbation of the former case, having in mind a damped-sinusoidal type of function, since we operate on a linear system and therefore any perturbation could in principle be represented by a FOURIER series or a FOURIER integral: a trial function could be, for instance:

$$\begin{aligned} \psi &= i \cdot A \cdot \exp[\pm i \cdot (\alpha \cdot \xi \pm i \cdot \eta)], \quad \text{where} \\ \xi &= \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda} \quad , \quad \eta = \frac{2 \cdot \pi \cdot y}{\lambda} \end{aligned} \quad (16)$$

and λ is the wavelength of the perturbation; α is a constant different from 1 and – as it will turn out – complex.

By operating on (16) according to (15) one gets easily:

$$\begin{aligned} \varphi &= \pm i \cdot \alpha \cdot \psi \\ \alpha^2 &= 1 \mp \frac{i \cdot \lambda}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad \text{where} \quad L = \frac{c}{g \cdot p} = \frac{c}{g} \cdot \frac{\mathcal{X}^2 \cdot R}{2 \cdot v_0} \quad ; \\ \alpha &\equiv \pm \left(1 \mp \frac{i \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot L} \right) \quad \text{for} \quad \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot L} \ll 1 \quad ; \end{aligned} \quad (17)$$

and reverting to the actual physical quantities:

$$\begin{aligned} h &= A \cdot \left(1 \mp \frac{i \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot L} \right) \cdot \exp\left(\mp \frac{x}{2 \cdot L}\right) \cdot \exp\left[\pm \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{\lambda} \cdot (x \mp ct)\right] \\ v &= \pm \frac{g}{c} \cdot A \cdot \exp\left(\mp \frac{x}{2 \cdot L}\right) \cdot \exp\left[\pm \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{\lambda} \cdot (x \mp ct)\right] \end{aligned} \quad (18)$$

from which it is evident that the attenuation happens always in the direction of propagation².

² We would expect the piezometric head, h , to have been converted back to a real quantity; on the contrary the first of eqs. (18) gives for it a complex value, thanks to the factor $(1 \mp i \cdot \lambda / 4 \cdot \pi \cdot L)$. Recalling that we are dealing here with a sinusoidal function of space and time, it is readily seen that this factor represents chiefly a *phase difference* between h and v .

5 THE CASE OF THE LEAKING PIPE

To complete this exposé let us take up the case of a pipe with leaks, which is, in a sense, the dual of the previous one. Assume that all over the pipe length there is a slit of area σ for unit length, through which water can leave the inner section of the pipe with velocity proportional to the local piezometric head; thus the variations $q(x,t)$ of the leak discharge per unit length that are associated with the water-hammer waves will be, in the linearised approximation:

$$q = \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_0 + h)} - \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0} \equiv \frac{\sigma \cdot \sqrt{g \cdot h}}{\sqrt{2 \cdot h_0}} \quad (19)$$

The basic eqs. are modified as follows:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial x} &= -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -\frac{c^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} - K \cdot h \end{aligned} \quad (20)$$

where $K = \frac{\sigma \cdot c^2}{S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0}}$ and S = section of the pipe .

After transformations (2*), (3*), (5) eqs. (20) become in the complex world:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi}{\partial x} &= -\frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{i \cdot \varphi}{\Gamma} \end{aligned} \quad (21)$$

with $\Gamma = 1/K$ (homogeneous with a length), indicating, again, that now no analytical function $F(x + i \cdot y)$ can be a solution of (21).

Following a procedure completely similar (or specular, to adopt a Carrollesque terminology) to that of section III we get successively:

$$\varphi = A \cdot \exp[\pm i \cdot (\alpha \cdot \xi \pm i \cdot \eta)] \quad (22)$$

Where $\xi = \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda}$, $\eta = \frac{2 \cdot \pi \cdot y}{\lambda}$ and λ is the wavelength of the perturbation; α is again a complex constant different from 1; then, by operating on (22) according to (21):

$$\begin{aligned} \psi &= \mp i \cdot \alpha \cdot \varphi \\ \alpha^2 &= 1 \pm \frac{i \cdot \lambda}{2 \cdot \pi \cdot \Gamma} \quad ; \\ \alpha &\equiv \pm \left(1 \pm \frac{i \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot \Gamma} \right) \quad \text{for} \quad \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot \Gamma} \ll 1 \quad ; \end{aligned} \quad (23)$$

and reverting to the actual physical quantities:

$$\begin{aligned}
 h &= A \cdot \exp\left(\mp \frac{x}{2 \cdot \Gamma}\right) \cdot \exp\left[\pm \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{\lambda} \cdot (x \mp ct)\right] \\
 v &= \pm \frac{g}{c} \cdot A \cdot \left(1 \pm \frac{i \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot \Gamma}\right) \cdot \exp\left(\mp \frac{x}{2 \cdot \Gamma}\right) \cdot \exp\left[\pm \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{\lambda} \cdot (x \mp ct)\right]
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

from which it is again evident that the attenuation happens always in the direction of propagation³.

6 THE TAIL OF THE TALE (BACK FROM DREAMLAND)

Well now – seriously speaking – what is, if any, one might legitimately ask, the interest of the preceding exercise (which after all leads to nothing new in the way of final results, but simply indicates a dubious shortcut to arrive at them)?

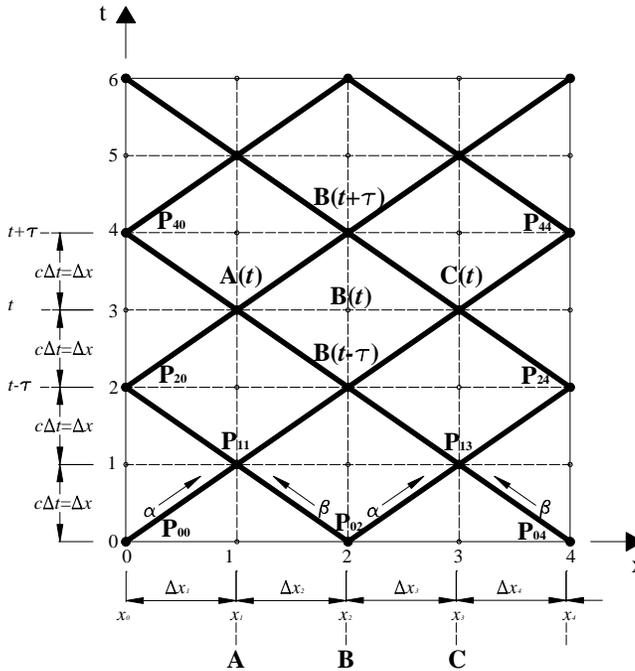


Figure 1. The characteristic lines in the plane $(x, c \cdot t)$ (after G. Evangelisti); in the present work $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \dots = \Delta x_n = \text{constant} = \Delta x$.

I feel that it should be taken merely as a simple, verifiable example showing in a compact way some unexpected possibilities offered by unabashed application, even

³ See footnote 1 for the meaning of the complex value of factor $(1 \pm i \cdot \lambda / 4 \cdot \pi \cdot \Gamma)$ in the expression of v .

beyond their legitimate field, of the theory of the functions of complex variable together with the systematic use of symbolic treatment. It goes without saying, however, that I do not recommend uncontrolled undertaking of such forays into uncharted territories; on the contrary, this kind of ventures should be carried out with due caution, verifying by independent means their results.

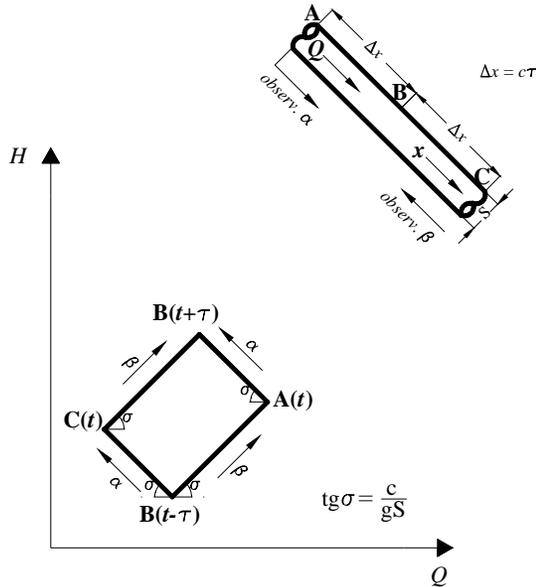


Figure 2. A BERGERON graph on the plane (Q, h) , showing that as long as there are no water losses the sum $h_A(t) + h_C(t)$ must be the same as the sum $h_B(t-\tau) + h_B(t+\tau)$, with $c \cdot \tau = \Delta x = x_C - x_B = x_B - x_A$.

The example chosen here, it might be said in the way of criticism, was an easy one, the results being classical acquisitions on which there is no possibility of error; and there is no guarantee that these practices would work in general⁴. However, that the validity of the formal analogy here attempted runs quite deep is shown by the following considerations: eqs. (4) would allow to write: $\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$, namely

considerations: eqs. (4) would allow to write: $\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$, namely

$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 h}{\partial (c \cdot t)^2} = 0$ which in terms of a finite difference procedure would entail, with

reference to Figure 1: $h_A(t) + h_C(t) - 2 \cdot h_B(t) - [h_B(t + \tau) + h_B(t - \tau) - 2 \cdot h_B(t)] = 0$,

⁴ After writing this paper, I found that very similar tricks work also in the problems of heat diffusion (FOURIER equation).

i. e. $h_A(t) + h_C(t) - [h_B(t + \tau) + h_B(t - \tau)] = 0$, an equation readily confirmed by a BERGERON diagram in the plane (h, Q) , see Figure 2, which also shows that in the presence of losses this relationship would no longer hold, as Chapt. III indicates, since in that case $\nabla^2 h \neq 0$; both circumstances were confirmed by experiment.

Acknowledgements. I should not end this presentation without expressing my thanks to Prof. Bruno Brunone of the University of Perugia, who invited me to participate in an interesting Seminar on “Control of leaks and management of pipe systems” during which two loose strands – one from the Seminar discussions, one from my extensive experience with the functions of complex variable – came casually together in my head giving me the first, dim spark of the ideas that I tried later to develop and are here exposed. And, of course, many thanks to the writings of Lewis Carrol, always an unequalled genius in encouraging unconventional thinking.

REFERENCES

Evangelisti, G. “Waterhammer Analysis by the Method of Characteristics”, *L'Energia Elettrica*, 18, 1969, pp. 11, 12.

Fanelli, M. “Studio di un dispositivo di protezione delle condotte forzate contro improvvise fughe di acqua”, (Study of a method of protection of penstocks against sudden losses of water), *L'Energia Elettrica*, 9, 1970.

See also: CESI RICERCA – “A Report on the study and testing of a system of on-line, real-time detection of sudden losses of water from pressure conduits” (year 2003) – Visit the site 1) herebelow and proceed as specified under 2)...5):

- 1) www.ricercadisistema.it
- 2) click on Progetti e Risultati
- 3) click on Project Siset
- 4) click on Subproject SIDI
- 5) click on Rapporti

In the last Reference a comprehensive Bibliography is appended.