

Secondo seminario su “La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto”
Perugia 22 settembre 2005

AFFIDABILITÀ DELLE RETI DI IRRIGAZIONE NEI CONFRONTI DEI FENOMENI DI MOTO VARIO

C. Mucherino, L. Cozzolino, C. Covelli & D. Pianese

Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale “Girolamo Ippolito”, Università degli Studi di Napoli Federico II, via Claudio 21, 80125 Napoli; e-mail: mucherin@unina.it

SOMMARIO

Nella presente memoria, viene proposto un approccio innovativo, di portata sufficientemente generale, per l’analisi dell’affidabilità meccanica dei sistemi di irrigazione in pressione nei confronti di eventuali fenomeni di moto vario innescati da una qualsivoglia perturbazione indotta nelle condizioni al contorno. Tale approccio porta esplicitamente in conto la variabilità aleatoria delle condizioni a partire dalle quali il transitorio può avere inizio, a loro volta dipendenti dall’aleatorietà della domanda idrica da parte dell’utenza, ed utilizza una serie di indici di performance all’uopo definiti. A scopo dimostrativo, la metodologia proposta viene applicata a una rete di irrigazione servita da un impianto di sollevamento, il cui improvviso malfunzionamento è in grado di originare temibili transitori.

1 INTRODUZIONE

Le reti di irrigazione in pressione mostrano, rispetto ai sistemi più tradizionali, che prevedono l’adduzione e la distribuzione a pelo libero, una maggiore elasticità di esercizio, una maggiore efficienza di distribuzione e minori sprechi della risorsa idrica: fattori che si traducono, di fatto, in una migliore capacità di distribuire la risorsa, indipendentemente dal momento e dal punto in cui la risorsa stessa è richiesta, e dalla sua entità. Tuttavia, le caratteristiche di tali sistemi pongono al tecnico numerosi problemi da risolvere in sede progettuale. Infatti, poiché i sistemi di irrigazione in pressione permettono agli utenti di sfruttare la risorsa idrica disponibile nei tempi e nei modi desiderati, la struttura della richiesta è variabile aleatoriamente sia nel tempo che nello spazio. Ciò risulta ancora parzialmente vero anche nel caso, sempre più frequente, in cui si ricorra a specifici dispositivi atti a limitare le pressioni e le portate defluenti in alcuni tratti del sistema. Si può mostrare come l’effettivo comportamento di una rete di irrigazione in pressione, progettata facendo uso di approcci probabilistici classici, solo apparentemente adeguati, possa dare luogo a indici di prestazione anche ben al di sotto di quelli progettuali (Cozzolino et al., 2005a). Va inoltre tenuto presente che, nell’attesa che, grazie a cospicui investimenti, i sistemi di adduzione attualmente esistenti si possano trasformare da sistemi a pelo libero a sistemi in pressione, sempre più frequentemente, per ottenere il carico idraulico necessario all’adacquamento delle aree irrigabili, si ricorre ad impianti di sollevamento. Il progetto di tali impianti può essere difficoltoso, in quanto le condizioni effettive di funzionamento del sistema variano

continuamente nel tempo, e in maniera aleatoria, portando spesso l'impianto di sollevamento lontano dal suo punto di massima efficienza operativa. La sempre più diffusa adozione di questo tipo di sistemi di irrigazione, non solo nei Paesi del mediterraneo, ma anche in altri Paesi, sia economicamente sviluppati, sia in via di sviluppo, ha comportato un fiorire di studi sulla loro performance, specie in riferimento alla variabilità, nel tempo e nello spazio, anche in maniera aleatoria, della domanda irrigua (Cozzolino *et al.*, 2005a; Lamaddalena & Sagardoy, 2000). Meno approfonditi sono gli studi relativi all'affidabilità meccanica dei sistemi irrigui in pressione.

Di norma, gli effetti della variabilità della domanda sull'insorgere di sovrappressioni/depressioni all'interno del sistema sono trascurati, in quanto si suppone che le manovre agli idranti, anche se svolte, eventualmente, in un tempo ridotto, siano in grado di generare transitori i cui effetti sono modesti, data la piccola entità delle variazioni di portata imposte al sistema rispetto alla portata globalmente erogata dal sistema stesso, e la molteplicità delle diramazioni esistenti. Tuttavia, date le notevoli portate in gioco (l'intera portata globalmente erogata dal sistema), gli effetti di colpo d'ariete dovuti allo stacco improvviso del funzionamento delle pompe, per esempio a causa della mancanza di alimentazione, possono essere di gran lunga più importanti.

In quest'ultimo caso, il transitorio che si genera è caratterizzato dall'attingimento di pressioni molto basse, fino a determinare fenomeni di rilascio dell'aria disciolta nell'acqua, cavitazione, implosione delle condotte per fenomeni di instabilità, o per eccesso delle pressioni esterne. Di norma, questi effetti distruttivi possono essere contenuti facendo uso di specifici organi di protezione dai fenomeni di moto vario, quali volani e casse d'aria.

Il progetto di contromisure adeguate alla protezione degli impianti di irrigazione in pressione nei confronti del colpo d'ariete non è semplice, a causa della complicata geometria del sistema, la quale comporta articolati fenomeni di riflessione delle onde di sovrappressione/depressione che si propagano al suo interno. Ciò nonostante, negli ultimi quarant'anni sono stati messi a punto numerosi approcci che consentono di risolvere, per via numerica, i sistemi di equazioni differenziali alle derivate parziali che reggono i fenomeni di moto vario nelle reti in pressione. Tra questi, i metodi alle differenze finite, quelli agli elementi finiti, o quelli ancora più classici, quali il ben noto metodo delle caratteristiche o metodi da questo derivati, quali il cosiddetto *metodo algebrico* (Streeter, 1967). Tuttora irrisolto appare, viceversa, il problema dell'individuazione delle condizioni iniziali a partire dalle quali può innescarsi il transitorio, la cui conoscenza è assolutamente necessaria, indipendentemente dal metodo utilizzato, per la risoluzione del problema: infatti, a causa della variabilità aleatoria della domanda, le condizioni iniziali, sono, in generale, anch'esse incognite.

Tanto premesso, nella presente memoria viene affrontato, attraverso l'utilizzazione di specifici *indici di performance*, all'uopo definiti, il problema della determinazione della dipendenza degli effetti di colpo d'ariete dalla reale struttura della domanda da parte dell'utenza. L'approccio proposto viene illustrato, per semplicità di impostazione e di analisi, con riferimento ad uno specifico caso di studio, costituito da una rete di irrigazione in pressione servita da un impianto di sollevamento. L'approccio proposto risulta, tuttavia, facilmente estendibile, seppure a prezzo di un maggiore onere computazionale, anche ai casi in cui il fenomeno di moto vario è indotto non più da una manovra "deterministica" (in quanto pre-determinabile) quale quella conseguente all'arresto del funzionamento delle pompe, ma da manovre a loro volta almeno

parzialmente aleatorie (quali chiusura/apertura degli idranti o di organi di regolazione delle portate e/o delle pressioni ubicate all'interno del sistema). Più in particolare, avvalendosi della tecnica Monte Carlo, vengono dapprima generati numerosi scenari di richiesta da parte dell'utenza, tra loro equiprobabili, ciascuno dei quali caratterizzato da un certo numero di idranti contemporaneamente aperti sul totale dei presenti e dalla loro posizione all'interno della rete. Dopodiché, a partire da queste condizioni di domanda, vengono individuate, tramite un idoneo modello numerico, le condizioni idrauliche che, in condizioni stazionarie, si stabiliscono in rete (espresse in termini di portata e velocità nei tratti, e di carico nei nodi). Ciascuna di queste differenti condizioni idrauliche stazionarie viene infine assunta quale condizione iniziale a partire dalla quale può svilupparsi il transitorio conseguente all'arresto improvviso dell'impianto di sollevamento.

2 GENERAZIONE DELLE DIVERSE CONDIZIONI DI DOMANDA

Allo scopo di valutare l'affidabilità del sistema di irrigazione in pressione nei riguardi dei fenomeni di colpo d'ariete, al variare delle condizioni di funzionamento dell'impianto che si hanno al momento del distacco improvviso delle pompe, è necessario disporre di un modello della struttura della domanda da parte dell'utenza. Il modello utilizzato, pur se semplificato (*Clement*, 1966) consente di portare in conto le modalità di erogazione unitamente alla domanda. Le ipotesi alla base sono:

- 1) che ognuno degli idranti utilizzati per l'irrigazione possa essere regolato esclusivamente sulle posizioni tutto-aperto e tutto-chiuso;
- 2) che la probabilità elementare di apertura, p , sia la medesima per tutti gli idranti;
- 3) che il numero M di idranti eroganti ad un dato istante sia una variabile aleatoria con distribuzione binomiale.

Nelle dette ipotesi, la probabilità che il numero M di idranti eroganti, su un totale di N_{idr} , sia minore o al più pari a m , è data dall'espressione:

$$\Pr[M \leq m] = F_M(m) = \sum_{j=0}^m \left[\binom{N_{idr}}{j} \cdot p^j \cdot s^{n-j} \right] \quad (1)$$

In particolare, allo scopo di generare N differenti scenari di domanda, si fa uso del metodo Monte Carlo. Per ognuno di tali scenari vengono generati $G = N_{idr} + 1$ valori della variabile aleatoria R distribuita in maniera uniforme nell'intervallo $[0,1]$: l'ultimo di essi (R_G) viene sostituito al posto del primo membro della equazione (1), la quale viene risolta, seppure in modo approssimato, rispetto a m , fornendo il numero di idranti eroganti per lo scenario di domanda in esame. I rimanenti numeri ($R_1, R_2, \dots, R_{N_{idr}}$) distribuiti in maniera uniforme nell'intervallo $[0,1]$ vengono assegnati, sempre con lo stesso principio, ai diversi idranti del sistema: più in particolare, vengono considerati aperti gli m idranti che esibiscono gli m maggiori R_i . In *Cozzolino et al.* (2005a) è delineata la procedura generale da seguire nel caso in cui la generazione degli scenari di domanda debba tenere esplicitamente conto dell'esistenza di idranti aventi caratteristiche distinte.

3 MODELLO DI ANALISI DELLE CONDIZIONI IDRAULICHE INIZIALI

Una volta noti il numero e la posizione degli idranti aperti per ognuno degli scenari presi in esame, si possono ricercare quali siano le corrispondenti condizioni di funzionamento del sistema in regime stazionario. Il modello di analisi delle condizioni idrauliche del sistema, data la domanda, viene descritto qui molto brevemente, rimandando, per maggiori chiarimenti, ad altri lavori precedentemente pubblicati (Cozzolino *et al.*, 2005b). In esso, i valori della quota piezometrica h agli S nodi vengono messi in relazione tra di loro e con la domanda ai nodi attraverso l'equazione di continuità.

Se la corrente muove dal nodo n verso il nodo j , le perdite di carico nel tratto compreso tra i nodi n e j possono essere espresse come

$$h_{n,j} = h_n - h_j = SF_{n,j} \cdot \beta_{n,j} \cdot \frac{Q_{n,j}^{\alpha_{n,j}}}{D_{n,j}^{\omega_{n,j}}} \cdot l_{n,j} = r_{n,j} \cdot Q_{n,j}^{\alpha_{n,j}} \quad (2)$$

Nell'equazione (2), D e l rappresentano il diametro e la lunghezza del tratto, rispettivamente; Q è la portata che scorre nel tratto; gli esponenti α e ω dipendono dal regime di moto; β è un coefficiente che, in generale, è funzione della portata, del diametro e della scabrezza delle pareti della condotta.; SF è un coefficiente di sicurezza, necessario per tenere conto dell'incertezza connessa con la valutazione dei parametri da cui dipendono le perdite di carico, h è la quota piezometrica. Del resto, la portata erogata dal generico nodo j può essere scritta come

$$Q_j = k_j \cdot \mu_j \cdot \sigma_j \cdot or_j \cdot \sqrt{2g \cdot (h_j - y_j)} = k_j \cdot \lambda_j \cdot (h_j - y_j)^{0.5} \quad (3)$$

nella quale il significato dei simboli è il seguente: k_j = coefficiente uguale a pari a 1 se l'idrante è aperto, altrimenti uguale a 0 se l'idrante è chiuso, o assente; μ_j = coefficiente di efflusso; σ_j = area della luce dell'idrante; or_j = grado di apertura dell'idrante, preso sempre pari a 1; g = accelerazione di gravità; y_j = quota del baricentro della luce dell'idrante, h_j = quota piezometrica al nodo j . Con riferimento al generico nodo j della rete, l'equazione di continuità può essere scritta nella forma

$$\sum_{n=1}^{N_{j1}} Q_{n,j} - \sum_{z=1}^{N_{j2}} Q_{j,z} - Q_j = 0 \quad (4)$$

ove N_{j1} e N_{j2} sono il numero di tratti rispettivamente in ingresso e in uscita dal nodo j ; Q_j è la portata distribuita al nodo j . Risolvendo la (2) rispetto a Q , e sostituendo nella (4), unitamente con la (3), si ottiene:

$$\sum_{n=1}^{N_{j1}} \left[\frac{|h_n - h_j|}{r_{n,j}} \right]^{\frac{1}{\alpha_{n,j}}} - \sum_{z=1}^{N_{j2}} \left[\frac{|h_j - h_z|}{r_{j,z}} \right]^{\frac{1}{\alpha_{j,z}}} - k_j \cdot \lambda_j \cdot (h_j - y_j)^{0.5} = 0 \quad (5)$$

Il sistema di equazioni non lineari (5) nelle incognite quote piezometriche h_j ai nodi può essere risolto con un approccio alla Newton-Raphson (Lam & Wolla, 1972).

4 MODELLO DI ANALISI DEI TRANSITORI

Il modello utilizzato per l'analisi dei transitori che si generano, dopo l'improvviso stacco delle pompe, a partire da un fissato scenario di condizioni iniziali individuato con i metodi citati nei paragrafi 2 e 3, è sostanzialmente basato su quello descritto da *Pianese & Masini* (1994), il quale fa uso del metodo algebrico (*Streeter*, 1967). Questo metodo risulta una variante, particolarmente efficace dal punto di vista numerico, del più ben noto ed utilizzato metodo delle caratteristiche. Più precisamente, nel metodo algebrico il tracciamento delle linee caratteristiche viene effettuato non più da una sezione della condotta ubicata ad una predefinita distanza dalla sezione di condotta presa in esame, ma direttamente a partire dai nodi ubicati sulle estremità opposte, rispetto al generico nodo k , di ciascuna delle condotte confluenti nello stesso nodo k .

Nella senz'altro accettabile ipotesi di incomprimibilità del fluido contenuto nel sistema di condotte in pressione, il sistema di equazioni differenziali descrivente la conservazione della massa e della quantità di moto dell'acqua è il seguente:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + S_f = 0 \\ \frac{c^2}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Nelle (6) il significato dei simboli è il seguente: x = distanza, presa lungo l'asse della condotta, misurata a partire dall'estremità di monte della stessa; t = tempo, valutato a partire dall'istante iniziale t_0 ; $H=H(x,t)$ = carico piezometrico rispetto ad un piano orizzontale di riferimento, espresso in metri di colonna liquida; $U=U(x,t)=Q(x,t)/A$ = velocità media di portata del fluido, con A = area della sezione trasversale della condotta; S_f = forza resistente, per unità di peso di fluido, esercitata dalle pareti della condotta sul fluido, c = velocità di propagazione dei piccoli disturbi del campo di moto. Mediante il metodo delle caratteristiche, il sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali (6) si traduce in un sistema di equazioni alle derivate totali, valide lungo opportune curve del piano Oxt dette curve caratteristiche. In particolare, se c è la velocità di propagazione rispetto al fluido ambiente dei disturbi generati nel sistema, le curve caratteristiche sono definite dalle equazioni differenziali

$$\begin{cases} C^+ : \frac{dx}{dt} = c \\ C^- : \frac{dx}{dt} = -c \end{cases} \quad (7)$$

Nelle (7), in considerazione dei ridotti numeri di Mach, è stata trascurata la velocità del fluido ambiente rispetto alla celerità di propagazione dei disturbi del campo di moto. I valori della celerità possono essere ottenuti facendo uso di formulazioni classiche che tengono conto di diametro, spessore, modulo di elasticità, condizioni di vincolo delle condotte e modulo di Poisson, nonché della comprimibilità e della densità del fluido (*Wylie et al.*, 1993). Al fine di procedere alla discretizzazione nel tempo e nello spazio

delle equazioni derivanti dall'applicazione del metodo delle caratteristiche, il generico tratto t di lunghezza L_t , e caratterizzato dalla celerità c_t , viene suddiviso in S_t intervalli in maniera tale che

$$\left[1 - \frac{L_t}{S_t \cdot c_t \cdot \Delta t} \right] \leq \delta \quad (8)$$

La (8), al variare dell'indice t del lato, impone il soddisfacimento della condizione di stabilità di Courant-Friedrichs-Levy: in essa, δ è un indice di tolleranza, molto piccolo, dell'ordine dell'1%, e Δt è l'intervallo temporale di calcolo.

Lungo le caratteristiche positive e negative, rispettivamente, il sistema delle (6) può dunque essere discretizzato come

$$\left\{ \begin{array}{l} C^+ : Q_{ki}(e, n) = Q_A(e, n - S_e) + \frac{gA_e}{c_e} [H_A(n - S_e) - R_e \cdot Q_A(e, n - S_e) \cdot |Q_A(e, n - S_e)|^{we-1}] - \frac{gA_e}{c_e} H_k(n) \\ C^- : Q_{ku}(u, n) = Q_A(u, n - S_u) - \frac{gA_u}{c_u} [H_B(n - S_u) + R_u \cdot Q_B(e, n - S_u) \cdot |Q_B(e, n - S_u)|^{wu-1}] + \frac{gA_u}{c_u} H_k(n) \end{array} \right. \quad (9)$$

Nelle equazioni (9), il simbolo n indica il generico livello temporale ($t_n = n \cdot \Delta t$); il pedice e caratterizza le grandezze relative alla generica condotta lungo la quale la portata defluente è in ingresso nel nodo k ; il pedice u caratterizza le grandezze relative alla generica condotta lungo la quale la portata defluente è in uscita dal nodo k ; i pedici A e B caratterizzano, rispettivamente, le grandezze valutate in corrispondenza dei nodi posti all'altro capo, rispetto al nodo k , delle condotte attraverso le quali le portate sono, rispettivamente, in ingresso o in uscita dal nodo; S_e e S_u sono il numero di intervalli spaziali nei quali le condotte in ingresso e uscita dal nodo k sono suddivise; R e w sono termini relativi alle resistenze al moto che si hanno lungo i tratti in ingresso e in uscita dal nodo k . Le equazioni (9), unitamente alle equazioni di continuità ai nodi, nonché insieme a opportune condizioni al contorno interne ed esterne, risolvono il problema della determinazione delle portate e delle quote piezometriche agli estremi dei tratti. Per maggiori approfondimenti, si rimanda a Pianese & Masini (1994).

5 DEFINIZIONE DEGLI INDICI DI AFFIDABILITÀ DEL SISTEMA

Al fine di quantificare la capacità della rete di irrigazione di rispondere alle sollecitazioni applicate (in questo caso, le cospicue sovrappressioni conseguenti a rapidi transitori), è necessario introdurre opportuni *Indici di Affidabilità*, adimensionali, di chiaro significato fisico, i quali, in dipendenza della maniera con cui sono definiti, sono in grado di descrivere aspetti diversi del comportamento del sistema. Di seguito, sono

definiti alcuni *Indici di Affidabilità locali*, e per ognuno di essi viene fatta una breve discussione.

Con lo scopo di valutare l'affidabilità del sistema nei confronti delle sovrappressioni positive, è possibile definire agli estremi dei tratti della rete di irrigazione, e con riferimento ad ognuna alle distinte condizioni iniziali da cui il transitorio ha origine, gli Indici di Affidabilità IA_{np} , IA_{cl} , IA_{sn} (rispettivamente: *Indice di Affidabilità nei confronti delle massime sovrappressioni consentite dalle normative in vigore*, *Indice di Affidabilità nei confronti delle massime pressioni con riferimento alla classe di pressione del tubo*, *Indice di Affidabilità nei confronti delle massime pressioni con riferimento allo snervamento*).

Fissato l' i -esimo nodo della rete, e la j -esima condizione stazionaria iniziale, si definisce l'indice:

$$IA_{np}(i, j) = \begin{cases} p_{np}(i, j) < p_{\max}(i, j) \rightarrow 0 \\ p_{np}(i, j) \geq p_{\max}(i, j) \geq p_{in}(i, j) \rightarrow 1 - \frac{p_{\max}(i, j) - p_{in}(i, j)}{\Delta p_{sp}(i)} \end{cases} \quad (10)$$

Nella formula (10), il significato dei simboli è il seguente: $p_{in}(i, j)$ è la pressione relativa, valutata rispetto all'asse del tubo, in corrispondenza della j -esima condizione stazionaria iniziale, e del nodo i -esimo; $p_{\max}(i, j)$ la massima pressione che si consegue, nel nodo i -esimo, a seguito del transitorio generato dal distacco delle pompe, data la condizione iniziale j -esima; $\Delta p_{sp}(i)$ è la massima sovrappressione ammissibile da normativa, relativamente alle condotte confluenti nel nodo i -esimo (nel caso in esame, si sono adottati i valori indicati nella Tabella III allegata al *Decreto Ministero LL.PP. del 12 dicembre 1985*).

Fissato l' i -esimo nodo della rete, e la j -esima condizione stazionaria iniziale, si definisce, inoltre, nel tratto s -esimo che ha origine dal nodo i -esimo, l'indice:

$$IA_{cl}(i, j, s) = \begin{cases} PN(s) < p_{\max}(i, j) \rightarrow 0 \\ PN(s) \geq p_{\max}(i, j) \geq 0 \rightarrow 1 - \frac{p_{\max}(i, j)}{PN(s)} \end{cases} \quad (11)$$

Nella formula (11), $PN(s)$ è la classe di pressione nominale del tubo costituente l' s -esimo tratto della rete. Dalla definizione è chiaro come questo indice di affidabilità permetta di quantificare l'aliquota di resistenza del tubo mobilitata, nel campo di elasticità del tubo, dalla pressione massima introdotta dal transitorio, indipendentemente dall'effettivo rispetto dei limiti di sovrappressione imposti dalla normativa.

Sempre con riferimento all' i -esimo nodo della rete, e alla j -esima condizione stazionaria iniziale, si definisce, infine, nel tratto s -esimo che ha origine dal nodo i -esimo, l'indice:

$$IA_{sn}(i, j, s) = \begin{cases} p_{sn}(s) < p_{\max}(i, j) \rightarrow 0 \\ p_{sn}(s) \geq p_{\max}(i, j) \geq 0 \rightarrow 1 - \frac{p_{\max}(i, j)}{p_{sn}(s)} \end{cases} \quad (12)$$

Nella formula (12), $p_{sn}(s)$ è la pressione, valutata rispetto all'asse del tubo, in corrispondenza della quale il materiale costituente il tubo comincia a presentare fenomeni di snervamento. Viene, in tal modo, valutata l'aliquota di resistenza del tubo mobilitata dalla pressione massima introdotta dal transitorio, fino al limite oltre il quale il materiale presenta deformazioni plastiche non più recuperabili.

Ugualmente, al fine di valutare l'affidabilità del sistema nei confronti delle sovrappressioni negative, è possibile definire nei nodi della rete di irrigazione, e con riferimento ad ognuna alle distinte condizioni iniziali da cui il transitorio ha origine, gli Indici di Affidabilità IA_{nn} , IA_o (rispettivamente: *Indice di Affidabilità nei confronti delle pressioni minime*, generate durante un transitorio, con riferimento alla normativa; Indice di Affidabilità con riferimento alle pressioni relative negative).

Fissato l' i -esimo nodo della rete, e la j -esima condizione stazionaria iniziale, si definisce l'indice:

$$IA_{nn}(i, j) = \begin{cases} p_{\min}(i, j) < p_{in}(i, j) \rightarrow 0 \\ p_{in}(i) \geq p_{\min}(i, j) \geq p_{nn}(i, j) \rightarrow 1 - \frac{p_{in}(i, j) - p_{\min}(i, j)}{\Delta p_{dp}(i)} \end{cases} \quad (13)$$

Nella formula (13) il significato dei simboli è il seguente: $p_{in}(i, j)$ è la pressione, valutata rispetto all'asse del tubo, in corrispondenza della j -esima condizione stazionaria iniziale, e del nodo i -esimo; $p_{\min}(i, j)$ la minima pressione che nel nodo i -esimo si consegue a seguito del transitorio generato dal distacco delle pompe, data la condizione iniziale j -esima; $\Delta p_{dp}(i)$ è la massima depressione ammissibile, in corrispondenza del nodo i -esimo, in base alla normativa in vigore (cfr. la Tabella III allegata al *Decreto Ministero LL.PP., 12 dicembre 1985*).,

Sempre con riferimento all' i -esimo nodo della rete, e alla j -esima condizione stazionaria iniziale, si può definire, infine, l'indice:

$$IA_o(i, j) = \begin{cases} p_{\min}(i, j) < -\gamma z^* \rightarrow 0 \\ p_{in}(i, j) \geq p_{\min}(i, j) > -\gamma z^* \rightarrow \frac{p_{\min}(i, j)}{p_{in}(i, j)} \end{cases} \quad (14)$$

con il quale viene valutata l'affidabilità del sistema nei confronti del taglio della condotta da parte della linea piezometrica. In particolare, z^* è un valore limite dell'affondamento della piezometrica rispetto all'asse del tubo che, nei calcoli, è stato convenzionalmente fatto corrispondere a 10 m: al raggiungimento di tale valore, si ha una condizione di arresto del programma di calcolo degli effetti del transitorio, a causa del fatto che le Equazioni (6) non sono più valide.

6 APPLICAZIONE DELLA PROCEDURA PROPOSTA AD UNO SPECIFICO CASO-STUDIO

L'approccio proposto è stato applicato a un caso di studio schematico, ancorché realistico, il cui layout è presentato nella Figura 1. In particolare, dalla figura si osserva come le quote del terreno crescano all'allontanarsi dall'impianto di sollevamento.

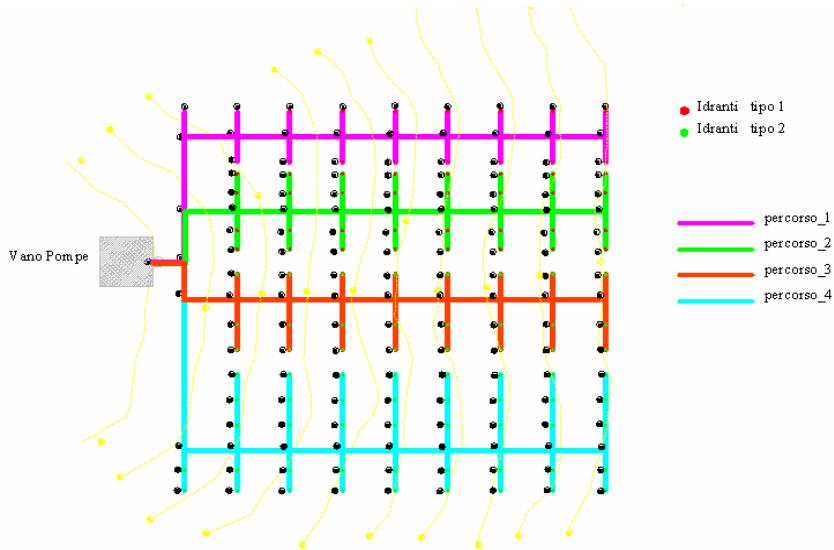


Figura 1. Caso di studio: layout.

La rete di irrigazione ipotizzata a servizio dell'area è caratterizzata da 4 rami principali, 152 tratti, 153 nodi (115 dei quali ospitano un idrante), ed è servita da un impianto di sollevamento la cui curva caratteristica è riportata nella successiva Figura 2.

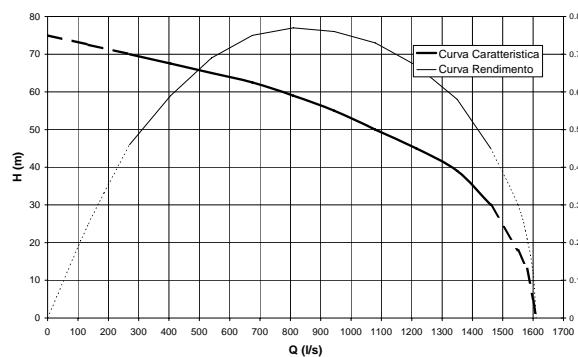


Figura 2. Caso di studio: Curva caratteristica e Curva dei Rendimenti.

Per le condotte, sono stati presi in considerazione due differenti materiali: rispettivamente, il PVC, classe PN 10, per i diametri fino a 350 mm, e l'acciaio per i diametri maggiori. Inoltre, per la distribuzione delle portate irrigue sono stati utilizzati

due differenti tipi di idranti: il primo tipo (49 idranti su 115) è in grado di erogare una portata di 10 l/s sotto un carico di 60 m, mentre il secondo tipo eroga, in corrispondenza dello stesso carico, 20 l/s. Posta $p=1/3$ la probabilità elementare di funzionamento dei singoli idranti, per il progetto della rete, seguendo l'approccio indicato nel paragrafo 2, si è fatto riferimento, alla probabilità di non superamento del 95%, la quale corrisponde a una portata di 724 l/s complessivamente erogata dal sistema. Al fine di attenuare gli effetti del colpo d'ariete, immediatamente a valle della stazione di sollevamento è stato disposto un sistema di casse d'aria, il cui volume ammonta a un totale di 100 m³.

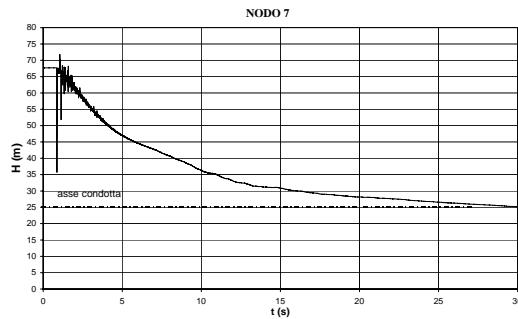


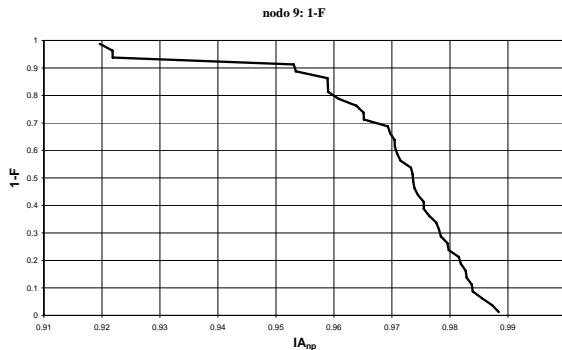
Figura 3. Nodo 7: Esempio di andamento delle pressioni in corrispondenza del transitorio conseguente al brusco distacco dell'impianto di sollevamento.

In Figura 3 viene mostrato l'andamento della quota piezometrica al nodo 7, generato dal transitorio conseguente al distacco delle pompe. Come si può osservare, e congruentemente a quanto atteso, il brusco arresto dell'impianto di sollevamento genera una depressione che si propaga nel sistema, e che dà luogo a complessi di fenomeni di oscillazione della pressione, attenuati, però, dalla presenza delle casse d'aria.

Con lo scopo di applicare la procedura delineata, sono stati definiti $N=100$ scenari di domanda da parte dell'utenza irrigua, essendo ogni scenario caratterizzato dal numero e dalla posizione degli idranti aperti; per ognuno di tali scenari, facendo uso del modello descritto nel paragrafo 3, è stato risolto il problema di caratterizzare le portate nei tratti e le quote piezometriche nei nodi in condizioni di moto permanente. Le caratteristiche idrauliche così calcolate sono state prese ognuna a riferimento come condizione iniziale per un distinto caso di transitorio dovuto al distacco delle pompe: la valutazione delle caratteristiche idrauliche durante tali transitori è stata effettuata facendo uso del modello descritto nel paragrafo 4. Infine, per ognuno degli M nodi, e per ognuno degli N transitori, è stato valutato, a titolo esemplificativo, l'Indice di Affidabilità nei confronti delle massime pressioni con riferimento alla normativa, IA_{np} : questo ha permesso di effettuare alcune elaborazioni statistiche preliminari. In particolare, per il nodo i -esimo, si è proceduto ordinando in senso crescente i valori di IA_{np} che si verificano nei diversi scenari, e approssimando la Funzione di Distribuzione Cumulata con la formula

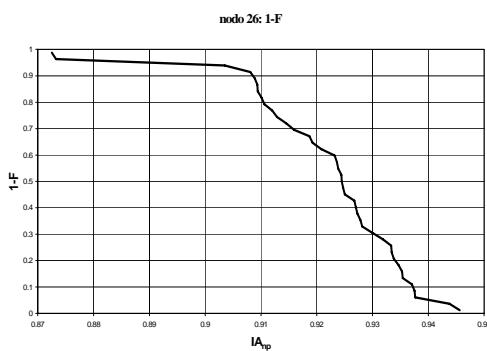
$$F(j) \approx \frac{j - 0.5}{N} \quad (15)$$

Gli indici $j=1$ e $j=N$ corrispondono, rispettivamente, al minimo e al massimo valore di IA_{np} nel nodo i -esimo. Risulta così possibile valutare la funzione di affidabilità, $1-F$.

**Figura 4.** Nodo 9: Funzione di affidabilità.

In Figura 4 è possibile osservare l'andamento dell'indice di affidabilità IA_{np} in corrispondenza del nodo 9, appartenente al primo ramo della rete (Figura 1). E' possibile evidenziare come, in corrispondenza di tale nodo, la probabilità di superamento di un indice di affidabilità pari a 0.95 sia piuttosto bassa, e inferiore al 10%, pur avendo fatto uso di sistemi di attenuazione di fenomeni di moto vario quali casse d'aria di non modesto volume.

In Figura 5 è possibile osservare l'andamento dell'indice di affidabilità IA_{np} in corrispondenza del nodo 26, anch'esso appartenente al primo ramo della rete. Significativamente, gli indici di affidabilità per tale nodo, che si trova a valle del nodo 9, sono più bassi: ciò è atteso, in quanto nello spostarsi dall'impianto di sollevamento verso le estremità dei rami principali la quota del terreno aumenta.

**Figura 5.** Nodo 26: Funzione di affidabilità.

7 CONCLUSIONI

In questa memoria è stata presentata una metodologia generale per l'analisi dell'affidabilità meccanica di sistemi di irrigazione in pressione. La metodologia consiste dei seguenti passi:

- 1) definizione di opportuni indici di performance, adimensionali, di chiaro

- significato fisico, eventualmente basati anche su parametri riportati nelle norme;
- 2) generazione di molteplici scenari di domanda da parte dell'utenza irrigua, ognuno caratterizzato dal numero e dalla posizione degli idranti aperti;
 - 3) ricerca delle condizioni idrauliche che, in situazione di moto permanente, vanno a determinarsi in corrispondenza di ognuno degli scenari di domanda generati;
 - 4) soluzione del moto vario che, per ogni scenario di domanda, si determina a causa della prestabilità perturbazione della condizione al contorno (ad esempio: stacco improvviso delle pompe);
 - 5) calcolo, per ciascuno scenario, degli indici di prestazione relativi ai vari nodi;
 - 6) valutazione delle Funzioni di Affidabilità relative a tali indici;
 - 7) Stima dell'Affidabilità locale come probabilità di superamento di un preassegnato valore dello specifico indice preso a riferimento

La metodologia è stata successivamente applicata, a scopo illustrativo, a un sistema di irrigazione in pressione schematico ma realistico. I risultati ottenuti mostrano che la metodologia consente di caratterizzare in maniera non gravosa, ancorché sufficientemente completa, un sistema come quello proposto anche quando soggetto a fenomeni complessi quali i quelli di colpo d'ariete.

I risultati preliminari della ricerca, lungi dall'essere definitivi, sembrano mostrare che i sistemi di irrigazione in pressione, di forma complessa, siano fortemente sensibili ai fenomeni di transitorio, in quanto la struttura della rete può, a causa dei fenomeni di riflessione, senz'altro ingigantire gli effetti dei fenomeni di moto vario. Sono da ritenere peraltro opportuni ulteriori approfondimenti, volti a soprattutto a valutare la dipendenza della stima dell'affidabilità del sistema dalle effettive condizioni iniziali.

BIBLIOGRAFIA

- Clement, R. Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant à la demande, *La Houille Blanche*, 1966, 5, 553-575.
- Cozzolino, L., Covelli, C., Mucherino, C. & Pianese, D. Hydraulic reliability of pressurized water distribution networks for on-demand irrigation, *CCWI 2005, Water Management for the 21st century*, ed. D. Savic, G. Walters, S.T. Khu & R. King, Centre for Water Systems, University of Exeter, Exeter, UK, 2005a, vol. 1, 91-97.
- Cozzolino, L., Pianese, D. & Pirozzi, F. DBPs control in water distribution systems through optimal chlorine dosage and disinfection stations allocation, *Desalination*, 2005b, 176, 113-125
- Decreto Ministero LL.PP., 12 dicembre 1985, Norme tecniche relative alle tubazioni, (GU 14 marzo 1986, n.61)
- Gargano R. & Pianese D. Reliability as a tool for hydraulic networks planning, *ASCE J. Hyd. Engrg.*, 2000, 126(5), 354-364.
- Lam, C.F. & Wolla, M.L. Computer Analysis of Water Distribution Systems. Part. II – Numerical Solution, *ASCE J. Hyd. Div.*, 1972, 98, 447-460
- Lamaddalena, N. & Sagardoy, J.A. Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems, *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 59, 2000
- Pianese, D. & Masini, P. Sui transitori che si sviluppano nelle reti idrauliche in pressione munite di luci di efflusso regolabili e di dispositivi di attenuazione dei fenomeni di moto vario, 1994, *Atti del Seminario Moto Vario nei Sistemi Acquedottistici*. Bari, 159-183.
- Streeter, V.L. Water-Hammer Analysis of Distribution Systems, *ASCE J. of Hyd. Div.*, 1967, 93(HY5), 185-201.
- Wylie, E.B., Streeter, V. L. & Suo L. Fluid Transients in Systems. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ. USA, 1993.