

ANALISI DELLA PROPAGAZIONE DELLE PULSAZIONI ACUSTICHE INTERNE AD UN IMPIANTO A FLUIDO MEDIANTE TECNICHE DI SIMULAZIONE AVANZATE

Ing. Attilio Brighenti

Ingegneria dei Sistemi e Studio di Tecnologie Avanzate - Venezia

1. SOMMARIO

Gli impianti di compressione e pompaggio di fluidi, soprattutto con macchine alternative, e il progetto e l'ottimizzazione dei condotti di aspirazione e scarico di motori alternativi o di camere di combustione di turbine a gas richiedono lo studio della propagazione e la prevenzione dell'esaltazione delle pulsazioni di pressione insite nel loro funzionamento.

ACUSYS è un software applicativo, per **MATLAB/SIMULINK**[®], realizzato a questo scopo, che simula la risposta dinamica stazionaria e transitoria del mezzo fluido contenuto in un impianto, sollecitato da pressioni o portate variabili applicate in punti discreti.

ACUSYS opera secondo un modello del mezzo fluido confinato in tubazioni e recipienti rigidi strutturalmente, con relativi accessori di linea, secondo schemi di configurazione e parametri di dimensionamento definiti rispettivamente in una libreria espansibile e in file di input. Il modello matematico si basa inoltre sull'ipotesi di campo di propagazione monodimensionale e lineare, normalmente valido nelle applicazioni citate, con eventuale correzione della velocità del suono per tenere conto della flessibilità delle pareti.

2. INTRODUZIONE

Durante la progettazione di un impianto a fluido o in occasione di modifiche ad impianti esistenti va valutata la possibilità che insorgano pericolose o rumorose vibrazioni delle tubature e dei componenti dell'impianto, oppure scadimenti delle prestazioni delle macchine motrici o operatrici, per interazioni dinamiche con i condotti, sia transitorie che stazionarie. Le vibrazioni possono essere eccitate non solo da elementi rotanti non equilibrati, ma da eventuali risonanze tra le pulsazioni di pressione o portata generate nel fluido dalle macchine connesse all'impianto (pompe, compressori, motori termici) e la struttura costituita dall'impianto stesso, ovvero l'insieme di tubazioni, contenitori, supporti.

Il campo applicativo tipico di questa analisi è quello degli impianti di compressione e pompaggio di gas e liquidi, soprattutto ma non solo con macchine alternative, o fluidi multifase pseudo-omogenei.

Il problema delle vibrazioni degli impianti è sentito soprattutto dall'industria petrolifera, nella produzione di olio e gas, nella compressione del gas, nelle raffinerie, dove macchine alternative e centrifughe sono largamente impiegate.

Di tale esigenza vi è evidente riflesso nelle norme API¹ 618, che prevedono esplicitamente di verificare che le pulsazioni di pressione generate nell'impianto dalle macchine operatrici non superino valori di ca. il 3% della pressione nominale². Per tale verifica sono anche previsti tre livelli di approfondimento, uno più semplice, basato su calcoli limitati ad una zona specifica dell'impianto e due, raccomandati per gli impianti più complessi, che consistono nella simulazione dinamica dell'impianto, quale mezzo continuo, a rete di elementi monodimensionali, di propagazione delle onde acustiche.

Anche altri settori sembrano sensibili a questo problema, come quello degli impianti termici a vapore, dove eventuali elevate vibrazioni indotte da pompe centrifughe di alimentazione delle caldaie possono avere conseguenze rilevanti sulla sicurezza o affidabilità degli impianti. Il controllo del rumore interno al condotto dei fumi delle turbine a gas di impianti a ciclo combinato e negli impianti di refrigerazione è anch'esso argomento di attualità, essendo a sua volta sorgente di rumore esterno. Per le prime poi vi è anche l'esigenza di studiare e controllare i fenomeni di instabilità dinamica dovuti all'interazione tra campo acustico e combustione.

In questa memoria si illustrano le possibilità di analisi dei fenomeni su accennati con uno strumento di calcolo avanzato, facilmente utilizzabile anche da tecnici senza esperienza di programmazione: **ACUSYS**.

Il modello propagatorio alla base di **ACUSYS** può essere utilizzato sia per l'analisi della risposta stazionaria di un sistema (versione base), sia per la sua risposta ai transitori (versione estesa).

Esso utilizza come piattaforma software l'ambiente MATLAB/SIMULINK[®] e come hardware ogni piattaforma con cui questi ultimi siano compatibili, ossia PC, MacIntosh, workstation UNIX.

ACUSYS è già stato fornito in licenza d'uso all'ENEL-Centro Ricerca di Automatica e alla SIAD Macchine Impianti SpA ed è pubblicato tra i prodotti forniti da terzi nella guida MATLAB - CONNECTIONS della The Mathworks Inc., produttore di MATLAB-SIMULINK³ (<http://www.mathworks.com/connections/>).

3. DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

Un esempio elementare che spiega il problema risolvibile con **ACUSYS** è illustrato in fig. 1. Un compressore alternativo, monocilindrico nell'esempio, è collegato ad un serbatoio accumulatore attraverso una tubazione.

Il compressore, come noto, eroga alla mandata una portata variabile ciclicamente ed avente una componente armonica fondamentale di frequenza pari al numero di cicli di compressione nell'unità di tempo. Se il compressore è a semplice effetto, tale frequenza coincide con il numero di giri al secondo. In realtà l'andamento della portata generata dal compressore all'imbocco della tubazione e la conseguente pressione che si genera per reazione in tale sezione ha un andamento temporale non puramente sinusoidale, ma ugualmente descrivibile come somma di più segnali sinusoidali, aventi frequenze multiple di quella fondamentale.

La variazione di pressione, ovvero il segnale di ingresso, si propaga nel condotto secondo un campo di onde piane con armoniche aventi lunghezze d'onda inversamente proporzionali alle rispettive frequenze del segnale di ingresso⁴.

¹ American Petroleum Institute.

² La soglia accettabile non è in realtà fissa ma dipende dalle caratteristiche dell'impianto.

³ MATLAB, SIMULINK, MS-Excel, MacIntosh sono marchi registrati di proprietà dei relativi produttori.

⁴ La condizione di mezzo non dispersivo è normalmente verificata in queste applicazioni.

Se si verifica che, ad esempio a certe velocità del compressore, la lunghezza della tubazione sia pari ad un multiplo dispari di un quarto di lunghezza d'onda, l'estremità sinistra si trova con il fluido soggetto alla massima oscillazione di pressione mentre l'altra estremità è a pressione pressoché costante, in quanto collegata ad un serbatoio di grande volume. In tali condizioni si verifica allora una forza netta assiale pulsante, esercitata sulla parete di confinamento del gas, ovvero sulle curve di raccordo collegate al tubo dal lato del compressore che determinerà una vibrazione del tubo e dei componenti ad esso collegati, con eventualità di risonanza strutturale qualora non siano previsti adeguati vincoli. Oltre a queste azioni vanno poi considerate quelle dovute alla variazione pulsante di quantità di moto nelle curve o derivazioni dei condotti.

Questo esempio è particolarmente semplice da analizzare, mancando tubazioni in derivazione, o ad anelli chiusi, accessori di linea, come valvole, diaframmi, filtri, etc. che possono alterare e rendere più complesso il campo acustico all'interno dell'impianto (Fig. 2). In determinati casi è necessario provvedere alla installazione in adeguate posizioni di filtri acustici ("silenziatori" o "mufflers") costituiti da accumulatori di opportune dimensioni, con setti interni che creino percorsi atti ad abbattere l'ampiezza della pressione pulsante trasmessa a valle, lungo l'impianto, e le forze conseguenti, soprattutto delle armoniche con frequenze prossime a quelle proprie strutturali, che provocano l'irradiazione di rumore nell'ambiente.

Con **ACUSYS** si è mirato a permettere l'analisi anche di questi importanti casi più complessi, non sempre alla portata di accorgimenti intuitivi.

4. MODELLO MATEMATICO

Il modello matematico di un impianto, realizzato in **ACUSYS** con MATLAB e SIMULINK, è sostanzialmente un modello ad elementi finiti del campo monodimensionale di propagazione. Questa ipotesi di propagazione ad onde piane è valida quando la lunghezza d'onda sia sufficientemente maggiore del diametro del tubo o della dimensione caratteristica ortogonale alla direzione di propagazione, ovvero, in formula approssimata, quando:

$$(1) \quad f_{\max} \leq f_{\lim} \cong 0.6 \frac{c}{D}$$

dove f_{\max} è la frequenza della più alta componente armonica di interesse del segnale, c la velocità del suono locale nel mezzo e D la dimensione massima del condotto ortogonalmente alla direzione di propagazione. Questa è una condizione normalmente verificata negli impianti di compressione e negli impianti oleodinamici, per le armoniche che creano problemi di vibrazione strutturale.

Oltre all'ipotesi di propagazione a fronti d'onda piani la versione base di **ACUSYS** opera nell'ipotesi di relazione lineare tra le ampiezze delle variazioni di pressione e di velocità locali del fluido, valida quando quest'ultima e la velocità media del fluido siano abbastanza piccole rispetto alla velocità del suono. A questa condizione è valida l'analogia elettro-acustica, riconducibile alle seguenti equazioni di continuità e della quantità di moto applicate ad un tubo elementare di sezione costante tra le sezioni 1 di ingresso e 2 di uscita (Fig. 3).

Eq. di Continuità:

Eq. di Conserv. Quantità di moto:

$$\begin{aligned}
 (2) \quad R\dot{m}_1 + L \frac{d\dot{m}_1}{dt} &= p_1 - p_2 & C \frac{dp_2}{dt} &= \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \\
 L &= \frac{\Delta x}{A} \quad R = \lambda \frac{\Delta x}{D} \frac{\dot{m}_0}{\rho_0 A^2} & C &= \frac{A \Delta x}{c^2}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Nelle equazioni 2 e 3 sono utilizzate le seguenti notazioni:

R, L, C	resistenza, induttanza e capacità equivalenti dell'elemento
\dot{m}, p	portata e pressione del fluido nelle sezioni 1 e 2
t	tempo
A	area della sezione trasversale del tubo
Δx	lunghezza dell'elemento di tubo
c	velocità del suono nel fluido contenuto nel tubo nell'elemento
λ	coefficiente di perdita per unità di lunghezza per attrito viscoso
D	diametro del tubo
ρ	densità del fluido
θ	pedice che indica il valore medio

Si può dimostrare che per una singola componente sinusoidale questa ipotesi lineare è valida quando il rapporto α_{max} definito dalla seguente equazione è sufficientemente piccolo.

$$4) \quad |\alpha|_{max} = \frac{\left| u \frac{\partial u}{\partial x} \right|}{\left| \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{max}} = \frac{1}{\gamma} \frac{\bar{p}}{p_0} = \frac{\bar{u}}{c}$$

u	velocità del fluido
x	posizione lungo l'asse di propagazione (tubo)
γ	rapporto dei calori specifici a p e v costante del fluido
$\bar{\quad}$	apice che indica l'ampiezza di variazione
θ	pedice che indica il valore medio

In pratica per gli impianti di compressione di gas, affinché le norme API 618 siano soddisfatte in base al criterio su accennato, tale condizione viene verificata necessariamente, con $\alpha_{max} \cong 0.03/\gamma$.

Il modello matematico così sommariamente descritto è realizzato combinando opportunamente le potenzialità di SIMULINK, quale strumento flessibile per la definizione di architetture di impianti mediante blocchi funzionali grafici, con quelle di MATLAB, quale linguaggio matematico particolarmente versatile ed efficiente nell'analisi matriciale, per la generazione delle matrici di stato dei macro-elementi della libreria dei componenti, come tubi, capacità, etc. (Fig. 4).

Il macro-componente base di **ACUSYS**, il **tubo**, viene descritto in SIMULINK come un blocco di equazioni di stato che sintetizza le caratteristiche di tutti gli elementi discreti che lo compongono. La funzione che lega input e output di ogni blocco tubo viene ricavata preliminarmente da

MATLAB, che discretizza tale tubo in un numero di elementi finiti di uguale lunghezza, sufficienti per una corretta descrizione della caratteristica dinamica del sistema. Nel caso di analisi lineare MATLAB ricava le matrici di stato (A,B,C,D) di ogni tubo e degli altri macro-componenti facenti parte della configurazione di impianto⁵ (Fig. 5).

Queste matrici sono di dimensioni sufficientemente grandi da poter descrivere tutti i modi di ogni tubo significativi per l'analisi globale, fino alla frequenza massima di interesse per l'analisi che viene assegnata in input⁶, ma permettono di limitare le variabili di stato esplicitate alle sole pressioni e portate all'ingresso ed all'uscita del tubo. Le matrici di stato sono poi utilizzate nei blocchi **state-space** che compaiono nell'**S-file** generato da SIMULINK (Fig. 6), per calcolare le matrici di stato dell'intero sistema e le funzioni di trasferimento globali della configurazione di impianto.

In questo modo si svincola la discretizzazione dell'impianto dallo schema SIMULINK, che rimane inalterato qualunque sia il grado di discretizzazione dei macro-componenti, che può invece essere variato da caso a caso.

In SIMULINK viceversa si possono generare, partendo da una configurazione già definita o, più in generale, dalla libreria di componenti base (tubi, valvole, collettori, capacità, etc.) varianti e nuovi schemi di impianto, avendo la sola accortezza di collegare correttamente le porte di ingresso e uscita dei vari blocchi, che rappresentano le variabili di stato.

5. CONFIGURAZIONI TIPICHE DI IMPIANTO ED IMPIEGO DI **ACUSYS**

In Fig. 2 sono rappresentati due esempi di configurazione di impianto, di differente livello di complessità, che vengono forniti come libreria di sistemi. Con opportuna assegnazione dei dati di input i componenti presenti nella configurazione possono essere resi inefficaci (ad es. i filtri o gli scambiatori), consentendo perciò l'analisi di una ben più ampia gamma di varianti d'impianto. Ogni sezione numerata corrisponde ad un punto per il quale vengono calcolate le funzioni di trasferimento e le risposte. Tali sezioni, in funzione delle lunghezze assegnate agli elementi tubo che le interconnettono, possono rappresentare un punto qualsiasi del ramo di impianto a cui appartengono. Se ad esempio si vorrà determinare la posizione ottimale di un diaframma o di un filtro capacitivo in un ramo di impianto, si potranno effettuare calcoli successivi, assegnando ai tubi T_i lunghezze diverse e complementari a due a due.

L'impiego di **ACUSYS** è semplice, anche per utenti non ancora addestrati all'impiego di MATLAB-SIMULINK, in quanto nessuna delle istruzioni e degli schemi gestiti dai due ambienti viene portato ad interagire con l'operatore, salvo che questi non lo comandi espressamente. L'operatore interagisce con l'ambiente MATLAB solo all'avvio di **ACUSYS** dalla finestra di comando di MATLAB con il semplice comando:

```
acusys <invio>
```

Successivamente tutte le operazioni vengono gestite da finestre grafiche, realizzate con le utilities "Graphic User Interface" di MATLAB (Figg. da 7 a 12). Esse permettono anche la

⁵ Anche i componenti capacitivi, con due o più connessioni (quali filtri reattivi e collettori) sono descritti con combinazioni opportune di componenti tubo in serie/parallelo che permettono di considerare anche ritardi e amplificazione/smorzamento di propagazione all'interno di tali componenti.

⁶ **ACUSYS** utilizza automaticamente una funzione di impostazione della massima lunghezza di elemento finito ottenuto in modo che l'errore sul calcolo dell'autovalore più prossimo alla massima frequenza di interesse non ecceda una soglia assegnata (2,5,10%).

visualizzazione dei risultati in forma grafica (con assegnazione delle scale manuale o automatica, zoom) o tabulare.

Infine tutti i risultati possono essere stampati o salvati su file in formato testo per essere esportati e utilizzati in altri ambienti, ad esempio MS-Excel, Lotus, SAP etc., per presentazioni personalizzate o successive rielaborazioni, ad esempio analisi dinamiche strutturali.

Le figure fin qui citate ad esempio, relative alla versione base di **ACUSYS**, mostrano la procedura di analisi dinamica in condizioni stazionarie.

L'impiego di **ACUSYS** non si limita a queste. Infatti il modello SIMULINK di ogni configurazione è accessibile dall'utente che può utilizzare tutte le caratteristiche e funzionalità di tale ambiente per eseguire analisi in transitorio dell'impianto.

Un'interessante applicazione di **ACUSYS** condotta dall'autore [4] in fase di prequalifica da parte dell'ENEL-CRA, riguarda la simulazione dei tubi di combustione (Fig. 13).

È noto [6, 8] che questi sistemi sono soggetti in determinate condizioni a fenomeni di instabilità dinamica della combustione, associati a elevati livelli di rumore. Questo fenomeno è analizzabile teoricamente solo in condizioni geometriche semplici e assumendo la velocità del suono identica a monte e a valle della zona di combustione, perciò lontano da casi di pratico interesse. Si è dimostrato, sia analiticamente [8], sia numericamente con **ACUSYS** [4], che tali instabilità compaiono quando il rapporto tra la costante di ritardo della combustione (τ)⁷ e il periodo naturale di uno o più modi acustici del condotto, o sistema di condotti a cui la zona di combustione è contigua, cada entro determinati campi di valori (Figg. 14, 15) e che l'instabilità è caratteristica dei modi che soddisfano tale condizione.

Con le tecniche numeriche, in particolare con **ACUSYS**, opportunamente esteso mediante un blocco non lineare che descriva la zona e la relazione di portata/pressione nella sezione ideale di combustione, è possibile studiare l'influenza della caratteristica acustica globale di un impianto anche complesso, con velocità del suono variabile lungo il percorso del gas.

Questo tipo di analisi consente allora:

- di prevenire l'insorgere di instabilità di combustione in impianti e percorsi complessi;
- di verificare la possibilità di aumentare il carico termico dei combustori, spesso sottoutilizzati proprio per evitare tale instabilità;
- di progettare, verificandoli con simulazioni matematiche, sistemi di controllo attivo delle pulsazioni di pressione nei combustori che, oltre a limitarle contenendo il rumore ad esse associato, le possano mantenere utilmente in campi accettabili, a beneficio dell'efficienza di combustione⁸.

6. CONCLUSIONI

La sempre più sentita esigenza di migliorare l'affidabilità degli impianti a fluido (sia liquido che gassoso) e di ridurre il rumore ambientale richiede una maggiore conoscenza e comprensione della dinamica associata a vibrazioni meccanico-strutturali e a pulsazioni di pressione (queste

⁷ Ci si riferisce al cosiddetto modello κ - τ [8], in cui, con riferimento a Fig. 13:

$$p_1(t) = p_2(t) = p_{1,2}$$

$$\dot{m}_2(t) = \dot{m}_1(t) + \kappa \dot{m}_1(t - \tau)$$

dove $0 < \kappa < 1$ (tipicamente $\kappa \approx 0.2 - 0.3$) e $\tau \approx 10 - 100$ ms

⁸ È noto che la combustione "pulsata" presenta un'efficienza maggiore di quella a pressione costante [8].

ultime spesso origine delle prime) generantisi all'interno dell'impianto, insite nel funzionamento delle macchine e dei componenti che ne fanno parte.

Sono oggi disponibili strumenti di calcolo alla portata delle potenzialità di calcolo di PC, di facile utilizzazione e costo contenuto che possono mettere in luce problemi di installazione e utilizzazione dovuti a questi fenomeni di rimedio ben più oneroso, se affrontati a posteriori.

ACUSYS è il primo strumento di questo tipo disponibile commercialmente, a quanto risulta, in Europa.

7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- (1) Beranek L.L., Vèr I.L., *Noise and Vibration Control Engineering - Principles and Applications*, J. Wiley & Sons, Inc., 1992
- (2) Brighenti A., *ACUSYS - Applicazione di MATLAB-SIMULINK™ per la simulazione delle pulsazioni acustiche negli impianti* 23° Congresso dell'Associazione Italiana di Acustica, Bologna, 12-14 Set 1995
- (3) Brighenti A., *COMPSYS - Simulatore di impianti di compressione*, 1a Conferenza Italiana Utenti MATLAB, Bologna, 6-7 Nov. 1995
- (4) Brighenti A., Contiero D., *Preliminary validation of ACUSYS to analyse instabilities in the non linear combustion zone-plant acoustic interaction*, ISMA 21 - Noise and Vibration Engineering Conference, Lovanio (Belgio), 18-20 Sett. 1996
- (5) Carli R., Casale P., *Simulation of Pressure Pulsations in Gas Compression Plants*, Quaderni Pignone 3, pp. 25-32.
- (6) Crocco L., *Theoretical studies on liquid propellant rocket instability*, 12th Int. Symp. on Combustion, pp. 101-113, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1965
- (7) D'Azzo J. J., Houpis C. H., *Linear Control System Analysis and Design - Conventional and Modern*, 3rd Ed., McGraw Hill Int. Ed., 1988.
- (8) McManus K.R. & others, *A review of active control of combustion instabilities*, Proc. Energy Combust., Sep 1993, Vol. 19 pp. 1-29
- (9) Seto William W, *Acustica* - Ed. Schaum- ETAS libri, 1978.
- (10) Smeulers J.P.M., *Simulation of Flow Dynamics in Pipe Systems*, Proceedings IMechE Seminar Dec. 1988, pp. 97-105.
- (11) The Mathworks Inc., *MATLAB/SIMULINK - User manuals*, 1992/1993.
- (12) Thomson W.T., *Theory of Vibration with Application*, Prentice-Hall, Inc., 1972.
- (13) Van Bokhorst E., Korst H., *The Centrifugal Pump as a Source of Pulsations in Pipe Systems - a Comparison of Measurements and Simulation Results*, IMechE C449/008 1993, pp. 83-91.

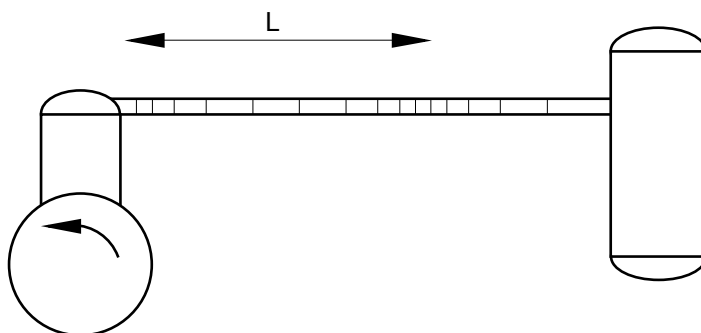
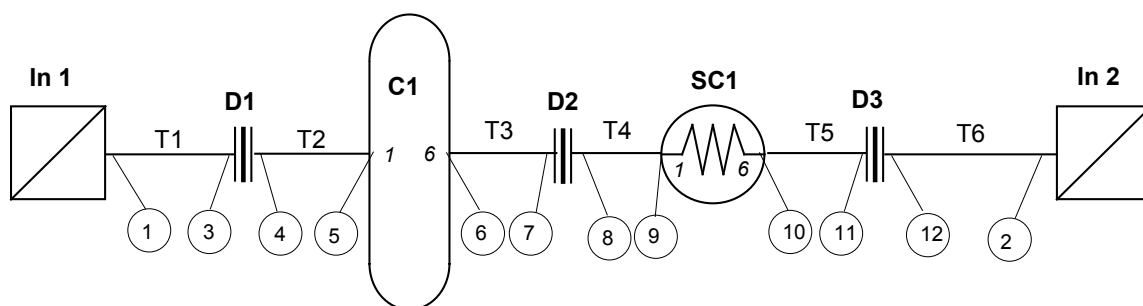
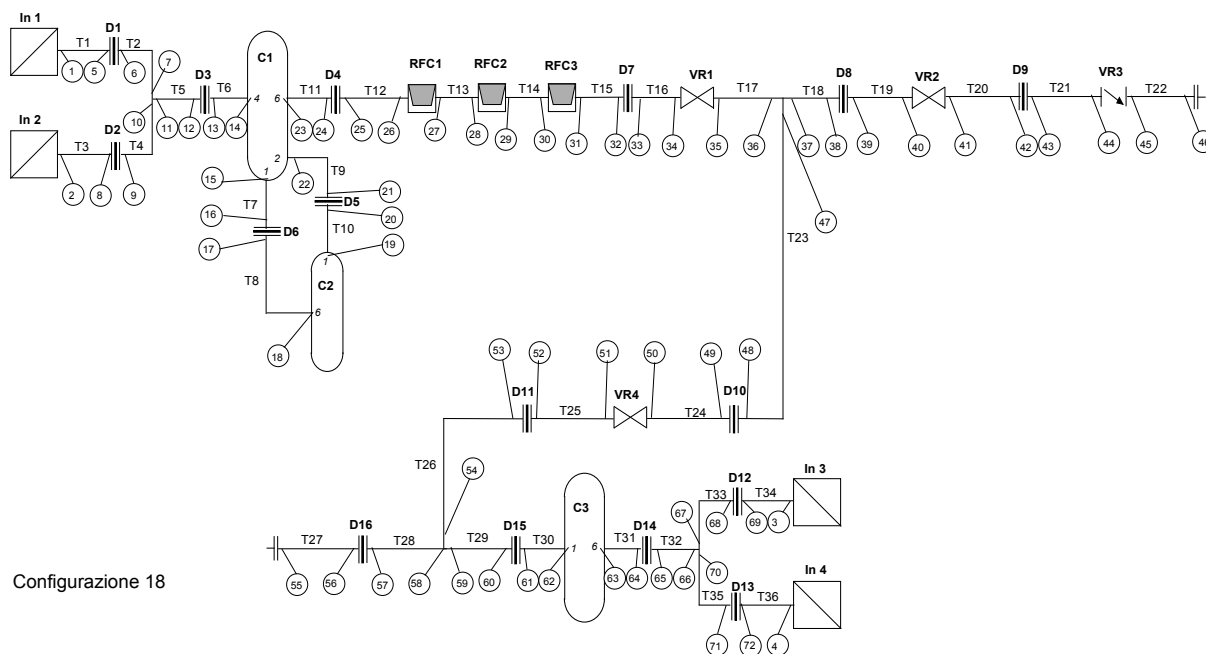


Fig. 1 - Esempio di generazione e propagazione delle pulsazioni di pressione (L = lunghezza d'onda)



Configurazione 2



Configurazione 18

Fig. 2 - Esempi di configurazione di impianto della libreria realizzabili con **ACUSYS**

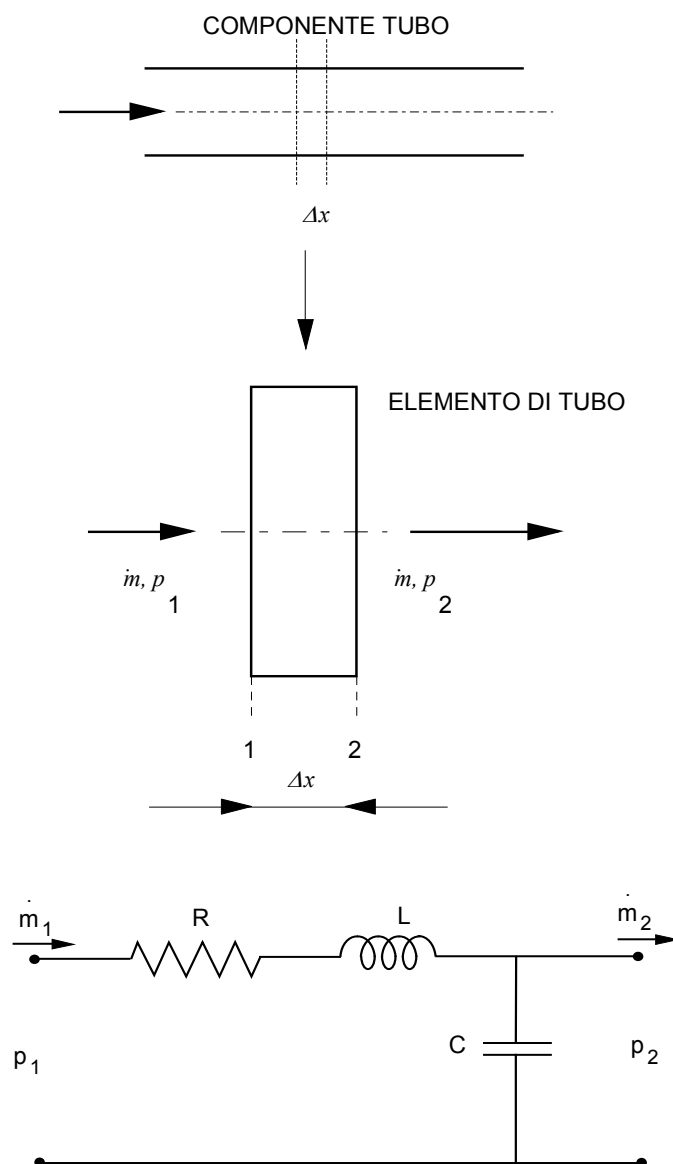


Fig. 3 - Analogia elettroacustica adottata da ACUSYS

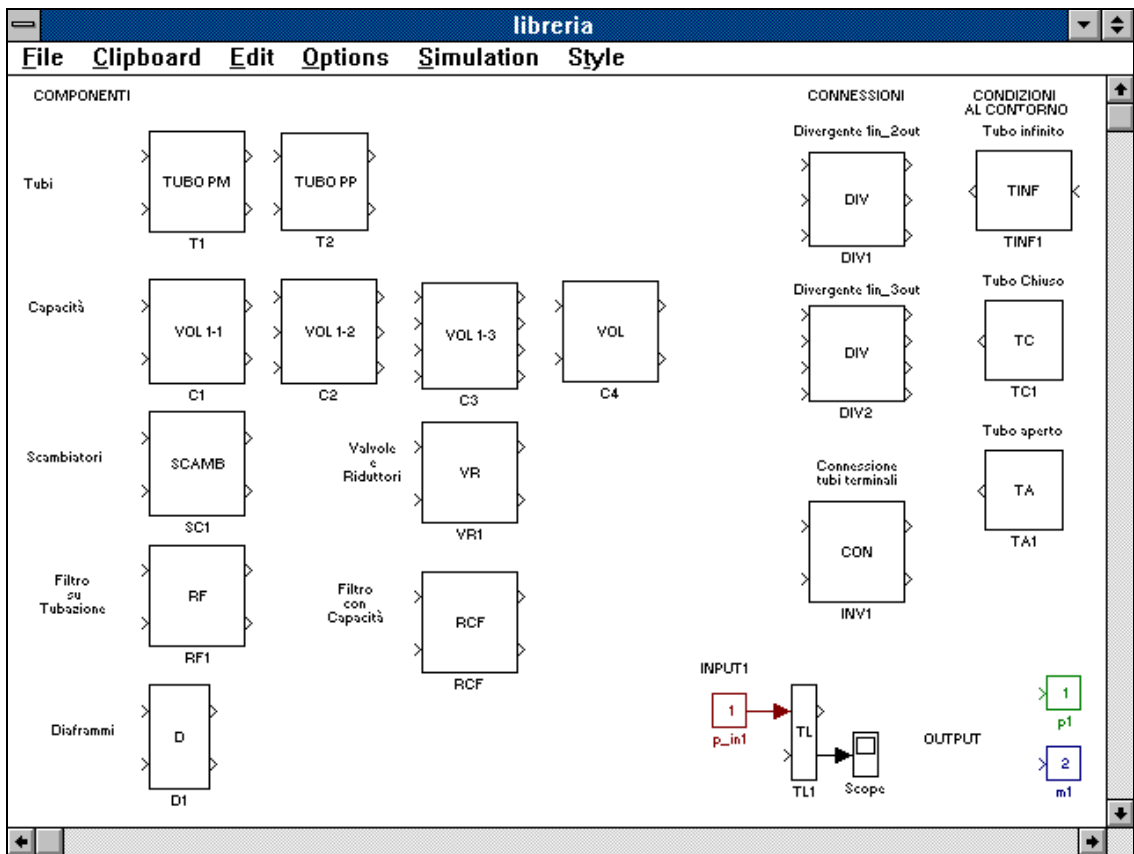


Fig. 4 - Libreria di componenti di **ACUSYS**

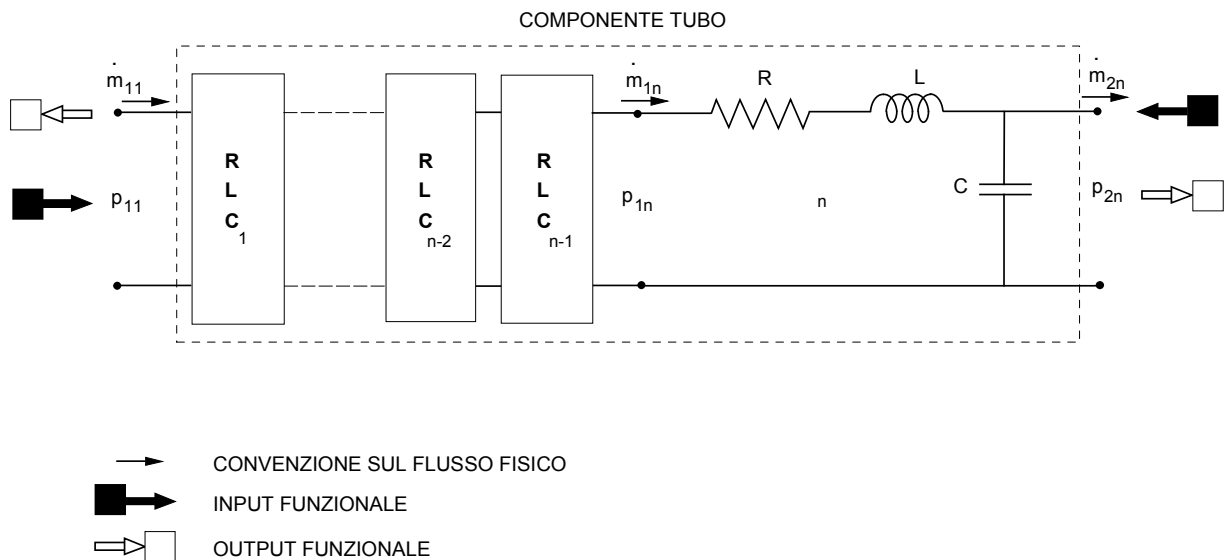


Fig. 5 - Equivalente discreto di un componente tubo

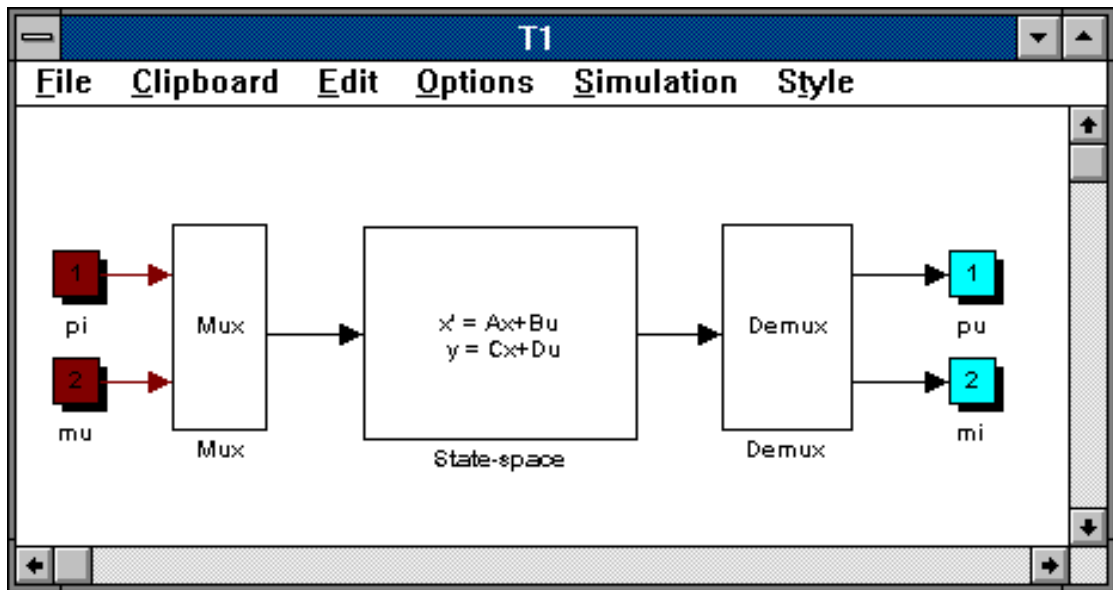


Fig. 6 - Esempio di struttura interna di un blocco componente utilizzato negli S-file SIMULINK di **ACUSYS** (elemento tubo con ingresso in pressione e portata)

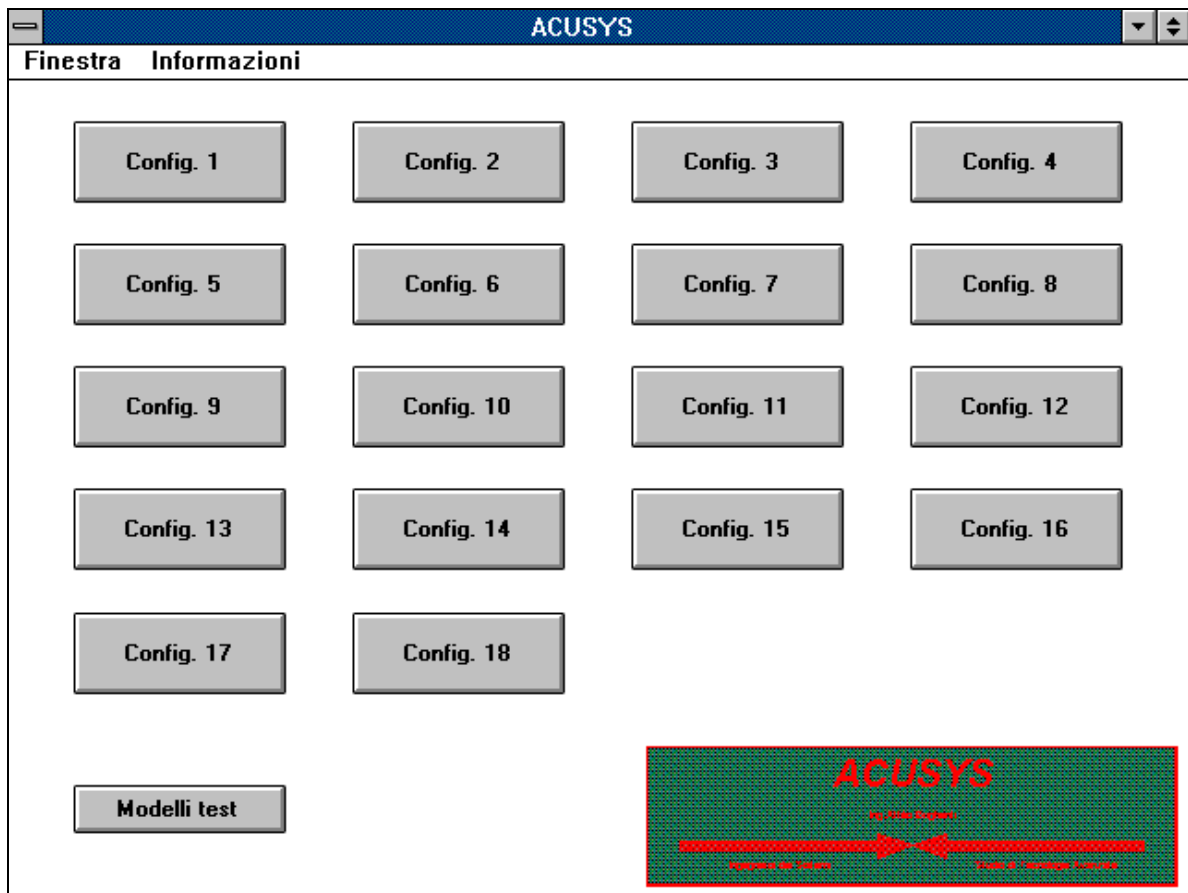
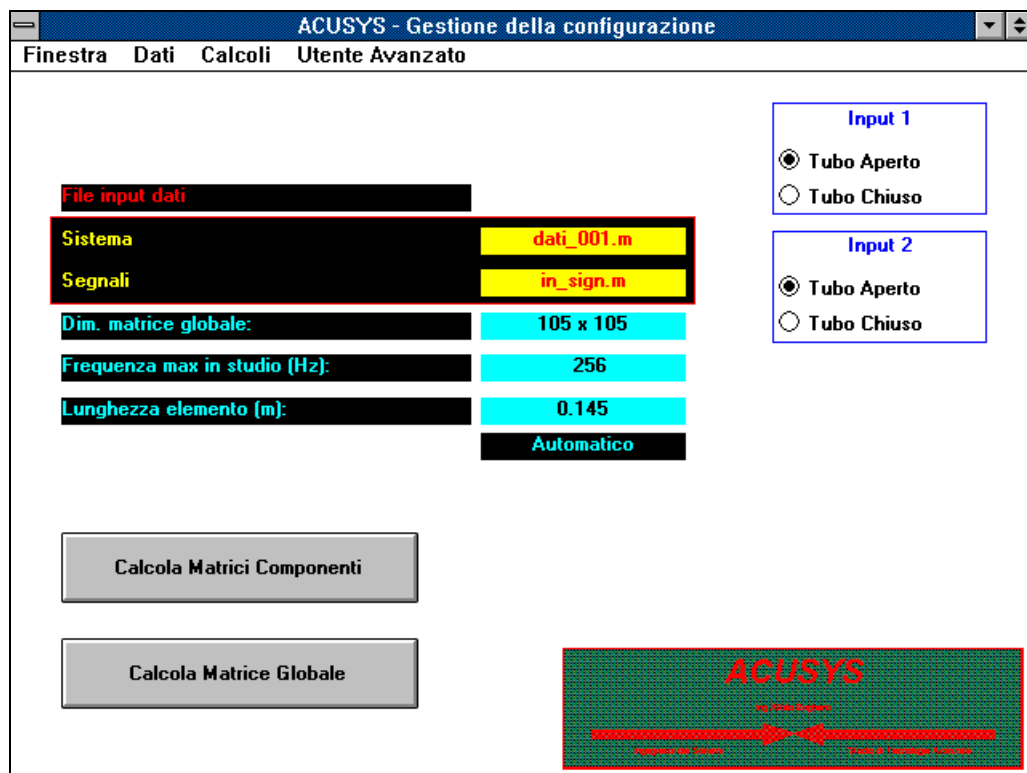
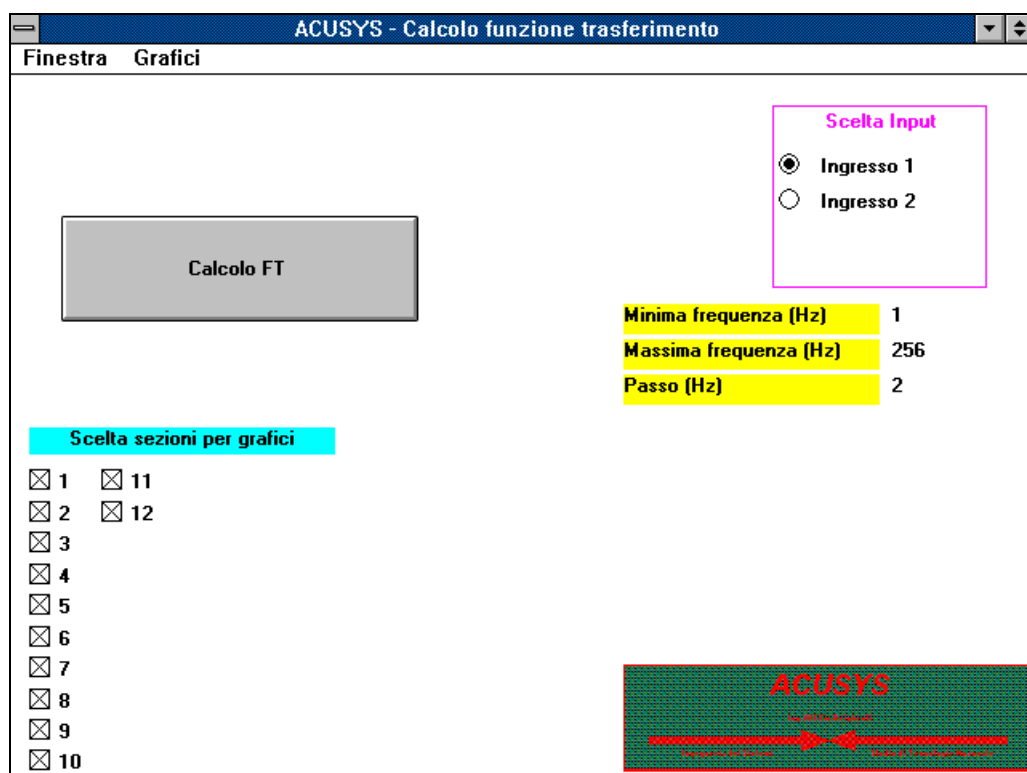


Fig. 7 - **ACUSYS** - Finestra di selezione della configurazione

Fig. 8 - **ACUSYS** - Finestra di gestione della configurazioneFig. 9 - **ACUSYS** - Finestra di gestione calcolo funzione di trasferimento

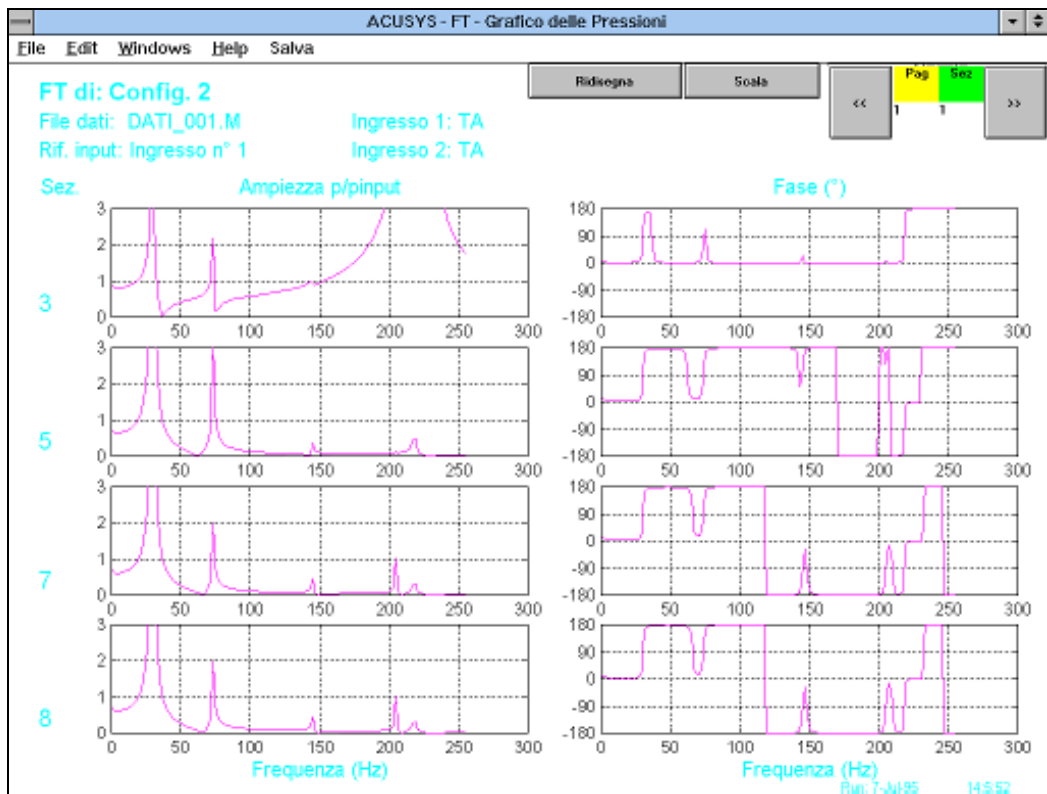


Fig. 10 - ACUSYS - Finestra FT - Grafico pressioni

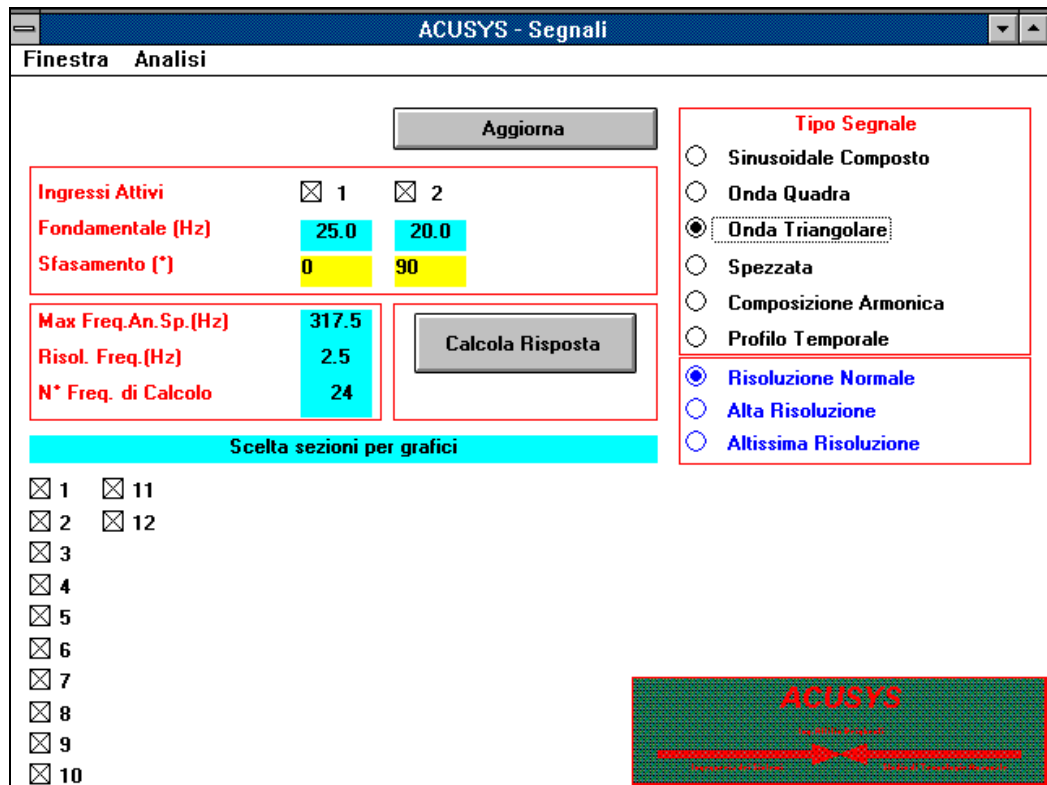


Fig. 11 - ACUSYS - Finestra di gestione segnali

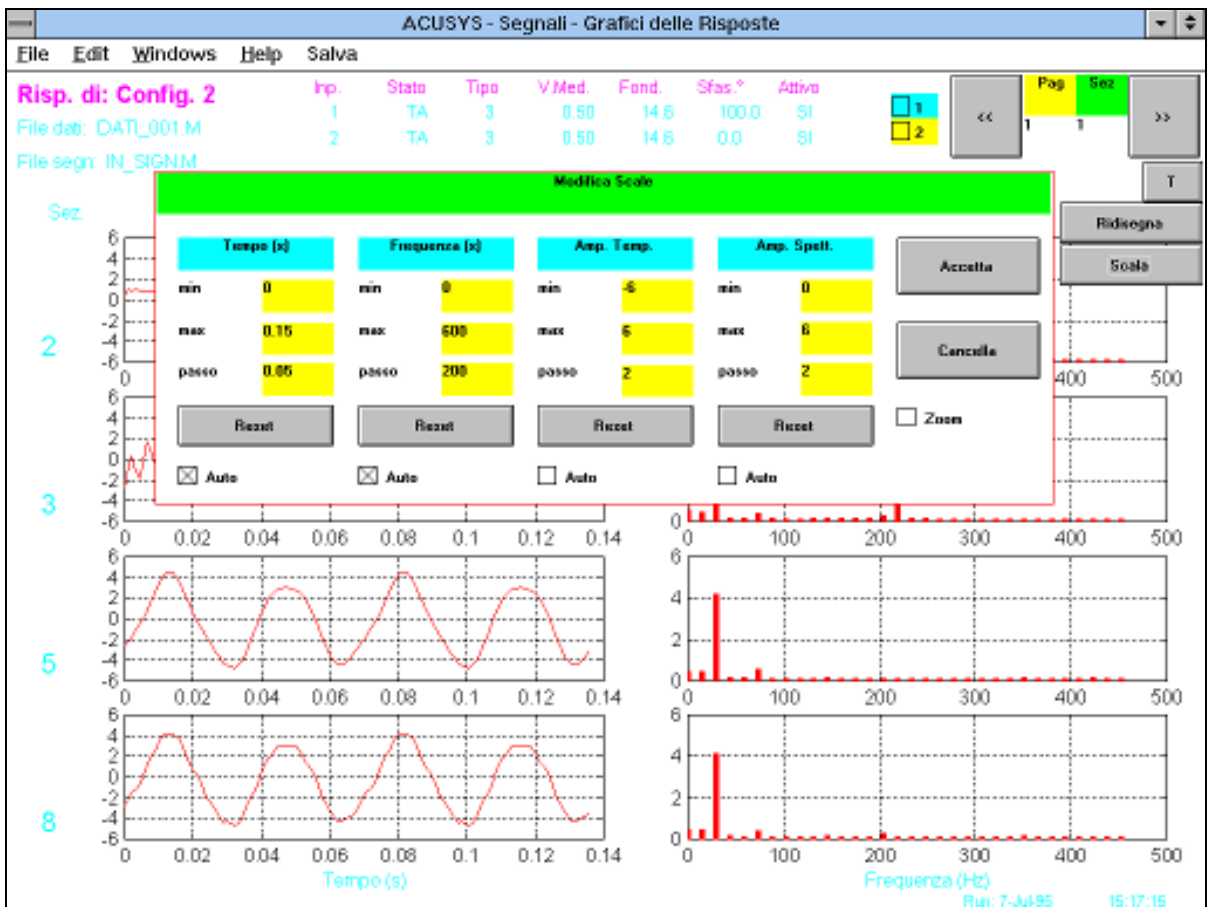


Fig. 12 - ACUSYS - Finestra Risposta (sovrin-presa la finestra di gestione scale e zoom)

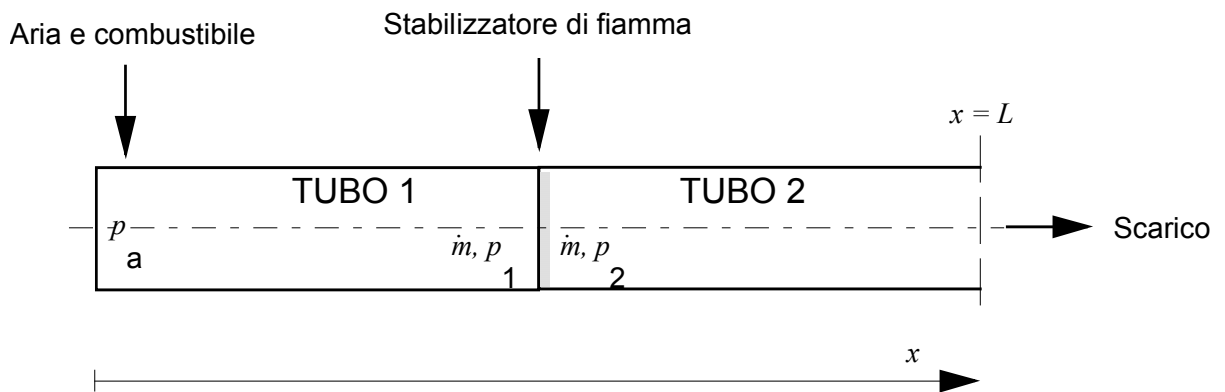


Fig. 13 - Esempio di combustore monotubolare

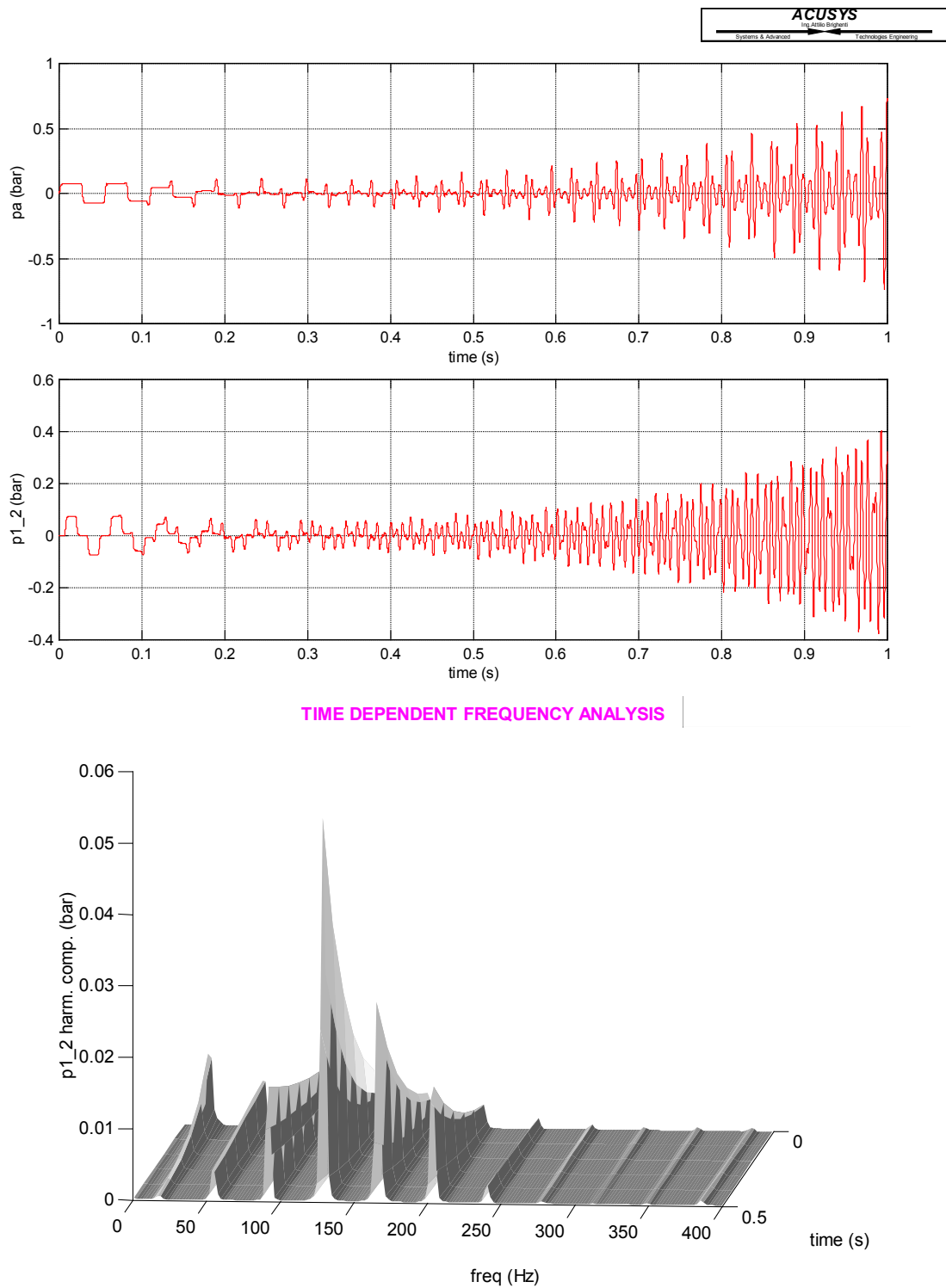


Fig. 14 - Esempio 1 - Instabilità del 3°, 4°, 5° e 6° modo del sistema di Fig. 13 ($\tau/T_1 = 0.75$) [4].
 In alto: pulsazioni di pressione all'estremità 'a' e nella zona di combustione '1_2', con transitorio in apertura del flusso.
 In basso: evoluzione nel tempo della composizione armonica del segnale (tra 0 e 0.5 s).

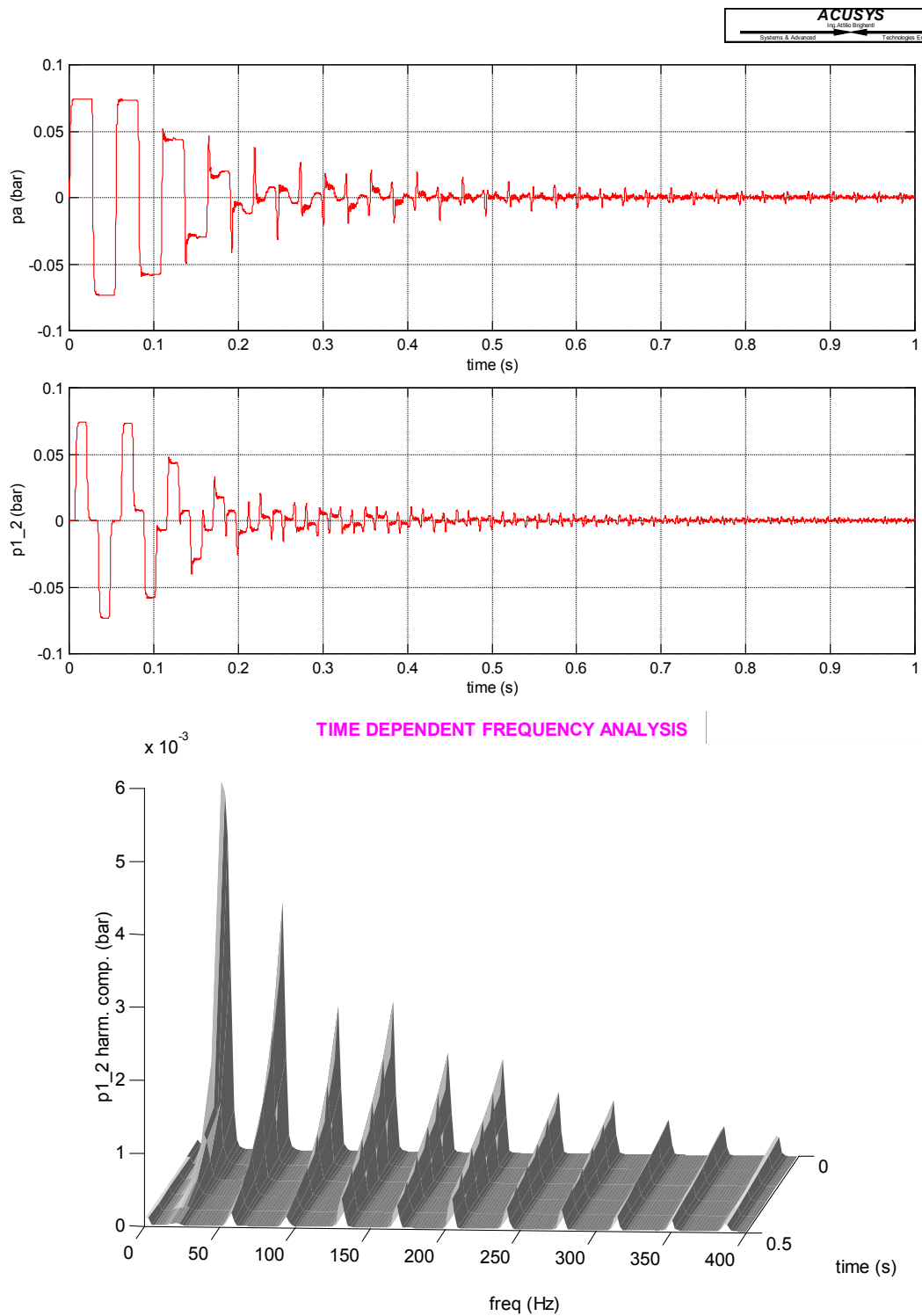


Fig. 15 - Esempio 2 - Stabilità di tutti i modi del sistema di Fig. 13 ($\tau/T_1 = 1.25$) [4].

- In alto: pulsazioni di pressione all'estremità 'a' e nella zona di combustione '1_2', con transitorio in apertura del flusso.
- In basso: evoluzione nel tempo della composizione armonica del segnale (tra 0 e 0.5 s).