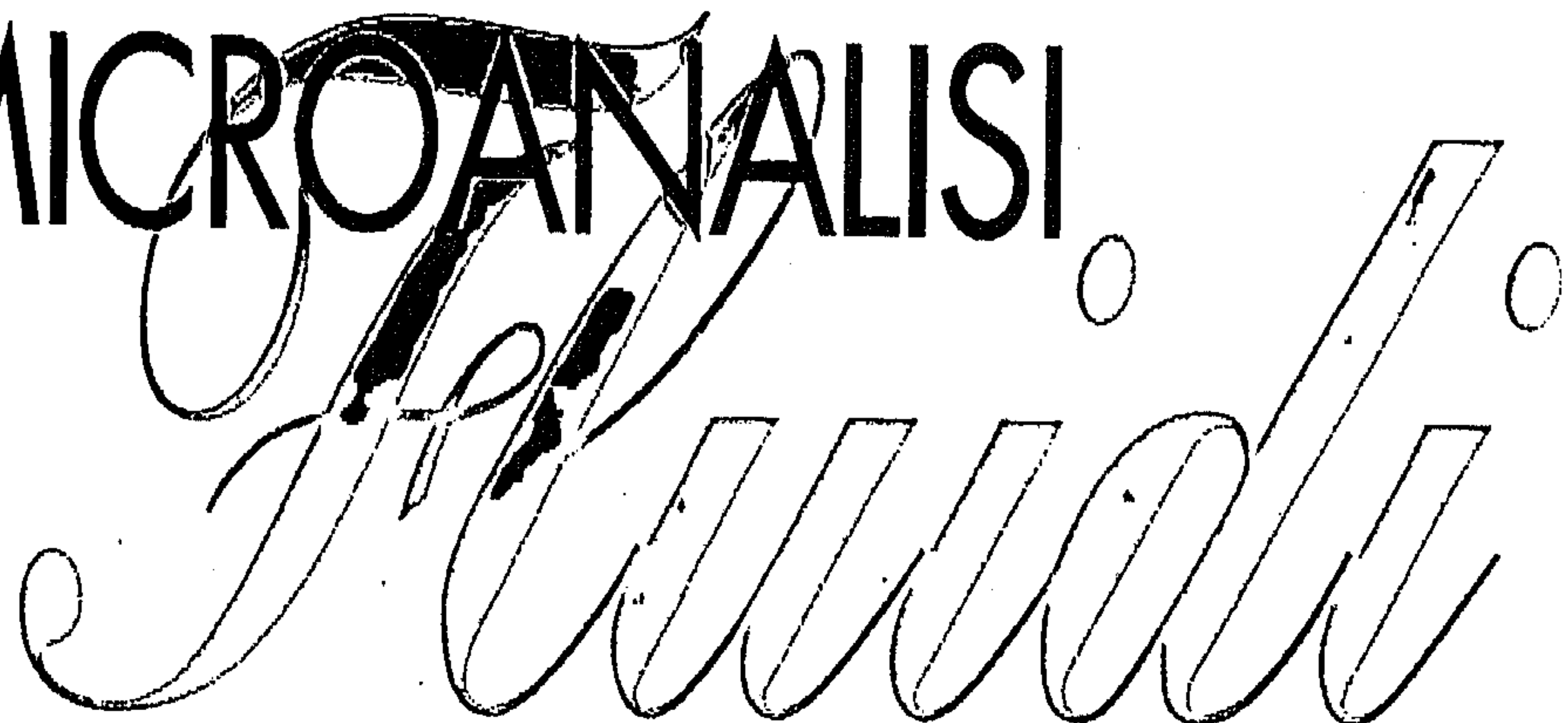


L'ARTICOLO DESCRIVE UN SISTEMA PLANARE MODULARE PER L'ESECUZIONE DI MICROANALISI SUI FLUIDI, BASATO SU UNA PIASTRA A CIRCUITO MISTO CON INTERCONNESSIONI ELETTRICHE E FLUIDICHE, CHE FA DA SUBSTRATO PER MODULI SENSORI E ATTUATORI. VENGONO PRESENTATI ALCUNI MODULI REALIZZATI SECONDO QUESTO PRINCIPIO E VENGONO ANALIZZATI IL PROGETTO, LA MODELLAZIONE E LA SIMULAZIONE DI SISTEMI FLUIDICI. VIENE PRESA IN CONSIDERAZIONE L'APPLICAZIONE GENERALE DI QUESTO PRINCIPIO NEI SISTEMI FLUIDICI DI MICROANALISI. INFINE IL PRINCIPIO MODULARE VIENE APPLICATO PRATICAMENTE A UN SISTEMA DI MICROANALISI CHIMICA COMPREDENTE MICROPOMPE, SENSORI DI PORTATA, UNA CELLA AD ASSORBIMENTO OTTICO E RELATIVA ELETTRONICA DI CONTROLLO

Vincent L. Spiering
Theo S.J. Lammerink
Miko Elwenspoek
Jan H.J. Fluitman
Albert van den Berg
Mesa Research Institute
Università di Twente
Enschede, Olanda

SISTEMI DI MICROANALISI PER



Negli anni più recenti si è manifestato un crescente interesse per lo sviluppo e la realizzazione di sistemi miniaturizzati di analisi totale [1-3]. Questa tendenza è dovuta in parte alla rapida evoluzione di dispositivi per la gestione dei fluidi comprendenti micropompe, microvalvole, microfiltri e micromiscelatori [4], ma è spiegabile anche in rapporto alla richiesta di complessi sensori (bio)chimici dotati di caratteristiche integrate di autodiagnosi e calibrazione. Tutto ciò ha favorito il tentativo di fabbricare sistemi fluidici miniaturizzati [2, 3] e microcomponenti per sistemi di analisi [5-7].

Poiché tuttavia questi sistemi comprendono tipicamente un'ampia varietà di componenti, materiali e tecnologie, occorre dedicare particolare attenzione al principio di integrazione dei sistemi stessi.

Le due forme estreme di integrazione sono la soluzione ibrida e la soluzione monolitica. Un esempio di dispositivo di analisi comple-

tamente ibrido è l'analizzatore a colonna per fosfati di van der Schoote [2], mentre un esempio di dispositivo monolitico è il dosatore per liquidi di Lammerink [8].

In pratica la maggior parte dei sistemi è costituita da una combinazione di queste due forme.

Il principio che viene proposto nella presente relazione consente un'integrazione modulare mista di diversi componenti del sistema o di sottosistemi su una piastra di supporto planare detta piastra a circuito misto (MCB), che funge anche da supporto meccanico per i componenti modulari del sistema, da sostegno per i necessari collegamenti elettrici realizzati come piastra a circuito stampato (PCB) e da piastra a circuito canalizzato (CCB) contenente i microcanali per il convogliamento del fluido ai vari moduli.

Per dimostrare l'efficacia del principio illustrato si ricorre a un semplice esempio riferito alla chimica, ossia l'acidificazione dell'indicatore di pH Congo-Red.

Principio della piastra a circuito misto MCB

La figura 1 mostra schematicamente in sezione e in prospettiva una MCB, composta da due piastre combacianti che servono a formare i canali per il fluido. La MCB può essere costituita da un sandwich di norma in vetro-silicio, ma realizzabile anche in materiale plastico. I moduli possono essere reciprocamente collegati con varie tecniche, come la giunzione anodica, l'incollamento, la saldatura ecc. La MCB descritta in questa relazione è costituita da un circuito stampato epossidico incollato su un substrato trasparente di policarbonato. In taluni casi si impiegano versioni dotate di canali scavati per lavorazione meccanica in uno dei due elementi.

La superficie superiore della piastra contiene le connessioni elettriche e i collettori del fluido da e verso i canali. Si possono immaginare futuri sviluppi della MCB simili a quelli già avvenuti per i circuiti stampati, come per esempio una versio-

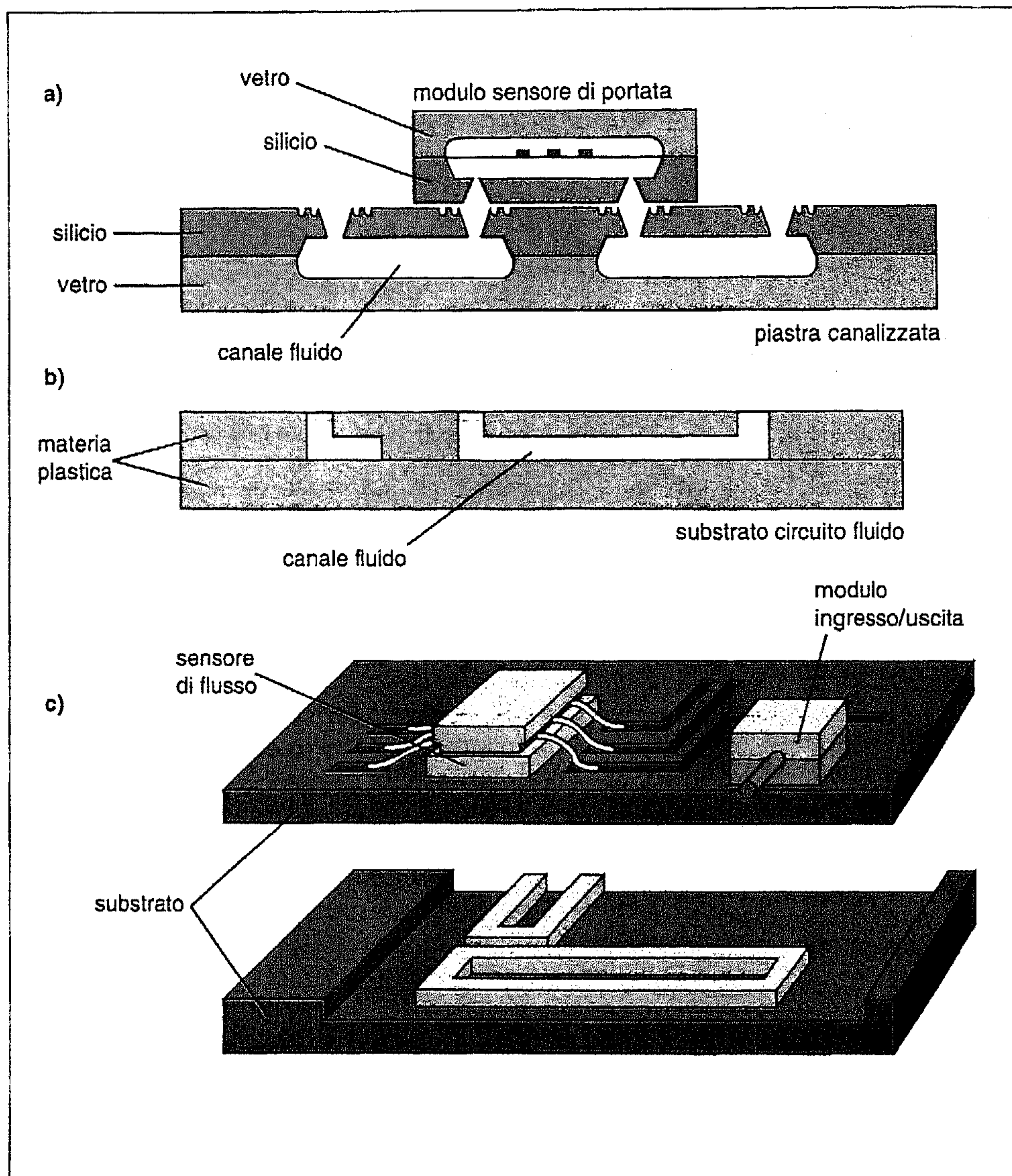
ne flessibile. Va infine ricordato che il principio planare facilita, molto più del principio a colonna [9], la produzione di grande serie secondo il metodo del *pick and place*.

Moduli del sistema

Per realizzare microsistemi destinati alla gestione dei fluidi è necessaria un'ampia gamma di moduli. Sebbene alcuni di essi (pompe, sensori di portata, filtri) fossero già stati sviluppati in precedenza [11], per consentirne l'integrazione nel sistema modulare è stato necessario riprogettarli. Nelle figure da 2 a 6 sono riportate alcune microfotografie di moduli eseguite al microscopio elettronico a scansione (SEM) o al microscopio ottico. Tutti i moduli hanno in comune il passo di 5 mm per gli attacchi del fluido.

Applicazioni

I sistemi miniaturizzati per l'analisi a iniezione di fluido (FIA) sono utilizzabili per numerose applicazioni. In primo luogo si possono usare per sostituire i sistemi di analisi a iniezione di fluido tradizionali, basati su pompe rotative. Nel caso in esame il vantaggio immediato è in una riduzione da 10 a 100 volte nel consumo di reagenti e di campione [2]. Un'altra applicazione raccomandata è la costruzione di strumenti portatili a batteria per misure ambientali sul campo. In questo caso al vantaggio sopra citato si aggiunge il bassissimo consumo di potenza, che assicura una lunghissima autonomia di funzionamento. In campo medico i sistemi miniaturizzati FIA possono essere sfruttati per il monitoraggio dai letti di degen-



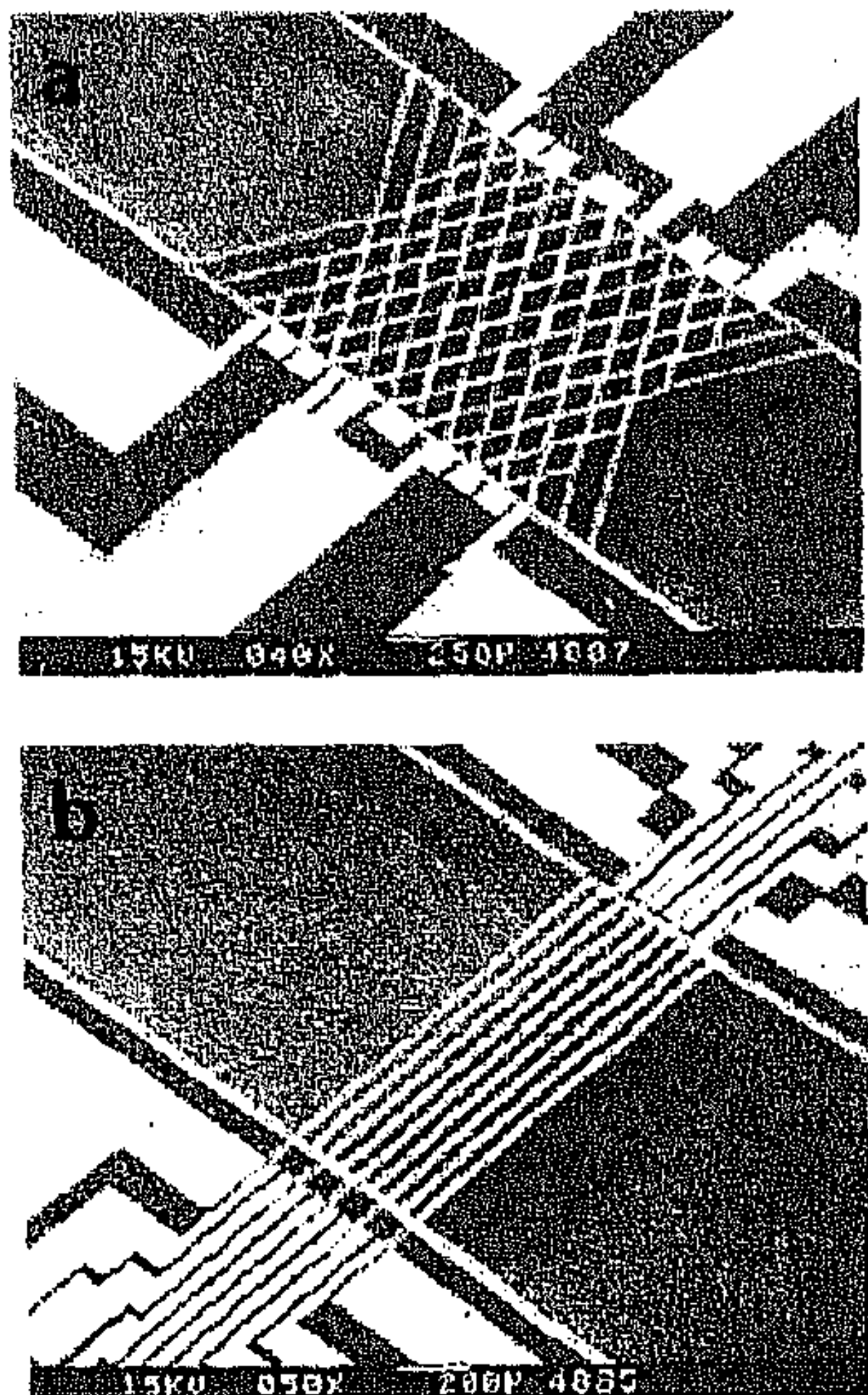
za o per il monitoraggio continuo di singoli pazienti; in questi casi il fattore determinante risiede nelle minime dimensioni dell'apparecchio. Un esempio di microsistemi di questo tipo è visibile in figura 7. Anche nelle applicazioni aerospaziali il basso peso e le minime dimensioni costituiscono un elemento determinante rispetto alle soluzioni convenzionali. In aggiunta ai vantaggi citati occorre ricordare che la tecnologia del silicio può consentire costi di fabbricazione inferiori, anche se questo risultato dipende strettamente dal tipo di sistema e soprattutto dal numero di pezzi prodotti.

Micropompa termopneumatica

Il sistema dimostrativo di analisi contiene due micropompe ad azionamento termopneumatico [12], di cui la figura 7 mostra la sezione schematica. La micropompa comprende 3 elementi costruttivi principali schematicamente rappresentati in figura 8: l'attuatore termopneumatico (A), la camera di pompaggio con membrana flessibile agente da capacità (C), due valvole circolari passive di non ritorno in silicio (V). L'attuatore della pompa genera nella camera d'aria una pressione periodicamente variabile, che agisce sulla membrana flessibile

Fig. 1 Principio modulare planare per microsistemi destinati alla gestione dei fluidi con moduli funzionali sovrapposti a una MCB: (a) sensore di portata sovrapposto alla MCB in silicio-vetro; (b) MCB in materiale plastico; (c) vista tridimensionale della MCB con sensore di portata e modulo ingresso/uscita.

Fig. 2 Microfoto di sensori di portata : (a) a griglia; (b) a fascio parallelo.



posta fra attuatore e camera di pompaggio. Per effetto della deflessione della membrana il volume della camera di pompaggio varia e grazie alla presenza delle due valvole di non ritorno il liquido viene periodicamente aspirato attraverso una delle due valvole e spinto attraverso l'altra, generando un flusso forzato in una direzione definita.

L'attuatore termopneumatico consiste di una cavità piena d'aria e da un resistore di riscaldamento a film sottile sostenuto da leggere strutture in nitrato di silicio, che riscalda periodicamente l'aria racchiusa. Uno stretto canale d'aria collega la cavità con l'esterno e consente uno scambio di pressione con l'ambiente circostante.

Un tipico attuatore è costi-

Fig. 3 (a) Resistore idraulico costituito da canale anisotropo inciso e (b) da modulo miscelatore-filtro.

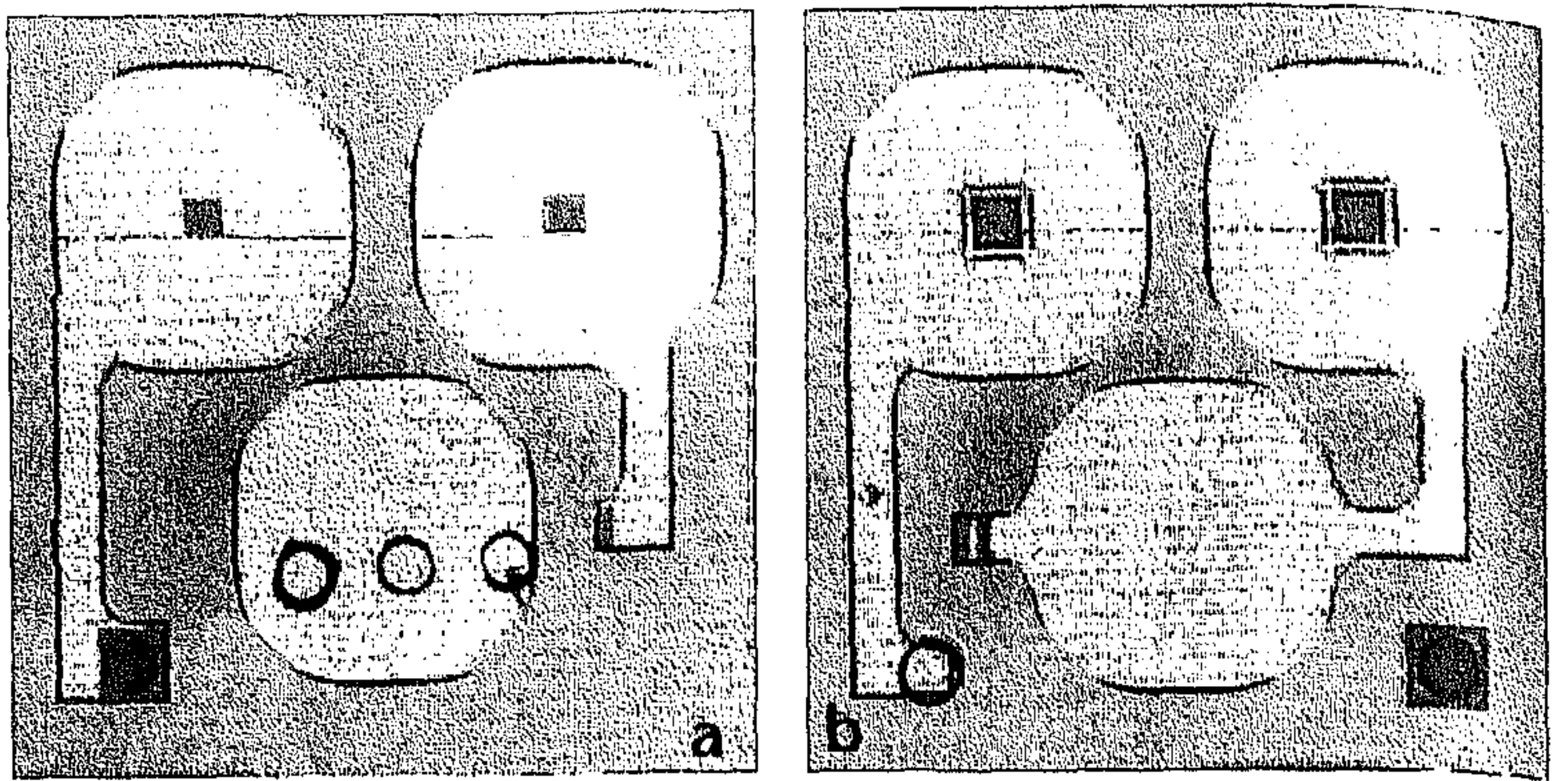
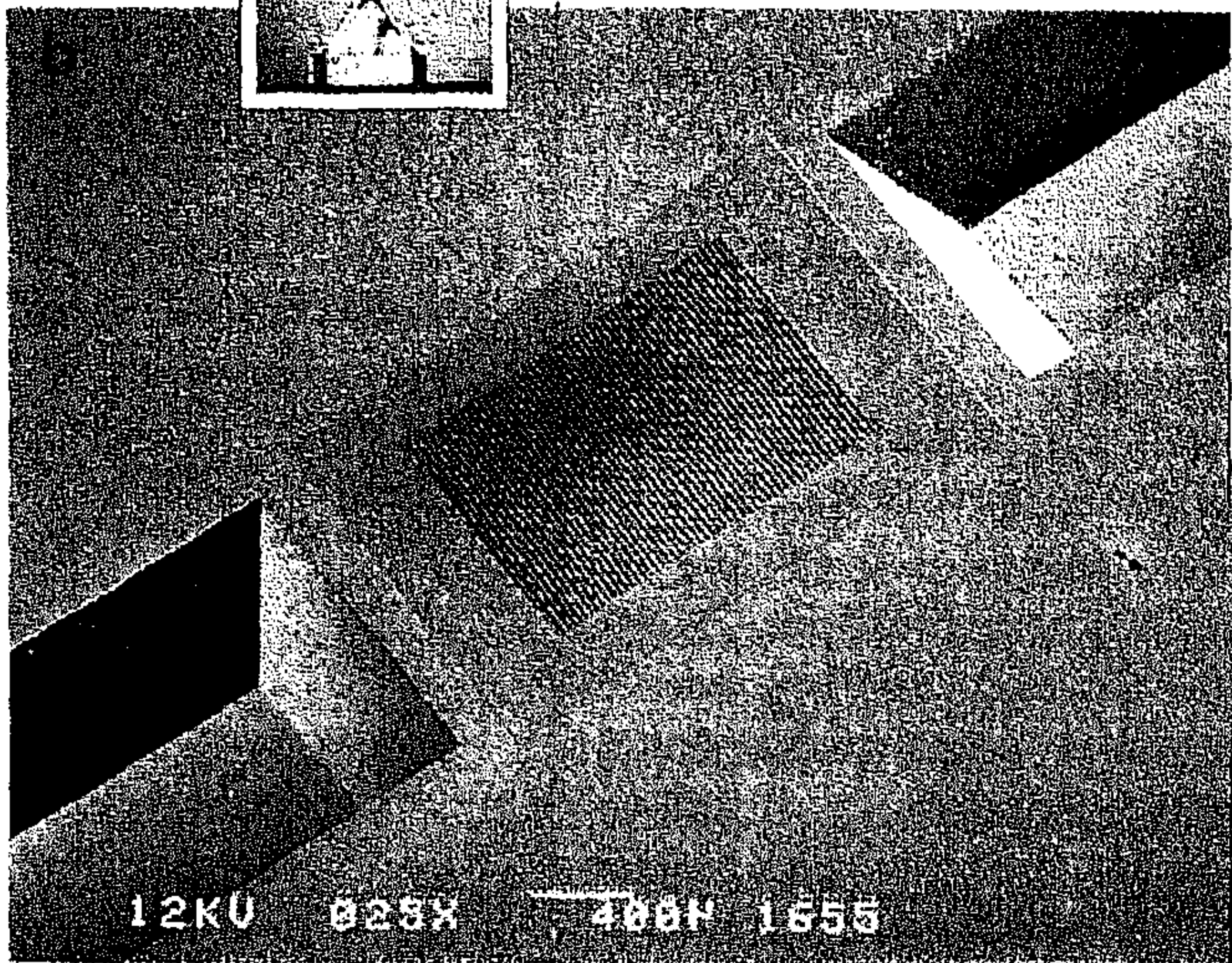


Fig. 4 Micropompa: parte superiore (a), parte inferiore (b).

tuito da una camera d'aria circolare con diametro 8 mm e altezza 0,4 mm in cui il resistore è montato a metà altezza «tra pavimento e soffitto». La risposta termica (raffreddamento e riscaldamento dell'aria) può essere descritta con un tempo di rilassamento termico τ_t che è determinato soprattutto dalla capacità termica del resistore e dalla conducibilità termica dell'aria [12]. Un secondo tempo di rilassamento termico è definito dalla capacità termica dell'intero corpo pompa e dalla conducibilità termica del corpo di supporto. Per la presenza

una capacità (particolare C in figura 8) che accumula un volume dipendente dalla caduta di pressione. In prima approssimazione la variazione di volume sotto la membrana è funzione lineare dello spostamento del centro della stessa [10]. Tuttavia la reattanza capacitiva della membrana manifesta un comportamento decisamente non lineare per spostamenti del centro di grande ampiezza. Le valvole di non ritorno, normalmente chiuse, sono costituite da un anello esterno flessibile e da un bordo interno rigido di tenuta (particolare V in figura

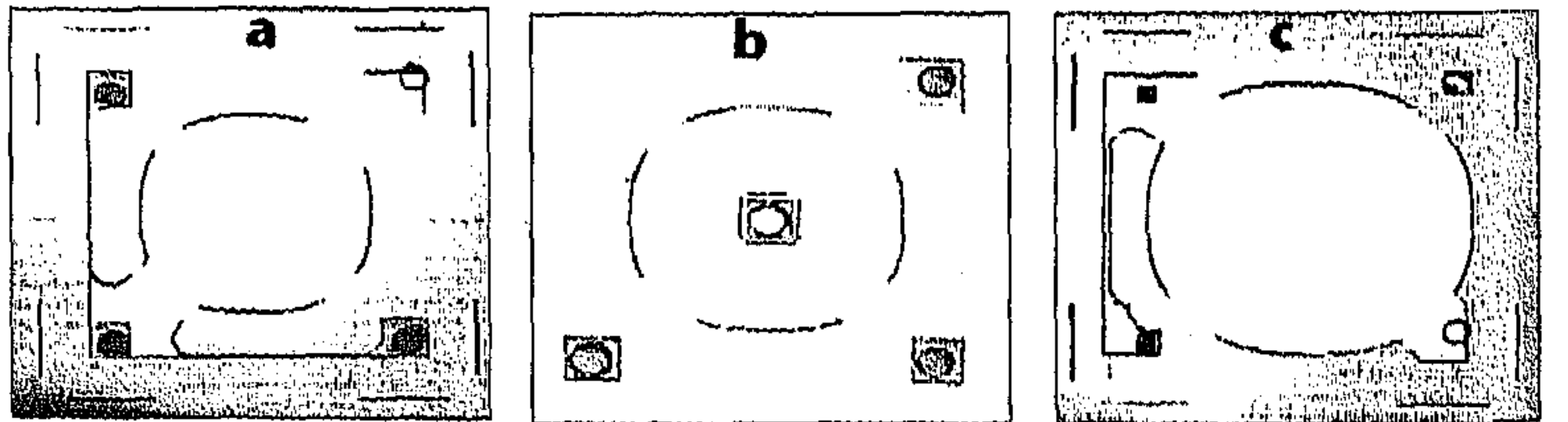


Fig. 5 Valvola di non ritorno: parte superiore con due resistori idraulici (a); parte inferiore con bordo di tenuta (b); combinazione capacità-resistore idraulico (c).

dei canali d'aria esiste un terzo tempo di rilassamento τ_p (pneumatico), che a causa della non linearità del sistema pneumatico può essere valutato solo in via approssimata. Una simulazione del comportamento dell'attuatore ottenuta con il programma 20SIM [13] è riportata in figura 9.

La membrana della pompa, che ha uno spessore tipico di 25 μm , funziona come

8). Quando la pressione p_1 è maggiore di p_2 il bordo di tenuta viene sollevato e il liquido passa. Quando invece la pressione p_2 è maggiore di p_1 il flusso è bloccato. Grazie a un sottile rivestimento di ossido sul bordo di tenuta la pressione di apertura è molto bassa. Ovviamente queste valvole hanno un comportamento decisamente non lineare.

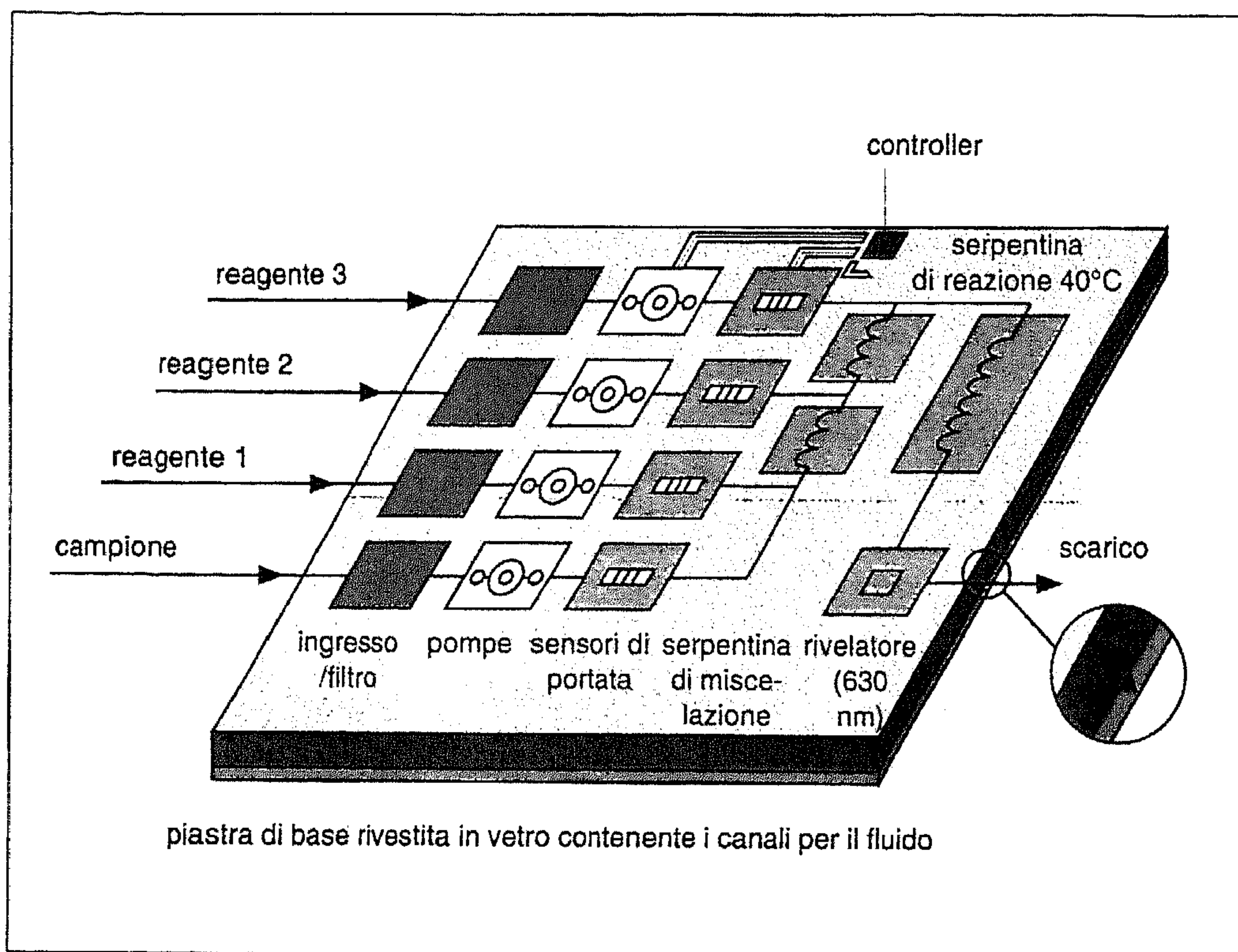


Fig. 6 Schema di analizzatore per ammoniaca realizzato secondo il principio MCB descritto.

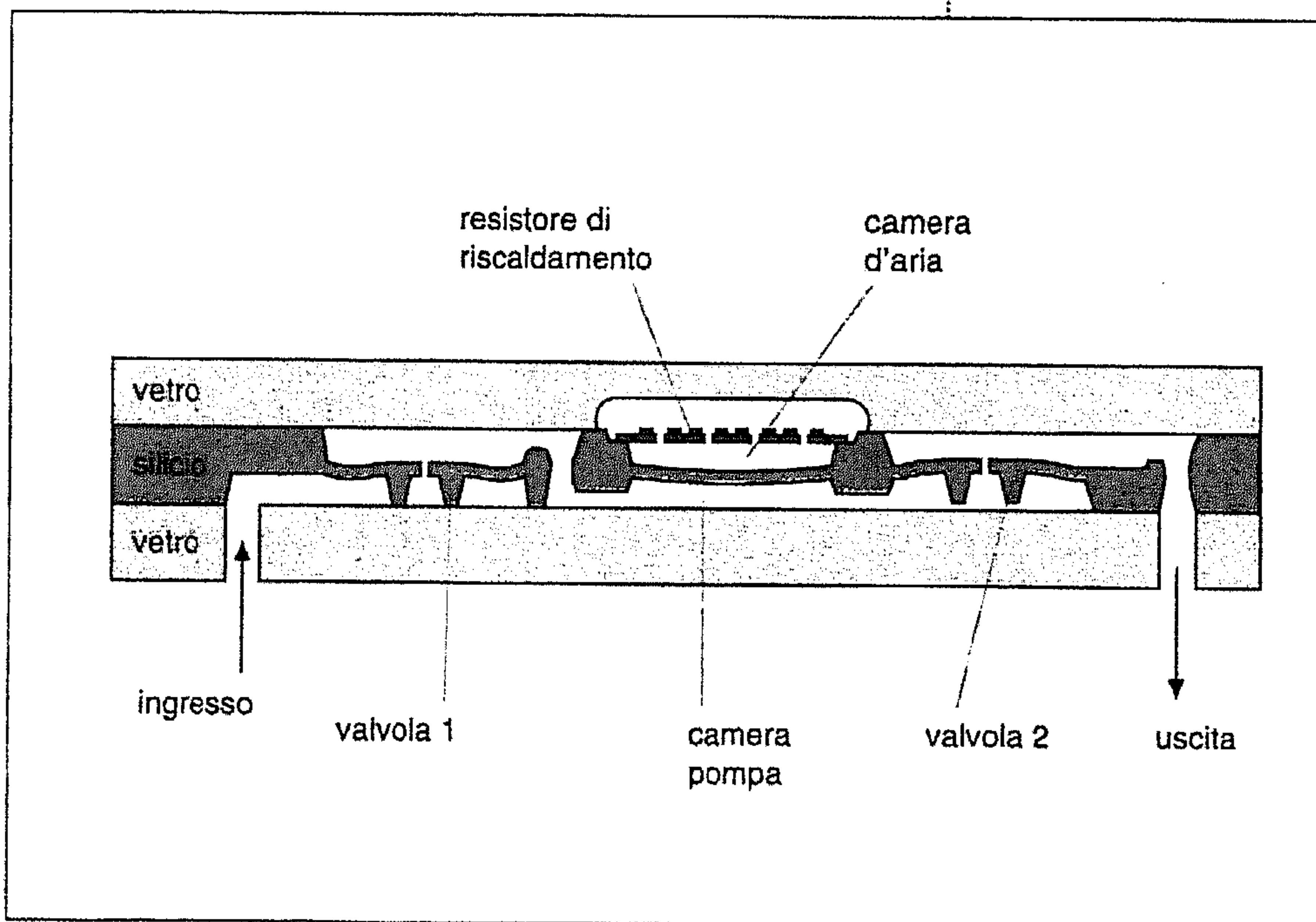
Fig. 7 Sezione trasversale della micropompa con attuatore termopneumatico impiegata nel dimostratore.

Nella pubblicazione [14] vengono presentate delle simulazioni del volume accumulato nella camera a membrana della pompa in funzione della differenza di pressione attraverso la membrana e risultati simulati del volume accumulato nella valvola e della portata che la attraversa.

In figura 10 sono illustrati i risultati della simulazione di un modello bondgraph dell'intera pompa. Si osserva che la pompa è azionata da una fonte di riscaldamento ad onda quadra. Grazie al fatto che i blocchi strutturali di base della pompa sono modellati come sottomodelli, la tipologia del modello bondgraph è molto simile alla struttura della pompa riportata in figura 7.

La figura 11 mette a confronto l'andamento simulato e quello reale della portata della pompa in funzione della frequenza dell'attuatore termopneumatico.

Ricorrendo al bondgraph la modellazione di sistemi più complessi risulta relativamente semplice. La publi-



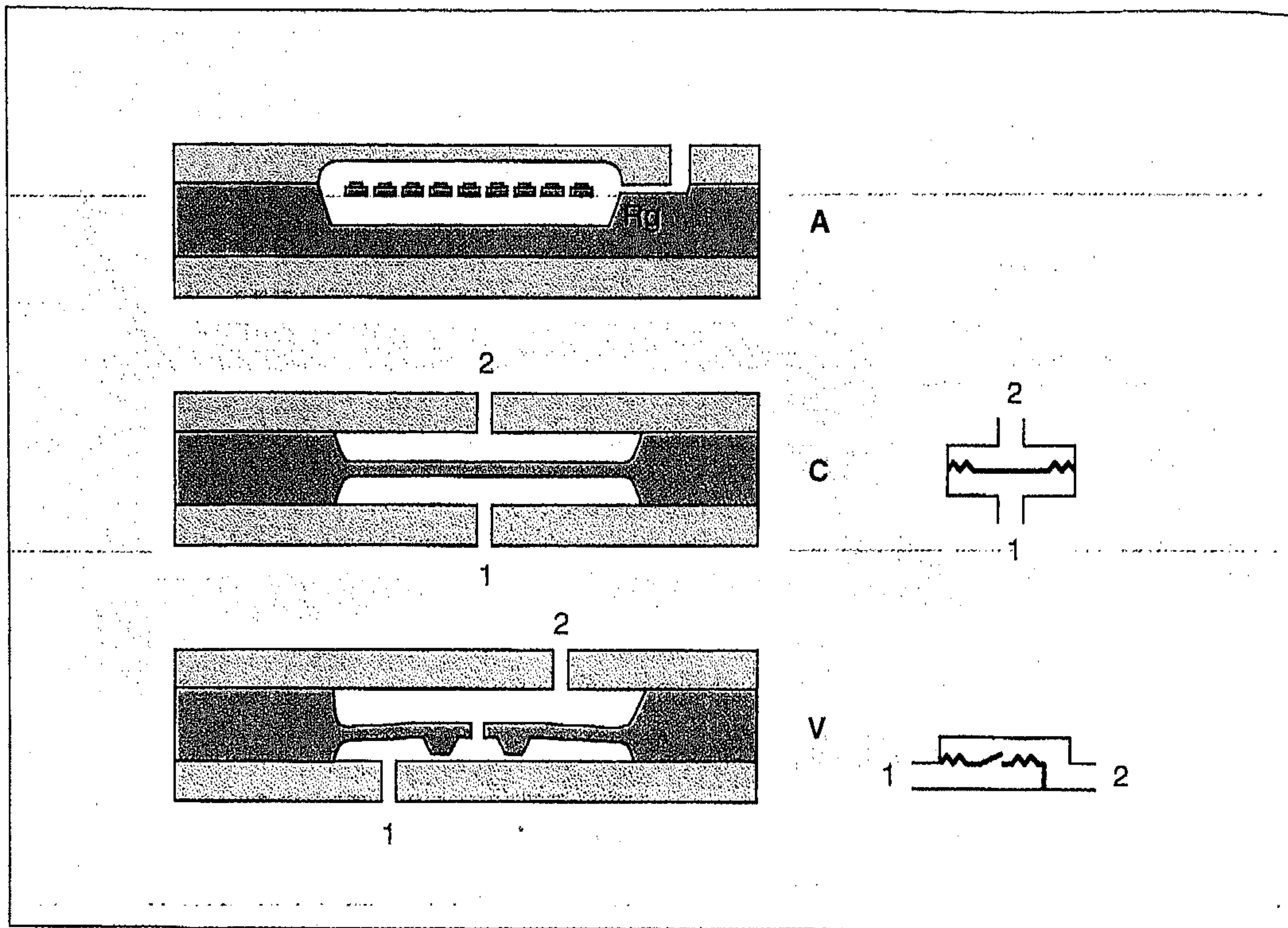
cazione [14] riporta sia il modello sia i risultati della simulazione del sistema dimostrativo con due micropompe.

Sistema dimostrativo

Un diagramma schematico dell'analizzatore chimico dimostrativo è visibile in fi-

gura 12. La MCB comprende tre ingressi/uscite, due micropompe, due sensori di portata, un modulo rivelatore ad assorbimento ottico. Lo scopo del sistema è di misurare i prodotti della reazione chimica attraverso la rilevazione dell'intensità di assorbimento spettrale. Il campione e i reagenti liquidi vengono mescolati negli opportuni rapporti all'inter-

Fig. 8 Sezione trasversale delle strutture vetro-silicio-vetro dell'attuatore pompa, della membrana e della valvola di non ritorno. A destra delle sezioni sono riportati i modelli fisici ideali (IPM) della membrana e della valvola.



no del dispositivo; di norma la miscelazione avviene durante la propagazione dei liquidi nei canali. L'assorbimento ottico viene misurato sul lato del rilevatore. La circuitazione elettronica di controllo, disposta in due livelli sotto lo strato della MCB contenente i moduli, è basata su un sistema di microcontroller per il trattamento del liquido e per la rivelazione dei

risultati dell'analisi chimica. Nella circuitazione elettrica sono implementati i circuiti di comando per le micropompe, i circuiti dei sensori di portata, i circuiti di misura dell'assorbimento ottico, la gestione di potenza e la comunicazione con un'interfaccia RS232.

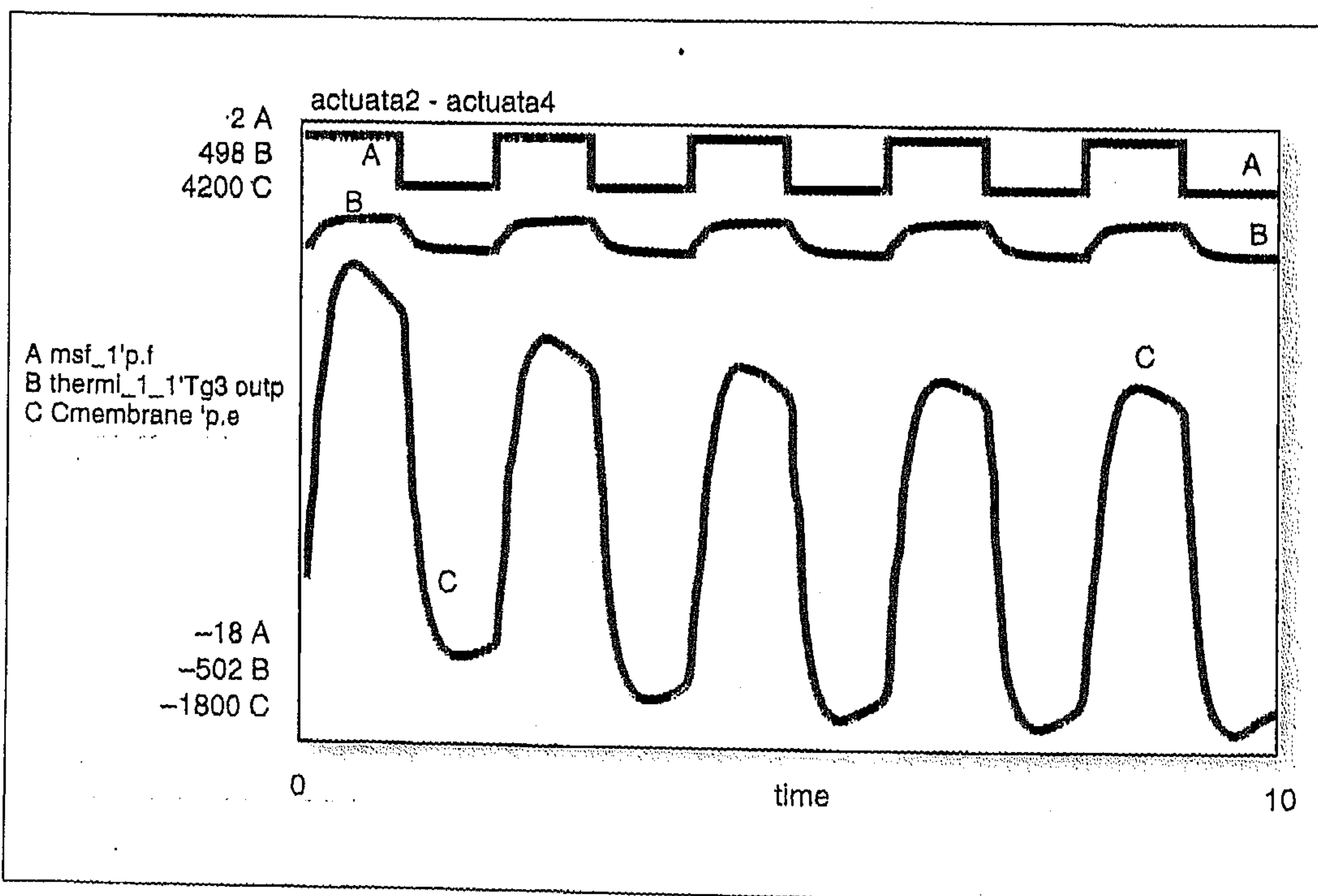
La cella di assorbimento è un sandwich vetro-silicio-vetro (15 x 1 x 0,4 mm) nel quale le intensità otti-

che provenienti da LED diversamente colorati sono misurate da un rilevatore CCD a 64 pixel (figura 13). L'analizzatore dimostrativo presenta un volume complessivo di circa 50 cm³ ed è rappresentato in figura 14.

Risultati

La figura 15 mostra i risultati sperimentali del com-

Fig. 9 Risultati della simulazione dell'attuatore pompa: A = potenza di riscaldamento [W]; B = temperatura del gas [°K]; C = pressione gas nella camera dell'attuatore [Pa]. I tempi di rilassamento termico sono rispettivamente $\tau_t = 0,2$ [s] e $\tau_g = 200$ [s]; il tempo di rilassamento pneumatico è $\tau_p = 2$ [s].



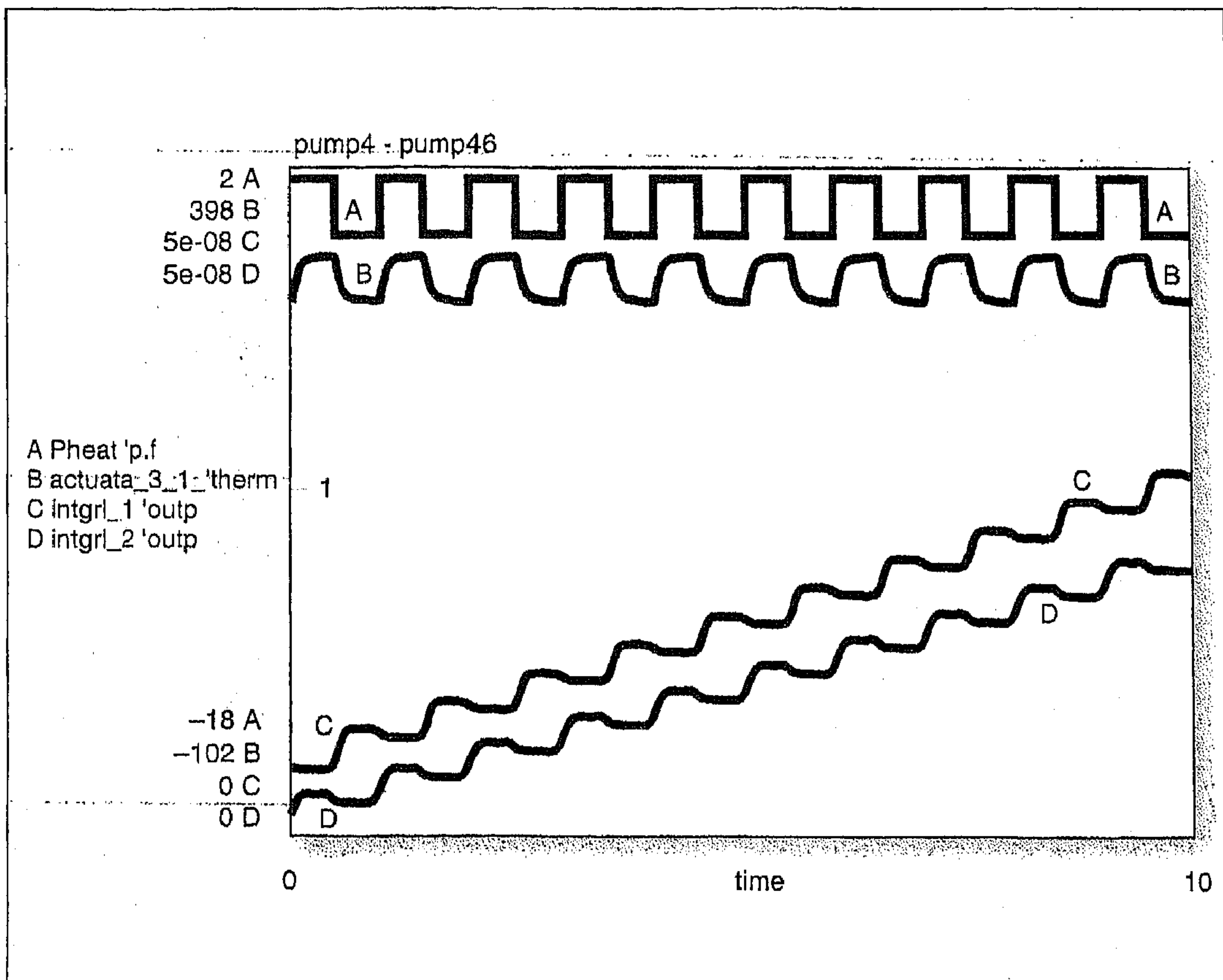


Fig. 10 Risultati della simulazione di una micropompa con attuttore termopneumatico: A = potenza dissipata nel riscaldatore [W]; B = temperatura dell'aria nella camera dell'attuttore [°K]; C, D = integrale della portata all'ingresso e all'uscita della pompa.

portamento reale della pompa e del sensore di portata. La costante di tempo misurata della combinazione pompa-sensore, dell'ordine di 0,2 s, è in accordo con i risultati della simulazione. L'integrazione del segnale emesso dal sensore di portata si traduce in una funzione di dosaggio decisamente graduale.

Il funzionamento del rilevatore è documentato dalle registrazioni dell'intensità di assorbimento effettuate su 4 lunghezze d'onda e con 3 liquidi: un liquido trasparente, l'indicatore Congo-red a PH 7 (colorato in rosso) e l'indicatore Congo-red a PH 3 (colorato in blu). In accordo con le indicazioni della letteratura tecnica il rilevatore a LED rosso ha manifestato l'attenuazione più marcata (figura 16).

Conclusioni

È stato illustrato un principio modulare per microsi-

stemi destinato alla gestione di fluidi.

Alcuni componenti del sistema sono stati fabbricati secondo questo concetto, con l'implementazione di connessioni elettriche e

fluidiche standardizzate. Per lo studio del comportamento dei componenti e del sistema sono stati sviluppati dei modelli, la cui efficacia è stata successivamente verificata attraverso

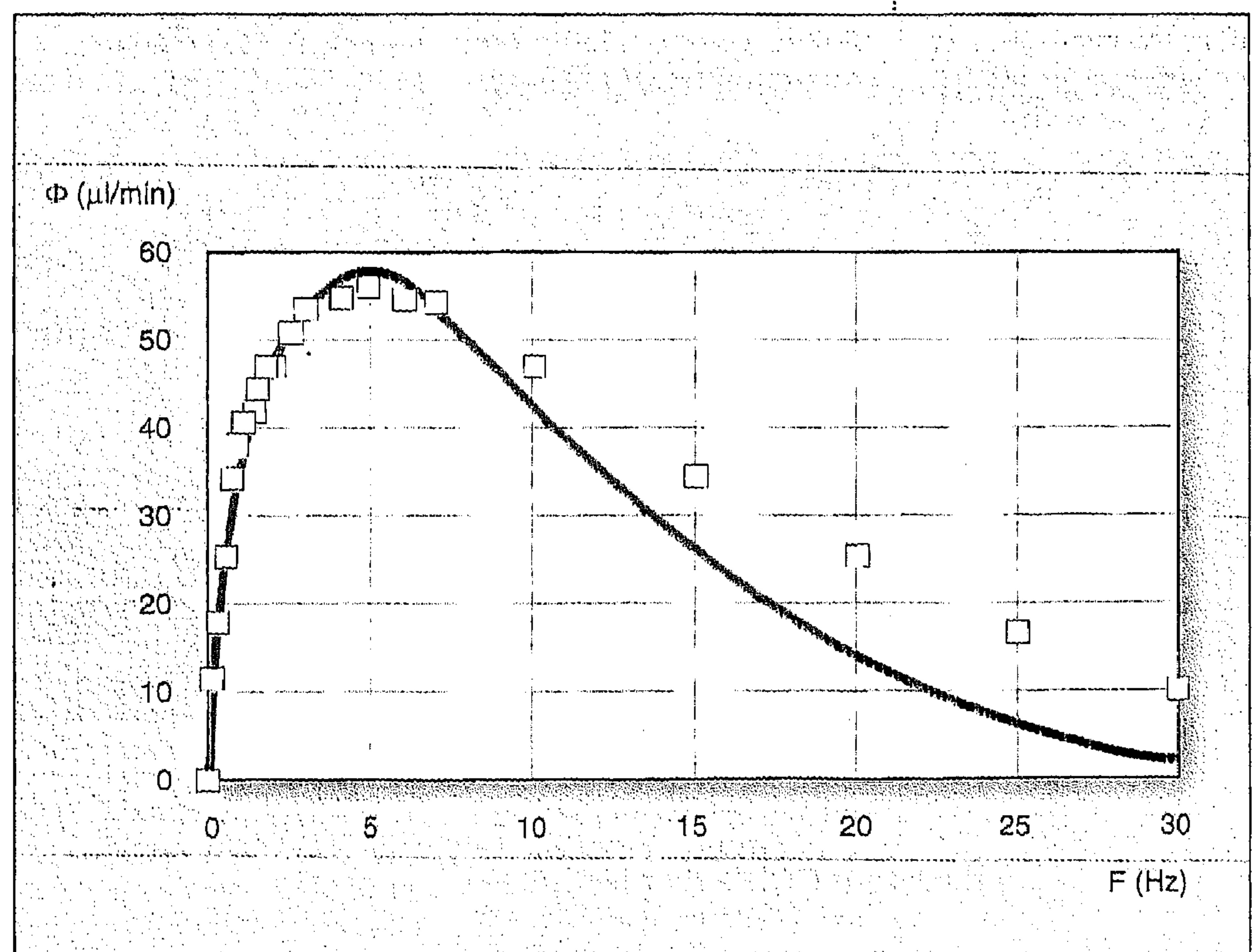
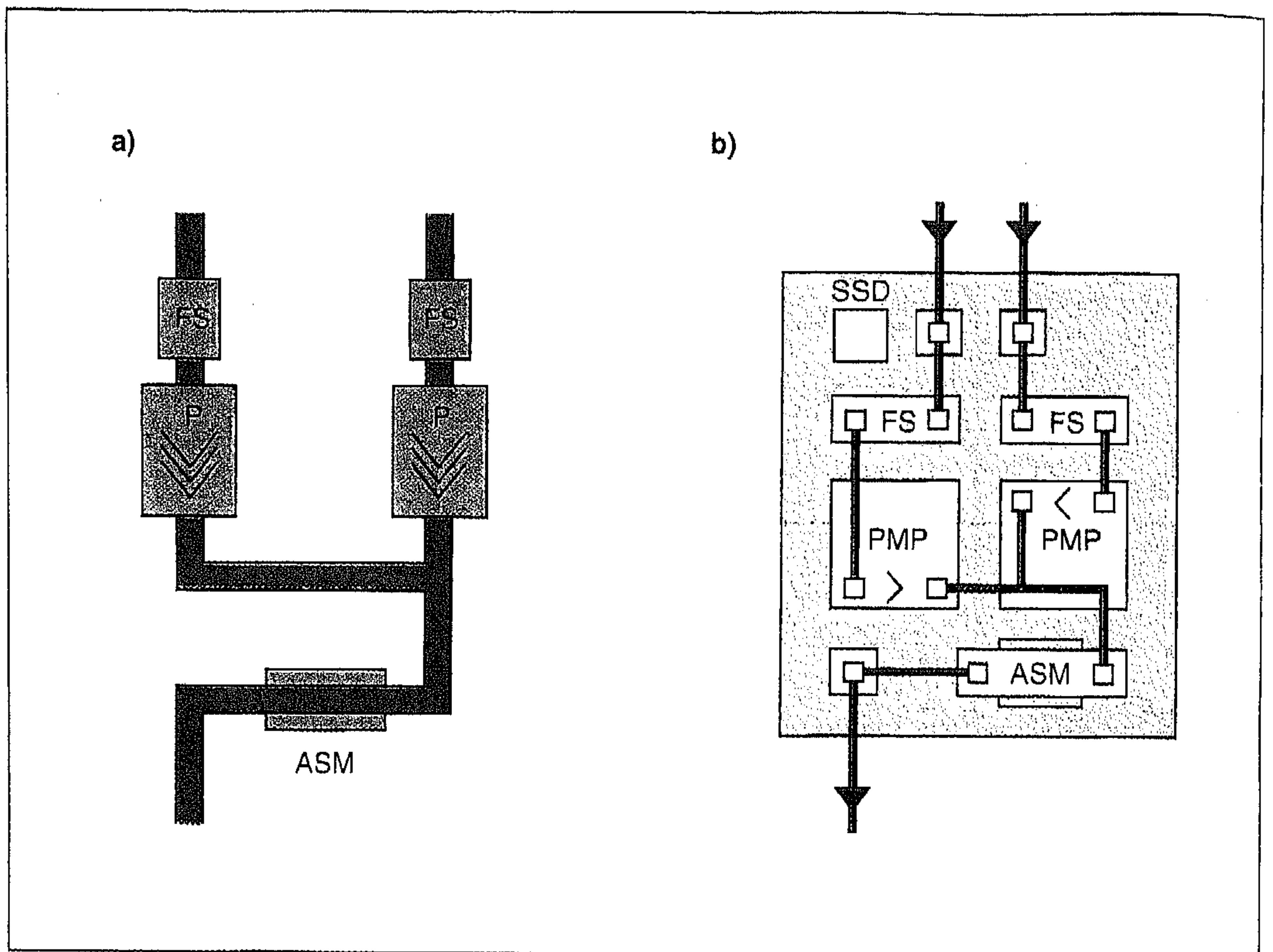


Fig. 11 Portata simulata e misurata della pompa in funzione della frequenza di eccitazione. L'ampiezza della portata simulata viene adattata alla portata reale agendo sull'ampiezza del riscaldamento.

Fig. 12 Sistema di microanalisi: (a) circuito schematico con due sensori di portata, due pompe e un modulo sensore ad assorbimento; (b) layout.



il confronto con i risultati sperimentali.

La modellazione e la simulazione con i bondgraph si è rivelata uno strumento efficace per la progettazione dei microsistemi.

È stato progettato, simulato e costruito un sistema dimostrativo miniaturizzato per l'analisi a iniezione di fluido, comprendente due micropompe, due sensori

di portata, una cella ad assorbimento ottico e l'elettronica di controllo.

Bibliografia

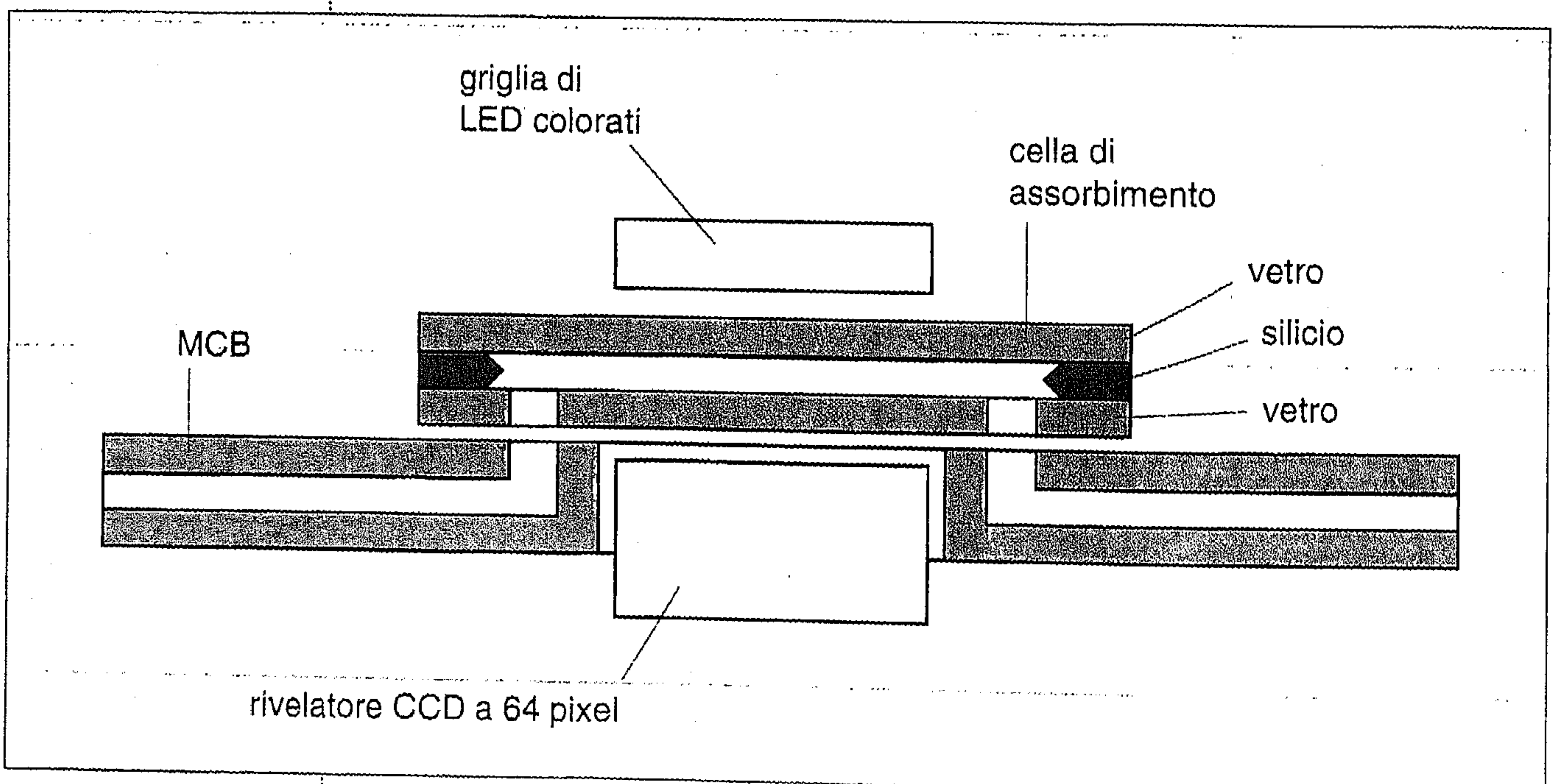
[1] A. Manz, N. Graber, H.M. Widmer, Sensors and actuators, B1, (1990), 244.
 [2] B.H. van der Schoot, E.M.J. Verpoorte, S. Jeanneret, A. Manz, N.F. de Rooij, Micro to-

tal analysis systems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Olanda (1994), 181.

[3] J.H.J. Fluitman, A. van den Berg, T.S.J. Lammerink, Micro total analysis systems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Olanda (1994), 73.

[4] M. Elwenspoek, T.S.J. Lammerink, R. Miyake, J.H.J. Fluitman, Towards integrated microliquid handling systems, Micromech. Microeng., 4, (1994), 227-245.

Fig. 13 Sezione trasversale di un rivelatore ad assorbimento ottico.



ABBREVIAZIONI

ASM	(absorption sensor module)	modulo sensore ad assorbimento
CCB	(channel circuit board)	piastra a circuito canalizzato
CCD	(charge coupled device)	dispositivo ad accoppiamento di carica
FIA	(flow injection analysis)	analisi a iniezione di fluido
FS	(flow sensor)	datore di portata
IPM	(ideal physical model)	modello fisico ideale
MAS	(micro analysis system)	sistema di microanalisi
MCB	(mixed circuit board)	piastra a circuito misto
MEMS	(micro electro mechanical system)	microsistema elettromeccanico
P, PMP	(pump)	pompa
PCB	(printed circuit board)	piastra a circuito stampato
SEM	(scanning electron microscope)	microscopio elettronico a scansione
TAS	(total analysis systems)	sistemi di analisi totale

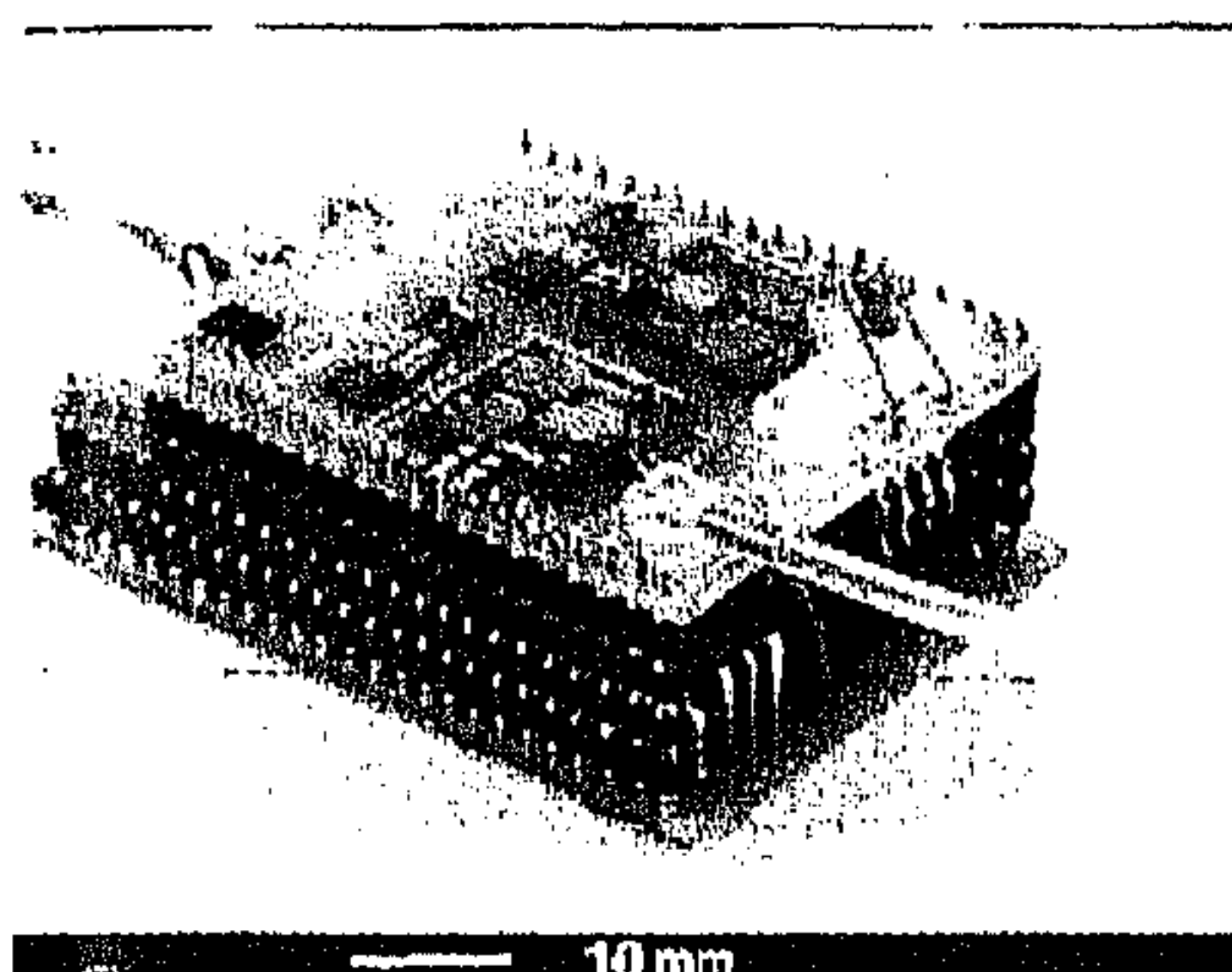


Fig. 14 Vista di insieme dell'analizzatore dimostrativo: si notano i vari moduli montati sulla MCB.

[5] S. Terry, J.H. Jerman, J.B. Angell, IEEE Trans. El. Dev. ED-26, (1979), 1880

[6] D.J. Harrison, K. Fluri, K. Sella, Z. Fan, C.S. Effenhauser, A. Manz, Science, 261, (1993), 895.

[7] G. Ocvirk, E. Verpoorte, A. Manz, M. Grassenbauer, H.M. Widmer, Analysis methods and instruments, 2 (2), (1995), 74-82.

[8] T.S.J. Lammerink, M. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman, Micro liquid dosing system Proc. MEMS '93 Conference, 1993, Fort Lauderdale, FA, USA, 25-29.

[9] B.H. van der Schoot, S. Jeanneret, A. van den Berg, N.F. de Rooij, A silicon integrated miniature chemical analysis system, Sensor and actuators B6, (1992), 57-60.

[10] T.S.J. Lammerink, N.R. Tas, J.W. Berenschot, M.C. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman, Micromachined hydraulic stable multivibrator, Proc. MEMS '95 Conference, 1995, Amsterdam, Olanda, 13-18.

[11] Informazioni dettagliate disponibili presso V.L. Spiering

[12] F.C.M. van de Pol, H.T.G.

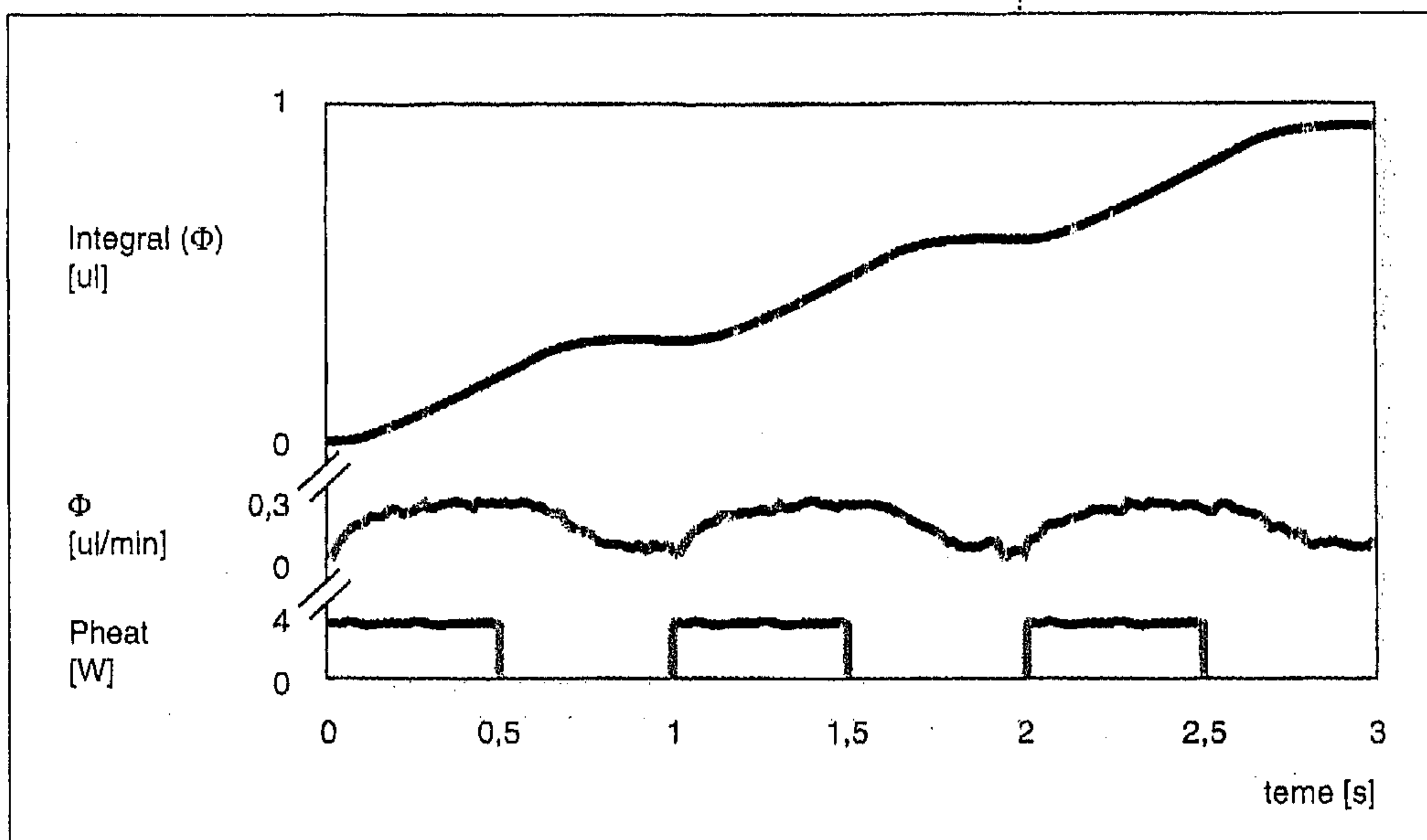


Fig. 15 Risultati delle misure sperimentali sul comportamento della pompa e del sensore di portata.

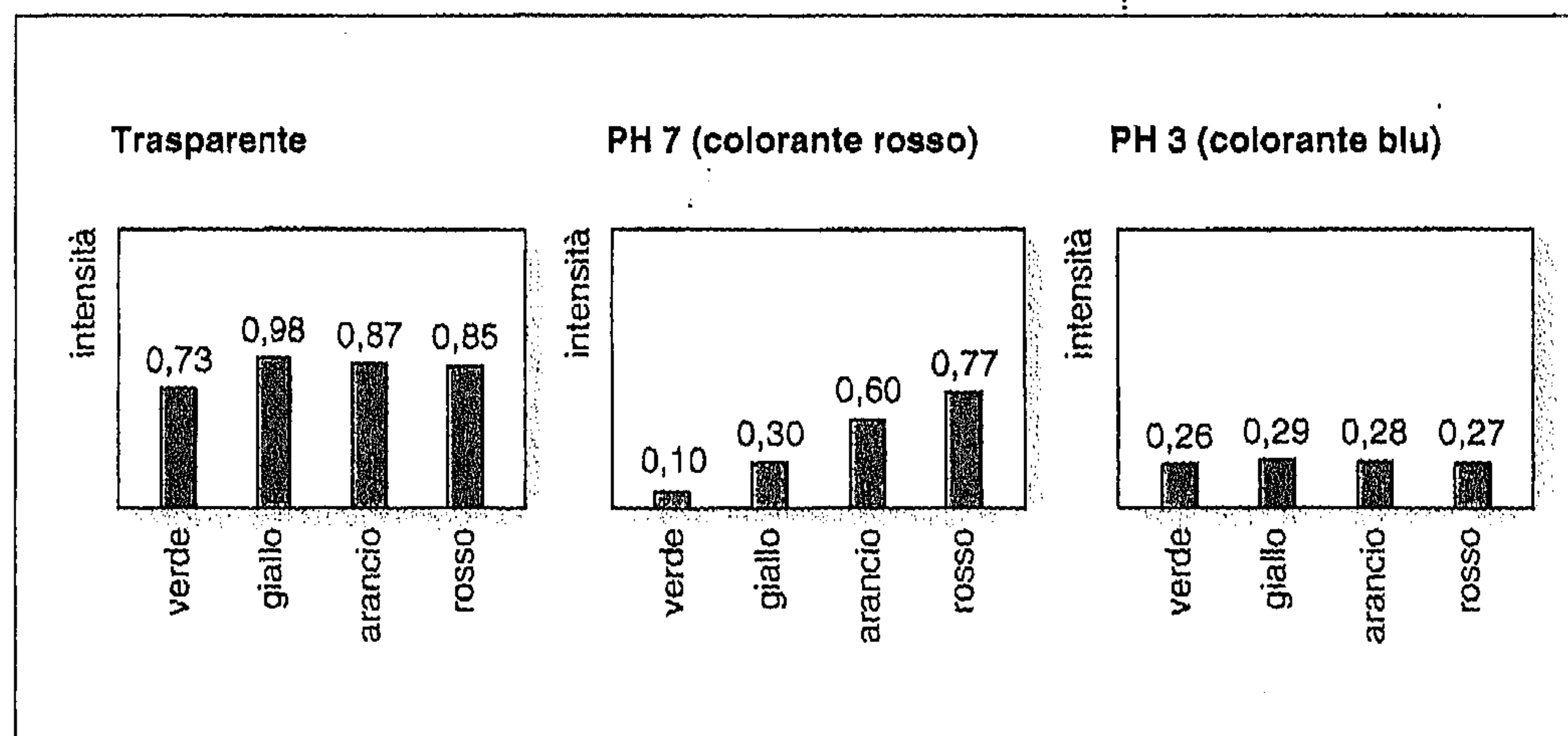


Fig. 16 Intensità misurate della luce con 4 LED colorati.

van Lintel, M.C. Elwenspoek, J.H.J. Fluitma, A thermopneumatic micropump based on micro-engineering techniques, Sensors and actuators A21-A23, (1990), 198-202

[13] 20SIM: Programma di modellazione e simulazione commercialmente disponibile, sviluppato presso l'Università di Twente, Laboratorio Con-

trolli, Facoltà di Ingegneria Elettrotecnica, Enschede, Olanda

[14] T.S.J. Lammerink, V.L. Spiering, M.C. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman, A. van den Berg, Modular concept for fluid handling systems: a demonstrator MAS, Proc. 9th IEEE Workshop on MEMS '96, San Diego, USA, (1996)