

BRESCIA

RICERCHE

PUBBLICAZIONE INN.TEC.



ANNO XIII - N. 45 - DICEMBRE 2003

SPEDIZIONE IN ABBONAMENTO POSTALE, 70% FILIALE DI BRESCIA
AUTORIZZAZIONE DEL TRIBUNALE DI BRESCIA, N. 17/1990

BRESCIA RICERCHE

RIVISTA TRIMESTRALE EDITA A CURA
DEL CONSORZIO INN.TEC. SRL
CON SEDE IN BRESCIA, VIA BRANZE, 38
P. IVA E C.F. 03067310171
DIREZIONE, AMMINISTRAZIONE E REDAZIONE
VIA BRANZE, 38 - BRESCIA
TEL. 030.3384030 - FAX 030.396999
www.inntec.it - e-mail: info@inntec.it

Direttore Responsabile
Romano Miglietti

•

Direttore Editoriale
Romano Miglietti

•

Segretarie di Redazione
Daniela Lini
Roberta Codenotti

•

Stampa
Arti Grafiche Apollonio - Brescia

•

Prezzi in Italia
Fascicolo € 3,00
Abbonamento annuo € 10,00

•

Prezzi all'estero
Fascicolo € 6,00
Abbonamento annuo € 18,00

Spedizione in abbonamento postale 70%
Filiale di Brescia

SOMMARIO

7

MOMENTI INN.TEC.

Romano Miglietti

8

STATO DELL'ARTE DELLA MICROMECCANICA: I MICROATTUATORI

Alberto Borboni, Claudio Bosio, Rodolfo Faglia

16

IL TOTAL QUALITY MANAGEMENT E IL SEI SIGMA

Francesco Aggogeri

20

SENSORE CAPACITIVO ANGOLARE PER APPLICAZIONI AUTOMOTIVE

*Alessio Ghisla, Vittorio Ferrari, Daniele Marioli, Andrea Taroni,
Stefano Pelloso, Dorian Rossetto*

25

STRUMENTI PRATICI E TEORICI A SUPPORTO DELLA GESTIONE DELL'AZIENDA MANIFATTURIERA GLOBALMENTE ESTESA

Marco Busi

33

ANALISI DI VIBRAZIONI IN SISTEMI MECCANICI PER DIAGNOSTICARE MALFUNZIONAMENTI: STATO DELL'ARTE E METODOLOGIE INNOVATIVE

*Massimo Antonini, Francesco Caruzzo, Rodolfo Faglia,
Andrea Magalini, Monica Tiboni, David Vetturi*

39

VERSO UN SERVIZIO REGIONALE LOMBARDO DI POSIZIONAMENTO GPS IN TEMPO REALE. LE DUE RETI DEMO-TEST ATTIVATE PRESSO L'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA

Matteo Sgrenzaroli, Giorgio Vassena

46

STUDIO SUL CONTROLLO DEGLI OSSIDI DI AZOTO NELLE EMISSIONI DEGLI IMPIANTI DI INCENERIMENTO DI RSU

Stefano Tenini, Gianpietro Mazelli

Gentile Lettore,

si chiude un anno caratterizzato da notevoli difficoltà per il nostro sistema economico. I dati generali evidenziano una modesta crescita del PIL nazionale e dei paesi europei a cui si contrappongono performance eccezionali delle economie asiatiche emergenti e un netto cambio di tendenza degli Stati Uniti.

Sono tuttavia diversi i casi di piccole e medie aziende bresciane che sfruttando fattori competitivi, come il design e l'innovazione tecnologica, hanno saputo inserirsi con prodotti ad alto contenuto nel mercato globale.

In un recentissimo evento, organizzato dal Consorzio Inn.Tec., alcuni di questi casi sono stati presentati con l'obiettivo di diffondere messaggi di ottimismo e testimonianze imprenditoriali nelle quali l'attitudine ad operare con determinazione investimenti in ricerca, ha consentito di conseguire significativi successi.

Cogliamo l'occasione per augurare ai nostri lettori un sereno natale e un 2004 ricco di soddisfazioni.



Romano Miglietti

STATO DELL'ARTE DELLA MICROMECCANICA: I MICROATTUATORI

di **Alberto Borboni, Claudio Bosio, Rodolfo Faglia**

Dipartimento di Ingegneria Meccanica - Università degli Studi di Brescia

ABSTRACT

Lo scopo principale di questo articolo è quello di illustrare il principio di funzionamento e le prestazioni offerte dai tradizionali attuatori **elettrostatici** ed **elettromagnetici**, seppur miniaturizzati, e microattuatori "innovativi" quali i **piezoelettrici**, quelli in **lega a memoria di forma** e **polimerici**. Per concludere si presenteranno alcuni esempi prototipali di micro-macchine per lo più costituite da

parti realizzate tramite le succitate tecniche di microlavorazione e da microattuatori che saranno descritti di seguito.

I MICROATTUATORI

La scelta di un buon microattuatore si deve compiere considerando il tipo di conversione effettuata per ottenere una determinata forza in uscita, (Tab. I), le prestazioni offerte dall'attuatore stesso, ad esempio i rapporti di potenza-

massa e coppia-velocità che sono all'origine di molte limitazioni nella fase di progetto [22], ed infine lo spazio di lavoro disponibile. Per miniaturizzare un motore elettrico dotato di alta velocità in modo che sia utilizzabile come microattuatore, si deve ricorrere alla realizzazione, estremamente difficile e complessa, di una riduzione di trasmissione. Inoltre, va aggiunto un'ulteriore riguardo sull'effettiva affidabilità di funzionamento dei microingranaggi e dell'intero apparato di trasmissione [22].

Principio di funzionamento	Attuatore	Tipo di trasmissione	Range di trasmissione	Rendimento	Velocità di risposta	Tensione di trasmissione
Elettricità statica Elettricità → forza	Elettrostatico di rotazione	Rotazione	10 Kgf	alcuni gf	1 -100 KHz	5-500 V
	Elettrostatico lineare	Diretta	10 gf	10 gf	fino a 100 KHz	5-500 V
Piezo-elettricità Elettricità → forza	Ad effetto verticale	Diretta	10 gf	4Kgf x mm ²	fino a 100 KHz	10-200V
	Bimorfo	Diretta	10 gf	10 gf	1 KHz	10-200V
	Supersonico	Rotazione	10 Kgf	4Kgf x mm ²	100 Hz-1 KHz	5-100 V
Calore Calore → forza	Memoria di forma	Diretta	10 Kgf	4Kgf x mm ²	1 KHz	fino a 5 V
	Espansione termica	Diretta	10 Kgf	4Kgf x mm ²	1 KHz	fino a 5 V
	Bimetallico	Diretta	5 Kgf	alcuni gf	1 KHz	fino a 5 V
Induzione elettromagnetica Magnetismo → forza	Ordinario	Diretta-Rotazione	10 Kgf	da alcuni gf ad alcuni Kgf	1-100 KHz	fino a 5 V
	Superconduttivo	Diretta-Rotazione	10 Kgf	alcuni gf	1 -100 KHz	fino a 5 V

Tab. I - Caratteristiche di alcuni attuatori di interesse [16].

1.1 Microattuatori Elettrostatici

I microattuatori elettrostatici sono i più semplici da realizzare, ma hanno una densità di energia limitata rispetto a quella degli elettromagnetici, tuttavia, possiedono una serie di caratteristiche che li rendono particolarmente interessanti ed adattabili ad applicazioni su microscala, tra cui la facile realizzazione su wafer di silicio e la possibilità di ottenere elevate velocità di rotazione [16].

Si possono utilizzare forze elettrostatiche per alimentare sia motori lineari che motori rotazionali [17]. Per entrambi questi tipi di microattuatori, durante la fase di progettazione, si prevede la generazione di un tipo di trasmissione normale o tangenziale. Generalmente, l'elemento base di molti attuatori **elettrostatici lineari**, è costituito da due piatti paralleli il cui principio di funzionamento si basa direttamente sulle forze coulombiane, che tendono a riallineare i piatti dopo che tra di essi è avvenuto uno spostamento relativo, (Fig. 1 a) e 1 b)). In questo modo, come è anche facilmente intuibile dalla figura 2, si possono generare degli spostamenti bidirezionali normali o tangenziali rispetto alla struttura di base.

Da semplici considerazioni geometriche e considerando il microattuttore equivalente ad un condensatore a due piatti come quello rappresentato in figura 1, si possono ricavare, tramite le seguenti relazioni, le forze esercitate dall'attuatore in caso di trasmissione normale o tangenziale:

$$F_z(z) = -\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{1}{2} \epsilon \frac{L_x L_y}{z^2} V^2$$

$$F_x(x) = -\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2} \epsilon \frac{L_y}{z} V^2$$

E' da notare in figura 2 come, per il microattuttore elettrostatico lineare a trasmissione normale, la disposizione a pettine permetta di garantire un buon valore della

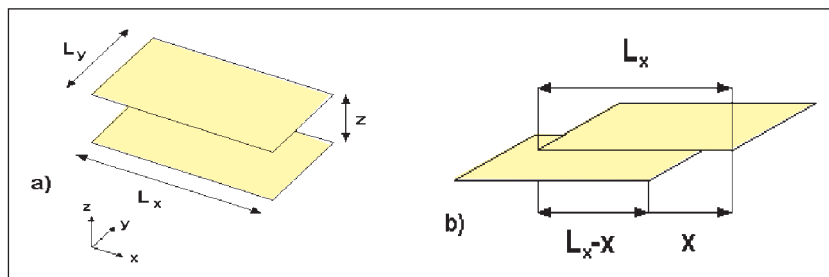


Fig. 1 - Geometria di un condensatore a piatti paralleli: a) a trasmissione normale, b) a trasmissione tangenziale [15].

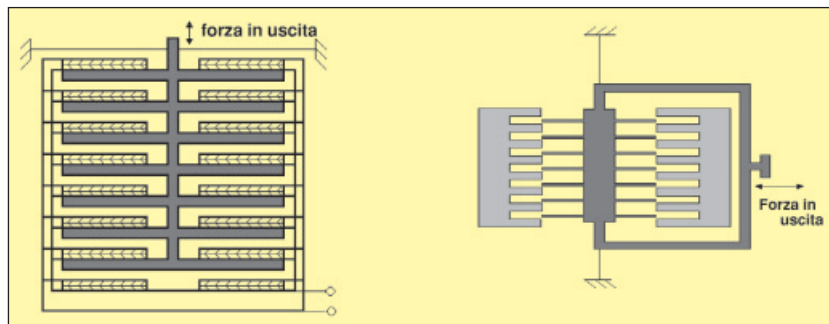


Fig. 2 - Rappresentazione di un microattuttore elettrostatico lineare a trasmissione normale e tangenziale [15].

forza in uscita, riducendo allo stesso tempo la pressione esercitata sui piatti; in questo modo si eliminano eventuali rischi di deformazioni o rotture dei piatti ed il conseguente mal funzionamento dell'attuatore stesso.

Un'altra configurazione tipica di microattuatori elettrostatici a forza normale che permette di ottenere forze sostanziali e corse piuttosto lunghe, è strutturata con piatti paralleli costituiti da lamierini a sospensione cedevole. La figura 3 rappresenta un dispositivo di questo genere nella configurazione di riposo (figura a) e di carico (figura b)), rispettivamente.

I microattuatori di **rotazione** forniscono una coppia piuttosto bassa a causa dell'attrito interno; una possibile soluzione per mi-

gliorare tale inadeguatezza per gli scopi pratici, potrebbe essere la realizzazione di una conversione delle vibrazioni in rotazioni [6], o l'impiego di microattuatori armonici caratterizzati da un raggio di 1mm, [21], e che forniscono coppie dell'ordine di 10 mNm.

Gli attuatori di rotazione si possono classificare in: top-drive, side-drive e microattuatori ad oscillazione armonica. Nei motori top-drive l'energia elettrostatica si immagazzina nel traferro formato dalla sovrapposizione degli elettrodi del rotore e dello statore. La trasmissione del motore è fornita da una forza tangenziale che allinea i poli del rotore sotto i poli eccitati dello statore. Nei motori side-drive, o micromotori a capacità variabile, l'energia viene immagazzinata tra le pareti la-

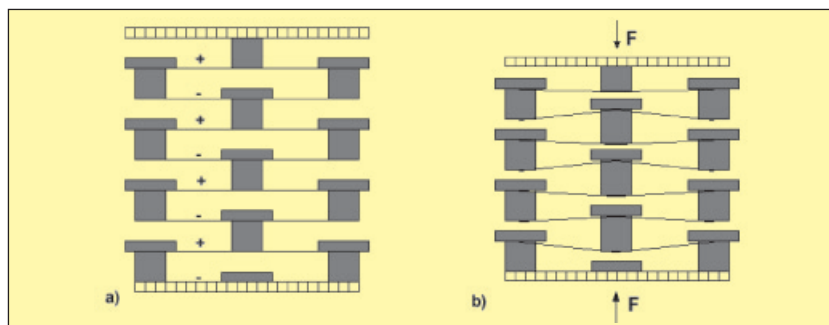


Fig. 3 - Rappresentazione di un microattuttore a lamierini a sospensione cedevole [15].

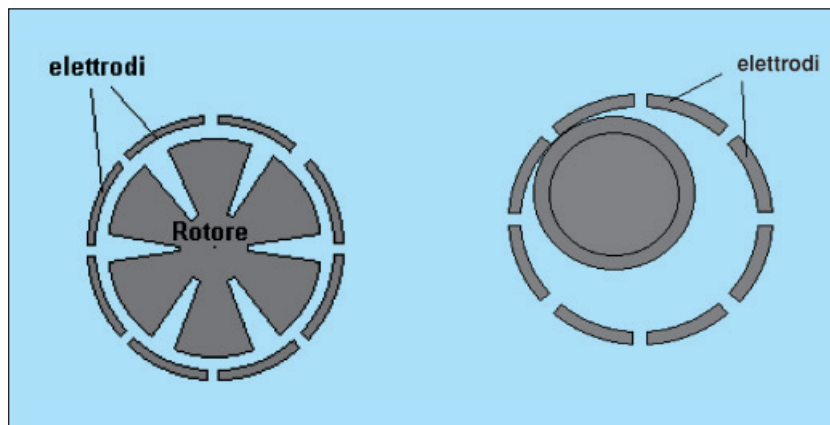


Fig. 4 - Rappresentazione di un microattuatore elettrostatico di rotazione semplice ed uno armonico [21].

Alcune tra le principali caratteristiche dei microattuatori elettrostatici di rotazione sono riportate nella tabella 2.

Raggio [m]	Velocità di rotazione [rads ⁻¹]	Coppia [Nm]	Densità di potenza [Wm ⁻²]	Picco di campo [Vm ⁻¹]
65 x 10 ⁻⁶	1500	10 ⁻¹¹	4 x 10 ⁻³	10 ⁸
1,6 x 10 ⁻³	?	7 x 10 ⁻⁴	?	6 x 10 ⁷

Tab. 2 - Caratteristiche di alcuni microattuatori di rotazione [2].

terali dei poli del rotore e dello statore. Come per i top-drive, il principio di funzionamento dei side-drive sfrutta una forza tangenziale tra il rotore ed i poli eccitati dello statore.

Nei microattuatori ad oscillazione armonica il rotore si mette in contatto con lo statore in un punto di rotazione, la cui forza risultante produce una coppia attorno al punto stesso. Le reazioni nel punto di contatto sono supportate le une dalle altre da un contatto ad attrito, oppure dalle caratteristiche geometriche, come accade per esempio nei denti degli ingranaggi.

I.2 Microattuatori Elettromagnetici

Nel microdominio, gli attuatori elettromagnetici possiedono le stesse capacità degli attuatori elettrostatici, da un punto di vista ingegneristico, presentano un moto uniforme dovuto al loro principio di funzionamento intrinseco. A dispetto di questa enorme potenzialità esistono alcuni problemi tecnologici legati alla loro realizzabilità e a difficoltà che sorgono, non solo per quanto concerne la realizzazione fisica

della struttura del motore, ma soprattutto nella generazione di un campo magnetico intenso. Ciò è dovuto principalmente a causa del numero e delle dimensioni molto ridotte dei cavi elettrici. Un altro degli inconvenienti più significativi degli attuatori magnetici è la dissipazione interna di energia, che avviene nelle spire durante il mantenimento di una forza ad un valore costante.

Il più semplice modello di attuttore elettromagnetico è costituito da un cavo percorso da corrente che genera un campo magnetico. La forza si esprime attraverso la nota relazione:

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

Recentemente Holtzer et al. (1995) hanno dimostrato che applicando una corrente di soli 20 mA su una sottile spira di alluminio si ottengono 20 mm di spostamento ed una forza stimata attorno a 0,1 mN.

Un tradizionale attuttore elettromagnetico è raffigurato in figura 5. Il principio di funzionamento di questi dispositivi sfrutta la concentrazione del flusso magnetico in piccoli intervalli di spazio.

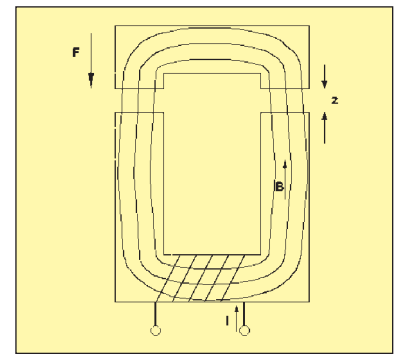


Fig. 5 - Schema di un attuttore elettromagnetico lineare [6].

La forza in direzione normale è data da:

$$F_z(z) = -\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{A}{z^2} (NI)^2$$

dove H rappresenta il campo magnetico, μ_0 la permeabilità dello spazio libero ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$), N il numero di spire, z lo spessore dell'interspazio, ed A l'area dell'interspazio.

Ahn et al hanno realizzato un attuttore elettromagnetico di rotazione con un diametro di 1,5 mm in grado di generare una coppia di 1,2 mNm [10].

I.3 Microattuatori Piezoelettrici

Gli attuatori piezoelettrici si basano sulla conversione dell'energia elettrica in energia meccanica tramite un effetto caratteristico di materiali quali il quarzo, le ceramiche e i polimeri. Possono avere diversi tipi di configurazione ottenute dalla stratificazione o, semplicemente, come sovrapposizione di fogli sottili per originare una struttura a singola piastra, bimorfa o a struttura stratificata. Tuttavia il modello a singola piastra è scarsamente impiegato perché necessita di un alto voltaggio. Il modello a piastra bimorfa realizza grandi spostamenti a discapito di una forza in uscita molto bassa. Infine, il modello a struttura stratificata è costituito da una pila di strati ceramici sottili, che può generare piccoli spostamenti con una tensione relativamente bassa [11].

In figura 6 è rappresentato un particolare microattuatore piezoelettrico bimorfo, per il quale si è valutato, tramite la relazione riporta-

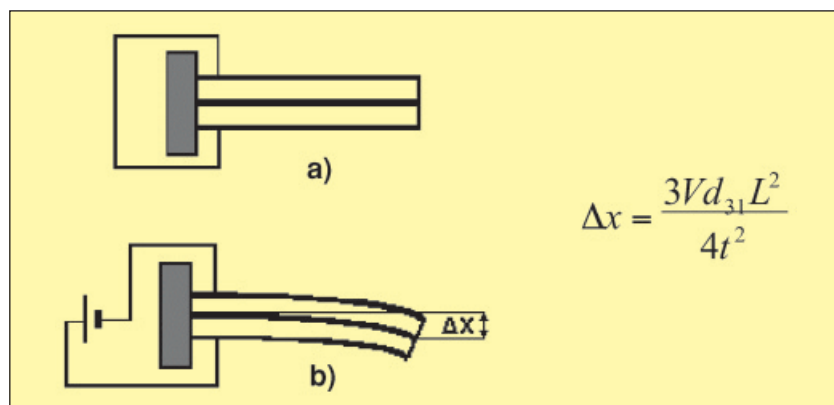


Fig. 6. Rappresentazione di un microattuatore piezoelettrico dimorfo a cui è applicata una tensione di 100 V (figura b)) e nella configurazione di riposo (figura a)) [Baglio 3].

ta di seguito, che per una lunghezza effettiva dell'attuatore di 15 mm ed applicando una tensione di 100 V, si ottiene un'inflexione massima di 36 micron.

Recentemente è stato proposto un interessante motore piezoelettrico in miniatura per applicazioni robotiche [3], che sfrutta il cosiddetto impact drive mechanism (IDM) in cui si coinvolgono la forza d'attrito e quella d'inerzia generate dalla rapida deformazione degli elementi piezoelettrici. Il motore include due parti essenziali: una parte avente una grossa massa (il corpo del robot) ed una parte avente una massa un po' più piccola, connesse da un elemento piezoelettrico. Il ciclo di funzionamento del motore è composto da cinque passi. La semplicità di questo meccanismo permette una miniaturizzazione molto spinta. In aggiunta, poiché con questo dispositivo è possibile produrre spostamenti compresi tra qualche nanometro e qualche micrometro, è meglio adattabile dei micromotori

ultrasonici per il posizionamento di precisione.

1.4 Microattuatori in lega a memoria di forma (SMA)

Le leghe a memoria di forma, in particolare la lega NiTi, sono un punto di forza per le applicazioni nel campo della microrobotica. Queste leghe hanno la capacità di recuperare parzialmente o a pieno la loro forma originaria, anche se sottoposte ad una deformazione apparentemente plastica, se successivamente sono riscaldate ad una temperatura caratteristica. Questa proprietà è conosciuta come shape memory effect (SME) ed è dovuta alla fase di trasformazione tra martensite ed austenite senza diffusione di massa.

Gli attuatori a memoria di forma sono caratterizzati da un basso rendimento che non va oltre il valore teorico del 10%; in pratica hanno un rendimento che, spesso, supera di poco l'1%. Tuttavia, gli attuatori a memoria di forma hanno alcuni vantaggi che risiedono nella

semplicità di approccio a presa diretta che limita il numero dei componenti e permette un'integrazione reale degli elementi di attivazione con la struttura, inoltre, la tensione richiesta per generare un effetto Joule in grado di riscaldare gli elementi a memoria di forma per l'azionamento corrisponde a quella disponibile nei circuiti integrati. Alcune interessanti applicazioni degli attuatori in lega a memoria di forma investono il settore della realizzazione di piccoli giunti per bracci di robot che lavorano sotto un microscopio e per l'attuazione di end-effectors in strumenti biomedicali come cateteri ed endoscopi [25]. Un altro interessante esempio di questo tipo di attuatore, è una valvola in miniatura la cui dimensione è adatta per la cromatografia miniaturizzata a gas. La valvola è realizzata tramite il deposito di una membrana di NiTi su uno strato sacrificale sopra un foro in un wafer di silicio. Alcuni ricercatori giapponesi hanno descritto un tipo di attuatore a memoria di forma che è riportato in figura 7 [20]. La struttura di azionamento denominata Mollusc Type incorpora dei sottili cavi a memoria di forma ottenuti con la tecnica dello sputtering su diversi substrati.

1.5 Microattuatori Polimerici

I cosiddetti attuatori polimerici costituiscono un nuovo concetto di attuatore a fluido. Furono introdotti per la prima volta nel dominio della microrobotica per applicazioni in cui si richiedeva un funzionamento lineare e sicuro. Possono essere guidati da un sistema idraulico o pneumatico. Recentemente il concetto di attuatori polimerici si è esteso al dominio della microrobotica dove sono previste diverse applicazioni, specialmente nel settore della medicina, della biologia e della micromanipolazione. Recentemente è stato presentato da Suzumori et al un prototipo di questo tipo di attuatore in grado di simulare il comportamento di una micropinza di presa capace di generare una forza di presa di 2 N [9]. Essi hanno sviluppa-

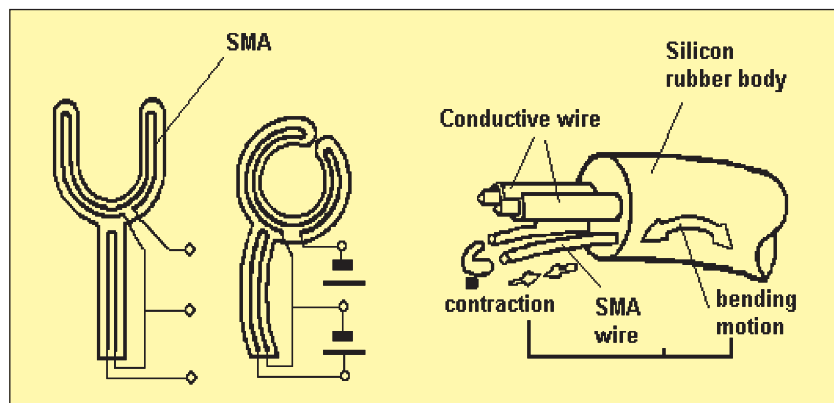


Fig. 7 - Rappresentazione del Mollusc Type [9]

to il microattuatore polimerico con una fibra rinforzata al silicio avente da uno a tre gradi di libertà. Il principio di funzionamento è mostrato in figura 8.

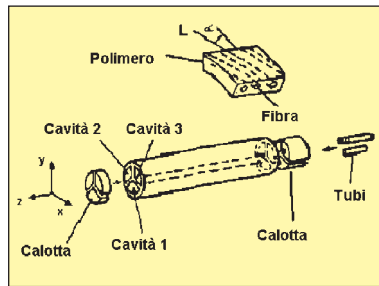


Fig. 8 - Struttura e principio di funzionamento di un miniattuatore polimerico [9].

Gli attuatori flessibili hanno alcune caratteristiche che li rendono molto interessanti; in particolare sono facilmente miniaturizzabili, hanno una struttura semplice e compatta che li rende versatili per diversi tipi di mansione. Hanno diversi gradi di libertà e alta densità di potenza che è inversamente proporzionale alle dimensioni; e in aggiunta, i meccanismi di guida non prevedono attrito.

2 ESEMPI APPLICATIVI

Di seguito si propongono alcuni esempi di microsistemi e microrobot impiegati in diversi settori della robotica che spaziano dalla microchirurgia alle applicazioni spaziali.

2.1 Applicazioni Medicali

La nuova chirurgia, intendendo con tale termine la chirurgia mini-invasiva, la microchirurgia, la chirurgia stereotassica e in generale la chirurgia robotizzata, ha iniziato un'evoluzione ad intenso uso tecnologico, che offre migliori prestazioni ai pazienti ed enormi opportunità ai produttori di strumentazioni biomedicali [26].

Le tecniche proprie della chirurgia mini-invasiva, incluse l'endoscopia (chirurgia gastrointestinale), la laparoscopia (chirurgia addominale) e la chirurgia toracoscopica, stanno rivoluzionando la chirurgia. Queste tecniche, che prevedono l'inserimento di strumenti chirurgici nel corpo del paziente attraverso orifizi naturali o piccole inci-

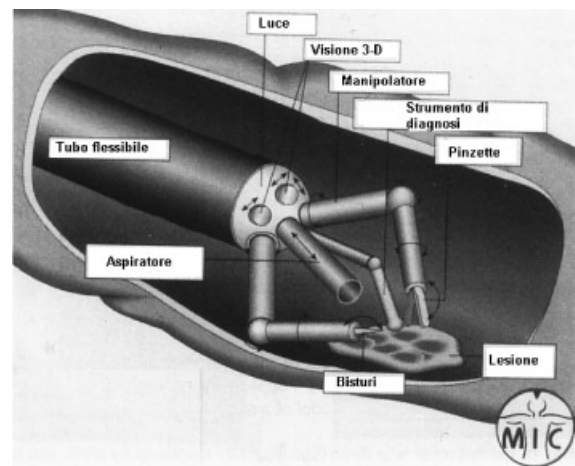


Fig. 9. Immagine di un manipolatore endoluminale per interventi di asportazione di tessuto tumorale [7].

sioni, hanno molti vantaggi sulle tradizionali tecniche operatorie.

Un esempio tra le applicazioni più promettenti è rappresentato dalla laparoscopia pelvica, che combina l'atto diagnostico con quello chirurgico e sta diventando di elezione per molte patologie ginecologiche. Il vantaggio più significativo consiste certamente nella minimizzazione dei traumi a carico di tessuti sani con una conseguente riduzione dei tempi di ospedalizzazione e del rischio di complicazioni post-operatorie quali ad esempio l'insorgere di infezioni.

In figura 9 si riporta un'immagine di un manipolatore endoluminale. Questo apparecchio è stato progettato, prendendo spunto e perfezionando la tecnica della colonoscopia per diagnosticare ed asportare tessuti tumorali. Un tubo flessibile ed una testa multifunzionale sono le parti principali che costituiscono il sistema. Il tubo flessibile è infilato nella via rettale ed ha il compito di raggiungere l'area da operare. La testa, invece, dispone di alcune appendici sulla sua sommità, tra cui un modulo di manipolazione, un modulo di visione ed

uno di diagnosi.

Un esempio di strumento chirurgico endoluminale ancor più evoluto si configura nelle micromacchine semiautonome, in cui lo strumento stesso è in grado di separarsi da un'unità di trasporto per effettuare iniezioni anestetizzanti o altri trattamenti locali. In figura 10 è rappresentato questo nuovo prototipo di manipolatore endoluminale.

I microsistemi mostrati precedentemente presentano dei limiti piuttosto severi al diminuire del diametro dell'endoscopio e all'aumentare dei gradi di libertà cinematici necessari per consentire il raggiungimento di zone difficili o quasi inaccessibili [24].

La movimentazione di questi strumenti vede un impiego sempre più marcato di attuatori in leghe a memoria di forma e materiali piezoelettrici. In figura 10 è anche rappresentato lo schema di un endoscopio, in cui si rilevano spire in lega a memoria di forma, che consentono di rendere la sommità dello strumento snodata e quindi molto manovrabile per facilitarne l'inserimento in vasi sanguigni o stretti orifizi.

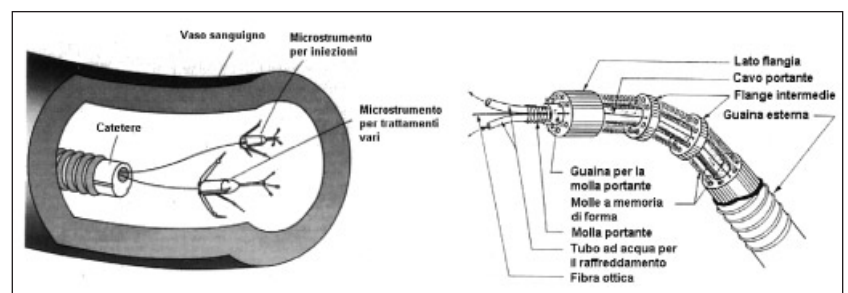


Fig. 10 - Catetere con appendici per applicazioni microchirurgiche [18] ed endoscopio realizzato tramite molle in lega a memoria di forma [13].

Il principio di funzionamento delle molle in lega a memoria di forma, è attuato tramite riscaldamento elettrico e raffreddamento ad acqua, oppure con altri mezzi atti ad incrementare la loro frequenza di funzionamento.

In [8] si è sviluppato un endoscopio robot progettato per eseguire colonscopie muovendosi autonomamente lungo l'intestino (figura 11). L'endoscopio robot è progettato per accedere direttamente e visualizzare l'intero tratto gastrointestinale. Il prototipo termina con dei cavi che sono trascinati all'interno dell'intestino; essi sono caratterizzati da un cavo elettrico per il controllo del segnale, dei tubi per connettere gli attuatori ed un fascio di fibre ottiche per illuminare e visualizzare l'area anti-stante il sistema robotizzato [8].

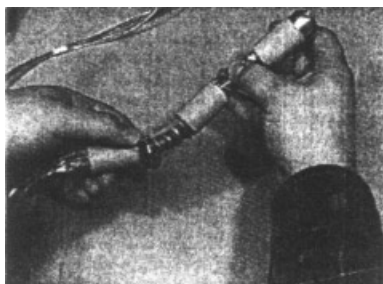


Fig. 11 - Endoscopio robot [8].

Per concludere si riporta l'esempio di una mano articolata robotica composta da quattro dita, ognuna della quali formata da tre links collegati da quattro giunti. La mano ha un peso complessivo di 1800 g e sviluppa una forza di 11 N, il suo compito è quello di afferrare, sollevare e manipolare oggetti di varia forma e superficie. La dotazione sensoristica che equipaggia la mano è di tutto rispetto: ogni dito è infatti munito di ben 25 sensori.

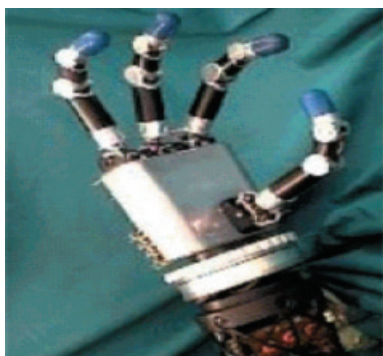


Fig. 12 - Schema della mano articolata robotica [4].

2.2 Applicazioni di microassemblaggio

La realizzazione di sistemi che adempiano ai compiti di microassemblaggio, richiede tre tipi di tecnologie chiave: il metodo di osservazione di parti dalle dimensioni molto ridotte, la calibrazione delle forze per il serraggio e la movimentazione di oggetti microscopici, e la tecnologia in grado di effettuare spostamenti micro. Oggi, l'applicazione di pinze per la manipolazione e l'assemblaggio di microstrutture progettate in modo speciale, è un'importante condizione per l'industrializzazione della tecnologia di microrobot. La manipolazione e l'assemblaggio, sono il passo più importante ed innovativo che determina il salto da un microsistema ad un promettente microrobot.

Ci sono diversi principi che possono essere applicati per la micromanipolazione: principio a vuoto, pinze meccaniche, pinze guidate elettrostaticamente o elettromagneticamente. Qui si propone di illustrare il progetto di una micropinza meccanica per il generico scopo di assemblare microcomponenti. Il progetto è stato determinato dai seguenti requisiti: il campo di afferraggio all'estremità della pinza deve avere delle dimensioni di $100 \times 150 \mu\text{m}$ ed un'altezza di $50 \mu\text{m}$, l'apertura o la chiusura di entrambe le estremità della pinza devono avvenire parallelamente, il progetto delle micropinze deve prevedere la manipolazione di oggetti che abbiano una dimensione da $10 \mu\text{m}$ fino a 2 mm, infine, i materiali usati per la realizzazione delle pinze devono esse-

re acciai (rispettano tutte le richieste sulla stabilità ed elasticità meccanica).

2.3 Applicazioni di microposizionamento

Le macchine ad architettura cinematica parallela stanno assumendo una sempre maggiore rilevanza industriale ed economica in differenti campi applicativi. Le macchine parallele solitamente consistono in una piattaforma mobile che è connessa al telaio da bracci uguali; tipicamente il numero di bracci è uguale al numero di mobilità del meccanismo così che ogni braccio è controllato da un attuatore; per questo motivo le macchine parallele sono a volte chiamate piattaforme o macchine a catena cinematica chiusa, perché è possibile identificare più circuiti chiusi che connettono tra loro i vari membri. La maggior parte delle macchine parallele attualmente realizzate è composta da sei assi controllati e pertanto consente di effettuare movimenti a sei gradi di libertà nello spazio, tramite lo spostamento di sei bracci estensibili. Queste macchine, proprio per la particolare natura della loro struttura cinematica, possiedono molti vantaggi rispetto alle strutture seriali.

L'esapode M-850 è un sistema di microposizionamento a sei gradi di libertà disponibile in commercio e con una risoluzione di 1 mm che permette all'utente di definire il punto rotante internamente o esternamente alla struttura del sistema. Tale rotazione, si può definire con una risoluzione del microradiante su uno qualsiasi degli assi di rotazione.

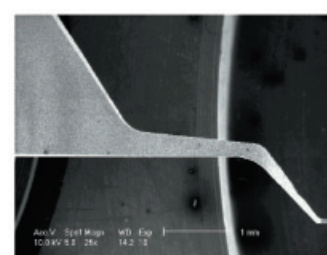
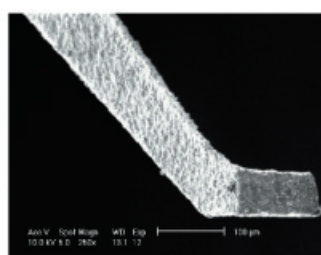


Fig. 13. Rappresentazione della micropinza complessiva con particolare attenzione rivolta alla posizione dei sensori ottici e della "freccia" [5] e vista di lato. Si può notare l'angolo di 30° che facilita il compito di afferraggio ed assemblaggio di microcomponenti [14].

Vantaggi	Svantaggi
Elevata capacità di carico	Difficoltà di progettazione
Elevata rigidezza	Spazio di lavoro limitato e dalla geometria complessa
Frequenze naturali elevate	Bassa destrezza e singolarità interne allo spazio di lavoro
Basse masse in movimento	Complessità delle relazioni cinematiche
Elevate accelerazioni	Sensibilità agli effetti termici
Ottima accuratezza	Difficoltà di calibrazione
Costruzione meccanica semplice e modulare	

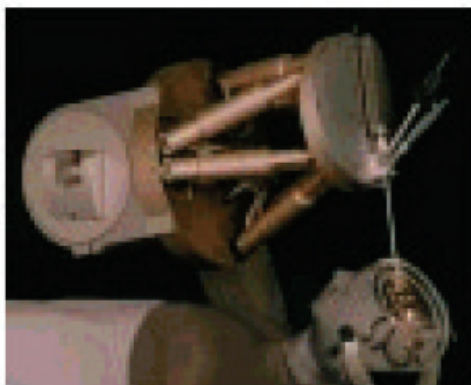
Tab. 3 - Vantaggi e svantaggi offerti da robot a cinematismo parallelo [23].



Fig. 14 - Esapode M-850 [19].

Oltre ai sei gradi di libertà, l'M-850 offre la possibilità di poter lavorare in qualsiasi orientamento, una capacità di carico verticale di 200 Kg e 50 Kg di carico per un orientamento casuale, una ripetibilità di ± 1 mm per l'asse z e ± 2 mm per i movimenti combinati degli altri assi, ed infine una maggior rigidità durante il movimento ed il posizionamento dei tradizionali sistemi multi-asse.

I principali settori di applicazione dell'esapode M-850 sono: assistenza per interventi chirurgici, posizionamento di strumenti ottici, laser, o altre sorgenti luminose, posizionamento di specchi per tele-



scopi astronomici, strumento di controllo per la lavorazione di precisione e di manifattura.

2.4 Microrobot per l'ispezione e la manutenzione di impianti industriali

Questo tipo di applicazione, richiama attorno a sé un grande interesse, ma allo stesso tempo ripropone gli stessi limiti e gli stessi problemi incontrati nel settore della microchirurgia.

Ai sistemi proposti, deve spettare il compito di ispezionare e riparare i difetti riscontrati all'interno di scambiatori di calore, condotte di impianti di generazione

di energia elettrica o nucleare. Uno dei progetti più avanzati, è stato proposto dalla Micro Machine Project in cui si coinvolge lo sviluppo simultaneo di quattro moduli ben distinti e caratterizzati da diversi tipi di funzionalità, (figura 15).

In figura si possono distinguere chiaramente i quattro moduli e le loro caratteristiche funzionali. La microcapsula presenta un diametro di 2 mm ed include un meccanismo direzionale, una microdinamo, un microgiroscopio ed un dentatore di frammenti. Un altro componente della microcapsula particolarmente interessante è il microgeneratore; caratterizzato da un diametro di 1,2 mm, è formato da un rotore cilindrico a magneti permanenti che sviluppa punte di energia fino a 120 kJ/m³ e realizzato con un film sottile di 12 nm. La nave madre ha un diametro di 10 mm e rappresenta il modulo principale. Essa è costituita da un microgeneratore di potenza (batteria), un dispositivo elettrostatico necessario per la guida, dei morsetti pneumatici ed uno scanner ottico. Dopo aver eseguito delle accurate ispezioni ed analisi, i dati raccolti sono inviati, attraverso la nave madre, al controllo centrale.

Il modulo di ispezione senza cavi, la cui figura ne riporta le diverse parti, è realizzato in un diametro di 2,5 mm in cui sono presenti un microattuatore piezoelettrico, un meccanismo di guida a vite senza fine, un microsensore visivo, un

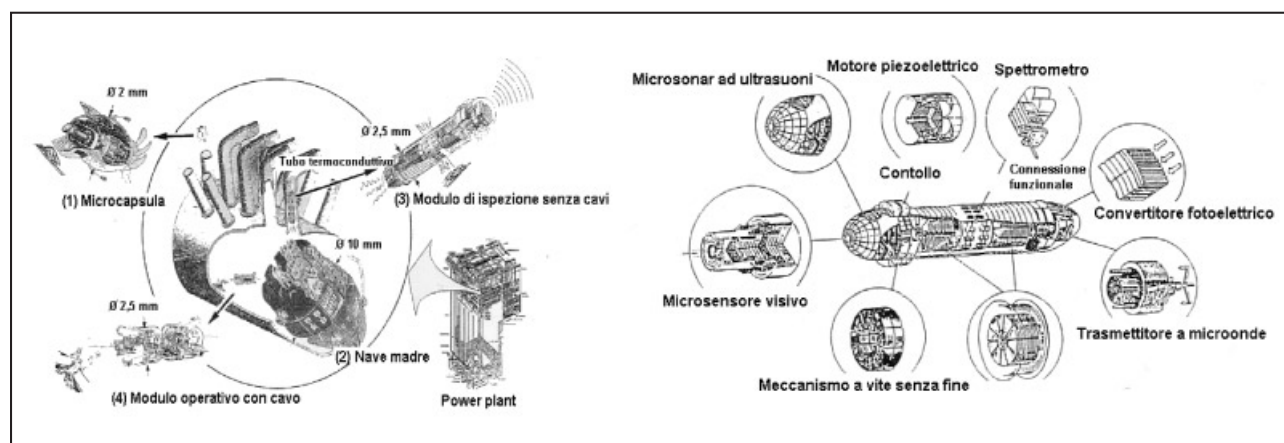


Fig. 15 - Schema di un prototipo di microrobot per l'ispezione e riparazione di impianti industriali, termici e nucleari, di un modulo di ispezione senza cavi e delle principali parti che lo caratterizzano [12].

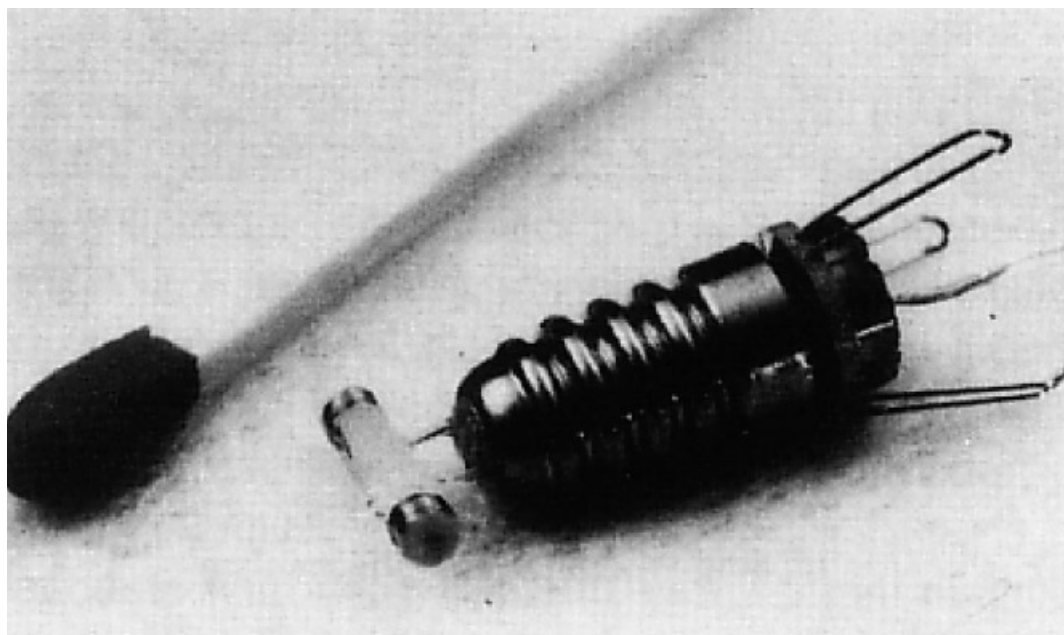


Fig.16 -
Micromacchina per
ispezioni sviluppata
dalla Nippodens Co,
Ltd [15].

microsonar ad ultrasuoni, un trasmettitore a microonde, un convertitore fotoelettrico ed uno spettrometro.

Il modulo operativo, invece, ha un diametro di 2,5 mm ed un cavo di collegamento che comprende un meccanismo di movimentazione a treno di ingranaggi, un manipolatore a diversi gradi di libertà, un dispositivo per fotostimolazione, un generatore fotoelettrico ed un booster.

Prima di arrivare alla forma definitiva della microcapsula, è stato proposto un prototipo di micromacchina per ispezione, elaborata dalla Nippodens Co, Ltd, ed illustrata in figura 16. Il prototipo è caratterizzato da un diametro di 5,5 mm ed una massa di 1 g in cui sono contenuti un sensore a correnti parassite di 2,2 mm di diametro ed un attuttore piezoelettrico di $2 \times 3 \times 9 \text{ mm}^3$.

Ringraziamenti

Questa ricerca è sostenuta dal fondo di finanziamento COFIN-MIUR 2003.

Bibliografia

- [1] A.A.V.V., Proceedings of the International Symposia on Micro Machine and Human Science 1990 -1995, Nagoya (Japan)
- [2] Bart S. F., Howe R.T., Lang J. H., Lober T.A., Schiccht M. F. (1988) Design considerations for micromachined electric actuators. Sensors Actuators vol 14 num 3, pp.269-292
- [3] Beneke W., Wagner B. (1991) Micro-fabricated actuator with moving permanent magnet. Proc. IEEE MicroElectro Mechanical Systems Nara (Japan), pp. 321-387
- [4] Bergamasco M., Dario P., Salsedo F. (1989) Shape memory alloy micromotors for direct-drive actuation of dexterous artificial hands. Sensors Actuators, pp. 115-119
- [5] Böhringer K., Cohn M., Goklberg K., Howe R., Keller C., Noworolsky J., Singh A. (1998) Microassembly technologies for MEMS. in Proc. SPIE Micromachining and Microfabrication Santa Clara (CA), pp. 216
- [6] Branebjerg J., Gravesen P. (1992) A new electrostatic actuator providing improved stroke and force. Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Travemunde (Germany), pp. 24-172
- [7] Buess G., Schurr M. O., (1995) MST News, pp. 1-13
- [8] Burdick J., Grundfest W., Slatkin B. (1995) Proceedings of IEEE '95 IROS Conf., Pittsburgh (PA), Vol. 2, pp. 162
- [9] Buss M., Fukuda T., Kawauchi Y., Nakagawa S. (1988) Self organizing robots based on cell structures. CEBOT ProC. IROS Tokyo (Japan), pp. 50-145
- [10] Choi B., Christenson T.R., Guckel H., Han S., Klein J., Lovell E.G., Skrobis K.J. (1991) Fabrication of assembled micro-mechanical components via deep x-ray lithography. Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Nara (Japan), pp. 37-134
- [11] Choi W., Smits J. G. (1991) The constituent equations on piezoelectric: heterogeneous bimorphs. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics Frequency Control UFFC-38, pp. 18-74
- [12] Cohn M. B., Crawford L. S., Wendlandt J. M., Sastry S. S. (1995) J. Robotic Systems, pp. 6-401
- [13] Dario P., Pardini M., Sabatini A., Valleggi R. (1991) Proceedings of MEMS '91, Nara (Japan), pp. 1-17
- [14] Fatikow S., Rembold U. (1997) Microsystems Technology and Micro-robotics. Springer-Verlag, Berlin (Germany)
- [15] Fujita H., Katsurai M., Kim Y. (1990) Fabrication and testing of a micro superconducting actuator using the Meissner effect. IEEE Inf. Conf. on Robotics and Automation USA, pp. 78-134
- [16] Gabriel K. J., Trimmer W.S.N. (1987) Design considerations for a practical electrostatic micro-motor. Sensors Actuators II, pp. 58-91
- [17] Gianchandani Y., Najafi K. (1992) Batch fabrication and assembly of micro-motor-driven mechanism with multi-level linkages. Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Travemunde (Germany), pp. 167-234
- [18] Hirose S., Ikuta K., Tsukamoto M. (1988) Proceedings of 1988 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Philadelphia, pp. 427
- [19] Hollingum J. (1997) Hexapods to take over? Industrial Robot, pp. 428-431.
- [20] Homma D., Iguchi N., Miwa Y. (1990) Micro robots and micro mechanisms using shape memory alloy. Integrated Micro-Morion Systems ed F Harashima Amsterdam (Holland), pp. 225-341
- [21] Jacobsen S.C., Price R. H., Rafaelof M., Rytting T.H., Wood J. E. (1989) The wobble motor: design, fabrication and testing of an eccentric-motion electrostatic microactuator. Int. Conf. on Robotics and Automation. Scottsdale (AZ), pp. 73-97
- [22] Jebens R., Trimmer W. (1989) Actuators for micro robots. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation Scottsdale (AZ), pp. 46-103
- [23] Merlet J.P. (2000) Parallel Robots, Kluwer, Dordrecht
- [24] Narumiya H. H. (1993) Proceedings of LARP Workshop on Micromachine Technologies and Systems, Tokyo (Japan), pp. 50
- [25] Paros J.M., Weisbord L. (1965) How to design Flexure Hinges. Machine Design, pp. 174-198
- [26] Younse J. (1993) IEEE Spectrum, pp. 27

IL TOTAL QUALITY MANAGEMENT E IL SEI SIGMA

di Francesco Aggogeri

Dipartimento di Ingegneria Meccanica - Università degli Studi di Brescia

ABSTRACT

La dinamicità del mercato attuale caratterizzato da clienti sempre più attenti ed esigenti ha imposto alle aziende, per sostenere la propria capacità competitiva, livelli di servizio sempre più qualificati. In altre parole gli standard qualitativi dell'output offerto, la rapidità e la modalità di consegna e la prontezza di introduzione di nuovi prodotti / servizi, sono diventati fattori determinanti per il successo del business aziendale.

In questo contesto è risultato indispensabile l'applicazione di metodologie di ottimizzazione e miglioramento delle performance aziendali, che hanno suggerito tecniche e metodi innovativi per gestire ed organizzare processi industriali, sia rivolti alla realizzazione di un bene che di un servizio.

Il Total Quality Management (TQM) e, più recentemente, il Sei Sigma rispondono perfettamente alle esigenze di tutte quelle aziende che vogliono perseguire la soddisfazione del cliente finale attraverso un processo di miglioramento continuo. Entrambe le discipline permettono attraverso filosofie gestionali ed operative delle attività aziendali di garantire significativi cambiamenti nei modi di operare delle imprese e nei risultati che esse ottengono.

L'approccio suggerito non ha solo l'obiettivo di modificare e migliorare le business performance di



una realtà industriale, ma anche di creare in ciascun addetto coinvolto la consapevolezza dell'importanza di un nuovo modo di agire e di concepire il miglioramento continuo [1].

La *customer satisfaction* viene raggiunta attraverso il miglioramento del bene / servizio offerto, quale risultato di una riduzione significativa di tutti gli sprechi e di tutte le attività a non valore aggiunto che sono presenti nella realizzazione dell'output. La soddisfazione del cliente si sviluppa aumentando le prestazioni aziendali, incrementando quindi la produttività.

Il Total Quality Management e il Sei Sigma hanno origini e aspetti differenti, ma, perseguendo lo stesso obiettivo, sono accomunate da logiche e metodi molto simili, che hanno riscontrato un significativo successo per la semplice ed immediata applicazione.

L'implementazione di una metodologia di miglioramento continuo deve avere un impatto importante sulla realtà aziendale, portando un

modo diverso di approcciarsi alle problematiche industriali e la consapevolezza che spesso l'ottimizzazione dei processi passa da una gestione più efficiente delle risorse che si hanno già a disposizione. Si deve creare un coinvolgimento totale da parte di tutto il personale attraverso attività di responsabilizzazione e autonomia nelle azioni aziendali [2].

Mantenere un cliente costa ad una azienda cinque volte di meno che acquisirne uno nuovo [3]; quindi essa non deve limitarsi unicamente a vendere un prodotto ma anche a garantire una durabilità del bene nel tempo attraverso un processo di ottimizzazione delle attività realizzative.

Di fatto non esiste un unico approccio al TQM e al Sei Sigma; ogni azienda, una volta riconosciute le peculiarità delle due metodologie, può modellarle mantenendo i concetti sostanziali, ma operando sulle caratteristiche applicative. La validità di una metodologia migliorativa si deve anche misurare dalla flessibilità e dalla capacità di adattarsi a contesti e a realtà completamente diverse.

Il TQM nasce nell'ambito accademico negli anni 50, quale filosofia manageriale innovativa per gestire un'impresa, a dispetto di teorie organizzative inefficienti ed obsolete (fordismo e taylorismo) per le caratteristiche di dinamicità ed imprevedibilità del mercato.

Il modello proposto, basato principalmente sulla *customer needs sati-*

sfaction, si distingue per un insieme di metodi di *problem solving* e di strumenti manageriali di semplice applicazione e flessibili alle problematiche industriali, che devono coinvolgere tutte le risorse a disposizione [4]. I risultati e gli obiettivi raggiunti hanno fatto del TQM una metodologia di sicuro successo in diversi contesti industriali.

Il Sei Sigma ha invece un'origine aziendale; la creazione è dovuta a una reale esigenza manifestata da una grande azienda americana di competere sullo scenario internazionale; lo sviluppo e il completamento della disciplina deve essere invece attribuito alle diverse necessità delle aziende da cui la metodologia è stata successivamente accolta[5].

Il Sei Sigma è un approccio al miglioramento aziendale continuo altamente disciplinato finalizzato alla soddisfazione del cliente, che fonda il proprio sviluppo ed efficacia sulla raccolta di dati, costituiti da informazioni sulle necessità/aspettative del cliente finale, che vengono integrate nella struttura aziendale [6].

Principio di fondo è la misurabilità di ogni processo, che consente di condurre un'analisi seguendo una rigorosa struttura nella quale sono utilizzati opportuni strumenti statistici: tale analisi è volta a un miglioramento della performance del processo associato a una diminuzione della sua variabilità fino alla realizzazione di una difettosità in-

feriore a 3,4 difetti p.p.m. (parti per milione)[7,8].

Questo risultato può essere osservato graficamente come un restringimento della curva normale (supposto rappresentativa del processo) con un conseguente aumento della capacità del processo di soddisfare l'intervallo di specifica (figura 1).

Il Sei Sigma è risultato la risposta maggiormente decisa per l'incremento di competitivo da parte delle aziende occidentali nei confronti della sempre più aggressiva competizione dei giapponesi, ai quali non si può negare lo sviluppo del Total Quality Management. Pensare che il Sei Sigma sia un affinamento maggiormente efficace del TQM può essere in alcuni aspetti un errore; infatti pur condividendo gli stessi obiettivi finali e i medesimi strumenti applicativi, le due metodologie sono state create in contesti diversi con aspetti gestionali di *problem solving* differenti.

Si deve comunque sottolineare l'importante merito che deve essere attribuito al Total Quality Management per l'introduzione nel mondo industriale di un nuovo metodo di concepire la "Qualità" e di approcciarsi alle problematiche, dal quale non si può negare il Sei Sigma abbia preso spunto per lo sviluppo.

Bill Smith, definito dalla letteratura "The Father of Sei Sigma", osservò, studiando la correlazione fra le performance di un prodotto nel ciclo di vita e la quantità di

rilavorazioni resesi necessarie durante la produzione, che i prodotti con un inferiore numero di non conformità in fase di lavorazione fossero quelli che creavano meno problemi in fase di consegna al cliente [9]. Questo aspetto ha suggerito nel Sei Sigma una maggiore focalizzazione sulla capacità di un processo di soddisfare le specifiche richieste attraverso la riduzione della variabilità, che, come si può intuire dalla denominazione stessa della metodologia, assume importanza fondamentale.

La metodologia Sei Sigma si sviluppa direttamente dal contesto industriale, questo aspetto non è da trascurare poiché essa è stata creata per risolvere reali problematiche aziendali ed è stata imposta in base all'esperienza manageriale di figure coinvolte direttamente sul campo. Il Total Quality Management è invece una filosofia gestionale, che per l'origine accademica risulta essere in taluni aspetti maggiormente teorica nel fornire risultati quantitativi.

Nella definizione delle metodologie si può notare riferimenti espliciti nel Sei Sigma a risultati misurabili e riscontrabili sia in termini di *performance* sia in termini economici; questo aspetto non è trascurabile nel contesto industriale dove ciò che realmente conta è il risultato finale. Il Sei Sigma, a differenza del TQM, si concentra su di un aspetto concreto: la variabilità di processo dovuta a cause esogene, elemento chiave per valutare le performance aziendali attraverso la misurazione, l'analisi e la riduzione nel caso non sia idonea alle richieste manageriali. Il TQM si sviluppa invece fornendo un insieme di tecniche e strumenti generali, che se da un lato forniscono un metodo ordinato di applicazione dall'altro non definiscono le modalità di azione.

Dal concetto applicato nel TQM che "fare le cose giuste la prima volta" è sinonimo di incremento di produttività e di riduzione dei costi, il Sei Sigma si propone di eliminare i COPQ (*Cost of Poor*

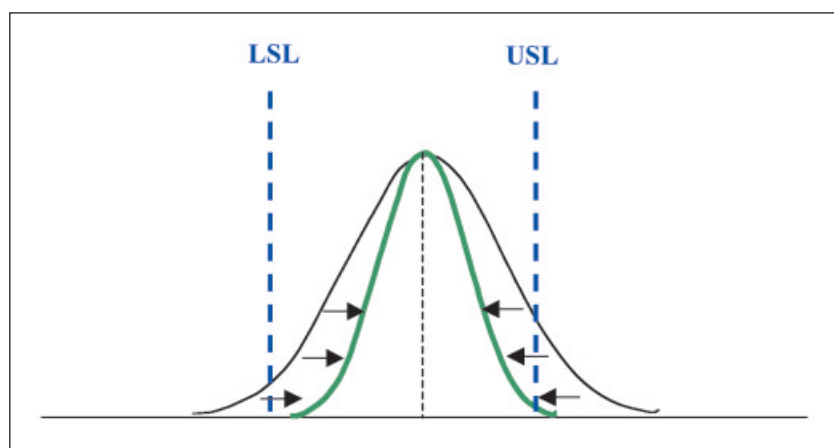


Fig. 1 - Il Sei Sigma riduce la variabilità di un processo per aumentarne la capacità di soddisfare le specifiche

Quality), costi legati all'incapacità di realizzare prodotti conformi "al primo tentativo", che sono presenti in ogni tipo di contesto, economico e non. La realizzazione di prodotti o servizi giusti la prima volta sottintende una concreta comprensione dei reali requisiti del cliente; compito di difficile realizzazione in quanto implica uno sforzo integrato da parte di tutta la struttura aziendale e una continua messa in discussione degli obiettivi da raggiungere. La riduzione degli scarti e di tutte quelle attività a non valore aggiunto che sono presenti in azienda deve essere guidata da un metodo ordinato di *problem solving* che entrambe le metodologie a loro modo forniscono al contesto di riferimento.

Il TQM si basa in linea generale sul ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), caratterizzato da una fase di

pianificazione, una di sviluppo, una di controllo e un'ultima di azione; il Sei Sigma invece si appoggia al DMAIC (*Define, Measure, Analyse, Improve, Control* - figura 2) piuttosto che al DFSS (*Design For Sei Sigma*) in base alle caratteristiche della realtà di interesse [10].

Le due metodologie applicano tecniche di problem solving caratterizzate da metodi ordinati, spesso assenti in azienda, di proporsi ad una problematica aziendale, che possono risultare in prima battuta molto simili ma che invece differiscono per alcuni aspetti.

Il Sei Sigma ad esempio propone una fase di misurazione e quantificazione (*Measure*) delle prestazioni del processo di riferimento che può essere di aiuto all'azienda per definire gli obiettivi e le performance da raggiungere. Il

TQM invece è caratterizzato da un ciclo applicativo molto più semplice e snello che può essere maggiormente efficace in alcuni contesti particolari.

Le due metodologie si focalizzano anche sulla capacità di impiegare e sfruttare al meglio le risorse interne, convogliando entrambe alla conclusione che il personale sia una risorsa indispensabile per il successo di una azienda.

Vi è comunque una divergenza sulle modalità e i metodi di coinvolgimento delle persone; il Total Quality Management suggerisce una totale applicazione delle persone per un miglioramento che passa attraverso un "piccolo" e continuo lavoro parallelo alle normali mansioni; il Sei Sigma fa leva invece su piccole squadre migliorative guidate da figure di esperienza quali i *Black Belt* o i *Master Black Belt*, che sono impegnate a tempo pieno nel progetto.

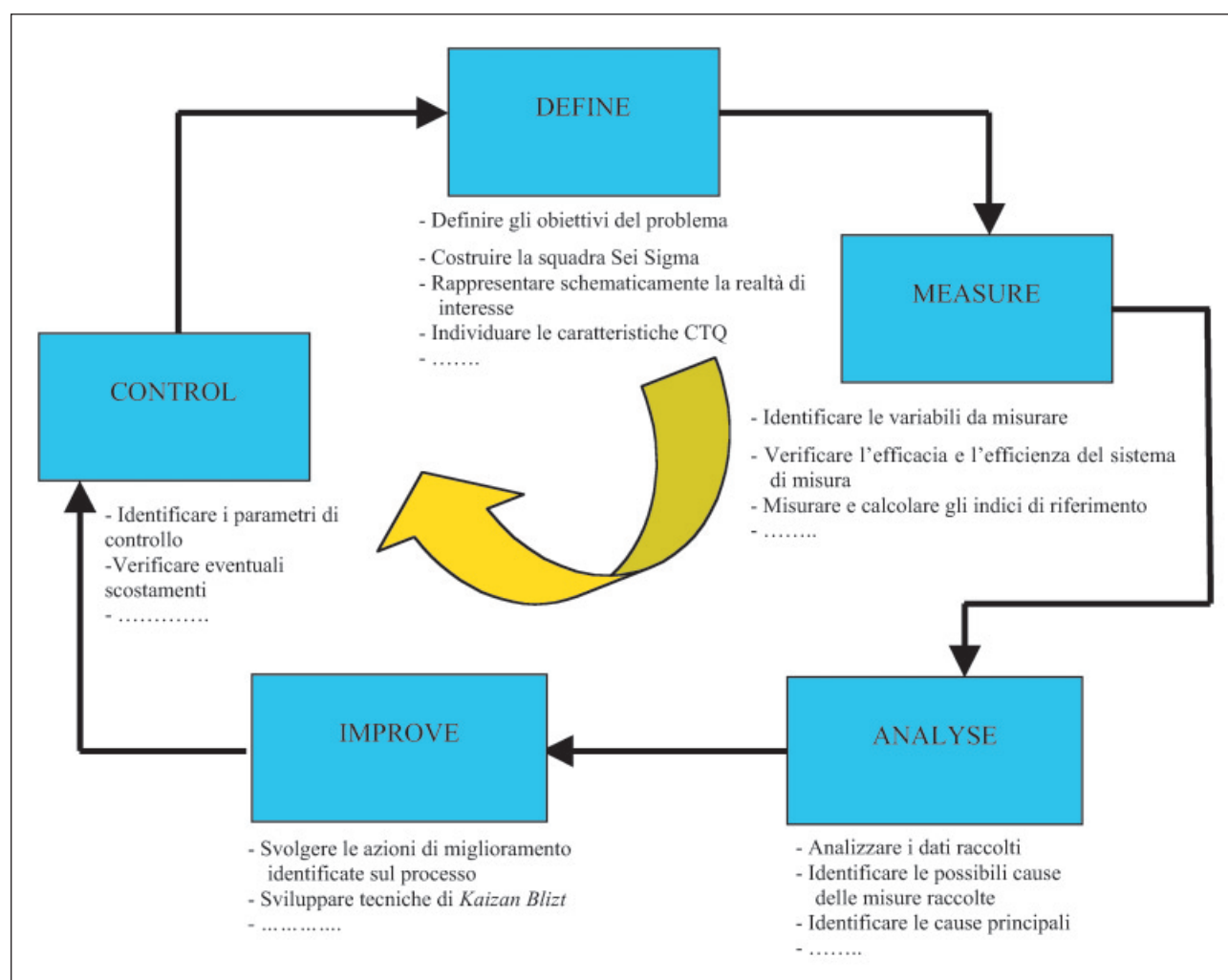


Fig. 2 - Struttura della tecnica problem solving DMAIC del Sei Sigma

Il Sei Sigma parte evidentemente da un concetto di miglioramento localizzato (ad esempio una linea, un processo) per poi espandere il progetto a tutta l'azienda, mentre il TQM si propone un fenomeno migliorativo globale sin da subito. Sicuramente il contesto industriale gioca un ruolo fondamentale sul successo di una modalità piuttosto che dell'altra, ma si possono comunque trarre delle considerazioni interessanti a livello generale. Le aziende difficilmente accettano figure impegnate a tempo pieno per modificare e aumentare le prestazioni di un processo, ma è esperienza comune che se si sommasse tutto il tempo speso *part-time* dal personale (approccio TQM) per azioni migliorative, si riscontrerebbe che è maggiore di quello impiegato dalle persone *full-time* sul progetto (approccio Sei Sigma) e i risultati sarebbero complessivamente meno efficaci [10]. Si può pertanto sottolineare come le due metodologie siano per certe sfaccettature molto simili ma nello stesso tempo diverse per altre. Ciò che risulta chiaro è che il Total Quality Management ha avuto, insieme con i fondatori della "Gestione Globale della Qualità", il merito indiscusso di portare in

azienda un nuovo modo di pensare e di approcciarsi alle problematiche industriali, lasciando un segno indelebile nella gestione organizzativa ed operativa di molte aziende. Il Sei Sigma si è invece dimostrato in questi ultimi anni lo strumento maggiormente efficace per incrementare le performance aziendali e quindi il vantaggio competitivo tra le aziende, adottando un insieme di tecniche e metodi innovativi indispensabili per una gestione efficiente delle risorse a disposizione. Le aziende, che a tutt'oggi applicano il *Total Quality Management*, possono essere comunque potenzialmente realtà Sei Sigma, predisposte per l'orientamento che già le caratterizza ad una più favorevole implementazione della disciplina rispetto alle altre. Il TQM non risulta comunque l'unico aspetto che può favorire la creazione di un'azienda Sei Sigma, esistono dei modelli produttivi e organizzativi che per le particolari caratteristiche costituenti si integrano perfettamente con i principi del Sei Sigma; si fa riferimento in questo caso alla *lean production* e alla *lean organization*, contraddistinte da un modello gestionale ed operativo orientato alla soddisfazione delle esigenze del cliente e

alla riduzione degli scarti, attraverso delle modifiche sulle attività a valore aggiunto e degli interventi di eliminazione delle attività a non valore aggiunto [11].

References:

- [1]: K. Ishikawa: "Che cos'è la Qualità Totale: il modello giapponese", Il Sole24Ore Libri, 1992
- [2]: L. Stebbing: "Quality Assurance: the route of efficiency and competitiveness", Second Edition, Ellis Horwood Limited, 1989
- [3]: A. Galgano, E. La Mesa: "Vendere e comprare con Internet", Sperling & Kupfer Editori
- [4]: R. Collard: "La Qualità Totale: guida alla progettazione, avviamento e sviluppo di un sistema di gestione della qualità totale", Franco Angeli, 1992
- [5]: Air Academy Associates: "Six Sigma for manufacturing and non-manufacturing processes", www.isixsigma.com
- [6]: J. A. Jr. Blakeslee: "Implementing the Six Sigma Solution", Quality Progress, Luglio 1999
- [7]: M. J. Harry: "The Vision Of Six Sigma", Sigma Publishing Company, 1994
- [8]: F. W. Breyfogle III: "Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods", Wiley, New York, NY, 1999
- [9]: G. C. Chadwick: "Remembering Bill Smith, Father Of Six Sigma", www.isixsigma.com
- [10]: CBIA News: "Pursuing perfection: Six Sigma", Luglio-Agosto 2002, www.cbia.com/2News/
- [11]: D. Nave: "How to compare Six Sigma, Lean and the theory of constraints", Quality Progress, Marzo 2002

Il Consorzio Inn.Tec. informa che è in programma per il prossimo mese di gennaio il seguente corso di formazione

"Studio delle macchine e strategie di progetto"

Obiettivi:

La progettazione di una macchina, in cui convivano strettamente meccanica, elettronica ed informatica (servosistemi, robot, macchine sensorizzate, dispositivi servoassistiti, ecc.), deve necessariamente seguire un percorso differente rispetto ad un iter progettuale tradizionale.

Non si possono, infatti, analizzare separatamente, o addirittura trascurare, tutte quelle problematiche mutuamente connesse ed inscindibili che caratterizzano un sistema mecatronico.

Il seminario mira a suggerire dei criteri di scelta di un motore per macchine automatiche, nonché delle strategie per l'ottimizzazione dinamica di servosistemi, ottenibile mediante un'opportuna pianificazione della legge del moto.

A chi è rivolto:

Il corso si rivolge a Tecnici / Progettisti il cui compito è la scelta della motorizzazione (particolarmente per sistemi servoassistiti) e la definizione delle movimentazioni e dei cicli di un sistema elettromeccanico.

Per maggiori informazioni, contattare la segreteria di Inn.Tec. al seguente numero telefonico 030/3384030 oppure via mail al seguente indirizzo info@inntec.it

SENSORE CAPACITIVO ANGOLARE PER APPLICAZIONI AUTOMOTIVE

di **Alessio Ghisla, Vittorio Ferrari, Daniele Marioli, Andrea Taroni, Stefano Pelloso⁽¹⁾, Dorian Rossetto⁽¹⁾**

Dipartimento Elettronica per l'Automazione e INFM – Università degli Studi di Brescia

⁽¹⁾ FINMEK S.p.A.

INTRODUZIONE

I sensori di posizione angolare trovano numerose applicazioni nel campo *automotive*, ad esempio nella misura di posizione di pedali e valvole, o per la regolazione di sedili e fari. Le condizioni nelle quali questi dispositivi si trovano ad operare, ad esempio le elevate escursioni in temperatura, l'umidità, le vibrazioni, combinate con l'esigenza di avere elevate prestazioni metrologiche, affidabilità e basso costo rendono difficile la progettazione di tale tipologia di sensori.

Il principio di traduzione capacitivo presenta alcuni vantaggi quali il ridotto consumo, la semplicità della geometria che si presta a realizzazioni a basso costo, l'assenza di contatti elettrici striscianti e le prestazioni metrologiche potenzialmente elevate. D'altro canto, i sensori capacitivi tendono ad essere dispositivi critici a causa del basso livello dei segnali in gioco, della necessità di avere adeguati circuiti elettronici di interfaccia, della tendenziale sensibilità alle condizioni ambientali e alle interferenze elettromagnetiche (*ElectroMagnetic Interference*, EMI). In letteratura sono riportati esempi di sensori di posizione angolare basati su strutture capacitivo, e spesso si tratta di soluzioni piuttosto complicate e non direttamente adattabili all'applicazione in esame [1-4].

BRESCIA
RICERCHE

Nel seguito è proposta una soluzione, dedicata alla misura della posizione di un pedale acceleratore (Figura 1), che si pone come obiettivo il superamento delle sopracitate criticità e la massimizzazione del rapporto prestazioni/costo attraverso uno studio

approfondito dell'applicazione e uno stretto *co-design* di sensore ed elettronica di condizionamento [5].

Il dispositivo realizzato è formato da due parti, l'elemento sensibile e l'elettronica di interfaccia dedicata. La struttura fornisce ridondanza come richiesto dalle esigenze *automotive* includendo nello stesso contenitore due sensori, completi dei relativi circuiti di condizionamento, identici ed indipendenti, che lavorano come due sezioni di misura separate.

Sul dispositivo realizzato è stata depositata una domanda di brevetto nazionale con titolare la Finmek S.p.A. e inventori il personale dell'Università di Brescia coinvolto nello sviluppo [6].



Fig. 1 - Pedale acceleratore in plastica vetrorinforzata.

ELEMENTO SENSIBILE

Nella Figura 2 è riportato il *layout* della struttura capacitiva che costituisce l'elemento sensibile del sensore. Questa è composta da tre parti principali: i due elettrodi piani, denominati statore e contro-statore, realizzati mediante la tecnologia dei circuiti stampati (*Printed Circuit Board, PCB*), che vengono montati in una configurazione a piani paralleli, e il rotore conduttivo, di spessore non trascurabile, che viene montato tra i due elettrodi rimanendo elettricamente flottante, quindi senza collegamento elettrico con il circuito. Il rotore è innestato ad un albero ad esso perpendicolare che gli trasferisce lo spostamento angolare rispetto a statore e contro-statore che rimangono fissi.

Per ottenere la ridondanza, la struttura comprende un sensore principale (M) e uno ridondante (R), ciascuno collegato alla rispettiva elettronica di interfaccia.

Ogni sensore è formato da un certo numero di elettrodi sullo statore e sul contro-statore, in particolare ogni elemento è formato da quattro elettrodi sullo statore (M_a, M_b, M_c, M_d e R_a, R_b, R_c, R_d) e due elettrodi opposti sul contro-statore (M_e, M_f e R_e, R_f). Questi elettrodi sono opportunamente collegati tra di loro, M_a con M_c , M_b con M_d , M_e con M_f per la sezione M, e R_a con R_c , R_b con R_d , R_e con R_f per la sezione R. In questo modo ogni sezione implementa due capacità C_1 e C_2 che presentano un elettrodo comune sul contro-statore e due elettrodi separati sullo statore.

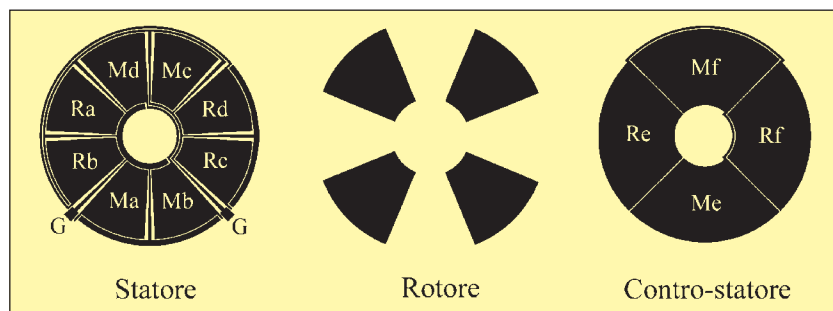


Fig. 2 - Layout del sensore, con indicati gli elettrodi che costituiscono la sezione principale (M) e ridondante (R).

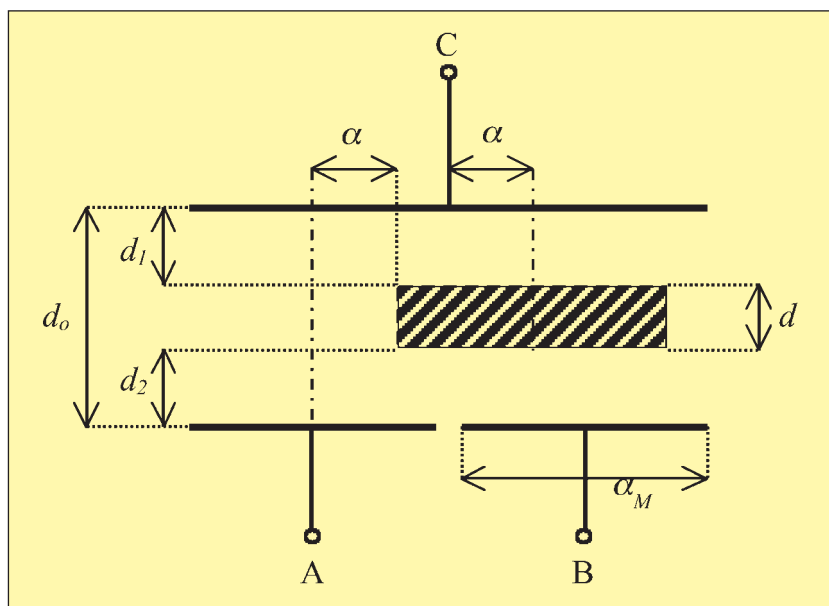


Fig. 3 - Modello lineare dell'elemento sensibile, nel quale sono riportati gli elettrodi risultanti per ogni sezione.

Diametro esterno	37.6 mm
Ampiezza angolare elettrodi statore	39°
Distanza d_0 tra statore e contro-statore	2.5 mm
Spessore del rotore	1.6 mm

Tab. I - Dimensioni geometriche significative.

Il rotore è costituito da quattro lamierini in ottone, di spessore adeguato e forma a sezione circolare, innestati sull'albero. Una coppia di lamierini tra loro opposti è usata dalla sezione M e l'altra coppia dalla sezione R.

Le capacità risultano sensibili alla posizione del rotore, variando in modalità *push-pull*, ovvero se in seguito allo spostamento del rotore C_1 aumenta, C_2 diminuisce della stessa quantità e viceversa.

La suddivisione utilizzata per gli elettrodi ed il rotore fornisce un effetto di media spaziale che permette la compensazione di tolleranze di montaggio e possibili *tilt*

del rotore. Per ridurre l'effetto di curvatura del campo elettrico, ogni elettrodo sullo statore è circondato da piste di guardia che fanno capo al contatto G collegato alla massa del circuito. L'intera struttura è racchiusa in uno schermo, formato dalle superfici metalizzate esterne dei circuiti stampati, collegato a massa al fine di ridurre la suscettibilità alle EMI.

Nella Tabella I sono riportate le dimensioni geometriche significative della struttura. Queste sono risultate da una scelta di compromesso tra l'esigenza di avere un sufficiente valore di sensibilità e, nel contempo, valori di capacità superiori a quelli di possibili capacità parassite.

Il principio di funzionamento viene descritto con riferimento alla Figura 3 che riporta lo schema semplificato di una sezione del sensore, nel quale la combinazione degli elettrodi è stata rappresentata mediante i tre elettrodi complessivamente risultanti. Per la sezione M l'elettrodo A (M_a-M_c) sullo statore e l'elettrodo C (M_e-M_f) sul contro-

statore formano la capacità C_1 , l'elettrodo B (M_b-M_d) e l'elettrodo C formano la capacità C_2 . La figura rappresenta per semplicità una configurazione lineare. Per mezzo di semplici passaggi matematici si dimostra che il valore delle capacità C_1 e C_2 varia linearmente in funzione dello spostamento angolare normalizzato x secondo le seguenti espressioni:

dove:

$$C_1 = C_o(1 - kx) \quad (1a)$$

$$C_2 = C_o(1 + kx) \quad (1b)$$

$$k = \frac{1}{\frac{2d_o}{d} - 1} \quad (2)$$

$$x = \frac{2\alpha}{\alpha_M} \quad (3)$$

$$C_o = C_1|_{\alpha=0} = C_2|_{\alpha=0} \quad (4)$$

con $-\frac{\alpha_M}{2} \leq \alpha \leq \frac{\alpha_M}{2}$ cioè $-1 \leq x \leq 1$.

Il fattore k è una costante numerica dipendente solamente da un rapporto di dimensioni, quindi in prima approssimazione risulta insensibile a fattori di influenza. La posizione verticale del rotore nello spazio compreso tra statore e contro-statore non ha influenza su k , per cui possibili tolleranze di montaggio e giochi meccanici non costituiscono un problema.

Essendo il rotore un materiale conduttore, la sensibilità non dipende dalla costante dielettrica di nessun materiale, a parte l'aria, garantendo così una stabilità e una robustezza intrinseche nei confronti di possibili derive.

Esaminando le equazioni (1a) e (1b) si può osservare che l'informazione circa lo spostamento angolare x può essere accuratamente ottenuta dalla misura della seguente quantità:

$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = kx \quad (5)$$

Poiché l'ampiezza angolare α_M di ogni elettrodo sullo statore è di 39° , il campo di misura

$$\left[-\frac{\alpha_M}{2}, \frac{\alpha_M}{2}\right] \text{ risulta di } \pm 19.5^\circ.$$

ELETTRONICA DI INTERFACCIA

Il valore molto piccolo delle capacità in gioco, dell'ordine dei picofarad, insieme alla necessità di avere dei valori ragionevoli di sensibilità e una ridotta complessità circuitale, hanno reso il progetto del circuito elettronico di interfaccia un punto fondamentale nella realizzazione del dispositivo.

Per la ridondanza sono previsti due circuiti identici e separati, uno collegato alla sezione M, e l'altro alla sezione R.

Nella Figura 4 è riportato il diagramma a blocchi del circuito relativo ad una delle due sezioni.

Il circuito permette di misurare il rapporto dato dall'espressione (5) convertendolo in una tensione continua V_o . Il nucleo fondamentale del circuito è un oscillatore a rilassamento controllato capacitivamente, nel quale il semiperiodo *high* di un'onda rettangolare è controllato dalla capacità C_1 , e il semiperiodo *low* è controllato dalla capacità C_2 . In questo modo il *duty-cycle* dell'onda quadra generata dall'oscillatore varia intorno al valore di 0.5 linearmente con $(C_1 - C_2)/(C_1 + C_2)$, che a sua volta è proporzionale all'angolo normalizzato x . Tale onda quadra è successivamente filtrata mediante un filtro passa-basso e quindi amplificata di livello e traslata. In questo modo la tensione continua di uscita V_o risulta data da:

$$V_o = V_{cc} \left(\frac{1}{2} + K_G \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} + K_O \right) = V_{cc} \left(\frac{1}{2} + K_G kx + K_O \right)$$

dove K_G e K_O sono opportune costanti di calibrazione che possono essere regolate in maniera da ottenere in uscita la sensibilità e l'escursione desiderate. Si può osservare che la tensione V_o varia in modo raziometrico rispetto alla tensione di alimentazione V_{cc} , in questo modo il sensore è elettricamente equivalente a un tradizionale potenziometro resistivo.

Il circuito è stato realizzato mediante tecnologia a montaggio superficiale (*Surface Mounting Technology, SMT*) sullo stesso circuito stampato dello statore, in maniera da ridurre l'effetto delle capacità parassite, migliorare la simmetria del circuito rispetto alle uscite dell'elemento sensibile, e ridurre le dimensioni.

RISULTATI SPERIMENTALI

Il sensore descritto è stato costruito e caratterizzato sperimentalmente.

In Figura 5 è riportato un insieme delle parti che costituiscono il dispositivo che sono state assemblate in un contenitore plastico dedicato, mostrato in Figura 6. Il sensore assemblato è meccanicamente compatibile con il sensore potenziometrico resistivo attualmente montato su pedali del tipo mostrato in Figura 1.

L'albero del rotore è stato collegato ad un goniometro utilizzato per

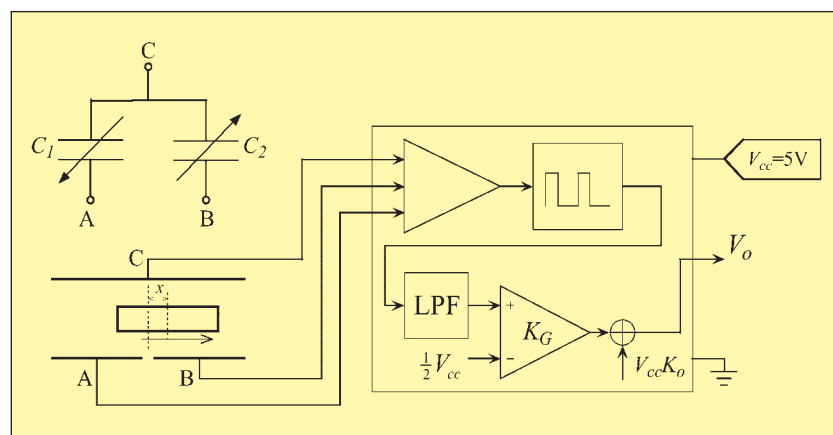


Fig. 4 - Schema a blocchi di una sezione del sensore e del circuito elettronico di interfaccia.

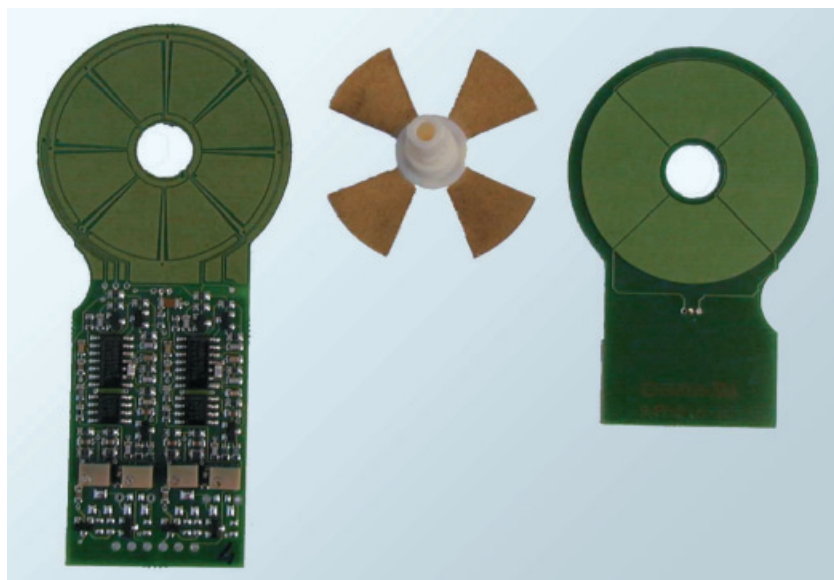


Fig. 5 - Componenti del dispositivo.

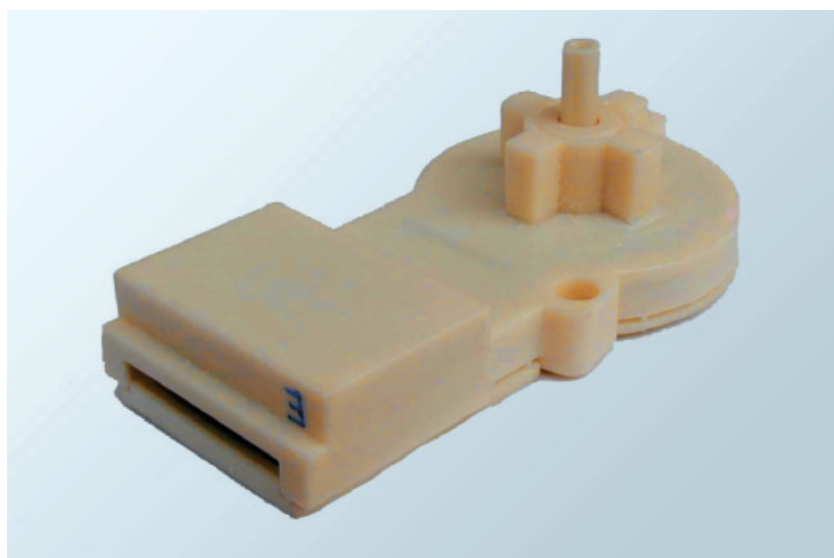


Fig. 6 - Sensore finale assemblato in un contenitore plastico.

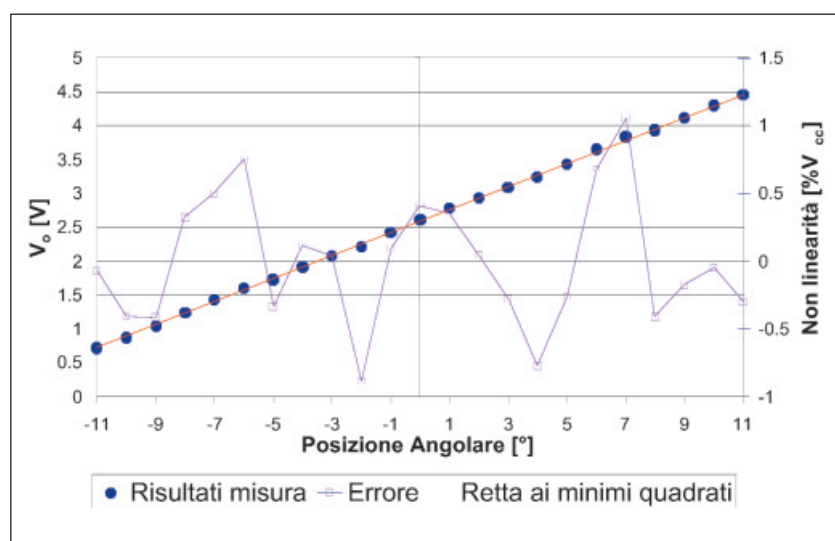


Fig. 7 - Tensione di uscita della sezione principale in funzione dello spostamento angolare ed errore di non linearità

la calibrazione ed il test del dispositivo. Dopo aver calibrato ogni sezione come da specifiche richieste, è stata misurata la tensione in uscita da ogni circuito in funzione dello spostamento angolare del rotore, su un intervallo di misura di $\pm 11^\circ$. La Figura 7 riporta l'andamento della tensione di uscita, la retta interpolante e l'errore di linearità indipendente in funzione dello spostamento angolare per la sezione M del sensore. Risultati simili sono stati ottenuti per la sezione R. Si può osservare che si ottiene un comportamento lineare con un errore di non linearità massimo di circa $\pm 1\%$ della tensione di alimentazione.

Nella Tabella 2 è riportato un confronto tra le specifiche richieste ed i risultati ottenuti.

FATTORI DI INFLUENZA

L'uscita del dispositivo è basata su un principio di misurazione raziometrico, come mostrato nelle equazioni (1)-(6), perciò in prima approssimazione variazioni di temperatura dovrebbero riflettersi in uscita in proporzione al rapporto dimensionale d_o/d , e quindi possono essere rese trascurabili mediante un'opportuna scelta dei materiali.

Prove sperimentali eseguite sul sensore hanno evidenziato una deriva termica non trascurabile, la causa della quale è stata individuata nel circuito elettronico. Prove preliminari su una nuova versione del circuito hanno mostrato un sostanziale miglioramento, confermando i vantaggi intrinseci del principio di misura. Gli effetti dell'umidità ambientale sono attualmente in esame.

Test preliminari relativi alla EMI, condotte per mezzo di campi elettrici con intensità dell'ordine di 20 V/m a 460 MHz, hanno mostrato un grado di suscettibilità non trascurabile per la versione attuale, ma una sostanziale immunità per la seconda versione dell'elettronica.

Parametro	Valore richiesto	Valore ottenuto
Tensione di alimentazione	5 V	5 V
Consumo elettrico per sezione	< 10 mA	8 mA
Intervallo di misura	$\pm 11^\circ$	$\pm 11^\circ$
Errore di non linearità	< $\pm 3\%$	< $\pm 1\%$

Tab. 2 - Confronto tra specifiche richieste e risultati ottenuti per il sensore.

CONCLUSIONI

E' stato progettato, realizzato e caratterizzato sperimentalmente un sensore capacitivo di spostamento angolare. Il principio di misura senza parti a contatto e la ridondanza della struttura aumentano l'affidabilità del sensore. L'uso di un rotore conduttivo spesso, elettricamente flottante senza alcun collegamento con il circuito, migliora le prestazioni e l'affidabilità del sensore e ne riduce la complessità meccanica.

Lo stretto co-design tra sensore ed elettronica di lettura ottimizza il rapporto prestazioni/costo. La tensione di uscita legata in modo ra-

ziometrico alla tensione di alimentazione, rende il dispositivo elettricamente compatibile ad un sensore potenziometrico resistivo.

Prove sperimentali hanno mostrato una linearità indipendente migliore di $\pm 1\%$ su un intervallo di misura di $\pm 11^\circ$ per entrambe le sezioni.

Test a differenti temperature hanno mostrato una certa deriva termica, che tuttavia è stato accertato essere dovuta al circuito elettronico. Ulteriori studi sono in corso su una nuova versione del circuito elettronico, per ridurre la sensibilità alla temperatura e migliorare l'immunità alle EMI. Misure preliminari hanno fornito risultati mol-

to positivi riguardo ad entrambi questi aspetti.

Bibliografia

- [1] M.Gasulla, X. Li, G.C.M. Meijer, L. van der Ham, J.W.Spronck, "A Contactless Capacitive Angular-Position Sensor", Proc. of IEEE Sensors 2002, Orlando, FL, USA, June 11-14, 2002, pp.880-884.
- [2] S.P. Cermak, G.Brasseur, P.L. Fulmek, "A Planar Capacitive Sensor for Angular Measurement", Proc. of IMTC 2001, Budapest, May 21-23, 2001, pp. 1396-1396.
- [3] G.Brasseur, "A Capacitive 4 Turn Angular Position Sensors", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 47, no.1, 1998, pp. 275-279.
- [4] A.H.Falkner, "The use of capacitance in the Measurement of Angular end Linear Displacement", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 43, no.6, 1994, pp. 939-942.
- [5] V.Ferrari, A.Ghisla, D.Marioli, A.Taroni et al., "Capacitive Angular-Position Sensor", Proc. of "Advanced Microsystem for Automotive Applications", 22-23 maggio 2003, Berlino.
- [6] V.Ferrari, D.Marioli, A.Taroni, "Trasduttore capacitivo per rilevare la posizione angolare di un organo rotante", Titolare: Finmek S.p.A., Brev. n.: UD2002A000144.

Il Consorzio Inn.Tec. informa che è in programma per il prossimo mese di febbraio il seguente corso di formazione

“L’innovazione dei processi gestionali”

Obiettivi:

Il Business Process Reengineering è una filosofia di revisione organizzativa che concentra la sua attenzione sull'innovazione dei processi aziendali e ne prevede il superamento delle logiche funzionali, con la convinzione che l'output, nella sua visione più integrata, non è altro che il frutto delle connessioni tra gli elementi costitutivi l'azienda stessa.

La reingegnerizzazione aziendale coinvolge le risorse hardware, software e umane, essendo un mix di cambiamento di gestione organizzativa (negli obiettivi, gerarchie, organigrammi, tecniche operative, strategie e obiettivi), un evoluzione delle competenze personali e una forte rivisitazione strutturale.

A chi è rivolto:

Il corso si rivolge a Project Manager, a chi si occupa di Ricerca, Sviluppo e Produzione e al management responsabile dei processi aziendali.

Per maggiori informazioni, contattare la segreteria di Inn.Tec. al seguente numero telefonico 030/3384030 oppure via mail al seguente indirizzo info@inntec.it

STRUMENTI PRATICI E TEORICI A SUPPORTO DELLA GESTIONE DELL' AZIENDA MANIFATTURIERA GLOBALMENTE ESTESA

di **Marco Busi**

*Università della Scienza e della Tecnica della Norvegia (NTNU), Ingegneria della Produzione e della Qualità
SINTEF Industrial Management, Economia e Logistica*

SINOSI

Il presente lavoro descrive il progetto Europeo MOMENT (MOBILE Extended Manufacturing ENTERprise) e discute ciò che, nel contesto di tale progetto, è stato fino ad oggi prodotto in termini di risultati teorici e strumenti pratici. L'oggetto di studio del progetto è l'azienda manifatturiera estesa; di particolare interesse sono i fornitori all'industria automobilistica ed elettronica. L'obiettivo generale è di rendere più efficiente sia la costituzione di nuove aziende estese che la loro gestione e controllo delle operazioni. Il risultato del progetto sarà composto di un insieme di strumenti e metodologie a supporto di quest'obiettivo. In particolare, questo articolo presenterà l'*extended enterprise Operation Model* e le linee guida per la progettazione di un sistema di misurazione di prestazione, i quali sono stati ad oggi sviluppati. L'*extended enterprise Operation Model* è una descrizione computerizzata degli attori, dei processi, delle operazioni e dei flussi di informazioni e materiali dell'azienda estesa nella catena logistica. Il sistema di misurazione di prestazione, è parte integrante dell'*extended enterprise Operation Model*; le linee guida per la sua progettazione evidenziano le caratteristiche che tale sistema dovrebbe presentare al fine di rendere possibile l'effettiva misurazione della prestazione di processi

BRESCIA
RICERCHE

estesi. Tali risultati rappresentano un passo in avanti nella direzione dell'integrazione delle aziende estese.

Parole Chiave: Azienda Estesa, Gestione della Prestazione, Logistica, Integrazione.

INTRODUZIONE

Lo scopo di questo articolo è di presentare il progetto MOMENT e di divulgare i risultati fino ad oggi prodotti. Così facendo intendiamo contribuire allo sviluppo di nuovi strumenti e pratiche industriali nel campo della gestione dell'azienda estesa. Per cominciare, il progetto MOMENT sarà presentato, sottolineandone il background, gli obiettivi e i risultati, e spiegandone le implicazioni teoriche e gestionali. Seguirà una discussione intorno ai due principali concetti sviluppati nel corso del progetto, e ai relativi strumenti.

Il consorzio di partners che lavorano nel progetto aspira a produrre una metodologia a supporto della rapida costituzione e start-up, e della gestione efficiente delle operazioni delle aziende manifatturiere estese fornitrici dell'industria automobilistica Europea. Tale metodologia consisterà di metodi, modelli e strumenti personalizzabili in qualsiasi realtà industriale locale in Europa. Fondamentale per l'efficacia della metodologia è lo sviluppo di uno strumento computerizzato composto dai seguenti diversi moduli:

- Un *extended enterprise Operation Model*
- Un sistema di misurazione di prestazione
- Un simulatore/ottimizzatore della filiera logistica
- Uno strumento di supporto decisionale
- Uno strumento d'apprendimento

Dato che la ricerca relativa ai primi due moduli ha raggiunto una fase significativa, questo articolo focalizzerà l'attenzione su di essa. Il contributo principale sarà un nuovo ed innovativo approccio alla gestione delle aziende estese. Feedback ricevuto sia dall'ambiente accademico che industriale sul lavoro qui presentato, hanno in passato confermato il suo valore a supporto dell'integrazione della filiera logistica. Per facilitare un migliore apprendimento delle pagine seguenti, definiamo quattro concetti:

- Catena di Valore: una rete di attori coinvolti nei diversi processi che producono valore nella forma di prodotti e servizi per il cliente finale.
- Azienda Manifatturiera Estesa: un insieme di aziende che congiuntamente producono il prodotto finale. Si differenzia da una normale filiera logistica, la quale è invece definita come un insieme di aziende indipendenti che sono tra loro collegate dal flusso di materiali, informazioni e soldi.
- Azienda Manifatturiera Estesa Mobile: azienda estesa nella quale i processi vengono portati a termine, e la conoscenza viene sviluppata e gestita, in modo tale da garantire il loro rapido trasferimento e implementazione in nuovi contesti industriali.
- Processo di industrializzazione: l'intero processo di sviluppo dall'identificazione dell'opportunità di mercato all'inizio della produzione.

IL PROGETTO MOMENT

MOMENT è l'acronimo di Mobile Extended Manufacturing Enterprise. Il progetto è iniziato in Maggio 2001 e coprirà un periodo di tre anni.

Sette partners Europei, provenienti da ambiti sia industriali che accademici, stanno lavorando insieme, contribuendo con diverse esperienze e conoscenze tecniche. Il consorzio che lavora sul progetto MOMENT beneficia largamente dalle diverse esperienze che sono distribuite tra i partners. L'esistente sinergia tra accademia ed industria fa sì che il risultato del progetto acquisti elevato valore. Segue una lista dei partners:

- SINTEF (Industrial Management) si occupa di progetti di ricerca e sviluppo per l'industria privata e per il settore pubblico, in aree tecnologiche ed in scienze naturali e sociali. È strettamente collegata all'Università della Scienza e della Tecnica della Norvegia. Norvegia.

- RCT (Raufoss Chassis Technology, AS) è un fornitore di primo/secondo livello nell'industria automobilistica. Conta due impianti produttivi: uno in Raufoss (Norvegia) ed uno in Canada. Produce bracci di controllo in alluminio per sospensioni della nuova piattaforma Epsilon utilizzata da GM Europa (Opel/Vauxhall, Vectra e SAAB 93) e la piattaforma Epsilon utilizzata da GM Nord America (Chevrolet Malibu, Pontiac, Grand Am e Saturn LS). Norvegia.
- CIMRU è un'unità di ricerca facente parte del Centro di Produzione dell'Università Nazionale Irlandese. Lavora in particolare con produzione, telecomunicazioni e industria alimentare, supportando le aziende nell'affrontare le sfide generate dalla competizione. Irlanda.
- BIBA è un istituto interdisciplinare di ricerca che sviluppa soluzioni tecniche/organizzative e le implementa in PMI e aziende multinazionali. L'istituto è direttamente collegato con L'università di Breme. Germania.
- Centro Ricerche Fiat (CRF) è un'organizzazione industriale con la missione di promuovere, sviluppare e trasferire innovazioni tecnologiche per rendere i suoi clienti più competitivi: Fiat Sectors, PMI di settore, Agenzie Nazionali di Ricerca e la Commissione Europea. Italia.
- KPMG Consulting è un'organizzazione di consulenza globale, rappresentata in più di 140 nazioni. Sia globalmente che localmente, KPMG lavora con diverse aziende manifatturiere, con speciale interesse nell'industria automobilistica. Norvegia.
- ALFAMICRO fornisce consulenza e servizi di ingegneria, sviluppando avanzate soluzioni informatiche integrate per PMI. Portogallo.

MOMENT è nato in risposta alla sempre crescente pressione nel settore automobilistico. OEMs (*Original Equipment Manufacturers*) cercano fornitori globali di primo livello che siano in grado di svilup-

pare componenti di piattaforme per prodotti globali, e di soddisfare i requisiti per consegne *just-in-time* e continue riduzioni di costo (Morrel e Swiecki, 2001). A causa della globalizzazione produttiva e di mercato, per riuscire ad acquisire nuovi contratti, i fornitori manifatturieri Europei devono essere in grado di installare impianti vicini ai siti produttivi degli OEMs. L'abilità di consegne efficienti diventa imperativa sia in diverse dislocazioni in Europa che in qualsiasi parte nel mondo dove l'OEM sia situato. Oggi, comunque, sia lo sviluppo che le operazioni delle aziende manifatturiere estese, soffre di insufficiente cooperazione all'interno dell'azienda stessa e di insufficiente collaborazione con clienti e fornitori (Christopher, 1998) in conseguenza al fatto che: processi, informazioni, standard e strumenti prodotti in progetti precedenti, non sono localmente disponibili a supporto dei responsabili; l'inefficiente gestione dell'informazione e della comunicazione causa scarsa collaborazione con conseguenti cicli addizionali di aggiustamento; e il controllo delle operazioni nella catena di valore è basato su previsioni e ipotesi, invece che su dati e fatti rilevati in tempo reale.

I fornitori devono quindi essere in grado di rilocalizzare i loro impianti produttivi ovunque il cliente lo richieda e gestirli nel modo più efficiente possibile. Sempre più spesso i produttori devono costruire diversi impianti per produrre prodotti quasi identici per OEM globalmente distribuiti. Questo significa che l'intera catena di valore di un'azienda estesa deve essere riprogettata, messa in funzione, e gestita. In tale contesto, questioni come selezione dei fornitori, distributori, trasportatori ecc, devono essere analizzate nel tempo più breve e nel modo più economico possibile. Questo rende utile per i fornitori il portare a termine processi di industrializzazione in un modo sistematico e standard, e l'aggiustare le loro reti di relazioni aziendali in accordo con i cambiamenti della domanda, i costi delle materie prime, la disponibilità di forza lavoro, ecc.

Mettere in opera diversi impianti produttivi per prodotti simili rende anche possibile per i fornitori lo standardizzare e riusare le loro operazioni nello sviluppo di nuove aziende estese. Il progetto MOMENT ha prodotto un avanzato modello e *template* (nominato “*extended enterprise Operations Model*”) da essere usato nella progettazione, sviluppo e operazione di aziende estese nell’industria dei fornitori. Gli aspetti innovativi dell’*extended enterprise Operation Model* sono, tra gli altri:

- a) Rappresenta uno strumento standard di controllo per l’azienda estesa
- b) È integrato con gli altri sistemi di gestione aziendale
- c) Utilizza tecnologie standard di comunicazione, come Internet
- d) Riduce la dispersione di informazione attraverso l’azienda estesa
- e) È totalmente automatizzato, garantendo la disponibilità di informazione in tempo reale.
- f) Rende possibile la visualizzazione di informazioni in diversi formati multimediali
- g) Rappresenta il portale tra l’utilizzatore e i fatti necessari per il controllo delle operazioni.

L’*extended enterprise Operation Model* è collegato con il sistema di misurazione di prestazione, realiz-

WP1	Sviluppare il <i>framework</i> concettuale di MOMENT, contenente i principi per la messa in opera di aziende manifatturiere estese mobili e le loro operazioni.
WP2	Sviluppare indicatori di prestazione per misurare le prestazioni dell’azienda estesa, e progettare un approccio per l’utilizzo di questi indicatori in un ambiente produttivo esteso.
WP3	Sviluppare un <i>Operation Model</i> che renda possibile la standardizzazione di processi ad elevata prestazione, replicabili e trasferibili, e che renda possibile l’efficiente pianificazione e controllo.
WP4	Sviluppare un insieme di applicativi informatici a supporto di processi decisionali strategici e analisi di investimento, valutazione di impatto sociale in diverse regioni, e integrazione della gestione del rischio con l’analisi delle conseguenze.
WP5	Sviluppare la metodologia integrata di MOMENT, basata sui risultati del progetto e sviluppare uno strumento di apprendimento per supportarne l’implementazione.
WP6	Applicare e testare la metodologia sviluppata in tre casi nell’industria automobilistica ed elettronica, e raffinare la metodologia.
WP7	Intraprendere studi di trasferibilità della metodologia ad altre industrie.
WP8	Disseminazione ed utilizzazione: fornitura e d utilizzo di sofisticati strumenti informatici.
WP9	Gestione del progetto.

Tab. I - WPs di MOMENT

zato per incontrare le necessità di aziende estese globali. Tale sistema è innovativo in quanto:

- a) È basato su dati relativi alle prestazioni rilevate in tempo reale
- b) La prestazione che viene misurata è relativa solo a quei processi e attività descritti nell’ *extended enterprise Operation Model*
- c) Rende possibili sia misurazioni top-down che *bottom-up*.

La metodologia sviluppata in MOMENT supporta i produttori nello sviluppo di operazioni globali efficienti, attraverso l’industrializzazione di nuovi prodotti, cambiamenti strategici nel network di aziende estese, e nel controllo e miglioramento delle operazioni giornaliere. La metodologia:

- Usa l’ *Operation Model* come una

piattaforma di comunicazione ed elemento centrale di informazione

- Rappresenta un approccio sistematico al processo di industrializzazione, che focalizza specialmente sullo sviluppo di sistemi manifatturieri estesi.
- Fornisce supporto decisionale per cambiamenti strategici del network di aziende estese, e linee guida per la messa in opera di nuovi impianti.

Al fine di confermare o meno la validità dei risultati prodotti nel corso del progetto, i risultati stessi vengono testati su: un fornitore manifatturiero norvegese all’industria automobilistica, un cluster di piccole medie imprese automobilistiche in Portogallo e un cluster di fornitori elettrici a OEMs in Irlanda.

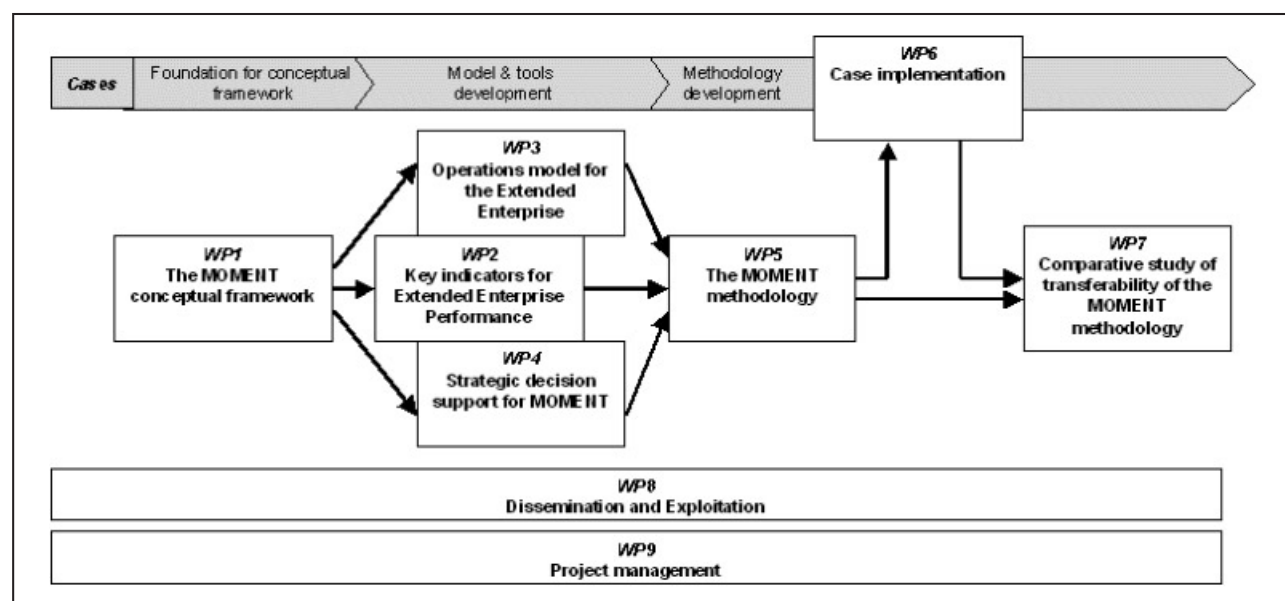


Fig. I - I work-packages del progetto europeo MOMENT

Le pietre miliari del progetto possono essere descritte come i risultati dei work-packages del progetto, come mostrato in Tabella I (Figura I mostra come sono collegati i diversi WPs di progetto)

I risultati scientifici raggiunti nel corso della ricerca portata a termine nei work-packages, insieme agli strumenti pratici progettati e sviluppati, formeranno la metodologia di MOMENT. Segue una breve discussione riguardo al contesto del progetto MOMENT: l'industria automobilistica. Cio' è importante al fine di capire in che modo gli strumenti sviluppati possono supportare le aziende nel processo di industrializzazione e nel controllo delle loro operazioni giornaliere.

Stato dell'industria automobilistica: il contesto del progetto MOMENT.

Le migliori pratiche industriali giapponesi e le loro filosofie di gestione vengono implementate con crescente interesse nel mondo occidentale, rendendo il vantaggio competitivo uno strumento necessario per fare in modo che OEMs automobilistici possano sopravvivere. La sempre crescente pressione sugli OEMs si traduce in un'anche maggiore pressione sui loro fornitori e sui fornitori dei fornitori (fornitori di ennesimo-livello).

L'attuale mercato globale automobilistico può essere diviso in 6 mercati geografici: (PWC, 2000), tre dei quali sono ad elevato volume e vicini alla maturità (Nord America, Europa Occidentale e Giappone, più Australia) e tre sono mercati in via di sviluppo e a crescita a lungo termine (Asia, Europa dell'est, e America del Sud). Si possono identificare sei principali "attori globali": General Motors, Ford Motor, Toyota Motor, Volkswagen, Daimler Chrysler e Renault. Le strategie produttive nell'industria automobilistica focalizzano principalmente sulla globalizzazione, consolidamento ed utilizzo di piattaforme (Bartel, 2001). La durata del ciclo di vita delle automobili è in

continua riduzione, e, in aggiunta, i prodotti hanno una fase di sviluppo e di *time-to-market* molto più breve.

La logica conseguenza, è che si stanno verificando importanti cambiamenti organizzativi nell'industria automobilistica e in quella dei suoi fornitori. Il maggior numero di OEMs ha già cominciato a riconfigurare le proprie catene di valore in network di relazioni più intense. Sembra che gli OEMs in genere siano concordi sul fatto che decentrare la produzione dei vari componenti ai fornitori nella catena logistica in possesso delle competenze più adeguate, renda possibile la formazione di aziende estese ad alta prestazione industriale. La conseguente maggiore responsabilità dei fornitori nella produzione del prodotto finale (i fornitori adesso sono responsabili fino all'80% del prodotto – Russel and Taylor, 2002) fa sì che sia importante per l'OEM l'essere in perfetta armonia con tutti i membri della sua catena di valore (Mehta, 2003). Nel 1998, un rapporto dell' Ernst & Young conclude che gli OEMs nell'industria automobilistica "[...] stanno abdicando certe funzioni non principali ai fornitori [...] al fine di rendere più snelle le operazioni e ridurre i costi. Come risultato, ai fornitori di primo livello viene richiesto di performare e integrare più passi del processo produttivo automobilistico, di portarli a termine in modo migliore, e di portarli a termine anche in alta sincronizzazione [...]. Per quei fornitori che accettano il pesante carico di lavoro, la ricompensa sono contratti di grande scala e relazioni strategiche con i produttori di automobili. Aziende non in grado, o non disposte a rispondere ai cambiamenti, saranno rovinare o comunque lasciate fuori dalla filiera logistica."

La catena di valore dell'industria automobilistica ha ormai cominciato un processo di trasformazione da *push* a *pull*. Tale re-invenzione della catena di valore automobilistica può potenzialmente fornire all'industria automobilistica un beneficio molto grande, e

allo stesso tempo costituisce la sfida più critica che in tale industria si sia mai affrontata. Formare catene di valore collaborative sarà critico per il successo futuro (Simatupang and Sridharan, 2002, Tyndal et al., 1998). Una tecnologia e un processo *plug-and-play* costituirebbero un importante fattore di successo, visto che le aziende manifestano il bisogno di connettersi a, ed integrarsi con, sistemi e processi multipli attraverso entità multiple.

L'utilizzo di Internet come mezzo per portare i giocatori più vicini contribuirà alla riorganizzazione dell'industria automobilistica e della sua tipologia di relazioni. L'impatto dell'e-business su tale industria deve ancora essere stimato, ma non può non essere considerato: secondo l'*Automotive Consulting Group*, la potenziale applicazione delle tecnologie che permettono *business-to-business* via Internet è significativo; la stima è che nel 2005, nella catena di valore globale di questa industria, i risparmi potenziali saranno di 174000 milioni di dollari all'anno.

RAUFOSS CHASSIS TECHNOLOGY: UN IMPORTANTE PARTNER INDUSTRIALE NEL PROGETTO E UN RAPPRESENTATIVO CASO DI STUDIO

I risultati del progetto MOMENT sono basati sulla ricerca svolta in stretta cooperazione con uno dei partner industriali, Raufoss Chassis Technology (RCT). RCT rappresenta anche un caso di studio dove la validità di tali risultati viene testata. Questo partner, sito in Raufoss (Norvegia), è un produttore manifatturiero che opera come fornitore di primo/secondo livello nell'industria automobilistica. RCT è considerata estremamente importante per l'applicabilità dei risultati prodotti, poiché essa rappresenta un caso comune nell'industria dei fornitori automobilistici.

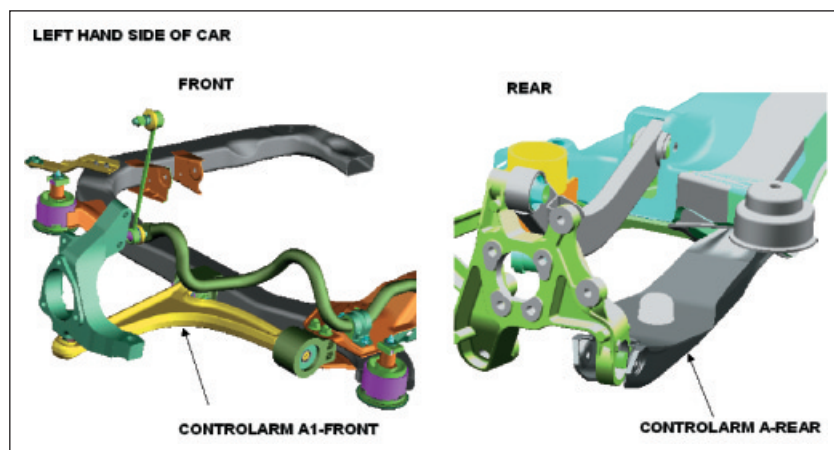


Fig. 2 - I prodotti di RCT

RCT ha un contratto a lungo termine (fino al 2007) con General Motors (GM) per la produzione di sospensioni anteriori e posteriori in alluminio (Figura 2), parte della piattaforma Epsilon (Vectra, SAAB 93, Vauxhall, + marchi Americani), sia per il mercato Europeo che Americano. Il contratto richiede una riduzione di prezzo del 5% annuale, il che rende di vitale importanza per RCT l'operare come *best-practice* lungo il periodo di durata del contratto.

Osservando la situazione odierna, si può notare che, da quando un venditore situato in prossimità di RCT spedisce un ordine a GM, servono tre mesi perché l'informazione raggiunga gli attori coinvolti nella creazione del prodotto finale, come mostrato in Figura 3. Tale situazione è comune nell'industria automobilistica e quella dei suoi fornitori. Anche considerando le transizioni in corso, i fattori di successo competitivo sono rimasti gli stessi (Mehta, 2003): costo, *time-to-market* e prestazione. Per di più, l'inefficiente flusso di informazioni (Figura 3) è inaccettabile e causa il cosiddetto effetto Forrester (For-

rester, 1961). Quest'ultimo, anche conosciuto come *bullwhip effect*, riguarda la situazione di quei partners che sono lontani dalla domanda finale con poca conoscenza del mercato e che di conseguenza ricevono informazioni meno accurate ed in ritardo.

Le principali leve di miglioramento nel progetto MOMENT sono precisamente i flussi di informazione e materiali. I risultati previsti sono quindi la riduzione dei costi e del tempo a un minimo e il miglioramento della qualità a un massimo. Gli strumenti usati sono quelli offerti dal mercato dell'ICT: Internet, sistemi ERP (*Enterprise Resource Planning*) fogli elettronici e simili. MOMENT dovrebbe usare questi strumenti al fine di produrre un insieme di strumenti computerizzati e linee guida teoriche, per supportare i responsabili impegnati nella messa in opera di aziende manifatturiere estese, e nel controllo e miglioramento delle operazioni giornaliere. Tale supporto è pensato come incentivante la collaborazione tra partners che porterebbe, tra gli altri, a ridurre l'effetto Forrester.

Nella prossima sezione seguirà una breve descrizione dell'*extended enterprise Operation Model* e del sistema di misurazione di prestazione automatizzato. Questi strumenti sono stati sviluppati in collaborazione con RCT dove sono ad oggi utilizzati per il controllo e il miglioramento delle operazioni.

PROGETTANDO STRUMENTI PER L'INTEGRAZIONE DELLE AZIENDE ESTESE

"Operazioni" sono funzioni o sistemi che trasformano *input* in *output* di maggior valore (Russell and Taylor, 2002, Reid and Sanders, 2002, Meredith and Shafer, 2002). Secondo Reid e Sanders (2002), la gestione delle operazioni è la funzione aziendale responsabile per la pianificazione, il coordinamento e il controllo delle risorse che servono a produrre i prodotti e servizi di un'azienda. In aggiunta, Hanna e Newman (2001) fanno notare che la strategia operativa, un insieme di decisioni prese da un'organizzazione nel tempo, deve essere basata su un *input* preciso e definito fornito dai responsabili.

Le operazioni in un'azienda estesa vanno dall'approvvigionamento di materie prime dall'ennesimo fornitore, alla consegna del prodotto finito al cliente finale (vedi anche Jagdev e Thoben, 2001; Browne et al., 1995; Child e Faulkner, 1998). I responsabili hanno a che fare con decisioni operative, tattiche, e strategiche. Coordinare una tale complessa struttura di attori e mutue relazioni è sia importante che difficile. Per supportare le aziende estese in questi casi, il *MOMENT Toolkit* - l'insieme di strumenti progettati in MOMENT-, come parte della metodologia sviluppata in MOMENT, è stato progettato per offrire supporto nelle seguenti aree:

- Progettazione e strategia delle operazioni: progettazione e implementazioni di un'ottimale struttura della rete di aziende,

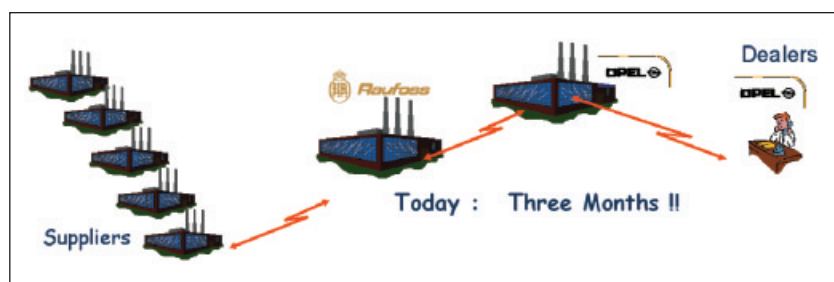


Fig. 3 - Il flusso di informazione nella catena di valore di RCT.

analisi "what-if" di differenti scenari, ecc.

- Progettazione dell'azienda estesa: definizione dei principi di controllo, KPIs, attività primarie e di supporto per la compagnia focale (fornitore di primo livello), ecc.
- Operazioni dell'azienda estesa: supporto alle operazioni giornaliere dell'azienda estesa attraverso la visualizzazione dei suoi attori e dei processi, accesso ad informazioni in tempo reale, educazione e miglioramento delle capacità dei dipendenti.

L'extended enterprise Operations Model

Basandosi sui concetti di operazioni, gestione delle operazioni, strategia operativa, e azienda estesa, il progetto MOMENT ha delineato i seguenti due concetti:

- La gestione dell'azienda estesa: l'organizzazione e il controllo dell'intero sistema manifatturiero, così che i processi interni ed esterni siano portati a termine in modo efficiente e siano abbastanza flessibili da soddisfare i cambiamenti della domanda del cliente finale.
- L'extended enterprise Operations Model: una descrizione computerizzata degli attori dell'azienda estesa, processi/operazioni, flussi dei materiali e delle informazioni. Lo strumento è progettato in modo da assicurare efficiente e coordinato controllo, e informazione e comunicazione in tempo reale, tra i diversi attori della compagnia estesa.

Nel corso della ricerca di progetto, il consorzio ha individuato un'opportunità nell'utilizzare tecnologie informatiche e di comunicazione esistenti al fine di rendere visibili le operazioni a livello non più locale ma di azienda estesa. Di conseguenza, il così detto "extended enterprise Operation Model" è stato progettato e sviluppato utilizzando comuni software ed applicativi informatici come Internet, Electronic Data Interchange (EDI), Enterprise Resource Planning (ERP), ecc.

L'extended enterprise Operation Model (Figura 4) ha un orizzonte che copre tutta l'azienda estesa. Funziona come un portale computerizzato ai dati di interesse per tutti gli attori coinvolti. Come mostrato in Figura 4, il modello presenta i seguenti elementi:

- Principi base: lo scopo di questo strumento è di costituire e gestire aziende estese, basandosi sui principi di *lean manufacturing* e *lean value*. Aziende estese competitive devono di norma prestare particolare attenzione ai tempi; i compiti dovrebbero essere svolti non ripetitivamente utilizzando flussi di informazione e materiali agili e ad una via; le decisioni dovrebbero essere basate su informazione in tempo reale; i processi dovrebbero essere integrati lungo la catena di valore del prodotto. Se questi principi vengono implementati, l'azienda estesa rende la catena di valore del suo prodotto visibile, semplice e trasparente.
- Principi di Controllo: il modello si basa su alcuni principi generali di controllo che specificano aree di controllo, flussi di materiali e dati, e il processo di pianificazione. In Raufoss Chassis Technology (RCT), esempi di principi di controllo sono: *masterplan* delle risorse e volume di consegna basati su un piano di domanda annuale, consegne giornaliere al cliente basate su *call-offs*, ecc.
- Centro SCM (Supply Chain Management): con il compito di coor-

dinare i processi amministrativi lungo la catena di valore del prodotto: rappresenta il cuore del modello e della sua pratica implementazione. Implementare il centro SCM significa selezionare ed addestrare una squadra di esperti con responsabilità individuali per la gestione dei processi relativi ai flussi di informazione e materiali. Il centro SCM è responsabile per l'accettazione dell'ordine, la schedulazione delle consegne, il controllo della produzione e del magazzino, e gli acquisti.

- Attori dell'azienda estesa e relativi processi primari: nella parte più bassa del modello, viene rappresentata la catena di valore del prodotto come insieme di: fornitori, trasportatori, magazzini e centri distributivi, la compagnia focale (fornitori di primo livello) e cliente finale (OEM).
- KPIs (Key Performance Indicators): integrato con il modello è il sistema di misurazione di prestazione. Tale sistema è stato progettato per soddisfare i requisiti delle operazioni di aziende estese globali. La prossima sessione del presente articolo discuterà questo punto in maggior dettaglio.
- Processi di gestione e supporto: integrati nel modello sono anche processi che non sono direttamente collegati con il flusso di materiali e informazioni nella catena di valore del prodotto, come, ad esempio: manutenzione, finanza, contabilità, ecc.

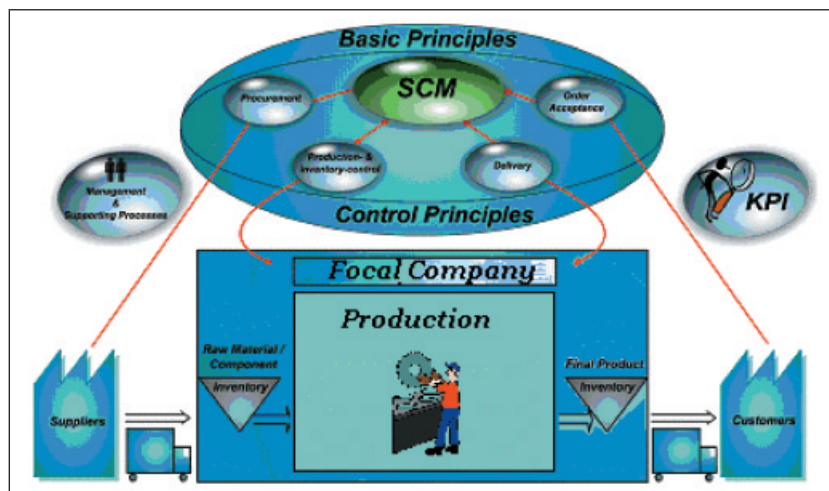


Fig. 4 - Extended enterprise Operation Model: uno standard

Ogni riquadro nella versione computerizzata del modello è collegato con le relative informazioni, che possono essere o immagazzinate o rilevate al momento della richiesta da parte dell'utente (informazione in tempo reale). Di conseguenza, non è una semplice rappresentazione delle operazioni e degli attori ma diventa anche un importante strumento di controllo dei flussi di informazione e materiali. È basato sull'idea che avere tutte le informazioni immagazzinate in un solo posto e accessibili da un unico portale, renda il flusso di informazione più agile all'interno dell'azienda estesa. Come RCT fa oggi, diverse aziende estese potrebbero usare lo stesso strumento per: controllare le loro operazioni e i flussi di materiali e informazioni, raccogliere dati, grafici e fogli di calcolo, migliorare la disponibilità di informazioni, diminuire i costi relativi al flusso di dati, addestrare forza lavoro e rendere possibile supporto tecnico in formato multimediale, di aiuto in un ampio insieme di casi (per esempio rottura di macchine, progettazione di migliorie, ecc).

Sistema di misurazione di prestazione automatizzato per compagnie manifatturiere estese
Selezionando l'opzione "KPI" sull'*extended enterprise Operation Model*, l'utente ha accesso al si-

stema di misurazione di prestazione (Figura 5). Tale sistema è diverso dai precedenti in quanto è stato progettato basandosi sulla struttura generica di un'azienda estesa ed i suoi bisogni. I principi di progettazione sono gli stessi usati nella progettazione dell'*extended enterprise Operation Model*, e cioè: informazione in tempo reale, immagazzinata e accessibile da un singolo nodo. Lo sviluppo di questo sistema è stato portato a termine in RCT, basandosi sui suoi obiettivi e bisogni.

Il concetto di sistema di misurazione di prestazione sviluppato in MOMENT suggerisce che tale sistema abbia le seguenti caratteristiche:

- Accessibile da un pannello di controllo computerizzato
- Basato sull'utilizzo di indicatori "lead" e "lag" al fine di mostrare valori passati, presenti e stime future
- Totalmente automatizzato sia per quanto riguarda la raccolta dati, che il calcolo del valore dei KPI
- In grado di fornire in tempo reale all'utente un'immagine della prestazione dell'intera azienda estesa
- Di semplice utilizzo grazie a una chiara e flessibile interfaccia grafica.

Per quanto riguarda gli indicatori

di prestazione, dovrebbero essere suddivisi in cinque categorie:

- Indicatori relativi al flusso di materiali
- Indicatori relativi al flusso di informazioni
- Indicatori relativi alla qualità dei processi di gestione della *supply chain*
- Indicatori relativi al consumo di risorse nella gestione della *supply chain*
- Indicatori Generali (Tradizionali indicatori standard)

In aggiunta, tali indicatori dovrebbero essere utilizzati per:

- Monitorare la prestazione
- Analizzare e valutare la prestazione
- Monitorare lo stato dei flussi e dei processi nella catena di valore logistica
- Come supporto per le decisioni concernenti il controllo dei flussi nella catena di valore (*supply chain control*)
- Per identificare problemi e aree su cui concentrare le forze in progetti di miglioramento.

Strutturare il sistema di misurazione di prestazioni in tale modo, e impostare la gestione per prestazione secondo questi principi, renderebbe possibili, secondo il consorzio di progetto, i seguenti benefici:

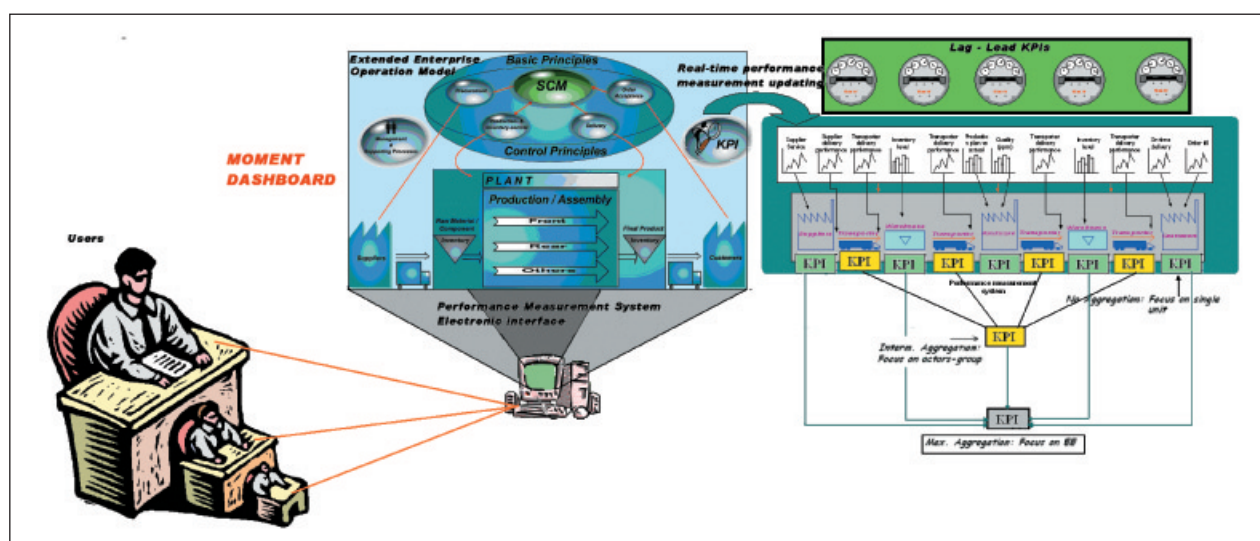


Fig. 5 - Utilizzo dell'*extended enterprise Operation Model* per controllare la prestazione della compagnia estesa: il metodo MOMENT [Source: Busi, Alfnes, Strandhagen, 2003].

- Le informazioni presentate all'utente sono basate su misurazioni in tempo reale della prestazione delle operazioni.
- Utilizzando Internet e strumenti come EDI o XML, le diverse organizzazioni all'interno dell'azienda estesa possono avere informazioni sulla prestazione dei processi lungo tutta la catena di valore, sfondando quindi i confini della singola azienda.
- Approcci *bottom-up* sono ora possibili. Questa caratteristica è un miglioramento logico dei sistemi precedenti dove "[...] il sistematico approccio [...] rende possibili solo approcci *top-down* per decomporre la prestazione in metriche misurabili ma non rende possibili approcci *bottom-up* per integrare diverse metriche a un più basso livello, in prestazione a un più alto livello" (Solvang, 2001).
- L'informazione relativa alla prestazione dei processi è fornita in tempo reale secondo diversi principi di aggregazione (da prestazione del singolo attore a quella dell'azienda estesa).

CONCLUSIONE

In questo lavoro, il background, il contesto e i risultati del progetto MOMENT sono stati presentati. Tale progetto rappresenta un tentativo di migliorare la conoscenza e gli strumenti relativi alla gestione delle aziende estese. I risultati sono raggiunti in stretta cooperazione con partner industriali dove la loro validità viene poi testata. La scelta di discutere l'*extended enterprise Operation Model* e il sistema di misurazione di prestazione automatizzato e le loro caratteristiche è stata fatta considerando la fase avanzata della relativa ricerca. La caratteristica più importante di entrambi gli strumenti è l'uso estensivo dell'informazione in tempo reale, resa possibile dalla totale automatizzazione e integrazione con gli altri sistemi di gestione aziendale e le esistenti tecnologie di comunicazione. L'importanza di

basare decisioni tattiche, operative e strategiche su informazioni attuali invece che storiche è stata dimostrata in numerosi precedenti lavori. Come confermato da Lance (2000): "[...] decisioni che influenzano la strategia generale di un'azienda e i suoi obiettivi devono essere prese al momento – e questo richiede dati accurati e aggiornati su costi reali, strategie di costo, pianificazione delle capacità e altre variabili chiave, se si desidera che tali decisioni siano fondate."

Ringraziamenti

Si ringraziano tutti i partners coinvolti nel progetto MOMENT. Un particolare ringraziamento a Jan Ola Strandhagen, Erlend Alfnes, Tom Fagerhaug, Marco Semini, Sindre Bolseth, Freddy Johnsen (SINTEF Industrial Management) e ad Arne Horten (RCT, logistics manager), per l'attiva e fruttuosa partecipazione.

Bibliografia

1. Andersen, B., Fagerhaug, T. (2001), *Performance Measurement Explained: Designing and Implementing Your State-of-the-Art System*, ASQ Press, USA.
2. Bartel, W. (2001) *Value Realisation in a Consolidating Global Automotive Sector*, in Business Briefing Global Manufacturing and Technology 2001, accessed at <http://www.wmrc.com/businessbriefing/pdf/auto2001/book/bartel.pdf>
3. Braithwaite, A., Christopher, M. (1991), *Managing the Global Pipeline*, International Journal of Logistics Management, Vol. 2, No. 2, pp 55 - 62.
4. Browne, J., Devlin, J., Rolstad, A., Andersen, B. (1997), *Performance Measurement: The ENAPS Approach*, The International Journal of Business Transformation, Vol. 2, p. 73-84.
5. Busi, M., Alfnes, E., Strandhagen, J.O., (2003), *The MOMENT Approach to Performance Measurement in Extended Manufacturing Enterprises*. In Proceedings of the POM in the Service Economy conference, Savannah, GA, U.S.A.
6. Busi, M., Alfnes, E., Bolseth, S., Strandhagen, J.O., (2003), *The Mobile Extended Manufacturing Enterprise*. In *One World? One View of OM? The Challenges of Integrating Research & Practice*, SGEditioni Padova.
7. Busi, M., Bolseth, S., Strandhagen, J.O., (2003), *A performance measurement system for extended enterprise operation control*. In *Implementation and Impact of Performance Measurement Systems*, IFIP WG5.7, Special Interest Group on Performance Measurement, Bergamo, Italy.
8. Busi, M., Strandhagen, J.O., (2003), *Towards Extended Enterprise Integration*. In Proceedings of the 8th International Symposium on Logistics (ISL), Sevilla, Spain.
9. Christopher, M. (1998). *Logistics and supply chain management - Strategies for reducing cost and improving service*. Pitman publishing
10. Fifth Framework Program, at <http://www.cordis.lu/fp5/management/particip/v-gfp2.htm#>.
11. Forrester, J., (1961), *Industrial Dynamics*, MIT Press
12. Hanna, M.D. & Newman, W.R. (2001). *Integrated Operations Management - adding value for customers*, Prentice hall
13. Harland, C.M., *Networks and Globalization - A Review of Research*. Warwick Business School, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UK.
14. Jagdev, H.S., Thoben, K.D. (2001) *Anatomy of enterprise collaborations*. In *Production Planning and Control*, Vol. 12, No. 5, pp. 437-451.
15. Lance, E (2000), *In search of the 12-Month Car*, Automotive Industries, February 1
16. Mehta, A. *Sharing CAE responsibilities between OEM & Suppliers, Emerging Issues*. Accessed on March, the 5th, 2003 at <http://www.mscsoftware.com/support/library/conf/auto00/index.cfm>
17. Meredith, J.R. & Shafer, S.M (2002). *Operations Management for MBAs*. John Wiley & Sons
18. MOMENT Project deliverables, accessible at www.cimru.nuigalway.ie/moment
19. Morell, J., Swiecki, B.F. (2001). *E-Readiness of the Automotive Supply Chain. Just how wired is the Supplier Sector?*, ERIM
20. Moseng, B. (1996). *TOPP Summering 1992-95*, TOPP report, Trondheim, Norway.
21. Moseng, B., Bredrup, H. (1993) *A Methodology for Industrial Studies of Productivity Performance*, Journal of Production Planning and Control, Vol. 4, No. 3.
22. PricewaterhouseCoopers (2000). *A2C: The Second Automotive Century*, accessed at <http://www.pwcglobal.com/auto>
23. Raid, R. & Sanders, N (2002), *Operations Management*, John Wiley & Sons.
24. Russell, R. & Taylor III, B (1998), *Operations Management - Focusing on quality and competitiveness*. Prentice Hall
25. Simatupang, T.M., Sridharan, R. (2002), *The Collaborative Supply Chain*, The international Journal of Logistics Management, Vol. 13, No. 1, pp. 15-30.
26. Solvang, W.D. (2001), *Architecture for supply chain analysis and methodology for quantitative measurement of supply chain flexibility*, PhD dissertation, NTNU.
27. Tyndall, G., Gopal, C., Partsch, W., Kamau, J. (1998), *Supercharging Supply Chains: New ways to Increase value through global operational excellence*, John Wiley & Sons, Inc.
28. Williamson, O.E. (1975) *Markets and Hierarchies*, The Free Press, New York, NY, USA.

ANALISI DI VIBRAZIONI IN SISTEMI MECCANICI PER DIAGNOSTICARE MALFUNZIONAMENTI: STATO DELL'ARTE E METODOLOGIE INNOVATIVE

di Massimo Antonini, Francesco Caruzzo, Rodolfo Faglia, Andrea Magalini,
Monica Tiboni, David Vetturi

Dipartimento Ingegneria Meccanica - Università degli Studi di Brescia

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito dei gruppi di Meccanica Applicata alle Macchine e di Misure Meccaniche e Termiche del Dipartimento di Ingegneria Meccanica negli ultimi due anni sono stati condotti alcuni lavori di tesi e successivamente lavori commissionati da aziende inerenti l'analisi dei fenomeni vibratorii in sistemi meccanici, che hanno consentito un progressivo affinamento delle competenze in questo ambito.

È questo un tema di grande interesse ed attualità, data la sua stretta correlazione con le problematiche di diagnostica e di monitoraggio ed, in una visione di ancor più ampio respiro, con le politiche di manutenzione dei sistemi meccanici.

In questo articolo si vuole presentare un quadro riassuntivo sullo stato dell'arte della diagnostica e più in generale della metodologie di manutenzione in ambito industriale, focalizzando l'attenzione sulla manutenzione predittiva e protoattiva e sulla tecnica di monitoraggio delle vibrazioni, molto diffusamente adottata.

Ci si sofferma anche sulla presentazione delle linee di tendenza nel settore, ossia delle nuove direzioni verso cui si stanno muovendo le più recenti ricerche, coinvolgendo metodologie di analisi sempre più evolute (cepstrum analysis, higher order spectral analysis, trasformate tempo-frequenza, ...) e strumenti di classificazione automatica (learning vector quantization, reti neurali artificiali, ...).



La presentazione delle ricerche da noi condotte in questo ambito e dei risultati conseguiti è qui soltanto accennata, in quanto le si darà ampio spazio in successive pubblicazioni.

2. STRATEGIE DI MANUTENZIONE

Ai metodi manutentivi classici si sono affiancati negli ultimi anni approcci innovativi e ad oggi si possono riconoscere quattro politiche: manutenzione a cedimento, manutenzione programmata, manutenzione su condizione ("condition monitoring") e manutenzione prioritaria ("proactive maintenance"). I primi due rappresentano gli approcci classici, mentre manutenzione su condizione e proattiva rappresentano le metodologie più innovative, destinate ad una sempre maggiore diffusione sia nelle macchine automatiche di piccola dimensione, sia in grandi impianti industriali.

2.1 Manutenzione a cedimento

La manutenzione a cedimento viene effettuata soltanto nel caso di rottura del macchinario, per cui essa viene adoperata fino a che il guasto non porta ad una situazione critica che pregiudica le possibilità di proseguire nella produzione. I limiti all'applicazione di tale metodo si trovano intrinsecamente nella sua definizione: il cedimento non deve essere un fattore che compromette la capacità produttiva dell'impresa; per poter operare con una tale strategia bisogna trovarsi in particolari condizioni favorevoli, come ad esempio un caso in cui il fermo-macchina non sia uno stato eccessivamente oneroso, cosa che non accade in industrie con processi produttivi che richiedono impianti con tempi di avviamento lunghi, oppure si sia in condizioni di ridondanza dell'apparato produttivo, così che se anche una linea rimane ferma, si può proseguire comunque nella produzione. Va inoltre considerato come, in genere, un danno alla macchina che comporti un arresto dell'impianto sia causa di danni anche ad altri organi della macchina stessa: classico è l'esempio del cuscinetto che, per effetto del suo bloccaggio, danneggia anche l'albero e i supporti. La manutenzione a cedimento risulta, quindi, valida se il modo di guasto è di tipo "soft" e se vi è una bassa probabilità di danni secondari all'impianto. Se si vuole procedere con tale tipo di manutenzione, si deve inoltre disporre di un magazzino di pezzi di

ricambio sufficientemente ampio, tale da assicurare una sostituzione rapida di un qualsiasi componente che possa andare incontro a rottura. Nel caso si decida di applicare la manutenzione a cedimento si ha un risparmio di risorse destinate alla diagnostica e al controllo notevole, a fronte di un elevato grado di rischio.

2.2 Manutenzione programmata

La strategia di manutenzione programmata si basa sulla manutenzione periodica e, se necessario, sulla sostituzione dei pezzi della macchina. Tale approccio richiede esperienza e conoscenza specifica dell'impianto: si deve essere in grado di prevedere, con ragionevole affidabilità, i tempi necessari alla rottura dei componenti della macchina e quindi programmare adeguatamente i fermi-impianto. Questi tempi sono spesso previsti dal produttore dell'apparecchiatura (ad esempio nei velivoli) o dagli enti legiferanti. Nel caso in cui il guasto avvenga con modalità e in tempi non previsti, si procede alla manutenzione come nel metodo a cedimento. Un caso particolare della manutenzione programmata è quella occasionale: al verificarsi di una sosta dell'impianto per cambio programma o per manutenzione di altre parti del sistema, si procede ad una verifica delle condizioni dell'apparecchio.

L'efficacia della manutenzione programmata dipende dal fatto che il sistema abbia modi di guasto noti, così che si possa procedere ad una analisi che porti ad una previsione dei modi e dei tempi in cui avverrà il guasto. Inoltre, terminato l'intervento di manutenzione, devono essere ripristinate le condizioni iniziali dell'apparecchiatura, così che si possa pensare di applicare gli stessi parametri usati nell'analisi precedente. Tale strategia richiede quindi la disponibilità di dati affidabili sui guasti passati e bene si adatta quando la distribuzione dei guasti è ristretta.

La manutenzione programmata risulta conveniente, rispetto alla manutenzione a cedimento, allorché i costi di smontaggio e controllo ef-

fettuati durante le soste produttive ripaghino le mancate produzioni dovute a soste non programmate che si potrebbero verificare a causa di cedimenti. Il limite principale risiede nel fatto che con queste strategie, molte volte, si interviene su componenti che sono ancora ben lontani dalla fine della loro vita operativa.

2.3 Manutenzione su condizione

La manutenzione su condizione ("condition monitoring") prevede il periodico monitoraggio di uno o più parametri, indicatori dello stato operativo della macchina, e delle relative soglie d'allarme: nel momento in cui, misurando tale parametro, si notasse una sua eguaglianza con il valore di soglia previsto, si potrebbe concludere che la macchina si trova in condizione di guasto imminente e va programmata al più presto una sosta, al fine di eliminare il guasto. La condizione può non essere definita con un unico parametro e può comprendere contemporaneamente l'analisi degli effetti vibratorii, l'analisi delle contaminazioni degli oli, il monitoraggio delle prestazioni ed altri controlli non distruttivi. Il monitoraggio su condizione è generalmente applicabile nei casi di macchinari ed impianti il cui guasto costituisce un notevole rischio per la sicurezza del macchinario stesso, del personale o in casi in cui il costo di mancata produzione per un fermo-impianto improvviso sia eccessivamente oneroso. In questo caso si deve adottare un monitoraggio della condizione per quei componenti la cui rottura costituisce un pericolo. Il condition monitoring risulta una strategia vincente anche nei casi in cui si riscontrano degli errori di progettazione e si vuole evitare la cosiddetta mortalità infantile del macchinario: il monitoraggio su condizione consente di individuare i problemi e permettere un intervento rapido ed appropriato. Tra i principali vantaggi del condition monitoring si evidenzia inoltre l'indipendenza dell'analisi dal singolo operatore; questa tecnica, infatti, bene si adatta a quelle situazioni in cui sia notevole la rotazione di ope-

ratori addetti al macchinario, o in cui non venga utilizzato personale specializzato. Al contrario, se un operatore acquisisce notevole esperienza con un macchinario, egli sarà in grado di "sentire" la macchina e riconoscere facilmente i malfunzionamenti, così come accade agli autisti con le autovetture. Il condition monitoring consente inoltre un controllo a distanza dei macchinari: si può, dall'ufficio tecnico, controllare l'andamento della capacità produttiva, prevedere eventuali correzioni o interventi, senza essere fisicamente vicini all'impianto. Malgrado la facilità con cui si possono elencare i vantaggi del condition monitoring, non è immediato stabilire i risultati in termini economici di una tale applicazione: nel dotarsi di un monitoraggio su condizione, i costi per la manutenzione crescono, ma essi sono, ove tale tecnica risulta essere una effettiva risposta ai problemi, ampiamente ripagati dalla quasi totale mancanza di fermi macchina imprevisi, da un aumento della sicurezza e da una diminuzione delle scorte di pezzi di ricambio.

2.4 Manutenzione prioritaria o proattiva

La manutenzione prioritaria o proattiva ("proactive maintenance") è un'estensione della manutenzione su condizione, essa prevede un'analisi dello stato dell'impianto pari a quella del condition monitoring, ma si differenzia prevedendo la correzione di eventuali cause di malfunzionamento, non appena queste si manifestano. Tale politica si propone di intervenire, non su condizioni di danno imminente (come nel caso del condition monitoring), ma sulle possibili cause di danneggiamento: ad esempio, considerato come la contaminazione degli oli sia una delle fonti principali di danno, la strategia in esame procede con un controllo continuo dello stato degli oli, e non appena il valore manifesta una tendenza verso condizioni di possibile guasto, essa propone di intervenire alla ricerca delle cause di tale contaminazione, al fine di apportare modifiche tempestive ed eliminare il problema alla fonte, pri-

ma che questo possa sfociare in un guasto. La manutenzione prioritaria si pone, quindi, come obiettivo il funzionamento continuativo dell'impianto alle condizioni di miglior esercizio.

La manutenzione proattiva consiste, quindi, nel controllo delle possibili cause che possono portare a danneggiamento del componente, infatti viene anche denominata "analisi origine-cause-guasto". Si procede prima applicando una politica di tipo predittivo e, una volta creato un database di guasti, si possono identificare i metodi inefficienti di manutenzione o i componenti di bassa qualità. Eliminando la causa dei difetti ricorrenti si effettua appunto una manutenzione di tipo proattivo.

3. MONITORAGGIO DELLA CONDIZIONE

Sia la manutenzione su condizione che la manutenzione prioritaria, richiedono la determinazione dello stato della macchina. Al fine di definire la condizione nella quale sta operando il sistema in esame, si devono rilevare i valori di parametri capaci di individuare univocamente la situazione di funzionamento.

La procedura che va dalla definizione di quali componenti analizzare, alla prognosi di un danno al macchinario, può essere standardizzata e riassunta nei seguenti passi: campionamento, rilevamento, diagnosi, prognosi, intervento, autopsia. In figura 1 è riportato uno schema che mostra a quale livello ciascuna fase interviene, mentre di seguito è ri-

portata una sintetica descrizione.

- **campionamento:** La fase del campionamento è spesso trascurata e compresa nel rilevamento. È importante invece attribuirle il giusto valore: un errato campionamento porta infatti a risultati fuorvianti. Le tecniche di campionamento sono state oggetto di normalizzazione e sono descritte, ad esempio, nelle norme ISO 4021.

- **rilevamento:** rientrano in questa fase sia la scelta di quali componenti sottoporre a monitoraggio (legata all'analisi dei guasti), sia la scelta dei parametri con cui monitorare il sistema. È fondamentale, nel rilevamento, controllare più parametri, ognuno dei quali capace, da solo, di descrivere opportunamente una eventuale condizione di danneggiamento, in modo da disporre di dati ridondanti, per poter stabilire con certezza lo stato del macchinario. È difficile accettare che le condizioni del sistema possano essere determinate sulla base di un unico sintomo; sarebbe opportuno individuare un set minimo di parametri indispensabile per effettuare la diagnosi. Una volta rilevati i dati, avendo avuto l'accortezza di campionarli secondo criteri che non invalidino le informazioni contenute, si può passare alla diagnosi.

- **diagnosi:** la diagnosi ha il compito di esprimere una valutazione, il più possibile oggettiva, sulla condizione attuale del macchinario, basandosi sul confronto tra i sintomi riscontrati e i sintomi tipici di sindromi note. Al fine di esprime-

re un giudizio valido sulla condizione di un macchinario, si deve quindi possedere un ampio database di sindromi, e dei relativi sintomi, poiché una mancanza di dati potrebbe portare a non essere in grado di esprimere un giudizio, o, peggio, ad esprimerne uno errato. È importante notare come l'insieme dei dati misurati deve concordare totalmente con l'insieme dei sintomi previsti per quella sindrome di cui si ritiene affetto il macchinario. In genere, questi database contenenti i valori critici dei vari parametri misurati, vengono forniti dalle case produttrici, ad esempio, di cuscinetti; questi vengono, poi, adattati alla situazione in esame che, nel caso delle vibrazioni provocate da rotture nei cuscinetti, corrisponde semplicemente ad un offset dei valori iniziali. La diagnosi consiste nella verifica del fatto che l'armonica che i dati storici associano ad un determinato problema è aumentata di ampiezza. Attualmente questa valutazione è affidata ad esperti con elevata competenza ed esperienza nell'interpretazione degli spettri dei segnali acquisiti.

- **prognosi:** la prognosi è la fase più importate del monitoraggio, essa dovrebbe essere in grado di prevedere quando la macchina richiederà manutenzione o sostituzione. Purtroppo è la fase più delicata e non trova ancora soluzioni certe. La tecnica che si cerca di attuare è quella di interpolare i dati misurati e prevedere un qualche andamento che interpreti il trend che la macchina ha manifestato fino al momento della prognosi. Per poter effettuare una prognosi certa, sarebbe importante avere una grande quantità di dati, sia dei guasti che si sono verificati, sia delle cause che hanno portato a tali guasti.

- **intervento:** una volta che diagnosi e prognosi hanno messo in evidenza la presenza di una anomalia, e la politica manutentiva adottata prevede che in presenza di tale malfunzionamento sia necessario un intervento, si procede al fine di ristabilire la condizione prevista.

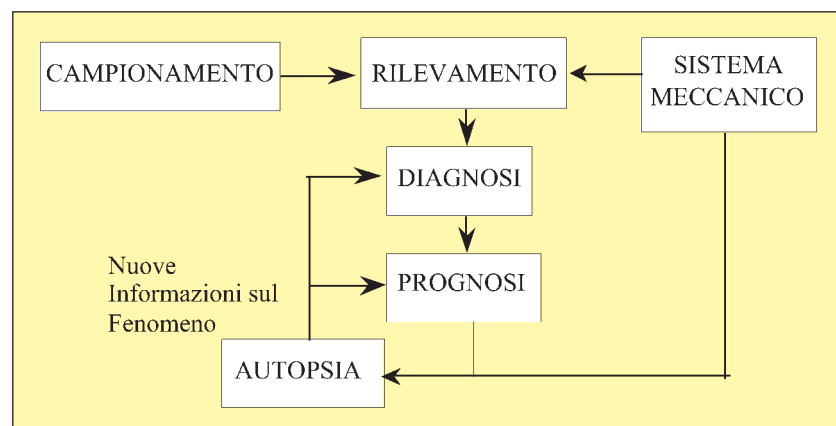


Fig. 1 - Fasi fondamentali della procedura standard di monitoraggio della condizione.

- **autopsia:** nel caso in cui la macchina vada incontro ad un guasto disastroso, è importante effettuare un esame autoptico, al fine di determinare quale componente ha provocato il cedimento, e quale sia stata la causa che ha messo in crisi il componente. Tutto questo allo scopo di acquisire nuovi dati che devono integrare quelli acquisiti lungo la vita della macchina, così da poter meglio prevedere, nel futuro, l'andamento del danneggiamento e quindi aumentare la capacità di eseguire prognosi sempre più corrette e quindi aumentare l'affidabilità di sistemi analoghi.

4. MONITORAGGIO DELLE VIBRAZIONI: STATO DELL'ARTE

Numerose aziende oggi offrono servizi di controllo delle vibrazioni dei macchinari, e attraverso la loro analisi stabiliscono le condizioni del macchinario stesso.

I dati di vibrazione vengono acquisiti attraverso accelerometri posti sulla cassa esterna dell'apparecchio da monitorare. La scelta del punto in cui posizionare l'accelerometro è una prima fase critica ed il corretto posizionamento ha influenza anche notevole sulle informazioni che si possono estrarre dall'analisi delle vibrazioni.

Dai dati acquisiti si può procedere con un'analisi di primo livello seguendo le norme ISO 2372; queste norme permettono di stabilire le condizioni del macchinario a partire dal valore quadratico medio della velocità di vibrazione misurata. I dati ricavati da questo primo tipo di analisi possono essere raccolti e confrontati al variare del tempo stabilendo così un trend di decadimento delle prestazioni.

Questo tipo di approccio è molto semplice e fornisce delle buone indicazioni sullo stato globale del macchinario, ma nel caso in cui si individui un malfunzionamento non si riesce a risalire dalla sola analisi della velocità di vibrazione a quale sia il componente danneggiato, ossia quello che fa insorgere la vibrazione.

La ricerca del componente danneggiato può essere fatta grazie alla relazione, che più volte è stata verificata, tra nascita di particolari picchi sullo spettro del segnale acquisito sul macchinario, e guasto di alcuni componenti del sistema meccanico. L'analisi dello spettro è definita come analisi di secondo livello e richiede la presenza di un database con le frequenze a cui si manifestano comunemente i danneggiamenti dei vari componenti e la presenza di un tecnico competente che conosce bene il macchinario in esame e che sia in grado di relazionare lo spettro acquisito con il database di dati storici.

Come si può immediatamente comprendere tale analisi non è di facile esecuzione e richiede molta sensibilità da parte del tecnico addetto che deve "districarsi" tra i vari picchi che si manifestano, la cui interpretazione è complicata da fenomeni secondari, dalla modulazione del segnale da parte delle componenti rotazionali della macchina e dal filtraggio di cui è responsabile la cassa.

Con questo tipo di analisi si riesce a stabilire lo stato di funzionamento della maggior parte dei componenti del macchinario. I problemi connessi a tale analisi sono però vari, primo tra tutti la totale dipendenza dei risultati dell'analisi dalle capacità discrezionali del tecnico che esegue l'interpretazione dello spettro. Non è inoltre possibile stabilire, con questo secondo livello di analisi, il grado di danneggiamento dei componenti che sono risultati fonte di vibrazione, ma si può esclusivamente osservare il trend dell'ampiezza delle varie frequenze e stabilire che il livello di danneggiamento di un componente si sta elevando.

Oltre alle problematiche connesse all'interpretazione dei risultati provenienti dalla FFT, vi sono numerosi limiti a riguardo delle informazioni che possono essere estratte dall'utilizzo di tale strumento. Innanzitutto i segnali analizzati non rispettano completamente le condizioni poste da Fourier, inoltre i fenomeni vibratorii non si ripetono ogni volta allo stesso modo.

Le direzioni di ricerca si possono

quindi classificare in due strade: una verso tecniche di elaborazione del segnale di vibrazione che consentano una migliore visualizzazione dei fenomeni di danneggiamento ed una verso sistemi in grado di rendere automatica e obiettiva l'interpretazione dei risultati di tali elaborazioni.

Nella ricerca di nuovi metodi di elaborazione dei dati da applicare al condition monitoring si sta procedendo verso l'analisi dei segnali random con l'Higher Order Spectra [14, 15, 16] e con l'utilizzo di strumenti per l'analisi dei transitori come le Wavelet [16, 17].

Nell'ambito di una interpretazione automatica e obiettiva dei risultati dell'elaborazione dati, la ricerca si sta sempre più concentrando sull'utilizzo di reti neurali artificiali [1, 2, 3]. Le capacità di tali sistemi di riconoscere le varie condizioni di funzionamento sono state più volte testate in varie applicazioni.

Si trovano reti neurali nella robotica, utilizzate per l'identificazione di guasti [9], o per la calibrazione [10], per l'identificazione di sistemi lineari e non [7, 8]. Altre applicazioni portano a primi utilizzi industriali delle reti neurali come in [11], dove le reti neurali sono applicate all'identificazione dei guasti nell'industria cartiera, e in [12] dove le reti neurali sono applicate alla manutenzione in ambito ferroviario.

Vi sono infine applicazioni che uniscono metodi di pre-elaborazioni dati innovativi con l'interpretazione automatica basata sulle reti neurali, come ad esempio in [13] dove un sistema basato sulle reti neurali artificiali è addestrato con dati di vibrazione pre-elaborati con le wavelet è utilizzato per il condition monitoring di un cambio automobilistico.

5. RETI NEURALI ARTIFICIALI COME STRUMENTI DI DIAGNOSI

Le reti neurali artificiali hanno già dimostrato di essere strumenti eccellenti per la diagnosi in svariati settori. Tali sistemi operano sulla base dell'analisi di un elevato numero di casi reali e penetrano nel-

le leggi della natura senza però conoscere le relazioni matematiche tra le grandezze in gioco. I campi di applicazione sono tutti quelli dove l'analisi statistica delle variabili di un problema risulta difficoltosa o dispendiosa in termini di calcolo, ma soprattutto dove non sia chiaro a priori quali relazioni deterministiche esistano tra le diverse variabili che caratterizzano il problema.

Tali sistemi sono stati utilizzati, ad esempio, per il riconoscimento della scrittura manoscritta, andando quindi ad ampliare le potenzialità dei programmi OCR. Per addestrare la rete è però necessario reperire un elevato numero di casi di scrittura noti; questo problema può sembrare banale ma non è facile reperire un gran numero di testi scritti da persone diverse, e nella varietà e completezza degli esempi raccolti si gioca gran parte dei risultati che si possono ottenere. A questo punto, addestrata la rete, si sono ottenute ottime capacità di riconoscimento.

Numerose sono anche le applicazioni nella diagnosi medica. In questi casi le reti neurali artificiali possono essere utilizzate per coadiuvare il medico nella fase di diagnosi. Applicazioni si trovano, ad esempio, nel riconoscimento automatico delle radiografie: la rete neurale suggerisce al medico l'operazione da eseguire che può essere *nessuna estrazione o chirurgia maxillo-facciale*, o altro. Anche in questo caso l'addestramento su casi noti è fondamentale e la scelta può ricadere su casi trattati e selezionati da alcune tra le più prestigiose associazioni di professionisti mondiali. In questo modo si addestra il sistema in maniera accurata e si può aiutare il professionista all'inizio della carriera quando deve ancora acquisire l'esperienza adeguata e desidera confrontarsi con altri specialisti.

Buoni risultati si sono ottenuti anche utilizzando le reti neurali per il monitoraggio ambientale. In questo caso vengono utilizzate per individuare eventuali contaminazioni di elementi radioattivi nell'ambiente. Le reti neurali artificiali intervengono nell'analisi dello spettro

per due fini: nell'assegnazione di un coefficiente di qualità agli spettri di analisi, operazione necessaria quando vi è deposito di materia sul sensore che impedisce la corretta valutazione del rischio ambientale, e per interpretare lo spettro ed identificare gli isotopi radioattivi in tempo reale. In questo modo si può rendere indipendente l'interpretazione dello spettro dall'operatore che esegue l'analisi evitando l'esposizione pericolosa del personale tecnico a radiazioni.

Viste le buone premesse, si può affermare che le reti neurali artificiali sembrano strumenti in grado di ottenere buoni risultati anche nelle applicazioni industriali.

6. CONCLUSIONI

Una strategia manutentiva vincente necessita di un buon apparato di diagnosi e di prognosi. Attualmente le tecniche diagnostiche si basano sull'analisi del sistema attraverso controlli non distruttivi e la prognosi è affidata agli operatori. La diagnosi spesso è il controllo di alcuni parametri dei sistemi meccanici che si sono dimostrati indici affidabili per il riconoscimento dello stato di salute dei macchinari; quali la temperatura, la pressione e la contaminazione degli oli del circuito oleodinamico, le vibrazioni misurabili sulla cassa della macchina, la cavitazione ed altri parametri caratteristici di ogni macchinario.

Il controllo delle vibrazioni è una delle tecniche più diffuse e più generalmente applicabili. Tale controllo è generalmente affidato a ditte specializzate che si occupano del service. Acquisiti i dati, il tecnico del service ha a disposizione un database di dati storici delle frequenze caratteristiche dei vari tipi di danno. In base alla sua sensibilità, suppone un tipo di cedimento ed esegue un confronto visivo tra lo spettro acquisito e lo spettro con la frequenza del danno ipotizzato, e, dalla sua esperienza, determina la fonte del problema. Questo approccio di analisi presenta intrinsecamente alcune limitazioni.

Il limite principale è il vincolo della sensibilità soggettiva e dell'esperienza dell'operatore che interpreta lo spettro. Il medesimo spettro potrebbe essere interpretato in modo diverso da due tecnici distinti. I segnali acquisiti sono poi, in generale, affetti da rumore, e la loro lettura è complicata dalla sovrapposizione di armoniche a frequenze multiple della frequenza fondamentale della vibrazione generata dal danno specifico e dalla contemporanea presenza di segnali modulanti (come la frequenza di rotazione dell'albero) che intervengono sul segnale acquisto generando numerose bande laterali. Si generano quindi spettri sporchi, che richiedono operatori con notevole esperienza per poterli interpretare e, molto spesso, l'interpretazione può non essere univoca.

L'approccio classico ad un tale problema di classificazione ed analisi prevede l'introduzione di un algoritmo con compito di confrontare i dati contenuti nel database con i dati acquisiti. Tale approccio potrebbe risultare non soddisfacente, infatti, esso, pur velocizzando il confronto rispetto ad un intervento umano, non è in grado di catalogare fenomeni con una tale variabilità, complessità e con la presenza di dati di partenza sporchi: la capacità di generalizzare non è una delle caratteristiche degli algoritmi.

L'impiego di reti neurali artificiali per la classificazione si rivela particolarmente efficace quando i dati in ingresso presentano simili caratteristiche. La flessibilità e la capacità di apprendere dall'ambiente in cui sono inserite è infatti una finalità propria delle reti neurali artificiali.

Espletata la fase di apprendimento, che sostituisce la normalizzazione dei dati storici che necessita un approccio supportato da sistemi di calcolo seriale, una rete neurale artificiale è in grado di determinare la soluzione anche in casi non perfettamente uguali ai casi previsti, giungendo a soluzione anche in presenza di disturbi, ed è in grado di acquisire ulteriori conoscenze nel tempo dai nuovi casi che si presentano, divenendo uno strumento di



Fig. 2 - Sistema meccanico considerato per effettuare prove sperimentali per studiare l'applicabilità delle differenti metodologie di diagnostica possibili.

diagnostica sempre più esperto ed adattato all'ambiente in cui opera. A titolo di esempio, si illustra una delle applicazioni studiate presso il laboratorio di Meccanica Applicata. Sono state condotte varie prove sperimentali, simulando differenti condizioni di funzionamento di un sistema meccanico per la generazione di moto intermittente unidirezionale (mostrato in figura 2) ed acquisendo l'accelerazione rilevata da due accelerometri, uno posizionato sul carico ed uno sulla cassa dell'intermittente. In questo modo è stato possibile raccogliere un ampio database di comportamenti vibratori del sistema al variare delle condizioni operative. Successive elaborazioni dei segnali di accelerazione realizzate con differenti metodologie (FFT, Cepstrum Analysis, Wavelet, Higher Order Spectral Analysis) hanno messo in evidenza la sensibilità degli indicatori estratti ai fenomeni simulati. Successive fasi di addestramento di Reti Neurali Artificiali utilizzando i differenti indicatori hanno consentito ulteriormente di evidenziare come alcuni consentano di caratterizzare meglio il fenomeno, nonché di verificare l'abilità delle Reti Neurali Artificiali nella classificazione e generalizzazione. Un altro interessante approccio al problema che si sta sperimentan-

do è un metodo matematico denominato GSLT [23, 24], che si ritiene possa consentire di formalizzare e "quantificare" i tipi di diagnosi e di intervento.

Bibliografia

- [1] Haykin S.: 'Neural networks: A Comprehensive Foundation', Prentice-hall, 1999.
- [2] D. Nguyen, B. Widrow: 'Improving the learning speed of a 2-layer neural networks by choosing initial values of the adaptive weights', Proceed. of the International Joint Conference on Neural Networks, vol.3, pp. 21-26, 1990.
- [3] H. Demuth, M. Beale.: 'Neural Network Toolbox for Use with Matlab', guida in linea di Matlab.
- [4] A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer: 'Discrete-time signal processing', Prentice-hall, 1989.
- [5] S.S. Rao: 'Mechanical Vibration', Addison-Wesley Publishing, 1995.
- [6] E. C. Fitch: 'Proactive Maintenance for Mechanical Systems', Elsevier Science Publisher, 1992.
- [7] Zhi-Quiang Hou, A. Lucifredi: 'On the use of Neural Networks for identification of linear and nonlinear systems', Meccanica (30), Klower Academic Publisher, pp. 377-388, 1995.
- [8] K. Worden, G.R. Tomlinson: 'Classifying linear and nonlinear systems using neural networks', Proceed. of the 17th international seminar on Modal Analysis, Leuven, 1992.
- [9] A.T. Vemuri, M.M. Polycarpou, S.A. Diakourti: 'Neural Network based fault detection in robotic manipulators', IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1998.
- [10] V.R. de Angulo, C. Torras, Self Calibration of a Space Robot, IEEE Transaction on Neural Networks, Publisher

- Item Identifier 1045-9227/97, 1997, pag.847-851.
- [11] D.J.H. Wilson, G.W. Irwin, G. Lighthbody: 'RBF Principal Mainfolds for Process Monitoring', IEEE Transaction on Neural Networks, 1999.
- [12] J.N.K. Liu, K.Y. Sin: 'Fuzzy Neural Network for Machine Maintenance in mass transit railway system', IEEE Transaction on Neural Networks, 1997.
- [13] B.A. Paya, I.I. Esat, M.N.M. Badi: 'Artificial neural networks based fault diagnostic of rotating machinery using wavelet transforms as a preprocessor', Mechanical Systems and Signal Processing, 1997.
- [14] A. Rivola, P.R. White: 'Use of Higher Order Spectral Analysis in condition monitoring: simulation and experiments', Proceed. of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conference, 1999.
- [15] A. Swami, J.M. Mendel, C.L. Nikias, Higher Order Spectral Analysis for Use with Matlab.
- [16] D.E. Newland, An Introduction to Random Vibration, Spectral and Wavelet Analysis, Harlow and John Wiley, 1993 New York Lngman..
- [17] Y. Misiti, G. Oppenheim, J.M. Poggi, Wavelet Toolbox for Use with Matlab, guida in linea di Matlab.
- [18] P.D. Mc Faden, Application of the wavelet transform to early detection of gear failure by vibration analysis, Proceed. Of the International Conference of Condition Monitoring, University College of Swansea, Wales, 1994.
- [19] R. Faglia, M. Tiboni, Antonini M., "Studio della funzionalità di sistemi meccanici: confronto tra metodologie tradizionali ed una metodologia innovativa basata su reti neurali artificiali", Atti del XVI Congresso dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica ed Applicata, AIMETA, Ferrara, 9-12 settembre, 2003.
- [20] R. Faglia, M. Tiboni, Antonini M., "Artificial Neural Network based automatic diagnostic system for condition monitoring.", Proceedings of the IASTED International Conference on Intelligent Systems and Control, Salisburgo, 25-27 Giugno, 2003.
- [21] R. Faglia, M. Tiboni, Antonini M., "Detection of various failure causes in mechanical systems by the use of artificial neural networks.", Proceedings of CASYS'2003, 11-16 Agosto, Liege, Belgium 2003.
- [22] M. Tiboni, "Condition monitoring e reti neurali artificiali per diagnosticare malfunzionamenti in sistemi meccanici, Atti del 47° Convegno Nazionale ANIPLA, Brescia, 21-22 Novembre, 2003.
- [23] Petrov A.A., G. Resconi, R. Faglia, P.L. Magnani, General system logical theory and its application to task description for intelligent robot, Proceed. Of the Sixth International Conference on Artificial Intelligence and Information Control of Robot, Smolenize Castle, Slovakia, Settembre 1994.
- [24] G. Resconi, M. Jessel, A general system logical theory, International Journal of General Systems, vol. 12, pp. 159-182, 1986.
- [25] J.S. Stecki, Introduzione al Condition Monitoring, Organi di Trasmissione, (9), 2000.

VERSO UN SERVIZIO REGIONALE LOMBARDO DI POSIZIONAMENTO GPS IN TEMPO REALE. LE DUE RETI DEMO-TEST ATTIVATE PRESSO L'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA

di Matteo Sgrenzaroli ^(*), Giorgio Vassena ^(**)

(*) Centro di competenza sul Rilevamento e la Geomatica (Topotek), Inn.Tec.

(**) Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Brescia

RIASSUNTO

Dai primi mesi del 2003, presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Brescia, è in svolgimento il primo test italiano di posizionamento cinematico GPS in tempo reale basato su una rete di stazioni fisse, secondo l'approccio *Network RTK*. La sperimentazione – svolta in collaborazione con Leica Italia, Trimble Italia S.r.l. e il neonato Centro di Competenza per il Rilevamento e la Geomatica (www.topotek.it) del Consorzio per l'innovazione tecnologica Inn.Tec. – intende verificare affidabilità e potenzialità del posizionamento RTK supportato da rete, attraverso la realizzazione di un *network* di quattro stazioni permanenti, allestite nel Nord Italia ai vertici del quadrilatero Brescia-Cremona-Mantova-Verona. Si intende dunque verificare l'affidabilità e robustezza di un servizio di posizionamento satellitare GPS che permetta ad operatori che si muovano con un unico ricevitore GPS all'interno di una zona delimitata da stazioni permanenti GPS, di effettuare un posizionamento GPS **in tempo reale** con accuratezze fino all'ordine del centimetro. Il collegamento tra utente e stazione di controllo (posizionata a Brescia) avviene tramite telefonia mobile; le accuratezze di posizionamento dipendono anche dal tipo di ricevitore utilizzato dall'utente. Se quest'ultimo opera con un costoso ricevitore geodetico tali ac-



curatezze possono raggiungere, come già ricordato, l'ordine del centimetro in planimetria; se si utilizzano un ricevitore di classe inferiore si possono comunque raggiungere accuratezze inferiori al metro (caso tipico per le applicazioni di aggiornamento di sistemi informativi territoriali o nelle applicazioni di monitoraggio ambientale o di protezione civile). Tale demo test risulta di estrema utilità in questo momento in cui la regione Lombardia, attraverso IREALP (Istituto di Ricerca per l'Ecologia e l'Economia Applicate alle Aree Alpine) sta procedendo in tempi rapidi all'attivazione di un servizio di posizionamento GPS per il territorio (primo caso in Italia di servizio su scala regionale). A tale riguardo si ricorda che la stazione permanente attivata presso la Facoltà di Ingegneria di Brescia, presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, grazie ad una collaborazione tra Università e Provincia, farà parte della nascente rete di stazioni permanenti della regione.

Le operazioni "demo-test", stanno riguardando entrambi i software commerciali attualmente disponibili. Sono state infatti attivate due reti del tutto indipendenti. La prima, che utilizza il software GN-SMART® di Geo++ e commercializzato in Italia da Leica Italia, ha visto la posa di 5 stazioni di riferimento presso le città di Milano, Brescia, Verona, Cremona e Mantova. I test con tale software sono attualmente in corso e a breve faremo comunicazione dei risultati ottenuti. La seconda rete, che utilizza il software GPSNeT® di Trimble, ha visto l'installazione di 4 stazioni presso le città di Brescia, Mantova, Cremona e Verona. I test relativi a tale software sono da ritenersi conclusi e sono stati presentati in una conferenza tenutasi nella giornata del 22 settembre 2003 presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Brescia (informazioni presso il sito www.rilevamento.it).

Il Centro di Competenza per la Geomatica e il Rilevamento del consorzio di innovazione tecnologica Inn.Tec. ha collaborato attivamente all'esecuzione dei test e alla non facile fase di attivazione del servizio; Inn.Tec. è il primo centro italiano che ha acquisito le competenze per il supporto all'attivazione di tali servizi di posizionamento territoriale in tempo reale.

Di seguito vengono descritti i risultati del test per ciò che riguarda il software GPSNeT di Trimble.

mento (circa 50%) delle precisioni sia nel posizionamento planimetrico che in quello altimetrico, oltre ad una consistente riduzione dei tempi di inizializzazione sempre inferiori ai 3 minuti. Assumendo gli esiti di tali esperienze come termine di confronto, il test italiano si attende di confermare il livello di accuratezza attestato inferiormente a 2 centimetri in coordinate orizzontali fino a distanze di 40 km, con tempo di inizializzazione non superiore al minuto su basi di 30 km, anche in condizioni di intensa attività ionosferica.

2. Allestimento della rete test e del poligono di prova.

La rete consta di quattro stazioni di riferimento posizionate ai vertici del quadrilatero delimitato da Brescia, Cremona, Mantova e Verona. Le antenne GPS sono state allestite presso enti pubblici o sedi universitarie (Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Brescia, Polo di Cremona del Politecnico di Milano, Polo di Mantova del Politecnico di Milano, Comune di Verona), su capisaldi stabilmente materializzati sulla copertura degli edifici. L'interdistanza tra le stazioni è compresa tra un minimo di 34 km (Verona-Mantova) ed un massimo di 65 km (Cremona-Verona, Cremona-Mantova).

La georeferenziazione dei vertici di rete è stata eseguita nel sistema WGS84 vincolando le coordinate della sola stazione di Brescia, pre-

cedentemente determinate in ITRF2000, per limitare l'introduzione di distorsioni. Entrambe le elaborazioni – l'inserimento in ITRF2000 e la risoluzione della rete test – sono state condotte operando in multisessione con il software Bernese 4.0 su dati acquisiti in continuo per sei giorni consecutivi. La rete è stata anche inquadrata nel sistema nazionale IGM95, indispensabile per verificare l'applicabilità del Network RTK in un contesto non accademico e la concreta fruibilità di un servizio per il territorio.

Nel sistema solidale ai vertici di rete sono stati in seguito inquadrati i punti appartenenti al poligono di prova realizzato internamente alla rete, lungo le diagonali del quadrilatero – dove si sono materializzati punti con passo di circa 10 km e raffittimento a 5 km – e in un'area limitrofa sulla congiungente Brescia-Cremona, destinata allo studio del comportamento al contorno e all'esterno del quadrilatero.

3. Architettura della rete RTK.

Ognuna delle quattro stazioni di riferimento allestite presso i vertici della rete è stata equipaggiata con un ricevitore Trimble 5700, dotato di antenna Trimble Zephyr Geodetic e connesso ad un terminal server attraverso il quale si stabilisce la comunicazione via internet con il centro di controllo di Brescia, al quale vengono recapitati in conti-

nuo, alla frequenza di 1 Hz, i dati grezzi acquisiti nel formato proprietario RT17, con una velocità di 9600 baud rate. La scelta di impiegare la rete internet pubblica per inoltrare i dati al centro di calcolo, dettata inizialmente da esigenze di semplicità e di convenienza, si è rivelata alla prova dei fatti proficua, data l'elevata stabilità del collegamento (se si escludono alcune interruzioni sufficientemente brevi per non condizionare lo stato del processore) e considerata la piuttosto ridotta latenza riscontrata (raramente superiore al decimo di secondo e regolarmente di almeno un ordine di grandezza inferiore).

Il cuore del sistema è rappresentato dal server software GPSNet® installato presso il centro di controllo, ininterrottamente connesso alle stazioni remote ed in grado di gestire simultaneamente diverse funzioni quali, la decodifica ed il trattamento preliminare dei dati grezzi, la modellizzazione e stima degli errori sistematici, la generazione della soluzione VRS, la generazione e la trasmissione del flusso di dati RTCM (o CMR) per la posizione virtuale di ogni ricevitore mobile in campagna. Requisito fondamentale di una rete RTK implementata secondo la modalità VRS è l'esistenza di una comunicazione bidirezionale tra ricevitore mobile e centro di calcolo. Per il test italiano è stata adottata la soluzione di collegamento GSM mediante modem cellulare. Il livello di trasmissione è pertanto costituito da una serie di modem collegati alle porte seriali del PC che ospita il server centrale, ciascuno dei quali accoppiato – all'interno del software GPSNet – ad un generatore di correzione differenziale che si attiva automaticamente non appena pervenga la chiamata dal modem remoto.

Lato utente, l'equipaggiamento comprende un ricevitore GPS che accetti RTCM v2.1, 2.2 o CMR, connesso ad un terminale GSM. I telefoni cellulari con accesso immediato ai dati possono fungere da modem per un dispositivo portatile: in tal caso è sufficiente collegare il terminale al ricevitore attraverso un appropriato cavo dati.



Geometria della rete demo-test. Tutte le stazioni inviano il segnale proveniente dalla costellazione satellitare GPS alla stazione di controllo dell'Università degli Studi di Brescia.



Il servizio è operativo anche con l'operatore in movimento. Nella figura un operatore durante le fasi di test con il ricevitore GPS montato a bordo di una bicicletta.

4. Prove in tempo reale. Risultati.

Una parte significativa delle prove in tempo reale è stata dedicata al posizionamento ripetuto su una successione di punti materializzati all'interno della rete, lungo le direzioni delle diagonali del quadrilatero, con un equipaggiamento comprendente un ricevitore Trimble 5700 con antenna Zephyr Geodetic allestita su treppiede topografico ed un modem cellulare. I test – finalizzati alla valutazione delle prestazioni ottenibili dal sistema in termini di accuratezza, precisione e affidabilità rispetto ad un RTK convenzionale avente Brescia come stazione fissa – sono stati anticipati da una serie di prove preliminari volte alla definizione di alcuni parametri guida utili allo svolgimento successivo. Da

un'analisi dei dati acquisiti è emerso che l'influenza del tempo di stazionamento (mai inferiore a 5 s) è assente sull'accuratezza mentre sembra condizionare la precisione che aumenta stabilizzandosi rapidamente per stazionamenti di 30 s, ma soltanto nei punti prossimi ai bordi della rete e all'esterno di essa; all'interno della rete non si riscontra alcuna dipendenza dalla durata dell'operazione di misura. L'indagine preliminare ha anche permesso di stabilire il numero minimo di acquisizioni necessario per dare consistenza ad un'analisi statistica dei dati: considerando la numerosità di un campione statisticamente rappresentativo, si è ritenuto sufficiente, su ogni punto rilevato, ripetere la procedura di inizializzazione per 10 volte e, all'interno di ciascun rilievo, acquisi-

re la posizione ripetutamente, per 5 volte, al termine di ogni misura rispettivamente della durata di 5, 15 e 30 secondi. Valutando inoltre l'opportunità di considerare la variazione dello stato della costellazione GPS e delle condizioni atmosferiche (soprattutto l'escursione dell'effetto ionosferico), si è scelto di eseguire almeno due sessioni di misura in condizioni differenti nell'arco di una giornata. Operando nel modo descritto sui punti dell'area di prova, è stato possibile stabilire la variazione di accuratezza e precisione in funzione della posizione occupata all'interno della rete e al variare dei parametri ambientali.

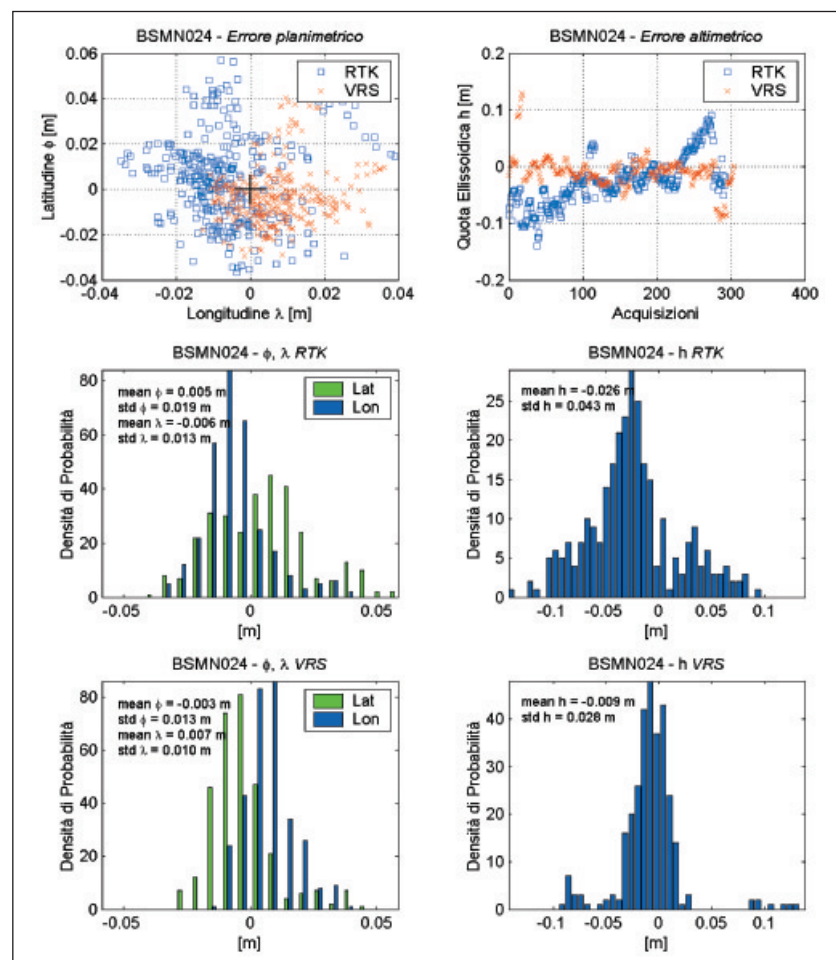
L'errore di posizionamento plano-altimetrico per il punto BSMN024 – situato in posizione centrale della rete, alla distanza di 37 km da Brescia – è illustrato nella successiva immagine.

Per entrambe le tecniche di misura, l'accuratezza risulta inferiore al centimetro in planimetria; il posizionamento VRS presenta la medesima accuratezza in quota, mentre in RTK lo scostamento medio è di 2.5 cm. La precisione planimetrica si mantiene inferiore a 1.5 cm in VRS, mentre risulta prossima a 2 cm in RTK; in altimetria il VRS appare maggiormente preciso (2.8 cm) della tecnica tradizionale (4.3 cm).

Estendendo l'analisi ai dati raccolti su tutto il poligono interno, lo scenario appare più variegato, mostrando per VRS e RTK in planimetria accuratezze confrontabili, mai superiori a 2 cm, e valori normalmente prossimi a 2.5 cm in quota. Le precisioni – attestate su valori inferiori a 1.5 cm per entrambe le tecniche fino a 25 km dalla stazione di riferimento – si differenziano per distanze superiori, rimanendo invariate per la modalità VRS ed aumentando rapidamente per il posizionamento RTK, superando 3 cm in planimetria e arrivando a 4 cm in quota. Raggiunta la distanza di 45 km, la disponibilità di inizializzazione RTK cessa determinando il limite di portata del sistema.

Nome Mozzanica		Numero BSCR208
Dati Regionali		
Regione Lombardia	Provincia BG	Comune Mozzanica
 		
accesso: Dalla SS11 entrare nel paese di Mozzanica e imboccare via Cominotti quindi proseguire fino al campo di calcio fuori dal paese. centro topografico		
metrizzazione: Centro infisso nella copertura del canale irriguo che affianca il campo da calcio.		
Coordinate geocentriche		
BS-TRF2000		WGS84 - IGM 95
X [m] 4416261.432	Y [m] 754367.664	Z [m] 4624567.054
Coordinate geografiche		
BS-TRF2000		WGS84 - IGM 95
lat [m] 45° 28' 27.4447"	lon [m] 9° 41' 45.4890"	h [m] 447.805
Gauss-Boaga		
Coordinate		Parametri
N [m] -	E [m] -	T ₁ -
		T ₂ -
		T ₃ -
		T ₄ -
Note:		

Documento interno - Sono vietate la diffusione e la riproduzione non autorizzate

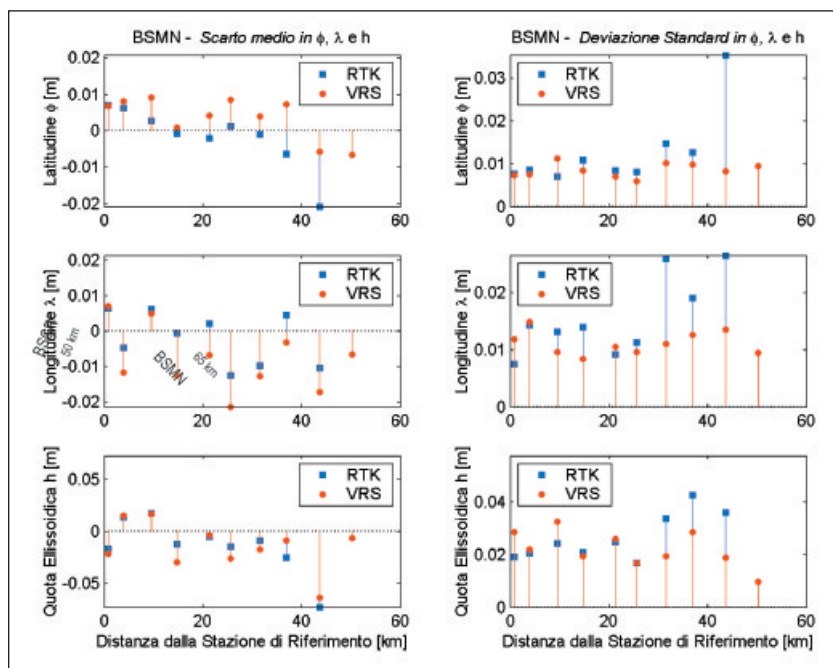


Errore di posizionamento plano-altimetrico e statistiche per il punto BSMN024.

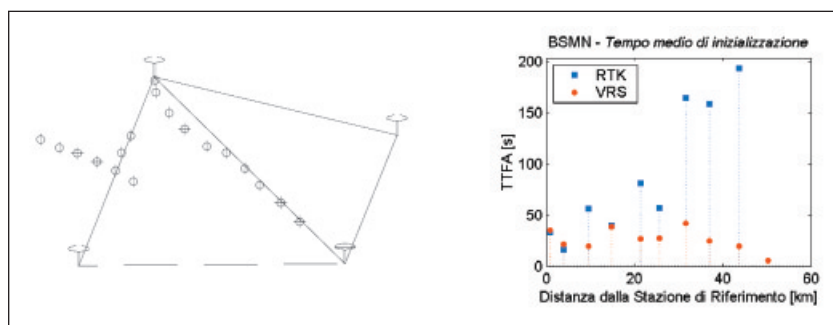
La performance del servizio viene indagata anche relativamente al tempo necessario per la risoluzione delle ambiguità intere di fase (TTFA), parametro essenziale per giudicare la produttività dell'applicazione. I risultati mostrati nella relativa figura, dove si illustrano i tempi medi di inizializzazione riscontrati sui punti della diagonale Brescia-Mantova, confermano come l'elevata produttività sia uno degli elementi di forza del sistema VRS: la durata media del processo di risoluzione delle ambiguità di fase appare infatti generalmente inferiore a 25 secondi e comunque non superiore a 45 secondi, indipendentemente dalla posizione all'interno della rete; diversamente, i tempi medi RTK tendono ad aumentare decisamente con la distanza dalla stazione fissa, raggiungendo anche valori superiori a 3 minuti.

Lo stato della costellazione GPS e – in misura minore – la condizione ionosferica (variabile attualmente in modo contenuto a queste latitudini) influenzano significativamente la qualità di posizionamento, come evidenziano i risultati delle due sessioni svolte sul punto BSMN013, la prima al mattino (AM), in presenza di numerosi satelliti e scarsa attività ionosferica, la seconda pomeridiana (PM), contraddistinta da un minor numero di satelliti in vista e in prossimità del culmine ionosferico giornaliero.

I risultati mostrati sono confermati da un'ulteriore serie di prove, condotta in una zona di confine lungo la congiungente Brescia-Cremona e trasversalmente ad essa e finalizzata a verificare l'affidabilità del servizio in zone di bordo e la «portata» oltre il perimetro della rete. Da tali prove, tuttora in fase di svolgimento, emerge la possibilità di ottenere qualità di posizionamento paragonabili a quelle valutate internamente alla rete, anche allontanandosi più di 20 km da essa, purché si adottino tempi di stazionamento di almeno 15 secondi.

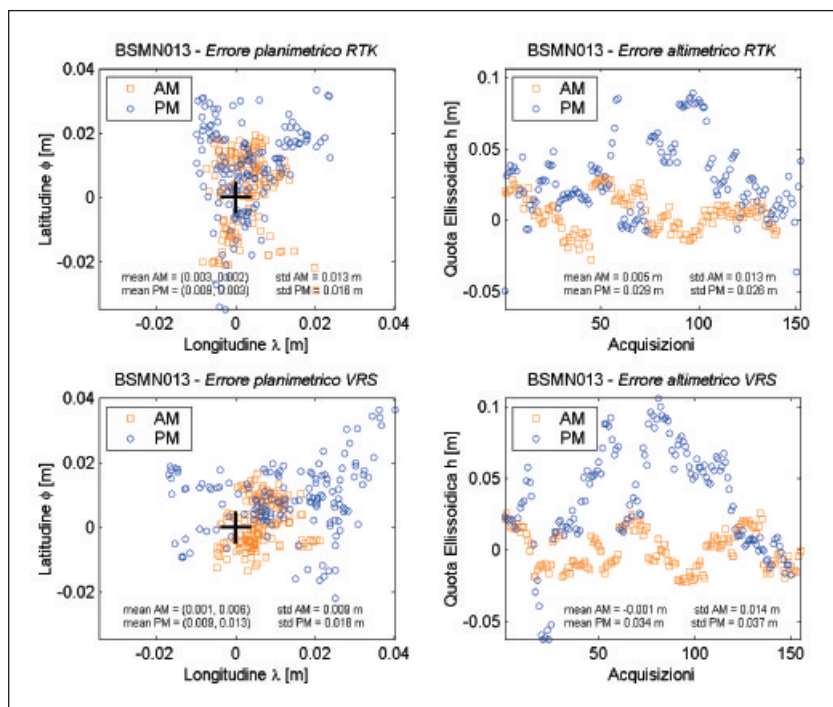


Accuratezza e precisione di posizionamento sulla diagonale BSMN al variare della distanza da Brescia.



Schema della rete e dell'area di prova.

TTFA medi sulla diagonale BSMN.



Errore di posizionamento plano-altimetrico nel punto BSMN013 in due sessioni distinte.

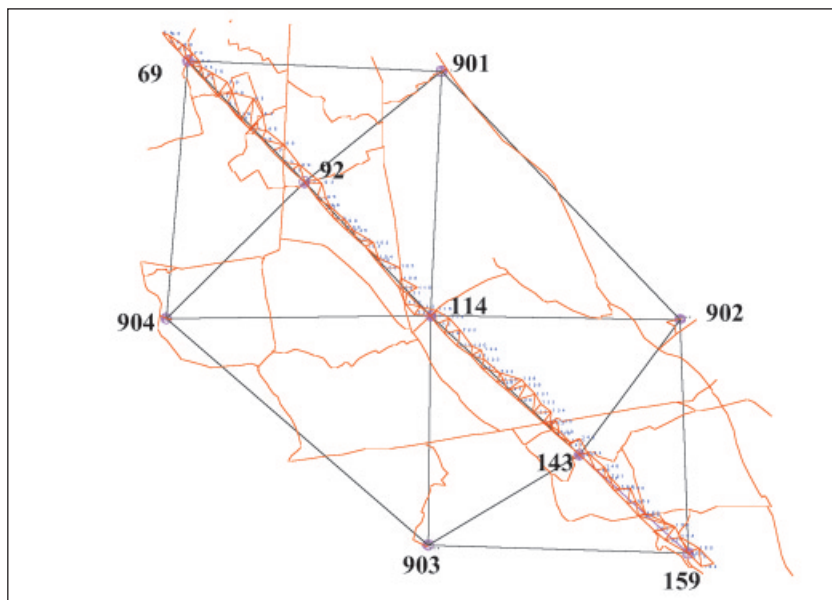
5. Conclusioni.

L'analisi dei dati acquisiti sembra confermare i risultati pubblicati all'estero. Operando all'interno della rete, dove non sembra sussistere alcuna dipendenza dell'accuratezza dal tempo di stazionamento, l'accuratezza è stimabile in 1.5 cm in planimetria e 2 cm in altimetria; la precisione si attesta al centimetro in planimetria e varia tra 2 e 3 centimetri in quota, rimanendo comunque inferiore ai valori del posizionamento RTK, soprattutto per basi di distanza superiore a 25 km. Indiscutibilmente superiore rispetto alla modalità RTK – assai più dispendiosa nei tempi operativi e limitata superiormente in copertura – è risultata la rapidità del processo di inizializzazione, il quale ha comportato un'attesa media, per punto, inferiore a 45 secondi, indipendentemente dalla posizione occupata. Restano infine ancora da indagare le effettive possibilità di estrapolazione del modello correttivo esternamente al confine della rete, apparentemente dilatabile oltre il perimetro fisico senza evidente decadimento di performance, almeno per durate di stazionamento maggiori di 5 secondi.

Numerosissime dunque le applicazioni a cui si presta tale tecnica di posizionamento. Le accuratezze assai spinte permettono di operare con GPS nel raffittimento di reti per il tracciamento di grandi infrastrutture, strade, ferrovie, ma anche le applicazioni in campo catastale e di supporto alla topografia classica sono numerosissime. Infine, come già citato all'inizio, sono ancora più numerose le possibili applicazioni nel campo del posizionamento di minore accuratezza, quali le operazioni di rilevamento e aggiornamento delle informazioni correlate a sistemi informativi territoriali.

Ringraziamenti

Un ringraziamento in particolare ai membri del gruppo di topografia dell'Università degli Studi di Brescia, veri artefici della rete demo-



Esempio-test applicato alla rete per il tracciamento di vertici lungo la linea di Alta Velocità Milano - Bologna, effettuata con GPS in modalità "tempo reale"

test qui descritta. In particolare si ringraziano gli ingegneri Roberto Cantoni, Massimo Gelmini, Carlo Lanzi e Giuseppe Stefini.

Un ringraziamento inoltre a Trimble Italia Srl e Leica Geosystems Italia per aver messo a disposizione la strumentazione hardware e software per l'esecuzione del test qui descritto (Trimble Italia) e per quello ancora in via di esecuzione (Leica Italia).

Si ringraziano inoltre l'ufficio cartografico della provincia di Brescia (ing. Trebeschi) per avere messo a disposizione alcuni ricevitori GPS di propria proprietà e per la collaborazione alle operazioni di test, l'AGSM di Verona (ing. Cavattoni), il Comune di Verona (geom. Pellegrini), il Collegio dei Geometri di Verona (geom. Pasqualini), il Polo di Cremona (ing. Pinto) e il Polo di Mantova (arch. Fregonese) del Politecnico di Milano, l'ASI di Mantova (ing. Bonazzi) per aver ospitato le stazioni permanenti GPS e/o collaborato alle operazioni di test.

Un ringraziamento infine ai tesisti

Dario Cucchi, Costante Bonacina e Matteo Manenti che si sono applicati con dedizione alla progettazione ed esecuzione dei test qui descritti.

Ulteriori informazioni riguardanti i test sono reperibili presso il sito www.rilevamento.it o contattando direttamente il centro di competenza sul Rilevamento e la Geomatica del consorzio Inn.Tec. alla mail: sgrenzaroli@topotek.it.

Bibliografia

- Cazzaniga N. E., L. Pinto, M. Gelmini, C. Lanzi, G. Vassena (2003), *Studio sperimentale di raffittimento catastale in modalità GPS-RTK in ambiente VRS*, in Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA, Verona, 28-31 ottobre 2003.
- Gelmini M., C. Lanzi, G. Stefini, G. Vassena (2003), *Esempi applicativi e modalità del servizio di posizionamento GPS in tempo reale, all'interno della prima rete demo-test italiana del software GPSNet Trimble-Terrasat*, in Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA, Verona, 28-31 ottobre 2003.
- Landau H., U. Vollath., X. Chen (2002),

Virtual Reference Station Systems, Journal of Global Positioning Systems, Vol. 1, No. 2, pp. 137-143.

Lanzi C., M. Gelmini, A. Trebeschi, G. Vassena (2002), *Progetto Brescia GPS: esperienze preliminari e problematiche di installazione di una stazione GPS permanente*, in Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA, Perugia, 5-8 novembre 2002, vol. II, pp. 1367-1372.

Talbot N., G. Lu, T. Allison, U. Vollath (2002), *Broadcast Network RTK - Transmission Standards and Results*, Proceedings of ION GPS 2002, 24-27 September 2002, Portland, Oregon, USA, pp. 2379-2387.

Vassena G., R. Cantoni, C. Lanzi, G. Stefini (2002), *GIS And DGPS Via Web: The GIS On Line Of The Everest National Park*, in via di pubblicazione negli atti della conferenza internazionale Advances In Infrastructure For E-business, E-education, E-science, And E-medicine On The Internet, L'Aquila (Italy), 29 luglio - 4 agosto 2002.

Vassena G., R. Cantoni, C. Lanzi, G. Stefini (2002), *Trasmissione del segnale di correzione differenziale GPS attraverso Internet: applicazioni e potenzialità del metodo*, in Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA, Perugia, 5-8 novembre 2002.

Vollath U., H. Landau, X. Chen (2002), *Network RTK - Concept and Performance*, Proceedings of the GNSS Symposium, Wuhan, China, November 2002.

Landau H., U. Vollath, A. Deking, C. Pagels (2001), *Virtual Reference Station Networks - Recent Innovation by Trimble*, Paper presented at the GPS meeting, Tokyo, Japan, November 2001.

Lanzi C., G. Vassena (2001), *Sperimentazione e prime applicazioni di rilievi GPS in modalità RTK finalizzate all'installazione di un servizio di stazione permanente per il territorio*, in Atti Della V Conferenza Nazionale Asita, Ottobre 2001.

Lanzi C., G. Vassena, C. Smiraglia (2001), *Metodologia di utilizzo integrato di strumentazione Gps e di dati cartografici per lo studio dell'evoluzione dei DEM di apporti glaciali*, in Atti Della V Conferenza Nazionale Asita, Ottobre 2001.

Vollath U., A. Deking, H. Landau, C. Pagels (2001), *Long Range RTK Positioning using Virtual Reference Stations*, Proceedings of ION GPS 2000, September 2000, Salt Lake City, Utah, USA.

Vollath U., A. Deking, H. Landau, C. Pagels, B. Wagner (2000), *Multi-base RTK Positioning using Virtual Reference Stations*, Proceedings of ION GPS 2000, September 2000, Salt Lake City, Utah, USA.

STUDIO SUL CONTROLLO DEGLI OSSIDI DI AZOTO NELLE EMISSIONI DEGLI IMPIANTI DI INCENERIMENTO DI RSU

di Stefano Tenini, Gianpietro Mazelli

PREMESSA

E' da dopo la metà degli anni 80 del secolo scorso che è nata l'esigenza di limitare alcuni inquinanti presenti nei fumi degli inceneritori, come polveri e gas acidi (HCl, HF, SO_x); questo è stato fatto ottimizzando le caratteristiche costruttive dei forni, migliorando il processo di combustione (temperature più alte di combustione, maggiori tempi di permanenza in regime di alte turbolenze, eccessi d'aria tali da garantire la presenza di sufficiente O₂ per l'ossidazione completa dei prodotti della combustione, ecc.) e installando efficaci sistemi di depurazione dei gas di combustione.

Parallelamente, lo sviluppo di metodi di campionamento e di analisi degli inquinanti nei fumi sempre più sofisticati ha consentito di misurare con accuratezza anche metalli pesanti (come il mercurio e il cadmio) e microinquinanti organoclorurati (come le diossine e i furani) nelle emissioni.

Ne è conseguita l'emanazione di norme più restrittive, volte al contenimento delle emissioni, a partire dall'art. 4 del DPR 915/1982, attraverso il DM del 12/7/90, al DM n. 12 del 16/1/95 per il riutilizzo ai fini energetici dei residui dei cicli di produzione, fino a giungere al decreto n. 503 del 19/11/97 recante norme per l'attuazione delle direttive 89/369/CEE e 89/429/CEE concernenti la prevenzione dall'in-

BRESCIA
RICERCHE

quinamento atmosferico e, infine, alla direttiva dell'Unione Europea n. 76/2000, ad oggi non ancora recepita dall'ordinamento italiano.

Ai vari sistemi di trattamento degli inquinanti tradizionali quali polveri, metalli, HCl, microinquinanti, in cui la tecnologia ha permesso un elevato rendimento di abbattimento, vanno aggiunti quelli per il trattamento degli ossidi di azoto.

Dalla letteratura si evidenzia che misure effettuate a monte dei presidi di trattamento presso numerosi inceneritori hanno mostrato che la produzione di NO_x è di circa 400 mg/Nm³, mentre i limiti prescritti dalla normativa vigente sono assai più bassi. Premesso che il solo controllo della combustione non permette la riduzione degli ossidi di azoto, si è dovuto ricorrere all'adozione di presidi specifici.

I due processi normalmente utilizzati per la riduzione degli NO_x sono del tipo SCR e SNCR. La prima tecnologia (detta riduzione selettiva catalitica) consiste nella installa-

zione di un reattore posto a valle della linea di depurazione fumi in cui viene iniettata ammoniaca nebulizzata che, miscelandosi con i fumi e attraversando gli strati di catalizzatori (ossido di vanadio e titanio su supporti ceramici), dà luogo alla riduzione degli NO_x in azoto e acqua. La temperatura ottimale di funzionamento è compresa in un range di 320°/380°C pertanto i fumi già raffreddati sotto i 140°C, per consentire il trattamento di depurazione dai componenti acidi, devono essere nuovamente riscaldati prima dell'ingresso nel reattore catalitico per il trattamento specifico degli ossidi di azoto; tale sistema permette di raggiungere abbattimenti degli NO_x molto elevati (70-90%).

Il processo SCR (riduzione selettiva catalitica) presenta il grosso svantaggio di richiedere notevoli quantità di energia (che in ultima analisi deve essere prodotta in altri impianti ricorrendo a combustibili fossili con le corrispondenti emissioni in atmosfera) per riscaldare i fumi da inviare al trattamento, ma soprattutto di dover, una volta esauriti, smaltire i catalizzatori esausti.

Analoghi risultati possono essere raggiunti con il sistema SNCR (Riduzione selettiva non catalitica); tale processo consiste nella iniezione di un reagente (ammoniaca o urea) in soluzione acquosa in una zona in cui la temperatura è compresa fra 850°C e 1000°C; con questo sistema sono stati ri-

scontrati rendimenti di abbattimento degli NO_x del 55-85%. Nel Termoutilizzatore dell'ASM Brescia, l'abbattimento degli ossidi di azoto viene effettuato, come previsto nelle prescrizioni del progetto approvato dalla Regione Lombardia, mediante l'iniezione controllata di soluzione ammoniacale in camera di combustione. Con questo sistema (SNCR) è stato raggiunto il "valore guida" (200 mg/Nm^3) per gli ossidi di azoto, fissato dalla Regione Lombardia nella suddetta autorizzazione, rispetto al valore iniziale prescritto di 400 mg/Nm^3 . Detto "valore guida" di 200 mg/Nm^3 è stato in seguito prescritto come limite di emissione (media giornaliera) dal decreto ministeriale n. 503/1997. Successivamente, è stata perseguita dall'ASM una ulteriore riduzione degli ossidi di azoto incrementando il dosaggio di soluzione ammoniacale. Questo fatto comporta la presenza all'emissione di una limitata quantità di ammoniaca residuale. Infatti, il processo di abbattimento è gestito in modo da contenere le concentrazioni di NO_x a livello di $70 - 80 \text{ mg Nm}^3$, ossia a valori pari al 35 - 40% del limite di legge. Il sistema di controllo è basato sulla misura in continuo della concentrazione di NO_x , con calcolo in tempo reale della quantità di soluzione ammoniacale da iniettare. In linea di principio, l'effetto globale è che, mentre diminuiscono le concentrazioni di NO_x , aumentano, sia pure in quantità ridotta, quelle di NH_3 . Per quanto riguarda l'ammoniaca le normative specifiche per gli impianti di termoutilizzazione sia italiane (DM 503/97) che europee (Direttiva 2000/76/CE) non prevedono limiti di emissione. Ciò è da porsi in relazione al fatto che il contributo di tali impianti alla presenza di ammoniaca in atmosfera è trascurabile, essendo l'ammoniaca stessa originata per la quasi totalità da fenomeni naturali e dalle attività agricole e di allevamento. La scelta gestionale effettuata dalla ASM Brescia è quella di ridurre, nelle emissioni, le concentrazioni

dei composti ben al di sotto dei valori consentiti dalle normative vigenti.

Questo studio si propone di analizzare l'influenza sulle emissioni in atmosfera del sistema di riduzione delle emissioni di NO_x , anche sottoponendo i fumi prodotti dall'impianto a particolari trattamenti, per investigare la possibilità di formazione di composti derivanti, non dal trattamento di incenerimento, ma, in modo "secondario", dal presidio di trattamento ossidi d'azoto non catalitico. La problematica evidenziata non è specifica esclusivamente degli impianti di incenerimento, ma di tutti quegli impianti industriali che hanno flussi di fumi con caratteristiche simili e trattano gli stessi con presidi analoghi.

DESCRIZIONE DI MASSIMA DEL TERMOUTILIZZATORE ESAMINATO

L'impianto è composto da due unità di combustione collegate ad una turbina a vapore; i fumi prodotti dalle operazioni di incenerimento vengono inviati al sistema di trattamento fumi. Nel dettaglio l'impianto consta delle seguenti sezioni principali.

Il ricevimento e lo stoccaggio dei rifiuti

All'ingresso dell'impianto gli automezzi, dopo essere stati pesati e sottoposti al controllo della radioattività, raggiungono il locale di scarico rifiuti che è chiuso e mantenuto in depressione a mezzo di ventilatori aspiranti che convogliano l'aria aspirata alla combustione dei rifiuti.

Il locale di scarico adiacente alla vasca di raccolta rifiuti è dotato di apposite aperture per consentire che i rifiuti cadano direttamente all'interno della vasca stessa. Nella vasca di accumulo, la cui capacità di stoccaggio è di 30.000 m^3 , i rifiuti vengono opportunamente omogeneizzati mediante movimentazione meccanica realizzata da benne poste su carroponte e governate manualmente da operato-

re il quale carica anche le tramogge asserventi la camera di combustione.

Il sistema di incenerimento

L'impianto è dotato di due linee di incenerimento indipendenti, ognuna costituita da una griglia mobile dove avviene l'incenerimento del rifiuto. La griglia di combustione è mobile al fine di favorire il movimento ed il rimescolamento del rifiuto, in modo da assicurare la completa combustione dei rifiuti introdotti. L'aria di combustione è immessa al di sotto della griglia (aria primaria) ed all'ingresso della camera di post-combustione (aria secondaria).

La distribuzione dell'aria al di sotto della griglia avviene attraverso diversi ed opportuni punti di immissione, con misura e regolazione della portata di ogni singolo punto, in modo da controllare la geometria della fiamma e il corretto dosaggio dell'aria comburente nelle varie zone della griglia e garantire una combustione ottimale.

A valle della griglia si trova il sistema di raccolta e spegnimento delle scorie dell'inceneritore, costituito da una vasca ricolma d'acqua.

L'aria secondaria viene iniettata al di sopra della griglia, all'ingresso della camera di post-combustione, per completare la combustione dei prodotti gassosi, ottenendo così una buona turbolenza e miscelazione dei fumi al fine di assicurare il completamento della combustione dei prodotti, rendere massimo il recupero energetico e minimizzare la formazione di ossidi di azoto (NO_x). A questo scopo è installato anche un apposito sistema di ricircolo dei fumi depurati (circa $_$) con reiniezione degli stessi sempre all'ingresso della camera di postcombustione.

La camera di post-combustione ha una dimensione volumetrica atta a garantire una permanenza dei fumi prodotti dall'incenerimento per almeno 2 secondi ad un livello termico non inferiore a 850°C .

L'impianto è anche dotato di un sistema di preriscaldamento dell'aria, in modo da far fronte a variazioni nel potere calorifico dei rifiu-

ti, e di bruciatori ausiliari a gas metano da impiegarsi nella fase di avviamento.

Sulla griglia il processo di combustione si sviluppa con modalità regolate da un sistema automatico e guidato da telecamera a raggi infrarossi, collocata sul cielo della camera di combustione.

La caldaia ed il ciclo termico

I gas prodotti dalla combustione attraversano gli scambiatori cedendo via-via il proprio calore e producendo vapore surriscaldato ad una pressione di 60 bar e ad una temperatura di 450°C.

Il vapore surriscaldato viene inviato ad un gruppo turboalternatore per la produzione di energia elettrica e di calore per la rete di preriscaldamento della città di Brescia.

La depurazione fumi

Il sistema di depurazione fumi, deputato al loro trattamento, provenienti dall'incenerimento inizia con l'iniezione di ammoniaca direttamente in caldaia dove la temperatura dei gas è di circa 950°C. I gas prodotti dall'incenerimento, dopo il recupero energetico che porta la temperatura fino a 140°C, entrano successivamente nel reattore a secco dove viene iniettata calce idrata in polvere e carbone attivo. Ha così inizio la reazione chimica di assorbimento dei gas acidi e l'adsorbimento dei microinquinanti, nello specifico clorurati e mercurio.

I gas sono quindi convogliati in un filtro a maniche dove, sullo strato di polvere depositato sul tessuto, le reazioni si completano.

Le maniche vengono periodicamente pulite dalla polvere che cade nelle tramogge e che viene in parte ricircolata nel reattore al fine di ottimizzare il consumo di reagente. All'uscita del filtro a maniche, i gas vengono aspirati dal ventilatore esaustore e inviati al camino.

Sistemi di controllo dei fumi

I fumi filtrati fuoriescono dal camino ad un'altezza di 120 metri. Nel camino, a varie quote, vi sono una

serie di apparecchiature di monitoraggio (tra le quali gli analizzatori FTIR: Fourier transform infrared) che misurano in continuo le concentrazioni dei seguenti componenti:

- monossido di carbonio (CO)
- biossido di zolfo SO₂
- ossidi di azoto NO_x
- acido cloridrico HCl
- polveri
- carbonio organico totale

inoltre sono misurate in continuo umidità, ossigeno, temperatura e portata dei fumi.

Le principali apparecchiature sono dotate di una riserva allo scopo di evitare la fermata dell'impianto in caso di avaria.

Alcune delle misure effettuate non servono solo al controllo delle emissioni per il rispetto dei limiti al camino, ma consentono anche di regolare in modo automatico il dosaggio dei reagenti (ammoniaca, calce idrata, carboni attivi) per la depurazione dei fumi.

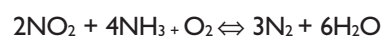
I numerosi campionamenti ed analisi eseguite con i metodi tradizionali hanno confermato l'attendibilità e l'accuratezza delle misurazioni effettuate dalle apparecchiature di monitoraggio in continuo.

Nella tabella che segue sono riportate le emissioni medie prodotte dal Termoutilizzatore confrontate con i limiti prescritti dal DM 503/97.

VALUTAZIONI PRELIMINARI

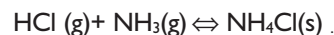
Ipotesi delle reazioni secondarie-

Come detto l'ASM utilizza il sistema di riduzione non catalitica degli ossidi di azoto nelle emissioni mediante l'utilizzo di ammoniaca; a tal fine mediamente vengono dosati circa 220 litri ora di una soluzione acquosa di ammoniaca al 25 %. L'iniezione di ammoniaca per la riduzione non catalitica degli ossidi di azoto avviene ad una temperatura compresa tra gli 850 °C e i 950°C-secondo le seguenti reazioni:



Il rendimento delle reazioni di cui sopra è notevolmente alto, ma non stechiometrico, per cui si riscontra nei fumi di emissione la presenza di ossidi di azoto e di ammoniaca.

Da quanto sopra si è ipotizzato che la simultanea presenza di acido cloridrico e ammoniaca possa portare alla formazione secondaria di cloruro di ammonio secondo la generica reazione:



Ispezionando il camino non si osservano depositi bianchi di cloruro di ammonio sulle pareti interne dei condotti fumi coibentati, mentre si formano depositi di cristalli bianchi di cloruro di ammonio nei bocchelli

Parametri indagati	limiti di emissione DM 503/97 mg/Nm3	Termoutilizzatore dati operativi Mg/Nm3
POLVERI	10	<0,
MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)	50	20
SOST. ORG. VAP/GAS (SOV-COT)	10	<1
COMP. INORG. DEL CLORO (HCl)	20	
OSSIDI DI ZOLFO (SO2)	100	10
OSSIDI DI AZOTO (NO2)	200	80
COMP. INORG. DEL FLUORO (HF)	1	0,01
CADMIO + TALLIO (Cd+Tl)	0,0	0,001
MERCURIO (Hg)	0,0	0,002
METALLI (Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V+Sn)	0,	0,012
	ng/Nm3	ng/Nm3
IDR. POLICICLICI AROMATICI (IPA)	10000	12
DIOSSINE (TCDD I-TE ng/m3)	0,1	<0,01
PCB	0,1 *	<0,001

* TCDD TE ng/m3 il DM 503/97 non fissa limite; per analogia si riporta il valore di TE basato su WHO (Organizzazione Mondiale della Sanità) 1998

e nelle flange che non sono coibentati e quindi sono esposti a temperature più basse.

Indipendentemente dalla forma in cui l'ammonio cloruro sia eventualmente presente all'interno dell'emissione convogliata, la cui dimostrazione richiederebbe una campagna di monitoraggio cospicua impiegando innumerevoli risorse umane e strumentali, si potrebbe ipotizzare che l'acido cloridrico e l'ammoniaca presenti in forma gassosa uscendo dalla bocca del camino e sottoposti simultaneamente alle variazioni delle condizioni di temperatura pressione e umidità, generino polveri di cristalli di ammonio cloruro.

Quando i fumi, all'uscita dal camino, si mescolano con l'atmosfera subiscono nel tempo una serie di reazioni e trasformazioni difficilmente riproducibili in laboratorio. Questo vale in particolare per le reazioni che portano alla formazione di particolato, e non riguarda solo l'acido cloridrico e l'ammoniaca ma anche altre specie chimiche (ossidi di azoto e di zolfo, sostanze organiche) in gran parte già presenti nell'atmosfera. In particolare, l'ammoniaca è già presente nell'atmosfera, generata prevalentemente da processi naturali biologici e dall'uso intensivo dei fertilizzanti azotati in agricoltura.

Caratteristiche chimico fisiche

Il cloruro di ammonio si presenta in forma di polvere bianca e fine, è igroscopico, posto a riscaldamento sublima senza fondere alla temperatura di 340 °C, mentre a 350 °C è completamente dissociato in HCl e NH₃, normalmente è altamente solubile in acqua.

La reazione di formazione può essere ben rappresentata da un equilibrio chimico in fase eterogenea (gas-solido).



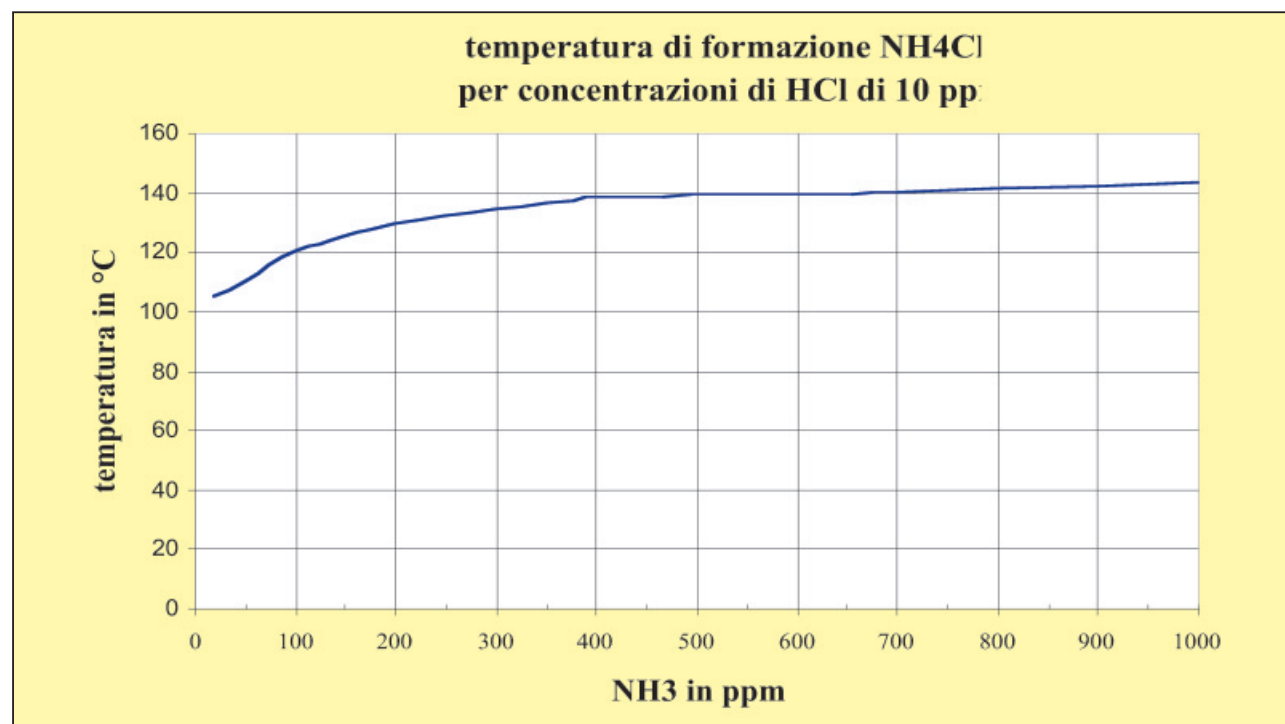
$$K = p_{\text{HCl}} * p_{\text{NH}_3}$$

La costante di equilibrio K varia in funzione della temperatura. Per la reazione sopra scritta la K diminuisce con la temperatura, ovvero a temperature più basse le pressioni parziali all'equilibrio sono minori. Quindi se si raffredda la miscela dei gas, tenendo costanti le pressioni parziali, ovvero le concentrazioni, si raggiunge la temperatura di saturazione al di sotto della quale comincia la formazione dei cristalli di cloruro di ammonio.

Quando i fumi escono dal camino si raffreddano per mescolamento con l'aria esterna ma, contestualmente al raffreddamento, c'è anche una diluizione. Diminuisce la K ma diminuiscono anche le concentrazioni dei due gas e quindi non è prevedibile quanto cloruro di ammonio si formi.

Si tenga comunque presente che le caratteristiche di pericolosità del cloruro di ammonio sono molto blande e la sua presenza ha un effetto migliorativo rispetto alla presenza disgiunta dell'equivalente quantitativo di cloruro di idrogeno ed ammoniaca. Inoltre, l'effetto rimane ampiamente positivo anche se si effettua il confronto tra la presenza di cloruro di ammonio e la presenza dell'equivalente quantitativo di sola ammoniaca o di solo cloruro di idrogeno. Oltre alle caratteristiche di cui sopra, utili al fine del campionamento sono i dati che si evincono dal grafico (di natura sperimentale) relativo alla temperatura di formazione del cloruro di ammonio per concentrazioni di 10 ppm (stesso ordine di grandezza misurato all'emissione) di acido cloridrico, fornito dalla società MARTIN riportato a seguito.

Da quanto sopra si evidenzia che la temperatura di formazione di materiale particellare costituito da ammonio cloruro avviene a temperature inferiori a 136 °C (temperatura misurata dei fumi all'emissione). Alla luce di quanto detto la prova per indurre la cristallizzazione deve essere condotta a temperature inferiori a quella sopra indicata tenendosi lontani dal punto di rugiada e soprattutto inserendo condizioni geometriche nel sistema



di campionamento atte a permettere la cristallizzazione del sale. Le condizioni geometriche sono fondamentali a garantire la cristallizzazione in quanto la "reazione" non avviene in modo istantaneo.

VALUTAZIONE ANALITICA

Riferimenti normativi

Giova innanzitutto ricordare quanto affermato dal D.M. 503 del 19 Novembre 1997 "Regolamento recante norme per l'attuazione delle direttive 89/369/CEE e 89/429/CEE concernenti la prevenzione dell'inquinamento atmosferico provocato dagli impianti di incenerimento dei rifiuti urbani e la disciplina delle emissioni e delle condizioni di combustione degli impianti di incenerimento di rifiuti urbani, di rifiuti speciali non pericolosi, nonché di taluni rifiuti sanitari" il quale al punto "C. Metodi di campionamento analisi e valutazione delle emissioni" fa esplicito riferimento a "I metodi di campionamento, analisi e valutazione delle emissioni sono quelli fissati ai sensi dell'art. 3, comma 2, del DPR, n. 203/88." Si ritiene utile ricordare che al comma 2 del sopra citato Art.3 e precisamente al punto a) e seguenti ".....le linee guida per il contenimento delle emissioni..." fa riferimento al DM 12 luglio 1990 (uscito successivamente al sopra citato DPR) il cui Art. 3 "VALORI LIMITE DI EMISSIONE. recita al punto 12. I valori di emissione espressi in flusso di massa o in concentrazione si riferiscono ad un'ora di funzionamento dell'impianto **nelle condizioni di esercizio più gravose.**

Studio preliminare

Atteso quanto sopra, prima di procedere al campionamento dell'emissione convogliata si è eseguito uno studio preliminare delle condizioni di esercizio dell'impianto attraverso la determinazione delle prestazioni energetiche come indicato dalla UNI 9246 al fine di poter avere dati utili al campionamento e alla verifica delle condizioni di esercizio durante lo stesso.

Di seguito si riporta l'analisi di dettaglio e i parametri calcolati di interesse per il prelievo.

Volumi normali gas nell'aria

T_{aria} 0° 80°	30					
Volume aria	1000			V_{vap./Mc aria}	0,00	
P_{x vap.<35°}	0,0			NV_{aria}	901,0	0,000%
P_{x vap.>35°}	0,0	P_{x rel.}	0,00	NV_{vap.}	0,00	
Umid.rel.	50,0%			NV_{gas}	901,0	0,000%
NV O₂	188,8	% O₂	21,0%	O₂/O₂	1	6,70
NV N₂	703,6	% N₂	78,1%	O₂/N₂	3,727	21,87
NV Ar	8,650	% Ar	0,96%	O₂/Ar	0,046	0,38
NV H₂O	0,00	% H₂O	0,00%	O₂/H₂O	0,000	0,00
		100,0%		P.M.	28,95	
					densità aria	1,2933619

RSU			
Elem.	P.A.	%	Form.
C	12,0	52,0	4,33
H	1,0	8,0	7,94
O	16,0	40,0	2,50
N	14,0	0,0	0
S	32,1	0,00	0
Cl	35,5	0,00	0
P.M.		100,0	
Kg/h		15174	
Kmoli		151,7	
Volume fumi		114563	Nmc/h
Kg/h RSU umido		38125	
Inerti t.q.		15,2%	
% umidità		45%	
Kg inerti		5795	
Kg/h acqua		17156	
Kg secco		20969	
P.C.I.		4.800	
Mcal/h		72834	
Metano alla potenzialità del bruciatore			
Elem.	P.A.	%	Form.
C	12,0	12,0	1,00
H	1,0	4,0	3,97
O	16,0	0,0	0,00
N	14,0	0,0	0
S	32,1	0,00	0
Cl	35,5	0,00	0
P.M.		16,0	
Kg/h		26,5	
Kmoli		1,7	
Volume fumi		390	Nmc/h
P.C.I.		11.800	
Mcal/h		313	
Volume fumi (con O₂ = 0%)		114953	Nmc/h
Umidità fumi (con O₂ = 0%)		34933	Nmc/h
Volume fumi anidri (con O₂ = 0%)		80019	Nmc/h

Volume dei fumi con ossigeno al valore riscontrato							Calcolo P.M. medio dei fumi
% ossigeno residua			8,50	%			3,357748
Volume aria in eccesso			78482	Nmc/h			3,250703
Volume totale fumi			193434	Nmc/h			18,20283
Volume totale fumi a 950°			830757	mc/h			2,72
Volume postcombustore			500	Mc			0,319681
Tempo di permanenza			2,2	S			
Temperatura			900				27,85
Volume totale fumi anidri			158501				Densità fumi
Umidità			34933				1,2441
% umidità			18,1%				
Temperatura aria			30				
Temperatura fumi out post			900				
Verifica termica							
	%	Kg/h	Mc/h	Kcal/Nmc	Kcal/Nmc	Kcal/Nmc	Kcal/h
CO2	7,6%		14761	452	11	441	6509218
H2Ovap.	18,1%		34933	357	12	345	12034810
N2	65,0%		125752	297	9	288	36255596
O2	8,5%		16442	314	9	305	5019094
Ar	1%		1546	314	9	305	471914
Tot 2	100%		193434				
Calore necessario			60.290.633	Kcal necessarie			
Calore totale prodotto			73.146.700	Kcal/h disponibili			

Dalla distribuzione dei dati sopra elencati si evince che il forno di incenerimento durante le operazioni di campionamento ha regolarmente funzionato alle massime condizioni di esercizio, con valori confrontabili con i dati delle prove di garanzia effettuate nel dicembre 1998 dal Raggruppamento Ansaldo, ABB, Martin GMBH.

Studio parametri fluidodinamici dell'emissione convogliata

Le indicazioni del punto 2 del M.U. 422 "le condizioni di campionamento ideali si hanno in punti distanti almeno 8 diametri a valle e almeno tre diametri a monte di qualsiasi ostacolo" sono ampiamente rispettate dal cami-

no dell'inceneritore. Il punto 5 dello stesso manuale afferma che quando si verificano le condizioni di flusso laminare e sufficiente fare le misure e i campionamenti in un solo punto. Ugualmente si è voluto accertare le condizioni fluidodinamiche dell'emissione misurando i seguenti parametri fluidodinamici.

	u.m.											
Pressione atmosferica	MmHg	756	756	757	757	757	756	757	756	756	757	757
Pressione statica	MmHg	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736	736
Concentrazione acqua	G/Nmc S	190	185	198	190	185	198	190	199	200	197	190
Diametro condotto	Mm	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200	2200
Tempo di campionamento	Min.	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Volume aerif.aspirato N	Nmc	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Velocità aeriforme	m/s	21.92	22.00	22.23	21.92	22.01	22.00	21.25	21.59	21.89	21.74	22.00
Profondità affondamenti	Mm	54	173	309	475	704	1100	1496	1725	1891	2027	2146

Metodo di campionamento

Al fine di poter misurare la quantità di polveri generate dalla condensazione di cloruro di ammonio, attesa la notevole presenza di umidità all'interno dell'emissione convogliata e considerate le caratteristiche di solubilità in acqua del cloruro di ammonio, si è deciso di utilizzare la metodica M.U.811 "determinazioni del materiale particellare in flussi gassosi convogliati ad alto tasso di umidità (EM/19)". Il principio del metodo di campionamento sopra citato si fonda sulla determinazione gravimetrica della sospensione in condizioni di isocinetismo, secondo quanto previsto dal M.U. 494, e relativa filtrazione su supporto in fibra di vetro con preventivo riciclo di una quota di aria campionata preventivamente essiccata. La quota di aria in ricircolo deve essere preventivamente portata a condizioni di temperatura tali da raffreddare il flusso che attraversa la membrana rimanendo molto distanti dal punto di rugiada.

Questo metodo permette di spostare gli equilibri di reazione sopra descritti provocando la deposizione di cloruro di ammonio permettendone la misura quantitativa in modo

gravimetrico, questo al fine di evidenziare la formazione di "materiale particellare secondario" ma anche al fine di evidenziare le problematiche legate al campionamento dei fumi contenenti questi composti.

Occorre precisare che il DM 503/1997 che fissa i limiti di emissione per gli inceneritori prescrive un limite per il cloro inorganico totale. La misura di questo parametro deve essere eseguita secondo il decreto del Ministro dell'ambiente del 25/8/2000 - Aggiornamento dei metodi di campionamento, analisi e valutazione degli inquinanti, ai sensi del DPR 203/1988.

Questo metodo per la misura dei cloruri totali, da esprimere come HCl, prescrive il campionamento con sonda riscaldata (120-130°C).

Dalla sperimentazione eseguita si dimostra che per la misura dei cloruri totali potrebbe non essere sufficiente la temperatura di 120°C, indicata nella metodica del DM 25/8/2000. Invece è consigliabile un riscaldamento della sonda e del filtro ad una temperatura superiore a quella dei fumi nel condotto. E' poi opportuno ispezionare il treno di campionamento, in particolare tutti i tratti

non riscaldati e non coibentati e verificare la presenza di depositi bianchi di cloruro di ammonio.

Se il filtro non fosse adeguatamente riscaldato si avrebbe una sottovalutazione delle concentrazioni di HCl, in quanto i cristalli di cloruro di ammonio verrebbero trattenuti dal filtro. Ne risulta che la presenza di ammoniaca interferisce con le misure di HCl.

Gli esperimenti condotti consigliano che il campionamento dei gas per la determinazione dell'HCl sia effettuato con un riscaldamento della sonda e del filtro ad una temperatura maggiore di quella dei fumi e in ogni caso non inferiore a 140°C.

Campagna di misure

Verificato che non vi sono scostamenti significativi di velocità all'interno dell'emissione convogliata e non vi sono moti di turbolenza, si è deciso di procedere al campionamento soltanto in un punto, come peraltro contemplato dalle metodiche ufficiali. I campionamenti sono stati effettuati alla profondità di 704 mm.

I parametri fluodinamici misurati durante i campionamenti sono:

n °campione		3	4	5	6	8
Data campionamento		31/05/02	31/05/02	4/06/02	4/06/02	4/06/02
Pressione atmosferica	mmHg	740	739	737	737	736
Pressione statica	mmHg	736	736	733	733	735
Densità aria a secco	g/l	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29
Concentrazione acqua	G/NmcS	220	220	200	200	150
Temperatura di normalizzazione	C°	0	0	0	0	0
Pressione parz.vapore acqua	mmHg	158	158	146	146	115
Diametro condotto	Mm	2200	2200	2200	2200	2200
Area condotto						
Tempo di campionamento	Min.	60	60	60	60	60
Temperatura al conta litri	C°	27	28	27	29	30
Volume aeriforme aspirato	Mc	470	477	558	1008	777
Volume aeriforme aspirato normalizzato	Nmc	427	431	506	911	697
Massa vol. vapor d'acqua	Kg/m3	0.11	0.11	0.10	0.10	0.08
Massa vol. aeriforme secco	Kg/m3	0.65	0.65	0.66	0.66	0.69
Massa vol. aeriforme greggio	Kg/m3	0.77	0.76	0.76	0.76	0.77
Temperatura emissione	°C	136	138	141	141	141
Pressione differenziale	MmH2O	24.86	24.26	30.03	26.18	24.78
Velocità aeriforme	m/s	20.28	20.10	22.39	20.90	20.17
Portata effettiva	m³/h	277638	275121	306419	286087	276119
Portata normalizzata	Nm³/h	184906	182378	201933	188543	182041
Portata normalizzata aeriforme secco	Nm³S/h	141359	139239	156813	146416	148574
Ossigeno misurato	%	9	8.8	9.2	9.7	9.1

ANALISI GRAVIMETRICA DEI CAMPIONI

I campioni sono stati condizionati in stufa a 105 C° per un periodo di 2 ore successivamente sono

stati condizionati in essiccatore a gel di silice e pesati con bilancia analitica a cinque cifre decimali.

N°campione	N I	Peso iniziale in g	Peso finale in g	Peso polvere in g	Mg	mg/Nm3
3	427	0,1186	0,12291	0,00431	4,3	10,09
4	431	0,1183	0,12284	0,00454	4,5	10,53
5	506	0,1237	0,12873	0,00503	5	9,94
6	911	0,1235	0,12511	0,00161	1,6	1,76
8	697	0,12286	0,12863	0,00577	5,8	8,27

Rapporto all'11 % di ossigeno

Emissione reale mg/nm3	Ossigeno misurato %	Ossigeno di riferimento	Coefficiente di correzione	Emissione rapportata mg/Nm3
10,09	9	11	0,833333333	8,41
10,53	8,8	11	0,819672131	8,63
9,94	9,2	11	0,847457627	8,42
1,76	9,7	11	0,884955752	1,56
8,27	9,1	11	0,840336134	6,95

ANALISI DIFFRATTOMETRICA

Al fine di poter identificare la tipologia delle polveri deposte sulle membrane di campionamento si è proceduto ad effettuare l'analisi dello spettro di diffrazione X.

Lo studio dello spettro derivante dall'analisi di diffrazione X fornisce un'immagine unica per ogni sostanza cristallina; questo permette, previa verifica con un campione standard, di desumere l'identità chimica del campione posto in esame. Si può affermare che lo spettro di diffrazione possa essere per analogia associato "all'impronta digitale" propria di ogni sostanza cristallina.

Lo spettro generato dall'analisi di diffrazione X del campione n°3 è stato ottenuto indagando l'intervallo 2 θ compreso tra 10 e 80 con uno step di 0,01 gradi e condizioni operative di 600 mA e 40KV ed è

mostrato dallo spettro di colore blu. Si è poi eseguita sullo standard (Eurobase Spa - S.Giugliano Milanese licenza Hetalab Chemical Corporation USA) di ammonio cloruro con step di 0,01 gradi e condizioni operative di 200 mA e 200KV mostrata con lo spettro di colore viola.

SPETTRO DI DIFFRAZIONE

Allo scopo di ulteriore verifica sono portate in soluzione le polveri depositate sulle membrane mediante acqua deionizzata successivamente si sono sottoposte le soluzioni così ottenute ad analisi riscontrando reazioni caratteristiche dei sali di ammonio e dei cloruri a conferma di quanto evidenziato dalla diffrazione eseguita. Dagli accertamenti analitici condotti si conferma la presenza di polveri di cloruro di ammonio.

CONCLUSIONI

Dai controlli effettuati si ricava che all'emissione del camino del Termoutilizzatore si riscontrano concentrazioni di inquinanti sempre al di sotto dei rispettivi valori limite di riferimento, sia regionali sia nazionali sia europei, per tutti gli inquinanti misurati.

Nel trattamento delle emissioni l'impianto ha mostrato di poter garantire, nella gestione a regime e soprattutto nel tempo, valori di rispetto delle concentrazioni massime prescritte.

Lo studio ha approfondito i possibili effetti secondari dell'iniezione di ammoniaca per l'abbattimento degli ossidi di azoto e conferma la validità della scelta di ridurre nelle emissioni le concentrazioni degli ossidi di azoto ben al di sotto dei valori consentiti dalle normative vigenti.

Si ringrazia ASM Brescia per il supporto e la collaborazione offerta