

# SISTEMA DI SUPPORTO ALLA DIAGNOSI PER LA MANUTENZIONE DI APPARATI COMPLESSI

De Falco, Massimo (a)  
Nenni, Maria Elena (b)  
Schiraldi, Massimiliano M. (c)

- (a) **Università di Lecce, Lecce, Italy**
- (b) **Università di Napoli "Federico II", Naples, Italy**
- (c) **Università di Roma "Tor Vergata", Rome, Italy**

## Sommario

In questo lavoro viene presentata una proposta per la strutturazione di un sistema di supporto alla diagnosi di apparati produttivi complessi nell'ambito della manutenzione.

La proposta è indicata per l'applicazione nei casi in cui dalla sola rilevazione dei segnali di malfunzionamento non sia possibile individuare l'avaria, ma la formulazione della diagnosi sia subordinata all'effettuazione di un certo numero di test sull'apparato ed all'intervento di tecnici specialisti. In particolare nei seguenti casi:

- in presenza di avarie difficilmente identificabili;
- nella necessità di test costosi, di lunga durata o di complicata effettuazione;
- in apparati in cui interventi di smontaggio o prove distruttive debbano essere minimizzate;
- nella necessità di intervento da parte di tecnici altamente specializzati.

Sotto queste condizioni, tutte le informazioni necessarie per formulare la diagnosi non sono inizialmente disponibili; di conseguenza, test ed interventi dei tecnici specialisti si ripetono alternandosi fino a quando non si è raggiunta una conoscenza sufficiente del malfunzionamento per poter procedere con la riparazione. Questa procedura è inevitabilmente lenta e costosa; la velocità con cui si riesce a raggiungere la diagnosi delle avarie ed a ristabilire le normali condizioni di funzionamento del sistema è infatti un fattore fondamentale.

Nel metodo proposto i tecnici specialisti dispongono già dal primo intervento di un insieme adeguato di informazioni sull'apparato, a partire dalla rilevazione dell'anomalia. Ciò che consente loro di arrivare in un sol step alla formulazione della diagnosi nella quasi totalità dei casi, ottenendo così una drastica riduzione del downtime.

Infatti, opportuni test preliminari sono selezionati, in base ad un trade-off tra l'obiettivo di ottenere informazione significative sull'avaria e l'obiettivo di minimizzare il costo globale dei test stessi.

La proposta prevede la strutturazione della conoscenza a priori disponibile su una famiglia di apparati in sistemi di relazioni tra *symptom*, *disease* e test; nel momento in cui si accerta un malfunzionamento su un singolo apparato, le informazioni di base vengono confrontate con i segnali rilevati per giungere ad un insieme di massima di test preliminari. Solo un sottoinsieme di questi sarà poi effettivamente eseguito,

dopo essere stato opportunamente selezionato in base al costo, alla complessità ed al grado di significatività a supporto della diagnosi finale. Nel metodo proposto viene considerata:

- la compresenza sia di informazioni storiche sul macchinario sia di quelle che derivano dall'osservazione dei segnali deboli
- la compresenza sia di costi fissi sia di costi orari per l'intervento dei tecnici specialistici
- la possibilità che vengano modificate le risorse di manutenzione durante l'intervento

L'intero sistema è stato infine validato su un caso di studio ed i risultati, convenientemente commentati, sono riportati per valutare le prestazioni della proposta.

## 1. Introduzione

Nell'ambito della manutenzione degli apparati complessi può capitare di trovarsi di fronte alla situazione in cui la funzionalità di un macchinario, totalmente o parzialmente compromessa da un'avaria, non può essere ripristinata senza l'intervento di un tecnico specialista, perché la sintomatologia immediatamente rilevabile non concede una diagnosi univoca, ma sono richieste delle analisi ad hoc e dei test di verifica. In questi casi, sempre più soventi man mano che si diffondono le politiche di outsourcing di manutenzione, l'intervento del tecnico specializzato costituisce un'attività critica, sia dal punto di vista del costo relativo all'intervento stesso, sovente affatto trascurabile, sia dal punto di vista della schedulazione delle attività nel processo di ripristino, all'interno del quale l'attività dello specialista si configura come necessaria, ineliminabile e critica per le successive. Il sistema produttivo o una parte di esso può dover rimanere fermo fino all'intervento dello specialista e spesso quest'ultimo non è in grado di risolvere istantaneamente il problema: non sono rari i casi in cui al primo intervento lo specialista si limita ad analizzare il sistema, ad effettuare alcune analisi e controlli, a commissionare agli operatori eventuali ulteriori analisi o smontaggi per poi essere costretto a dover rinviare la sua diagnosi ed il conseguente intervento risolutivo ad una volta successiva. Il tempo di fermo impianto in queste situazioni può allungarsi ben oltre il tollerabile.

L'obiettivo di ottimizzare il processo di diagnosi ha portato all'applicazione anche in ambito manutentivo della *telediagnosi*, tecnica che punta alla diminuzione dell'incidenza dell'attività critica – intervento dello specialista – attraverso l'eliminazione delle fasi che più chiaramente costituiscono uno spreco di tempo e non aggiungono alcun valore al processo di riparazione, quali i trasferimenti fisici. Tuttavia permangono tutte quelle perdite, affatto trascurabili, imputabili in primis all'organizzazione, effettuazione ed interpretazione dei test diagnostici ed in secundis alla ripetizione di attività, in particolare l'intervento dello specialista, a causa di inefficienze di varia natura.

Proprio la minimizzazione del costo degli interventi specialistici viene affrontata da vari autori (Chiacchierini R. P., 1994), ma si noti come la criticità di tale componente varia sostanzialmente in base a fattori esogeni. Quindi investire per la sua sola riduzione può risultare una strategia di efficacia limitata o anche confinata alla fase di negoziazione del contratto di manutenzione.

Un approccio più radicale, basato sull'idea della totale eliminazione dell'intervento dello specialista, è stato portato avanti da diversi autori che hanno teso ad automatizzare l'attività di diagnosi simulando, attraverso software piuttosto complicati, il comportamento dell'esperto. Molti di questi studi prendono le mosse da ricerche nel campo della medicina, dove l'importanza di una una corretta e veloce diagnosi di un caso è evidentemente di fondamentale importanza (Conigliaro N. et alii, 1988, Kim J.J. e Bekey G.A., 1992). Tale

approccio in azienda non ha però dimostrato grande applicabilità, sia per gli scarsi livelli di affidabilità dimostrati, sia per la sfiducia del management verso la loro implementazione, sia per la rigidità dei sistemi che restringevano molto il campo di applicazione.

Un aspetto su cui, a parere di chi scrive, non ci si è concentrati sufficientemente è sulla possibilità di strutturare diversamente il processo di diagnosi nel suo complesso, anticipando o ritardando le attività di test diagnostici. Queste attività rivestono infatti un ruolo critico, visto che sono quelle che più direttamente influenzano l'efficacia e la velocità della diagnosi; ricordiamo che nei casi di diagnosi complesse lo specialista avrà bisogno di conoscere i risultati di alcune analisi per poter procedere; in caso contrario sarà necessario predisporre una ulteriore fase di esecuzione dei test diagnostici e solo successivamente un secondo intervento dello specialista. È necessario quindi mutare la predisposizione verso i test diagnostici, eleggendole, da semplici attività di supporto all'attività critica di intervento dello specialista, ad attività strategiche.

Il problema della strutturazione del processo di diagnosi è generalmente affrontato in letteratura solo per grandi linee ed a livello qualitativo; Inoltre, esclusi alcuni ambiti altamente peculiari, nella pianificazione dell'intero processo non ci si preoccupa di determinare nessuna informazione in relazione alle caratteristiche od al numero dei test, né in che misura questi siano rilevanti e significativi ai fini della diagnosi finale;

## **2. La pianificazione dei test diagnostici**

La proposta di questo lavoro è quella di agire su una fase immediatamente a monte di quella di intervento dello specialista, introducendo una ulteriore fase di indagine che chiameremo *preliminare*, espletata tramite lo svolgimento di un certo numero ben preciso di test diagnostici, selezionati in base a informazioni disponibili sul caso specifico e tenendo presente un insieme di regole procedurali sviluppate ad hoc e che verranno chiarite nel seguito.

L'anticipazione di questi test corrisponde ad un investimento nella ricerca di informazioni che possano abbattere poi i costi delle successive fasi del processo, ad esempio evitando la ripetizione dell'intervento dello specialista e velocizzando il processo di diagnosi e ripristino della funzionalità del sistema. Questo semplice principio economico, preso in analisi da un punto di vista ingegneristico, si traduce in un modello di minimizzazione del costo complessivo del processo di diagnosi, che raggiunge un giusto compromesso tra i test diagnostici da effettuare a monte dell'intervento dello specialista e quelli effettuati a valle. È possibile in questo modo proporre allo specialista, sin dal primo intervento o addirittura in affiancamento ad una tecnica di teleconsulto, una serie di informazioni a supporto della diagnosi. I primi tentativi in questa direzione sono concentrati, come già accennato, nell'ambito della ricerca medica (Conforti M., 1999).

Per poter realizzare questo obiettivo è però fondamentale concentrarsi inizialmente sul meccanismo di organizzazione della conoscenza sulla *sintomatologia* degli apparati in esame e sulla sua traduzione in informazioni utili ai nostri fini.

Esistono fondamentalmente due tipologie di approccio al problema: la prima si fonda sull'utilizzo delle regole del calcolo proposizionale ed opera mediante le leggi dell'algebra di Boole, giungendo alla formulazione di un giudizio diagnostico sulla base della verifica delle relazioni logiche tra le variabili in oggetto; tali metodi esigono che il problema clinico sia ben definito (cioè siano note le relazioni tra sintomi

e avarie, di seguito chiamate *disease* sfruttando il termine inglese per esigenze di generalizzazione) per poter costruire e sfruttare la struttura logica – diagnostica. Pertanto essi sono indicati per l'automazione dei problemi di diagnosi nei settori in cui siano disponibili grandi quantità di dati storici, ma non lo sono per la formulazione delle diagnosi cosiddette *difficili*, in quei settori cioè in cui lo specialista per mancanza di informazione deve sottoporre l'oggetto della diagnosi a una serie di test diagnostici aggiuntivi.

La seconda tipologia di approccio è di natura probabilistica; da questo punto di vista, la significatività di un test è imprescindibilmente legata alla probabilità che, data una certa combinazione di sintomi, questi possano essere legati ad un certo sottoinsieme di *disease*. Esistono vari metodi per legare le rilevazioni sintomatologiche con le *disease*, tra cui per esempio il metodo di Bayes. Come risultato, si opera una previsione di diverse diagnosi ad ognuna delle quali viene associata una certa probabilità;

Il metodo presentato in questo lavoro sfrutterà elementi di entrambi gli teorie cercando di fornire un risultato ibrido di tipo booleano – probabilistico per la selezione dei test da effettuare in via preliminare. Un primo sforzo si è concentrato sul problema dell'organizzazione della conoscenza di base e della traduzione della sintomatologia in diagnosi potenziali; ed ha avuto come risultato la strutturazione delle informazioni in una conveniente architettura modellistica.

Una volta determinato il set di massima dei test diagnostici, il secondo passo consiste nel ricercare al suo interno il sottoinsieme di test da eseguire effettivamente. Tale ricerca, come già anticipato, persegue un compromesso tra la significatività dei test ai fini delle fasi successive ed il costo degli stessi; ed è conseguita applicando un modello di ottimizzazione non lineare appositamente sviluppato ed implementato su calcolatore.

### 3. L'organizzazione dei dati: architettura informativa

Nel metodo proposto, la conoscenza è organizzata in tre relazioni: la relazione tra *symptom* e *disease*, la relazione tra *disease* e test diagnostici e la relazione tra test diagnostici e *priorità di esecuzione*.

Nell'individuazione delle relazioni predette è evidente il ruolo che gioca, oltre la dimensione del database a disposizione, la metodologia di elaborazione dell'architettura delle informazioni di supporto (Pollizzi J.A., 1993) ed è appunto sulla descrizione di quest'ultima che ora ci soffermeremo.

Nel seguito indicheremo le relazioni symptom-disease con la sigla SM (è stata utilizzata la sigla SM dove con M si intende qui *malfunzionamento* per meglio aderire alla nomenclatura presente in letteratura); più precisamente, dato il generico sintomo  $s_i$ , il primo gruppo di relazioni è dato dalla coppia  $(s_i, M_i)$ , in cui  $M_i$  è un insieme di dimensione  $k$ , con  $k$  variabile, che contiene tutti i *disease* che annoverano  $s_i$  tra i sintomi caratterizzanti ( presenteremo più avanti una variante del modello che permetterà di distinguere tra sintomi caratterizzanti e sintomi collaterali).  $M_i$  quindi è un insieme del tipo  $(m^1_1, m^1_2, \dots, m^1_k)$ .

Un generico caso in esame sarà contraddistinto da una serie di sintomi rilevati ovvero un vettore del tipo:

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$$

Come punto di partenza è quindi necessario organizzare la base di conoscenza in questo modo:

$$(s_1, M_1) = (s_1, [m^1_1, m^1_2, m^1_3, \dots, m^1_k])$$

.....

$$(s_n, M_n) = (s_n, [m_{1}^n, m_{2}^n, m_{3}^n, \dots, m_{p}^n])$$

Che in forma tabellare diventa:

Symptom	Disease
s <sub>1</sub>	m <sub>1</sub> <sup>1</sup>
s <sub>1</sub>	...
s <sub>1</sub>	m <sub>k</sub> <sup>1</sup>
s <sub>2</sub>	m <sub>1</sub> <sup>2</sup>
s <sub>2</sub>	...
s <sub>2</sub>	m <sub>1</sub> <sup>2</sup>
...	...
s <sub>n</sub>	m <sub>1</sub> <sup>n</sup>
s <sub>n</sub>	...
s <sub>n</sub>	m <sub>p</sub> <sup>n</sup>

Come spunto di approfondimento e di ulteriore evoluzione della metodologia con cui è stato affrontato il passo appena descritto, è importante sottolineare che la relazione SM a cui siamo pervenuti è stata ottenuta esclusivamente partendo dal considerare i sintomi e associando ad essi i disease. Ma la definizione dei sintomi scaturisce esclusivamente dalla rilevazione, mentre per determinare i disease è possibile far riferimento a grandi quantità di dati e di casistiche relative ad apparati operanti in diverse aree tecniche. In questa fase quindi di associazione sintomo-disease può essere conveniente, soprattutto dal punto di vista della complessità computazionale, condurre parallelamente la ricerca della relazione contraria. Ovvero a partire da un dato insieme di disease, giungere a relazionare quest'ultimo all'insieme dei sintomi caratterizzanti.

Si procede a questo punto esplicitando la relazione tra disease e test diagnostici, che è indicata con la sigla MT: dato il generico disease m<sub>i</sub>, il secondo gruppo di relazioni è dato dalla coppia (m<sub>i</sub>, T<sub>i</sub>), in cui T<sub>i</sub> è un insieme di dimensione h, con h variabile, che contiene tutti i possibili test diagnostici che possono contribuire alla diagnosi del disease m<sub>i</sub>; T<sub>i</sub> sarà cioè un insieme del tipo (t<sub>1</sub><sup>i</sup>, t<sub>2</sub><sup>i</sup>, ..., t<sub>h</sub><sup>i</sup>). Si arriverà pertanto a relazioni del tipo

$$(m_1, T_1) = (m_1, [t_{1_1}^1, t_{2_1}^1, t_{3_1}^1, \dots, t_{h_1}^1])$$

...

$$(m_m, T_m) = (m_m, [t_{1_m}^m, t_{2_m}^m, t_{3_m}^m, \dots, t_{q_m}^m])$$

La tabella precedentemente esposta verrà quindi arricchita di una ulteriore colonna relativa ai test diagnostici, come viene mostrato qui di seguito.

Symptom	Disease	Test
s <sub>1</sub>	m <sub>1</sub> <sup>1</sup>	t <sub>1</sub> <sup>1</sup>

$S_1$	$m_{1_1}^1$	...
$S_1$	$m_{1_1}^1$	$t_{1_h}^1$
$S_1$	...	...
$S_1$	$m_{1_k}^1$	$t_{1_k}^k$
$S_1$	$m_{1_k}^1$	...
$S_1$	$m_{1_k}^1$	$t_{1_g}^k$
...	...	...
$S_n$	$m_{n_1}^n$	$t_{n_1}^1$
$S_n$	$m_{n_1}^n$	...
$S_n$	$m_{n_1}^n$	$t_{n_i}^1$
$S_n$	...	...
$S_n$	$m_{n_p}^n$	$t_{n_1}^p$
$S_n$	$m_{n_p}^n$	...
$S_n$	$m_{n_p}^n$	$t_{n_g}^p$

Infine è strutturata la relazione tra i test diagnostici e la relativa priorità di esecuzione da cui è possibile determinare anche l'ordine di effettuazione delle analisi. Questa ultima relazione, indicata con la sigla TP, ha però una valenza del tutto differente da quella delle relazioni SM e MT; abbiamo infatti visto come queste ultime, oltre a non essere biunivoche, fossero costruite a priori in maniera indipendente dal caso in esame. La relazione TP invece è strettamente dipendente dal particolare caso in esame e varia in valore e dimensione a seconda della quantità e della natura delle informazioni disponibili nella fattispecie. In particolare, dovendo valutare la priorità di esecuzione di un test di analisi, si dovrà tenere conto di tre fattori di discriminazione (Okada M., 1989):

- il costo del test;
- l'invasività o la distruttività del test;
- la significatività del test.

La scelta di effettuare le analisi preventive ci porta a dover valutare attentamente il rischio associato alla possibilità che queste analisi potrebbero rivelarsi successivamente non necessarie; la potenziale accelerazione del processo di diagnosi conseguita grazie all'anticipazione di una o più analisi deve essere confrontata ovviamente con il costo di ogni singolo test; conseguentemente si tenderà ad assegnare priorità più bassa a test dall'alto costo di esecuzione. Altrettanto chiara è l'importanza del fattore invasività: questa rappresenta una misura della possibilità del test di alterare il materiale sul quale lo si sta svolgendo o la necessità di una asportazione di un campione per lo svolgimento stesso: è chiaro che si tenderà ad assegnare una priorità più bassa ai test invasivi rispetto agli altri.

Analogamente, test meno significativi avranno priorità più bassa; questo ultimo fattore è però particolarmente critico; infatti la capacità del test di fornire utili informazioni ai fini della diagnosi finale è un elemento di difficile valutazione, spesso aleatorio e fuori dal controllo dell'operatore; da questo punto di

vista si possono individuare e distinguere due tipologie di informazioni a supporto del giudizio di significatività:

- le informazioni statiche;
- le informazioni dinamiche.

Con il termine informazioni statiche (Pollizzi, J. A., 1983) si intendono tutte quelle informazioni che a tutti gli effetti possiamo considerare indipendenti dal tempo. Ad esempio sono informazioni statiche quelle relative al modello del macchinario, i dati di targa, il grado di obsolescenza. Alcuni test diagnostici avranno infatti una priorità diversa a seconda delle informazioni statiche che caratterizzano l'oggetto dell'analisi.

Al contrario le informazioni dinamiche dipendono strettamente dal tempo, per cui è necessario conoscere sia il valore istantaneo delle variabili  $i(t)$  sia l'andamento del valore nel tempo, inteso come sequenza di anni giorni o ore, in cui è stato rilevato tale valore  $i(t_1), i(t_2), i(t_3), \dots, i(t_n)$ . Ovviamente l'intervallo di tempo tra le misurazioni deve essere adattato ad ogni circostanza.

Sono parimenti informazioni dinamiche quelle desumibili dai dati storici di un caso in esame; un determinato disease o intervento assume rilevanza diversa a seconda di quanto è vicino o lontano nel tempo ed una determinata sintomatologia può essere valutata diversamente a seconda della storia propria del caso in esame. Elaborando quindi ulteriormente la tabella vista prima, per le priorità di esecuzione si avrà:

Symptom	Disease	Test	Priorità
$s_1$	$m_1^1$	$t_1^1$	$p_1^1$
$s_1$	$m_1^1$	...	...
$s_1$	$m_1^1$	$t_h^1$	$p_h^1$
$s_1$	...	...	...
$s_1$	$m_k^1$	$t_1^k$	$p_1^k$
$s_1$	$m_k^1$	...	...
$s_1$	$m_k^1$	$t_q^k$	$p_q^k$
...	...	...	...
$s_n$	$m_1^n$	$t_1^1$	$p_1^1$
$s_n$	$m_1^n$	...	...
$s_n$	$m_1^n$	$t_i^1$	$p_i^1$
$s_n$	...	...	...
$s_n$	$m_p^n$	$t_1^p$	$p_1^p$
$s_n$	$m_p^n$	...	...
$s_n$	$m_p^n$	$t_q^p$	$p_q^p$

Le priorità appena introdotte sono utilizzate come input del modello decisionale.

#### 4. La classificazione dei sintomi

Nel paragrafo precedente si è visto che ciascun disease è associabile ad un insieme di sintomi che solitamente lo accompagna. Tra i sintomi associabili ad un disease è possibile distinguere tra *caratterizzanti* e *non caratterizzanti*: i primi sono tutti quei sintomi in cui le variabili sono misurabili quantitativamente e denunciano un valore numerico molto al di fuori dal normale range di oscillazione e si configurano come sintomi *specifici* di quel particolare disease. I sintomi in cui le relative variabili non sono quantificabili con precisione oppure non presentano valori particolarmente distanti dai range di oscillazione saranno detti in ogni caso *non caratterizzanti*.

Tuttavia i sintomi, sia qualitativi, sia quantitativi, per essere elaborati, devono essere ricondotti ad una scala di valori uniforme, che, per i nostri scopi, prevede tre livelli:

- al livello 1 sono classificati quei sintomi in cui le variabili sono misurabili quantitativamente e denunciano un valore numerico molto al di fuori dal normale range di oscillazione. Tra questi troveremo quindi alcuni sintomi *caratterizzanti* di diversi disease;
- al livello 2 sono classificati quei sintomi in cui le variabili, qualitative o quantitative, denunciano valori o intensità distanti dal normale range di oscillazione;
- al livello 3 sono classificati quei sintomi in cui le variabili, qualitative o quantitative, denunciano valori o intensità appena al di fuori dal normale range di oscillazione.

L'obiettivo di tale classificazione è quello di procedere estraendo dall'insieme di potenziali disease solamente quelli che presentano, tra i sintomi caratterizzanti, quelli del particolare caso in esame.

### 5. La procedura di individuazione dei test

Supponendo di avere a che fare con un siffatta combinazione di sintomi,

$$S=(s_1, s_2, s_3, \dots, s_n)$$

la procedura di individuazione dei test si articolerà nella seguente maniera:

- 1) dal vettore S si estraggono i soli sintomi caratterizzanti;
- 2) per ciascun sintomo  $s_i$ , ( $i=1, \dots, n'$ , con  $n' < n$ ) si individua l'insieme di disease  $M_i = (m^i_1, m^i_2, \dots, m^i_k)$  che presentano quel sintomo tra i caratterizzanti;
- 3) si effettua l'intersezione degli insiemi  $M_1, M_2, \dots, M_{n'}$ .

I test che andremo a selezionare dovranno riuscire ad evidenziare un o più disease all'interno dell'insieme :

$$M = M_1 \cap M_2 \cap M_i \cap \dots \cap M_{n'}$$

Analogamente a come si è appena individuato un insieme di disease logicamente (Micheli, E., 1969) compatibili con la sintomatologia rilevata, è possibile individuare l'insieme di test diagnostici a partire dai singoli disease.



- 4) per ciascun disease  $m_i$ , si individua l'insieme di test  $T_i = (t_1^i, t_2^i, \dots, t_k^i)$  che possono mettere in luce quel particolare disease;
- 5) si effettuerà l'intersezione degli insiemi  $T_1, T_2, \dots, T_h$ .

I test da selezionare sono quindi presenti all'interno dell'insieme:

$$T = T_1 \cap T_2 \cap T_3 \cap \dots \cap T_h$$

L'insieme  $T$  a cui si è pervenuti è generalmente costituito da un numero piuttosto elevato di test diagnostici, che può essere però ridotto eliminando le ridondanze derivanti dal fatto che alcuni tipi di test diagnostici possono essere "contenuti" in altri test più specifici, nel senso che i risultati a cui possono portare sono ottenibili anche come sottoinsieme di risultati di altri test (M. Okada, 1989). Occorre però porre un minimo di cautela nell'eliminare le ridondanze così definite. Si implicano infatti delle considerazioni di carattere qualitativo che è difficile tradurre in un modello matematico: non è detto che convenga sempre eliminare il test *dominato*, ma entrano in gioco considerazioni legate ai costi e allo specifico caso in esame. Nel prosieguo di questo lavoro, indicheremo con  $T'$  l'insieme  $T$  depurato delle ridondanze.

La formulazione del modello matematico per la determinazione dei test da effettuare in via preliminare all'intervento dello specialista, all'interno del predetto insieme  $T'$ , avrà come obiettivo la minimizzazione di una funzione di costo atteso, ovvero:

$$\text{Min} \left\{ \sum_{i=1}^h c_i x_i + \left[ C_{\text{FIS}} + C_{\text{VAR}} \left( \bar{t} + \alpha \Delta t \sum_{i=1}^h y_i \right) + \sum_{i=1}^h c_i (y_i - x_i) \right] * \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^h p_i x_i}{\sum_{i=1}^h p_i} \right) \right\}$$

tale che:

$$y_i \geq x_i \quad \forall i$$

$$\sum_{i=1}^h p_i y_i \geq \beta \sum_{i=1}^h p_i$$

$$x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i$$

Si analizzerà adesso il modello a partire dalle variabili decisionali  $x_i$  e  $y_i$ ; le variabili  $x_i$  sono associate ad i test da effettuare in via preliminare e sono variabili binarie così definite:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{se il test } i \text{ deve essere effettuato preliminarmente (è in soluzione)} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Le variabili  $y_i$  sono variabili fittizie; sono sempre associate ai test ma modellizzano la possibilità che alcuni test inizialmente non entrati in soluzione ( $x_i=0$ ) debbano essere comunque effettuati in seguito per il raggiungimento della diagnosi. Un test  $j$  non effettuato in via preliminare ma poi rivelatosi necessario in seguito alla prima diagnosi avrà quindi variabili associate  $x_j = 0$  ed  $y_j = 1$ . Uno degli obiettivi del lavoro è quello di determinare i test da effettuare in via preliminare, ma per trovare questo insieme dovrà essere tenuto in conto il rischio di anticipare o ritardare un test che poi si potrà rivelare rispettivamente inutile o necessario. Si noti che se  $x_i = 1$  allora  $y_i = 1$ .

Alla quantificazione del rischio è legato anche il parametro  $\beta$ : esso dipende infatti dal particolare contesto in cui si applica il modello e indica la quota parte delle priorità che deve essere soddisfatta complessivamente – cioè considerando sia l'esecuzione preliminare dei test, sia la possibilità che essi siano "ripescati" in fasi successive -. Il parametro  $\beta$  svolge un ruolo molto importante, spostando implicitamente il risultato del modello verso un aumento dei test da effettuare preliminarmente o viceversa. La valutazione di  $\beta$  è quindi un passo quanto mai delicato da cui può dipendere anche l'efficacia o meno del modello decisionale stesso: esso andrà quindi stimato nel migliore dei modi a seconda del contesto particolare nel quale ci si pone.

Dopo aver analizzato le variabili decisionali, procediamo con i singoli termini che compongono la funzione obiettivo.

$$\sum_{i=1}^h c_i x_i$$

- Il termine  $\sum_{i=1}^h c_i x_i$  indica semplicemente il costo dei test per i quali il valore  $x_i = 1$ . Tale costo va quindi sostenuto per svolgere i test in soluzione.
- Con  $c_{FIS}$  e  $c_{VAR}$  si indica rispettivamente il costo fisso e variabile dell'intervento degli specialisti. Questo ultimo essendo un costo orario va moltiplicato per la durata media dell'intervento, indicata con  $t$ .
- Con il termine  $\overline{\Delta t}$  abbiamo invece indicato il tempo medio che è necessario allo specialista per la valutazione dei test diagnostici nell'eventualità di un secondo intervento. Tale tempo è stato moltiplicato per il numero di test diagnostici che lo specialista dovrà valutare ( pari alla somma delle variabili  $y_i$ ). La quota parte di costo variabile che dipende da  $\overline{\Delta t}$ , va poi moltiplicata per il parametro  $\alpha$ .
- $\alpha$  misura la probabilità che l'eventuale secondo intervento tecnico sia svolto da uno specialista diverso da quello che ha svolto il primo; questa inefficienza viene modellizzata ipotizzando un

aumento della durata del secondo intervento, aumento ad esempio dovuto al fatto che lo specialista dovrà rivalutare anche i test che sono stati valutati nel primo intervento.

- Il termine  $\left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^h p_i x_i}{\sum_{i=1}^h p_i} \right)$  è invece la parte centrale della funzione obiettivo.

Ricordiamo che con  $p_i$  si indicano le priorità dei test dell'insieme  $T'$ , all'interno del quale il modello andrà a scegliere quelli da effettuare preliminarmente; Con la suddetta frazione si indica quindi la quota parte di priorità che si riesce a catturare facendo entrare in soluzione un determinato sottoinsieme di  $T'$ . Il complemento a uno di tale termine rappresenterà quindi la quota parte di priorità esclusa dalla nostra soluzione; risulta chiaro quindi perché che tale termine andrà moltiplicare tutti i costi relativi al secondo intervento dello specialista:

Passando ad analizzare i vincoli:

- Il vincolo  $y_i \geq x_i \quad \forall i$  è implicito nella definizione di variabili  $x_i$  ed  $y_i$  precedentemente data.
- Il vincolo  $\sum_{i=1}^h p_i y_i \geq \beta \sum_{i=1}^h p_i$  permette di fare una stima dei test diagnostici da fare tra il primo e il secondo intervento; al secondo intervento si ipotizzerà di dover arrivare ad una certa soglia di efficacia, cioè una certa quota parte di priorità catturate tramite i test; questa soglia è data appunto da  $\beta$ , che verrà stimato a seconda del contesto di riferimento.
- I vincoli di rispondenza a valori binari delle variabili  $x_i$  e  $y_i$  non necessitano di commenti.

Il modello che proposto è non lineare. Nel caso in analisi lo si è risolto con il metodo Generalized Reduced Gradient (GRG2) sviluppato da Leon Lasdon, Università del Texas ad Austin, e Allan Waren, Università di Cleveland.

## 6. Verifica su un caso di studio

La proposta presentata nei paragrafi precedenti è stata implementata su un caso di studio nell'ambito della manutenzione di apparati complessi. Per quanto riguarda la scelta dei parametri di funzionamento, non è sovente il caso, nella diagnosi per la manutenzione, che la quadra di specialisti cambi da un intervento a quello successivo, quindi ha senso scegliere un valore di  $\alpha$  sufficientemente alto (0.98); per quanto riguarda  $\beta$  si è osservato, dai numerosi tentativi effettuati, che deve essere scelto generalmente all'interno dell'intervallo da 0.5 a 0.8 nell'intenzione di cautelarsi sia contro la sottovalutazione dei rischi, sia contro una eventuale sopravvalutazione degli stessi. Dal punto di vista dei tempi, la durata di una diagnosi è stata scelta distribuita con andamento gaussiano con valore atteso attorno ai 25 minuti, mentre il valore medio

del tempo necessario alla valutazione di un risultato di un'analisi è stato scelto uguale ad 1 minuto. Per quanto riguarda i costi dell'intervento dello specialista, è stata presa in considerazione una tariffa media di 2.000 lire al minuto, con costi fissi di 400.000 lire. La dimensione scelta per l'insieme T' è di 15 unità, con conseguentemente 30 variabili decisionali. La scelta di 15 test diagnostici permette di rappresentare una ampia casistica di valori di costo: variando poi le priorità ad essi associate abbiamo potuto analizzare il comportamento anche in alcuni casi limite.

I casi esaminati sono stati divisi in tre fasce a seconda dell'obsolescenza dei macchinari. Questa divisione è stata fatta per permettere di ottenere una analisi più accurata dei risultati.

Nella scelta delle priorità da assegnare ai vari test diagnostici, abbiamo preferito proporre in input al modello le seguenti situazioni di trade off:

- Test diagnostici con alta priorità ed alto costo
- Test diagnostici con bassa priorità e basso costo.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti, l'affidabilità del modello si è riscontrata pari al 90.08%. Ciò non significa che in tale percentuale di casi il modello ha restituito tra i test esattamente quelli necessari, ma un insieme quasi sempre più grande tra cui si trovano anche quelli necessari.

Si vuole sottolineare la significatività di questo risultato, poiché, per come si è impostato il modello, il risparmio di costi dovuto al mancato intervento dello specialista è stato di molto superiore alla somma dei costi relativi ai test in esubero.

Il modello si è comportato meglio nella terza fascia dei casi, ovvero in quella che contraddistingueva i macchinari più obsoleti. Ci siamo spiegati questo andamento con la possibilità, per tale gruppo di macchinari, di tracciare un profilo storico più dettagliato, che si ripercuote direttamente nella possibilità di una più corretta assegnazione delle priorità di esecuzione dei test diagnostici.

Nelle prime prove eseguite si sono confrontate due soluzioni limite: la soluzione in cui vengono svolti tutti i test dell'insieme T' all'inizio del processo di diagnosi e la soluzione in cui tutti i test vengono fatti tra il primo ed il secondo intervento dello specialista; ne deriva una forte penalizzazione della funzione obiettivo nel secondo caso.

A parità di priorità, nella scelta dei test diagnostici il modello ha mostrato prediligere test significativi di basso costo rispetto ai test ad alto costo ed alta significatività.

I test a bassa priorità vengono tendenzialmente scartati immediatamente.

L'andamento della funzione obiettivo è chiaramente crescente in  $\beta$ ; incrementando  $\beta$  infatti, crescerà la somma della significatività catturata con il set di test diagnostici scelto dal modello, e, di conseguenza, il costo totale del set stesso.

Si è più volte sottolineato come nel modello proposto il vincolo con il parametro  $\beta$  sia di fondamentale importanza. Se per esempio il modello viene applicato con un certo valore di  $\beta$  che chiamiamo  $\beta^*$ , avremo un certo numero e tipo di test da svolgere; dopo di che si potranno presentare quattro situazioni tipo:

1. I test svolti sono tutti e i soli test necessari allo specialista per emettere il giudizio di diagnosi;
2. Tra i test svolti ci sono tutti i test necessari allo specialista per emettere il giudizio di diagnosi, ma qualche test è in esubero;

3. Tra i test svolti manca qualcuno dei test necessari per emettere il giudizio di diagnosi;
4. Nessuno dei test svolti si è rivelato necessario allo specialista.

La situazione 1 è ovviamente la situazione migliore possibile: in questo caso si sono svolti prima del primo intervento dello specialista tutti i test che erano effettivamente necessari; se quindi indichiamo con  $\beta'$  la significatività necessaria allo specialista per emettere la diagnosi, possiamo dire che in questo caso  $\beta^* = \beta'$ .

Nella situazione 2 invece la differenza ( $\beta^* - \beta'$ ) può essere presa come una misura di quanto si sia pagato il fatto che si è anticipata la fase di esecuzione dei test diagnostici; è chiaro che comunque il beneficio che si è ottenuto, cioè la diagnosi al primo intervento dello specialista, più che compensa tale esubero di costo ( il modello matematico infatti pesa appunto costi e benefici).

I casi 3 e 4 dovrebbero essere evitati, ovvero sono situazioni operative di cui le caratteristiche dovrebbero essere riconosciute a priori ed in cui l'applicazione del modello non dovrebbe essere consigliata, in quanto, seppur con basse probabilità, il modello potrebbe fornire risultati non migliori dell'approccio tradizionale; infatti nel caso 4 si sarebbe addirittura sopportato un onere aggiuntivo pari a  $\sum_i c_i x_i$ .

Ciò che va confrontato è quindi il costo atteso che il modello restituisce come ottimo con un determinato valore di  $\beta$  e il costo che si avrebbe con lo stesso valore di  $\beta$  con l'approccio tradizionale; la quantificazione di quest'ultimo fattore risulta problematica per una serie di motivi:

- Il costo del processo di diagnosi dipende dal tipo e conseguentemente dal costo dei particolari test diagnostici che appartengono all'insieme T'; pertanto in ultima analisi dipende dal particolare caso clinico in esame;
- Una quantificazione precisa di tale costo è in realtà possibile solo a posteriori.

Premesso ciò, risulta chiaro che la convenienza relativa va stimata di volta in volta, assumendo per  $\beta$  il valore storico nelle varie aree di applicazione ed un costo medio per costo dell'approccio tradizionale; Relativamente al rischio di cui parlavamo in precedenza e cioè di ricadere nelle situazioni 3 e 4, è chiaro che più è basso il valore di caratteristico di  $\beta$ , cioè minore è il numero di test storicamente necessari per la diagnosi, più è definita clinicamente la situazione del caso in esame, quindi minore è la probabilità che ci possano essere valutazioni errate della situazione;

In conclusione si vuole suggerire un indicatore in base al quale è possibile scegliere indicativamente il valore di  $\beta$  per ciascun caso specifico, ovvero il rapporto:

$$\frac{\text{CostoTotale}}{\text{Affidabilità}}$$

dove per affidabilità intendiamo la percentuale di casi per i quali è stato possibile in precedenza arrivare alla diagnosi al primo intervento dello specialista ovvero, in seguito all'applicazione del modello, tutti i casi

in cui la funzione di minimizzazione ha restituito, tra i test da effettuare, quelli necessari allo specialista per la diagnosi, eventualmente con qualche test in esubero.

Riportiamo qui di seguito in tabella, nella prima riga i valori di  $\beta$ , nella seconda i valori dell'indicatore precedentemente introdotto, nelle varie prove che sono state condotte sul caso di studio:

$\beta$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
C/A	9,4	6,2	5,12	4,76	5,8	6,0

Si noti che valori di  $\beta$  esterni all'intervallo 0.3 – 0.8 non sono stati presi in considerazione perché in questi casi il modello ha restituito soluzioni palesemente non efficienti.

Come si vede dalla tabella, il valore di  $\beta$  corrispondente al minimo dell'indicatore Costo/affidabilità precedentemente introdotto, è 0.6. Questo valore dovrebbe essere utilizzato nelle applicazioni successive del modello.

## 7. Riferimenti bibliografici

- [1] BARTHOLOMEW D. J., KNOTT M. " Latent variable models and factor analysis", Ed. Arnold, Hodder headline group, London, 1999
- [2] CHIACCHIERINI R.P., "Medical Device Clinical Trial Design, Conduct, And Analysis", IEEE, Health Care Tecnology Polycy I : The Role Of Tecnology In The Cost Of Health Care, 1994
- [3] CONFORTI, M. "Decision support systems for medical diagnosis", 1999 IEEE EMBS International Conference on, 1999.
- [4] CONIGLIARO N., DI STEFANO A., MIRABELLA O. "an expert system for medical diagnosis", IEEE, Proceedings Of The Symposium On, pages 75-81, 1988
- [5] D. MAIO, S. RIZZI "Archittetural Issues For Clinical Record Management System", IEEE, Computer, 1995
- [6] E. MICHELI "Approccio Logico Formale Probabilistico Ai Problemi Diagnostici", page 133, 1969
- [7] HONG ZHANG, FRANK C. LIN "Medical diagnosis by virtual phisycian", 12<sup>th</sup> IEEE Symposium on, 1999
- [8] J.A. POLLIZZI "The Design Of A Functional Database System And Its Use In The Management Of The Critically", IEEE, 1993
- [9] KIM J.J., BEKEY G.A. "Adaptative Abstraction In Expert Systems For Medical Diagnosis", IEEE, Symposium On , pages 345-352, 1992
- [10] M. OKADA, "Knowledge Representation And Compilation For Symptom-Desease-Test Relationships", IEEE, Symposium On, 1989
- [11] OLAGUNJU D.A., GOLDENBERG I.F. "clinical data base: who needs one (criteria analysis)", IEEE, Second Annual lee Symposium On, Pages: 36-39, 1989