

Modellazione di una Carta di controllo

La metodologia proposta permette di migliorare la bontà di risposta e la sensibilità dei principali strumenti statistici per il controllo di processo, nel caso di misure in continuo su fenomeni rilevati mediante sistemi di acquisizione automatici (**)

STEFANO DE FALCO (*)

Gli strumenti statistici per il controllo di processo sono generalmente applicati al caso stazionario. In tale situazione, la posizione lungo l'asse dei tempi di acquisizione dei dati di misura di una 'finestra' di osservazione del fenomeno è ininfluenza dal punto di vista dello stato del processo monitorato, se questo è soggetto alle sole cause comuni (figura 1). È tuttavia possibile che il processo da monitorare mediante strumenti di rilevazione in continuo presenti una variabilità ciclica del proprio profilo del valore medio (figura 2), e/o del proprio valore di scarto quadratico medio, che non

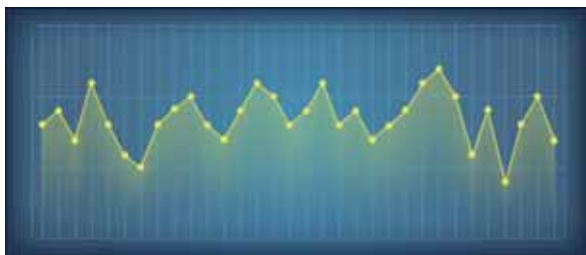


Figura 1: Processo stazionario normale

derivi dall'insorgenza di una causa speciale, ma che sia una diretta conseguenza del normale stato di funzionamento, o per specifiche imposte, o per cause naturali legate all'effetto di parametri d'influenza non controllabili. In

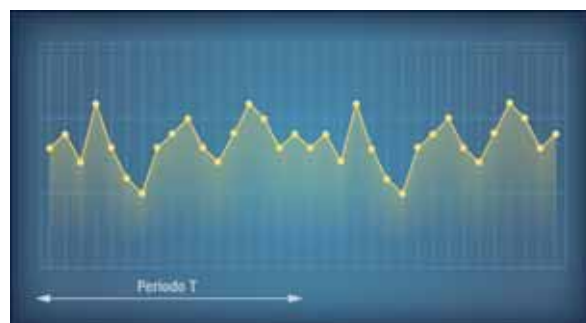


Figura 2: Processo caratterizzato da una variabilità ciclica della propria media



Figura 3: Variabilità intrinseca deterministica

tale circostanza, la posizione temporale della finestra di osservazione del fenomeno risulta essere molto influente ai fini della determinazione dello stato del processo, in quanto i dati di scostamento rispetto a un valore target

imposto come riferimento devono essere depurati dell'aliquota relativa alla variabilità intrinseca del fenomeno, determinata dalle condizioni suddette (figura 3).

L'approccio analitico scelto per la determinazione della variabilità intrinseca del fenomeno è basato su modelli autoregressivi. L'implementazione dell'approccio proposto consente di rendere tempo-varianti i principali strumenti statistici, tra cui la Carta di controllo e il test delle ipotesi. Qui di seguito verrà analizzato il secondo strumento. In particolare, a differenza del caso stazionario, si considereranno gli errori del I e II tipo a e b come funzioni del tempo $\alpha=\alpha(t)$ e $\beta=\beta(t)$ (figura 4). Si considereran-

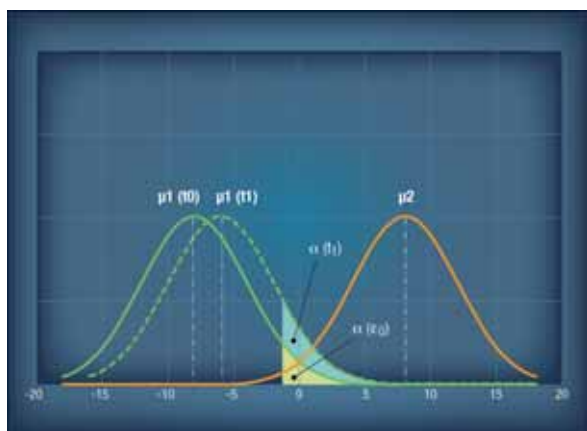


Figura 4: Errori di I e II tipo tempo-varianti

no in particolare tre casi: variabilità intrinseca del processo in media; variabilità intrinseca del processo in varianza; variabilità intrinseca del processo in media e varianza.

Lo scopo di una Carta di controllo predittiva

L'attuale adozione di strumenti di misura in continuo richiede infatti una revisione delle tradizionali tecniche statistiche, impiegate per il monitoraggio delle prestazioni di processi e impianti. La natura di molti processi e l'alta frequenza delle misurazioni effettuate con strumenti di rilevazione automatica sono spesso causa di correlazione tra le osservazioni. In questo caso, gli stimatori di media e varianza ne risultano distorti, con conseguente sottostima nel caso di correlazione positiva e sovrastima nel caso di correlazione negativa. Ciò può essere causa di falsi allarmi e di oneri economici inutili e inefficaci per i gestori del processo o dell'impianto monitorato.

Le Carte di controllo, così come tradizionalmente concepite, vengono utilizzate per verificare lo stato di controllo di fenomeni e processi stazionari, che presentano cioè variazioni casuali intorno ai valori medi \bar{X} e R . Nella pratica, però, può capitare che il parametro in osservazione abbia un andamento variabile ciclicamente nel tempo in maniera ricorrente. Si pensi ad esempio a fenomeni influenzati dalle variazioni climatiche stagionali, legati all'insolazione o, in ambito industriale, alle variazioni che intervengono tra una manutenzione programmata e la suc-

cessiva. In tutti questi casi potrebbe verificarsi la situazione in cui l'analisi con la Carta rilevi dati 'fuori controllo', in teoria dannosi per il prosieguo, che invece sono peculiari di processi a media mobile e varianza mobile, e che descrivono una fase in cui il processo si è modificato in maniera deterministica. La scoperta di valori esterni ai limiti prefissati, in tal caso, sarebbe fuorviante e andrebbe riconsiderata dopo una modifica dei limiti di variabilità e, comunque, sempre attraverso un confronto con i limiti più esterni relativi alle specifiche legate a fattori cogenti per imposizione di gestione e/o per rispondenza a norme di legge. Una volta che sia noto e prevedibile un valore anomalo, ne può essere valutato l'effetto e il risultato dell'analisi può condurre anche a evitare un'azione correttiva di ripristino sul processo in ottica costi/benefici. Possono infatti non essere giustificati dei costi elevati dell'azione rispetto ai benefici che essa porta eliminando quel fuori controllo. Tale considerazione non è però applicabile in caso di assenza di informazioni sul fenomeno, come avviene nelle carte tradizionali.

Queste considerazioni conducono alla possibilità di costruire dei limiti di controllo sulla base della previsione dell'andamento del processo monitorato in termini di salti di media e varianza. Per riutilizzare il modello delle Carte di controllo potrebbe essere utile costruirne altre su dati futuri probabili, ovvero dati prevedibili. Per far questo occorre partire da un'analisi storica del fenomeno in osservazione, cioè da una rilevazione continuata, che consenta di ricostruire l'andamento del fenomeno e di riprodurlo se risulta ciclico. Il problema, dunque, è cercare una procedura che permetta di analizzare i dati reali di un processo, individuare eventuali componenti del suo andamento e in base a quelle prevedere possibili andamenti futuri. In concreto, si tratta di prevedere possibili 'variazioni di media e varianza' $\Delta(\mu, \sigma)$ del processo dovuti a cause note, anche se non controllabili (per ignoranza del modello di controllo e/o per valutazioni di costo) e, in base a esse, modificare i limiti della Carta per rappresentare quegli stessi valori quali realmente sono, cioè dati in controllo.

Il risultato sarà una Carta di controllo predittiva, ovvero 'dinamica', perché capace di autoadattarsi a una modifica interna della struttura del processo. Chiaramente, lo spostamento della media e un aumento della variabilità saranno comunque limitati dai valori imposti dalle normative: nessuna causa, per quanto deterministica, può essere accettata se i valori risultanti dal processo eccedono i limiti di legge. Nessun problema, a tale riguardo, anzi condizioni di lavoro migliori nel caso in cui il processo presentasse un $\Delta\sigma$ negativo, cioè una diminuzione della varianza.

Strumenti e metodologia

Si è scelto di adottare questo percorso perché, per modificare in maniera dinamica i limiti di controllo, è necessario anzitutto prevedere il fenomeno, nel senso di prevederne i valori futuri in base alle componenti deterministi-

che interne. Per tale previsione di tipo statistico occorre disporre di una serie storica di rilevazioni. Una descrizione statisticamente esatta del fenomeno potrebbe avvenire solo attraverso un processo stocastico, ma tale passaggio risulterebbe eccessivamente complicato e dispendioso, soprattutto perché l'obiettivo è prevedere non i singoli valori futuri, bensì l'andamento generale. Pertanto, si è pensato di costruire un modello matematico sovrapponibile al fenomeno, in modo da poter confidare su una buona previsione. Ovviamente, la verifica reale del modello si avrebbe solo se fossero già noti i dati futuri, cosa impossibile. Ciò nonostante gli stessi dati storici potranno essere usati per verificare la correttezza del procedimento effettuato: la prima parte delle rilevazioni verrà utilizzata per elaborare il modello, la seconda parte per comparare l'andamento reale, noto, con la relativa previsione. La classe di modelli più vicini a questa esigenza è quella dei modelli lineari Arima (Auto regressive integrated moving average), costruita proprio perché funzionale all'obiettivo specifico di previsione delle serie storiche. La costruzione del modello permetterà di prevedere i valori futuri, intuendo la presenza di fattori deterministici e, quindi, di componenti di ciclo nel fenomeno. Tali variazioni comporteranno nelle rilevazioni un valore medio mobile $\mu = \mu(t)$, ma anche variazioni della varianza $\Delta\sigma$ in taluni periodi. Le variazioni della media potranno essere più che evidenti da un semplice 'plot' delle rilevazioni, invece per individuare variazioni $\Delta\sigma$ della varianza si dovrà sperimentare in aggiunta l'uso di una Carta R, costruita con sottogruppi molto ridotti in ampiezza, per individuare possibili salti di livello nell'andamento del range, corrispondenti a variazioni $\Delta\sigma$. Per tale approfondimento si è operata una simulazione, ottenuta costruendo un processo ad hoc che presenti le variazioni $\Delta\mu$ e $\Delta\sigma$ sia singolarmente, sia in modalità combinata. Al termine è stato rilevato proprio un andamento del range R con salti di livello in corrispondenza degli intervalli che presentano un $\Delta\sigma$. In base a queste conoscenze, acquisite dalle previsioni effettuate, si potrà costruire una Carta di controllo dinamica del processo, i cui limiti siano variabili in funzione delle componenti cicliche previste e verificate.

Algoritmo per una metodologia generale

L'obiettivo che ci si è posti è di generalizzare la problematica e implementarla all'interno di una metodologia di analisi valida per un qualsiasi processo. Tale metodologia trova il suo sbocco naturale nella costruzione di un software da implementare sui moderni strumenti di misura e rilevazione. La nuova funzionalità di tali strumenti sarebbe proprio la predittività della Carta di controllo, ovvero la possibilità di prevedere i valori futuri del processo in base a quelli acquisiti e memorizzati in periodi analoghi passati e, dopo questo, la possibilità di modificare opportunamente i limiti di controllo in base a salti di livello e di varianza previsti e deterministici. Si intende quindi individuare un algoritmo che descriva il processo di costru-

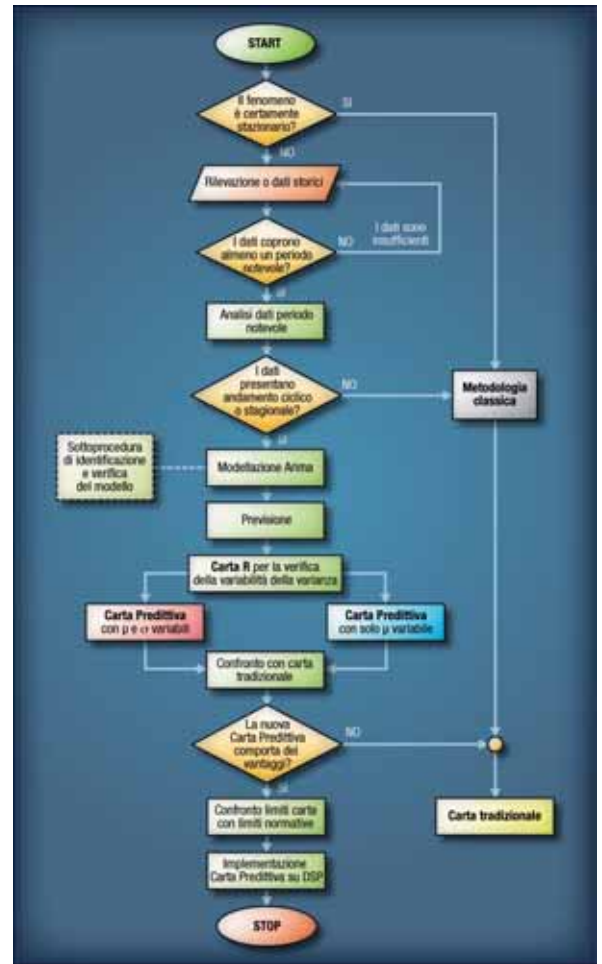


Figura 5: Algoritmo per la scelta della Carta di controllo predittiva

zione e analisi di una Carta predittiva, dunque una struttura logica composta da operazioni in sequenza, il cui susseguirsi consenta di giungere dalla rilevazione istantanea del fenomeno, alla previsione dei limiti di controllo più plausibili per la successiva fase di rilevazione.

Nel tracciare l'algoritmo si è tenuta presente la possibilità di scegliere, quando opportuno, se utilizzare una Carta predittiva o invece la metodologia classica, cioè una Carta di controllo tradizionale (figura 5).

In particolare, l'algoritmo prevede una scelta iniziale, qualora si conosca fin dall'inizio il tipo di processo sottoposto a controllo. Per processi in cui la stazionarietà sia un obiettivo, qualsiasi salto di livello sarà indesiderato, per cui sarà opportuno utilizzare una Carta tradizionale (dorsale destra dell'algoritmo). La scelta intermedia contemplata dall'algoritmo deve essere selezionata in base all'andamento del processo. Avendo a disposizione una serie storica di dati del processo stesso, rilevata o acquisita da rilevazioni passate, dall'analisi dell'andamento si può immediatamente dedurre, in maniera qualitativa, se il processo in esame è di tipo stazionario (media costante) o non-stazionario (media variabile, con variazioni periodiche, cicliche e/o stagionali). La scelta finale viene individuata in seguito a un confronto tra la Carta predittiva costruita e la corrispondente Carta tradizionale valutata sugli stessi dati. In questa fase, in base alle Carte costru-

te, sarà evidente se i limiti di controllo variabili descrivono il fenomeno in maniera più realistica di quelli costanti, così da preferire il nuovo tipo di Carta.

Ricerca della variabilità della varianza attraverso la Carta R

A questo punto di si è posti il problema di come individuare variazioni $\Delta\sigma$ della varianza che potrebbero essere poco evidenti o nascondersi tra variazioni $\Delta\mu$ della media più rilevanti. A tal riguardo, si è studiata la possibilità di utilizzare una Carta R applicata all'insieme dei dati.

È possibile effettuare una verifica sperimentale di tale applicazione attraverso una simulazione condotta su un set di dati acquisiti, nel quale siano presenti, per ipotesi, sia una variazione della media che della varianza, entrambe cicliche; realizzato ripetendo più volte una matrice di 50 dati, amplificandola e spostandola nel livello (figura

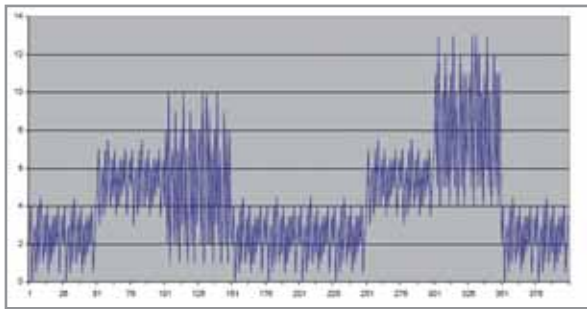


Figura 6: Fenomeno caratterizzato da media e scarto variabili

6). In esso, per ulteriore verifica, è stato creato un intervallo nel quale media e varianza mutavano nello stesso tempo rispetto all'intervallo precedente. In questo modo, risulta possibile stabilire, almeno qualitativamente, se le due variazioni si influenzano. Nell'esempio le variazioni di varianza risultano evidenti, per cui è abbastanza semplice individuare gli intervalli, tra l'altro ciclici. Nella realtà, invece, aumenti o diminuzioni della variabilità possono essere tutt'altro che evidenti, sia perché progressivi, sia perché poco accentuati.

Individuando da questi dati dei sottogruppi di due sole rilevazioni, si possono valutare i singoli range $R = x_{\max} - x_{\min}$. Si ottiene così un numero dimezzato di

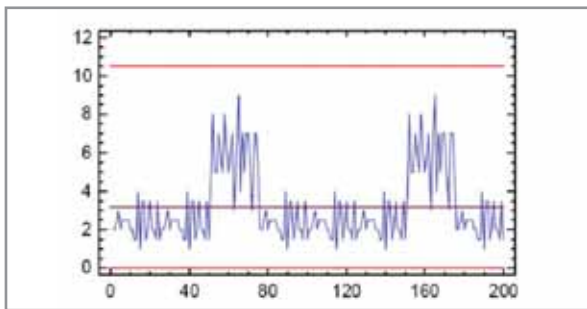


Figura 7: Carta del range R (in fenomeni con scarto variabile)

valori con cui costruire la Carta R. Ovviamente, i valori ottenuti sono tutti non negativi ($R \geq 0$), per cui il limite inferiore è $R=0$. La nuova Carta, compilata con l'aiuto del software, avrà la forma riportata in figura 7.

La Carta R presenta due salti di media in corrispondenza dei sottogruppi (50;75) e (150;175), che corrispondono agli istanti di rilevazione (100;150) e (300;350). In particolare, in tali intervalli i valori si ripetono esattamente, a testimonianza del fatto che un aumento di media nelle rilevazioni non ha nessuna influenza sulla varianza e, quindi, sui range calcolati. In maniera del tutto simile è possibile utilizzare una Carta R per rilevare la variabilità della varianza di qualsiasi serie storica, a prescindere dalla variazione della media.

Analisi dei risultati

Un valido esempio di applicazione sperimentale della metodologia proposta è costituito dall'esperienza di Condor Group, attivo nella produzione di ponteggi, casseforme, macchine da cantiere e monoblocchi prefabbricati. Il gruppo possiede sette stabilimenti produttivi in Italia, una filiale e un centro noleggi in Francia. Le imprese facenti parte della società controllano tutti gli stadi della filiera produttiva, dallo slittaggio dei coil in acciaio, alla profilatura del tubo, all'assemblaggio del prodotto finito su linee completamente automatizzate.

Per un processo non stazionario, l'utilizzo di una comune

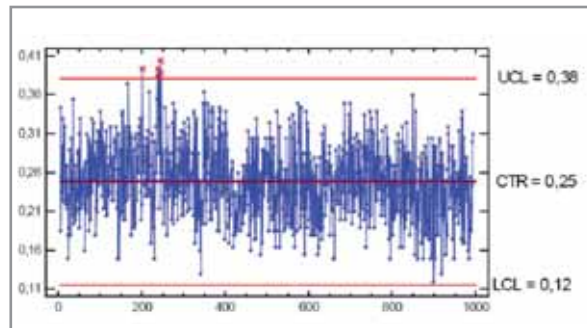


Figura 8: Carta di controllo tradizionale

Carta di controllo rischia di provocare un errore di valutazione nello stato di controllo del fenomeno stesso: valori del tutto normali, ovvero deterministici e prevedibili, possono risultare esterni ai limiti di controllo o di avvertimento costanti tradizionali e, quindi, costituire una situazione di 'fuori controllo' che invece non esiste. La figura 8 riporta la Carta tradizionale relativa al caso concreto di processo non stazionario rilevato in una delle aziende del gruppo Condor, in cui è stata monitorata la durezza superficiale di profilati di alluminio. L'immagine evidenzia cinque punti esterni ai limiti, che manifestano una situazione di 'fuori controllo', che andrebbe invece riconsiderata in base alle ipotesi di non stazionarietà del fenomeno. Per farlo, acquisiti i dati storici e costruito il modello Arima che meglio si addice al fenomeno in esame, si è prodotta una previsione dei dati futuri per un intervallo di tempo

prefissato per un dato errore ammesso (al crescere del quale aumenterà ovviamente l'errore di previsione sugli stessi dati). Nella ricerca di una ciclicità possibile sono stati riportati in un grafico (figura 9) sia i valori effettivamente rilevati (in blu), sia quelli calcolati attraverso il

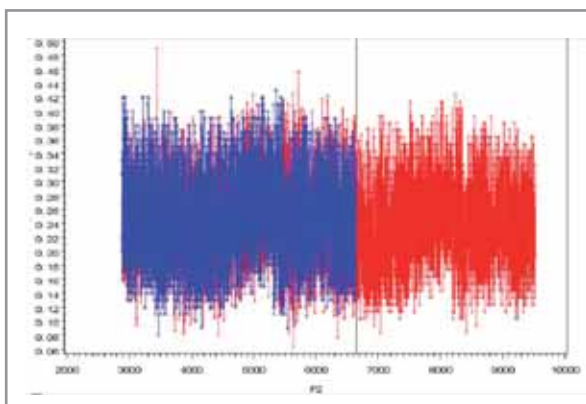


Figura 9: Previsione con modello Arima

modello Arima elaborato (in rosso). Come evidente, la previsione effettuata dal modello si sovrappone con buona precisione al set di dati reali, consentendo di accettare come validi i valori previsti per il futuro, lì dove la previsione è l'unica possibilità di stima.

Dalla stessa previsione si evince che l'andamento del fenomeno ricalca quello reale per ciascun intervallo notevole, per cui è legittimo prevedere che la ciclicità sia deterministica e dunque 'naturale' per lo specifico caso.

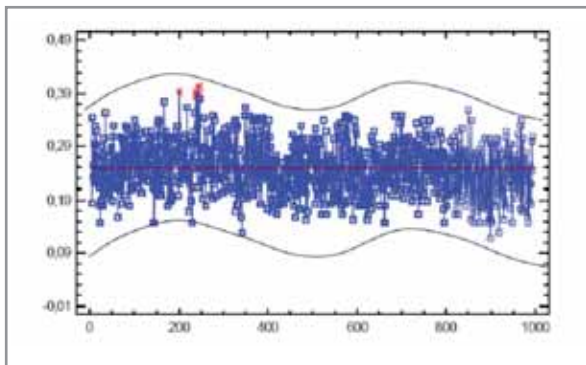


Figura 10: Carta di controllo predittiva

Ciò significa che, a prescindere dalla variabilità naturale dei dati e di quella ciclica rilevabile applicando una Carta R, l'andamento medio del fenomeno sarà non stazionario, ma variabile in maniera deterministica e ciclica. Conoscendone la ciclicità, si può pensare di modulare l'andamento dei limiti di controllo su quello medio delle previsioni, conservando come ampiezza della fascia di controllo quella calcolata con la regola del '3-sigma' e tenendo in conto le eventuali variazioni $\Delta\sigma$ della varianza. Il risultato risulta essere una Carta che permette di controllare il fenomeno partendo già dalla conoscenza del suo più probabile andamento medio futuro, una Carta di con-

trollo predittiva, appunto. Facendo riferimento ancora una volta al caso applicativo, la Carta predittiva assume la forma illustrata in figura 10. In questo caso, i punti che prima erano esterni ai limiti costanti rientrano ampiamente nei limiti di controllo variabili, per cui il processo è sotto controllo. Viceversa, qualora tali punti risultassero ancora esterni ai limiti, ciò testimonierebbe che il fenomeno è fuori controllo. Solo con una Carta predittiva, però, tali affermazioni possono essere ritenute statisticamente affidabili.

Una caratteristica unica

La Carta di controllo per variabili qui proposta risulta innovativa rispetto alle Carte tradizionali, in quanto possiede la caratteristica supplementare di possedere dei limiti di controllo variabili, la cui variabilità segue, alla stregua di un'onda modulante, la variabilità latente e ciclica che può caratterizzare alcuni processi, per effetto di parametri d'influenza non controllabili. La metodologia è stata posta in una forma algoritmica per prestarsi facilmente a una codifica software, per un utilizzo come suite di applicativi realtime a bordo macchina, tipicamente nel controllo di processo industriale. Le prestazioni reali di predizione dei dati descritti dipende, ovviamente, dalla complessità del codice di traduzione dell'algoritmo e dalla piattaforma hardware di supporto. ■

(*) Resp. ufficio ricerca e trasferimento tecnologico Polo delle scienze e tecnologie dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e Resp. ufficio servizi Aicq Meridionale

(**) Bibliografia: H. Ascher and H. Feingold (1987), *Repairable system reliability*, Marcel Dekker Inc. New York; G.E.P. Box and G.M. Jenkins (1976), *Time Series Analysis Forecasting and Control*, Holden-Day, San Francisco CA; J. Healy (1997), *A simple procedure for reliability of repairable systems*, Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium (pp. 171-5); N. Karunanithi, Y.K. Malaiya and D. Whitley (1991), *Prediction of software reliability of repairable systems*, Software Reliability Engineering, 1991, Proceedings, 1991 International Symposium (pp. 124-30); J. Knezevic (1993), *Reliability, Maintainability and Supportability*, McGraw-Hill, New York, NY; A. Krause and M. Olson (2000) *The Basises of S and S-PLUS*, Springer-Verlag, New York, NY; E. Madiedo (1986) *The use of time series analysis in reliability field*, Reliability Technology-Theory&Applications (pp. 209-13); H.R. Maier and G.C. Dandy (1996) *Neural network models for forecasting univariate time series*, Neural Networks World (Vol. 6, N. 5, pp. 747-72); W. Nelson (1988) *Graphical analysis of system repair data*, Journal of Quality Technology (Vol. 20, N. 1, pp. 24-35); N. Singh, D.A. Chrys and P.A. Fishwick (1994) *Forecasting time-dependent failure rates of systems operating in series and/or in parallel*, Microelectronic Reliability (Vol. 34, N. 3, pp. 391-400); N.D. Singpurwala (1978) *Estimating reliability growth using Time Series Analysis*, Nev. Res. Logistics Quarterly (Vol. 25, pp. 1-14); C.J. Wang (1991) *Graphical analysis of ill-collected interval data for a repairable system in vehicles*, Proceedings of the 1991 Annual Reliability and Maintainability Symposium (pp. 93-7)