

IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA DIAGNOSTICO COME STRUMENTO MIGLIORATIVO DI PRESTAZIONI: UNA APPLICAZIONE ALL'IMPIANTO DI PRODUZIONE E TRATTAMENTO ARIA DELL'ELETTROTRENO ETR500 PLT

M. Bandelloni, O. Borgia, F. De Carlo, M. Tucci
Sezione Impianti e Tecnologie Industriali
Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco"
Università di Firenze

Sommario

I sistemi produttivi si muovono oggi nel contesto di un mercato altamente competitivo all'interno del quale le esigenze prestazionali sono sempre più restrittive e vincolanti. Al centro delle nuove istanze di prestazione si trovano spesso i processi manutentivi dei macchinari e degli impianti industriali, anello debole e a volte trascurato del ciclo di vita di un sistema produttivo.

Nel presente lavoro si è posta l'attenzione sui sistemi diagnostici, evidenziando come questi siano la naturale risposta alle rinnovate esigenze prestazionali dei sistemi complessi. Sempre più la loro implementazione risulta essere sinonimo di evoluzione tecnica e metodologica nell'approccio manutentivo e ulteriore leva gestionale del processo produttivo.

In particolare si è operato un confronto tecnico-economico tra i principali indici affidabilistici di un impianto in due configurazioni: l'uno senza e l'altro con supporto diagnostico.

Oggetto della valutazione, tramite simulazione del processo manutentivo, è stato l'impianto di produzione e trattamento aria compressa, montato a bordo dell'elettrotreno ETR.500 PLT.

L'analisi del caso in esame conferma una legge generale dell'impiantistica e cioè che, a fronte di investimenti relativamente limitati in fase di progetto, si possono spesso ottenere sensibili miglioramenti tecnico-economici in fase di gestione.

1. Introduzione ai sistemi diagnostici

Il conseguimento di obiettivi di sicurezza, disponibilità, automazione ed economia d'esercizio di macchine e impianti industriali, richiede l'impiego di politiche manutentive avanzate in grado di limitare gli effetti derivanti dall'insorgere dei guasti. In questo contesto trova applicazione la diagnostica industriale che si prefigge di definire lo stato di degrado di un componente o di una macchina tramite la misurazione di alcune grandezze caratterizzanti.

La logica di un sistema diagnostico consiste nel monitorare, durante il normale ciclo d'esercizio della macchina, uno o più parametri di controllo e di segnalarne, tramite un opportuno dispositivo d'allarme, il superamento dei limiti prestabiliti.

Le fasi di un sistema di monitoraggio si possono così riassumere:

- **Monitoraggio:** misura, calcolo e registrazione dei valori dei parametri significativi della macchina o dell'impianto ad intervalli prestabiliti o su richiesta dell'operatore. Il superamento da parte di queste grandezze delle soglie di allarme, precedentemente stabilite, comporterà l'attivazione dei sistemi di avviso e delle procedure di diagnosi e prognosi;
- **Diagnosi:** partendo dai dati forniti dai sensori e dagli strumenti il sistema è in grado di definire lo stato della macchina o dell'impianto e l'efficienza dei suoi componenti; così da facilitare l'individuazione del componente su cui agire;
- **Prognosi:** il sistema è capace di un'elaborazione dei dati nell'ottica di tracciare la dinamica del fenomeno di deterioramento in questione.

Le principali caratteristiche che deve possedere il sistema diagnostico per garantire il raggiungimento di standard elevati sono:

- **Flessibilità:** per poter essere modificato facilmente durante la sua messa a punto, sulla base della progressiva acquisizione dei dati di esercizio della macchina e per favorirne l'estensione a macchine o impianti diversi;

- **Semplicità:** per evitare costi di acquisto e manutenzione eccessivi dovrà prevedere il minor numero di elementi possibili, compatibilmente con il grado di precisione desiderato. Inoltre deve presentare una facile ed immediata comprensione sia nello schema logico che nella presentazione dei dati, in modo da semplificare il compito dell'operatore;
- **Affidabilità:** oltre al grado di affidabilità richiesto per gli strumenti, il sistema deve prevedere un autocontrollo interno dei dati forniti, in modo da evitare falsi allarmi ed inutili interventi manutentivi. E' necessario per questo predisporre nella logica alcuni filtri, associati agli algoritmi di interpretazione.

Con riferimento alla tempistica di intervento esistono sistemi:

- **On line**, costituiti essenzialmente da insiemi di sensori e schede di acquisizione ed elaborazione dati, montati a bordo della macchina o dell'impianto che supportano. Garantiscono la conoscenza dello stato di funzionamento in tempo reale, durante lo svolgimento della fase di esercizio stessa;
- **Off line**, costituiti da tecniche e strumenti di analisi applicabili al sistema sotto esame parallelamente allo svolgimento della fase di esercizio o durante le consuete fermate per manutenzione preventiva o correttiva.

Entrambe le tipologie di sistemi diagnostici sono applicabili ad interventi manutentivi di primo e secondo livello.

2. Stato dell'arte dei sistemi diagnostici

Numerose applicazioni di sistemi diagnostici sono state adottate, già dagli inizi degli anni '70, in impianti di processo come quelli chimici, petrolchimici, per l'estrazione di idrocarburi, per la produzione d'energia ed in genere in tutti gli ambiti in cui produttività e sicurezza sono considerati obiettivi strategici.

Negli ultimi anni si è manifestato un incremento della richiesta di sistemi di monitoraggio non solo per applicazioni particolari ma anche per macchine a più vasta diffusione come macchine utensili o mezzi trasporto.

Applicazioni avanzate sono le sale di "Diagnostica Remota" attraverso le quali sono controllate centrali di produzione di energia elettrica ed interi complessi chimici e petrolchimici. E' possibile conoscere lo stato di funzionamento di questi impianti a qualsiasi distanza utilizzando la rete internet o i canali satellitari. La stessa filosofia ha preso piede anche nell'ambito dei mezzi trasporto.

Sia VOLVO per gli autobus a lunga percorrenza tramite l'adozione di sistemi Multiplex a bordo del mezzo, sia IRISBUS, già IVECO, per gli autobus urbani con una rete di sensoristica associata a delle centraline con logica master-master, hanno sviluppato sistemi diagnostici avanzati per la conoscenza a distanza dello stato della missione.

Sistemi informativi di bordo con caratteristiche simili ai precedenti sono stati già sviluppati anche per gli elettrotreni dedicati alle linee alta velocità europee, in particolare l'ETR.500 per la rete italiana e il TGV per quella francese.

La tendenza è indirizzata alla ricerca di un alto grado di automazione sia in fase di acquisizione che elaborazione, al fine di garantire un controllo "on line", il più possibile preventivo ed affidabile.

La futura costruzione di macchine e impianti complessi dovrà sempre più tener conto di queste esigenze, prevedendo già in fase di progettazione posizionamenti e connessioni adeguate per un completo e ben strutturato sistema di "condition monitoring".

Oggi il processo ingegneristico più consolidato, per una gestione efficace dei servizi di manutenzione, utilizza strategie manutentive preventive, basate sull'analisi RCM e sul monitoraggio delle condizioni operative delle macchine.

Si è accertato invece come il panorama tecnico attuale non offra risultati o considerazioni relativamente alla simulazione tramite codici numerici di sistemi diagnostici di supporto ad impianti industriali. Le potenzialità di un modello simulativo di questo genere sono enormi in quanto permetterebbe di implementare e calibrare sistemi diagnostici *ad hoc* per qualsiasi tipo di applicazione tramite la valutazione numerica degli indici di prestazione.

Il presente lavoro si rivolge proprio verso quest'ambito con l'obiettivo di quantificare il valore aggiunto in termini tecnico-economici di un sistema di monitoraggio "on line" tramite il confronto delle performance manutentive di un impianto pneumatico nelle due diverse configurazioni: con e senza supporto diagnostico.

3. II GPTA

L'impianto

Il gruppo oggetto dello studio è un impianto di aria compressa dell'elettrotreno AV (Alta Velocità) ETR500 politensione (PLT); ciascuna motrice del convoglio ne monta un esemplare posizionato tra i due carrelli all'interno del sottocassa.

Il gruppo produce aria depurata ed essiccata, ad una pressione di lavoro compresa tra i 9 ed i 10 bar, impiegata dalla locomotiva e dalle carrozze sia per le operazioni di frenatura che per le necessità di altre utenze.

Si riporta, in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, uno schema a blocchi in cui si evidenzia la funzione ed il compito del Gruppo Produzione e Trattamento Aria (GPTA) a bordo del treno.

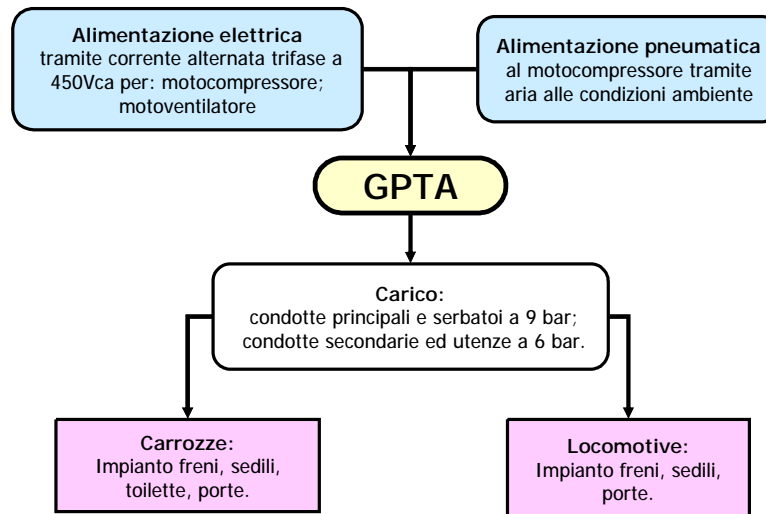


Figura 1: Schematizzazione degli impianti del treno con i quali interagisce il GPTA

Il sistema, composto da circa trenta elementi, è suddiviso concettualmente in due sottosistemi: l'unità di produzione aria compressa (parte sinistra dello schema di Figura 2**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) e l'unità di trattamento aria (a destra).

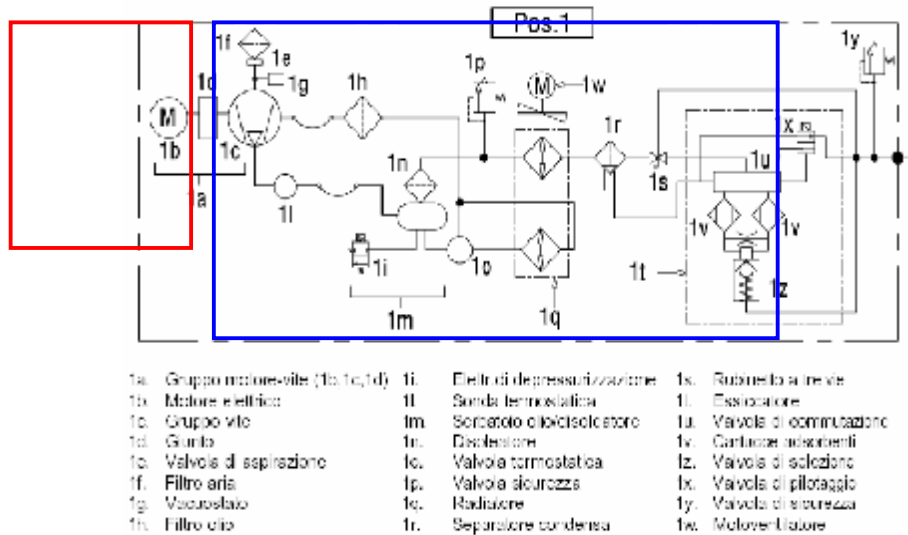


Figura 2: Schema impiantisco del Gruppo Produzione e Trattamento Aria

Nella Tabella 1 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riassunte le principali caratteristiche tecniche del GPTA.

Tabella 1: Caratteristiche tecniche del GPTA

CARATTERISTICHE TECNICHE DEL GPTA	
Pressione di mandata	9-10 bar
Portata effettiva	1,520 l/min
Taratura valvola di sicurezza	11,8 bar
Contenuto olio massimo	12,2 l
Portata aria di ventilazione	3500 m³/h
Peso	553 kg
Numero di giri del motore	1720 rpm
Potenza motore	18 kW
Classe di isolamento motore	H
Tensione di alimentazione motore	450 V
Corrente	33 A
Frequenza	60 Hz

Ricerca dati storici

Le informazioni, necessarie per giungere alla definizione delle grandezze affidabilistiche dei componenti dell'impianto, sono state ricavate tramite la consultazione del sistema informativo aziendale "Sigma", presente nell'impianto Trenitalia di Firenze.

La ricerca e l'elaborazione dei dati di guasto è stata caratterizzata dalle seguenti fasi:

1. analisi dettagliata della struttura ad albero dell'impianto;
2. estrazione dei dati dalle note di lavoro, secondo precisi criteri di ricerca relativi a convogli e intervalli di tempo considerati;
3. scelta della metodologia di trattamento dati: è stato necessario, per poter fare delle inferenze sulla vita dei componenti, scegliere una metodologia di trattamento dei dati che permettesse di tener conto anche delle informazioni estraibili dai componenti ancora funzionanti. E' stata utilizzata la teoria dei dati censurati con il metodo detto "life table"; applicabile ai dati *multiply time censored* anche se fornisce solo stime dei tempi di guasto ($1/\lambda$), per intervalli discreti, senza una valutazione degli errori standard.
4. Ricerca di quale funzione densità di probabilità di guasto $f(t)$ si adatti meglio alla distribuzione di dati ricavata dal sistema informativo di manutenzione (Figura 3 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**);

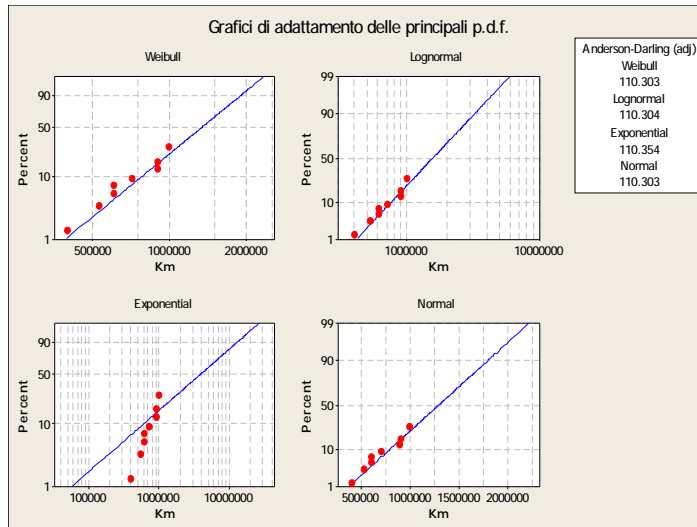


Figura 3: Test sulla bontà di adattamento delle principali funzioni probabilistiche

5. Rappresentazione di grafici legati alla densità di probabilità di guasto $f(t)$ (Figura 4):

- funzione cumulata della $f(t)$ in scala logaritmica;
- funzione di sopravvivenza, in scala lineare;
- funzione tasso di guasto.

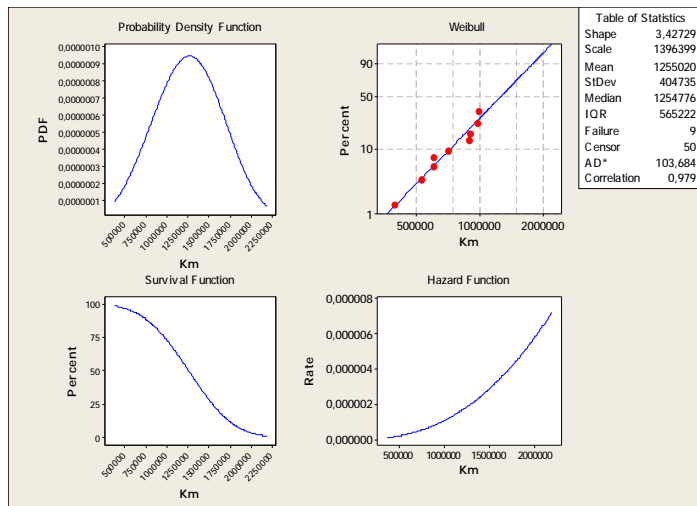


Figura 4: Funzioni probabilistiche legate alla $f(t)$.

L'analisi è stata condotta per tutti i componenti dell'impianto, su cui è stato possibile reperire un numero sufficiente di dati.

I dati sono stati inseriti all'interno di un codice simulativo in grado di fornire per i componenti costituenti il GPTA le distribuzioni dei tempi di guasto, di riparazione e di indisponibilità.

Il software manutentivo - affidabilistico impiegato è "SPAR", un programma simulativo ad eventi in grado di rappresentare al suo interno gli eventi di guasto e tutte le principali azioni manutentive, sia preventive che correttive, che possono essere applicate ad un sistema. Inoltre SPAR prevede un'apposita interfaccia di programmazione che prevede la possibilità di inserire nel codice variabili e funzioni definite dall'utente, da impiegare sia per misurazioni che per modifiche della configurazione del sistema rappresentato.

4. L'attuale GPTA

Modellazione ed implementazione

La costruzione del modello sul *software* prescelto ha seguito le seguenti fasi, legate alla struttura del codice stesso:

1. Rappresentazione del diagramma a blocchi di affidabilità (RBD) dell'impianto, come da Figura 5. Nessun componente dell'impianto risulta ridondato, tranne la valvola di sicurezza per il circuito aria. Lo schema affidabilistico, conseguentemente, è un insieme di blocchi, ciascuno rappresentante un componente, posizionati in serie (unico parallelo le due valvole di sicurezza);

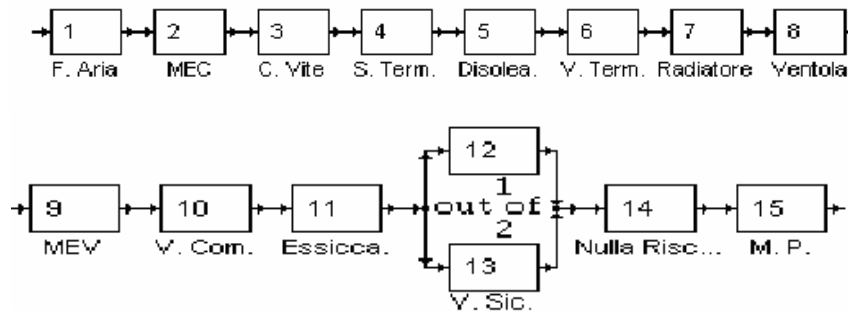


Figura 5: RBD del GPTA.

2. Modellazione e definizione delle caratteristiche dei blocchi attraverso l'apposita interfaccia. Alcuni blocchi non hanno nessuna corrispondenza fisica, ma sono stati creati per facilitare la costruzione di alcune logiche di gestione dell'impianto come, ad esempio, contatori, variabili ed interventi di manutenzione;
3. Sviluppo di un programma, all'interno del modulo "Bubble Maker". Questa opzione è stata molto sfruttata per creare logiche di funzionamento il più verosimili possibile, per poter ottenere dei risultati di particolare interesse non automaticamente ricavabili dall'output del *software*, per controllare il corretto funzionamento delle logiche stesse.

I *run* simulativi sono stati 1500 storie della durata di 58600 ore di funzionamento (pari a 4.400.000) km – circa nove anni di vita del treno;

In ciascuna storia il numero dei componenti di ricambio presenti in magazzino è illimitato;

Per coprire il ciclo d'esercizio annuale del treno sono stati impostati due profili di funzionamento: uno invernale ed uno estivo, con distribuzioni di probabilità specifiche per ogni profilo.

Analisi delle simulazioni

Gli indici manutentivi della simulazione sono stati ricavati implementando nel sistema il piano manutentivo attuale, riportato sul manuale d'uso e manutenzione del treno. Il primo risultato è la possibilità di vedere rappresentata in funzione delle ore di esercizio la probabilità di funzionamento dell'impianto, (Figura 6).

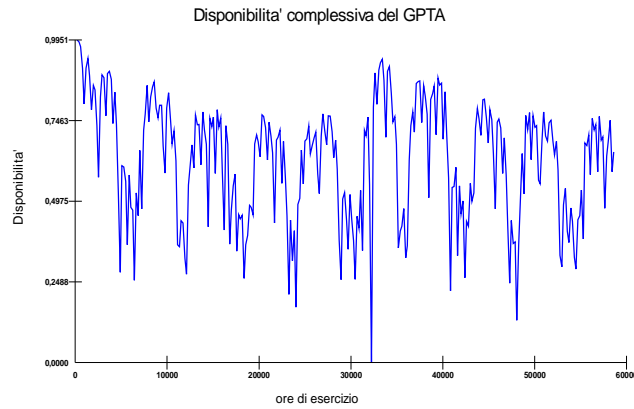


Figura 6: Andamento della probabilità di funzionamento in funzione delle ore di esercizio.

Appare evidente l'alternarsi dei due profili di funzionamento per tutti i nove anni della durata della simulazione; inoltre, in corrispondenza della revisione (detta RO) a 2.200.000 Km pari a 32.000 ore, la disponibilità è uguale a zero, in quanto il treno rimane fermo per molto tempo, subendo radicali operazioni di manutenzione.

In Figura 7, si è considerato, in corrispondenza di ciascun intervallo stagionale, un valor medio di disponibilità.

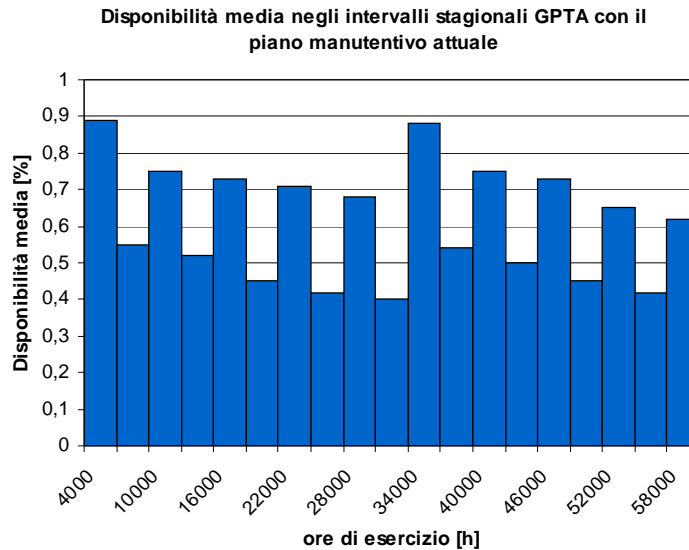


Figura 7: Disponibilità media del GPTA negli intervalli stagionali.

Si nota come con il progredire degli anni il valor medio della probabilità di funzionamento, nei due distinti intervalli, decresce progressivamente. Questo andamento è dovuto al fenomeno dell'usura che colpisce i componenti meccanici all'interno dell'impianto.

Gran parte delle distribuzioni delle p.d.f. di guasto ottenute è molto vicino alla normale o gaussiana, tipica per gli elementi soggetti ad usura.

La simulazione conferma l'efficacia dell'operazione manutentiva di RO che riporta il livello di affidabilità dell'impianto ad un livello pari a quello iniziale.

Sono stati utilizzati dei contatori software per valutare i guasti e gli eventi critici. La Tabella 2 mette in evidenza il valore medio finale di tutti i contatori rispetto alle 1500 storie simulate.

Tabella 2: Valore medio finale dei contatori

N° contatore	Nome del contatore	Valore del contatore
1	Temperatura Massima :	62,5
2	Possibile olio in impianto :	62,5
3	Possibile acqua in impianto :	4,3
4	Impianto non in sicurezza :	0,1
5	Nulla riscontrati :	23,1
6	Filtro Aria sporco :	34,1
7	Valvola Termostatica guasta :	3,3
8	Radiatore sporco :	20,9
9	Ventola guasta :	4,2
10	Interventi globali di manutenzione:	73,0
11	Numero di Interventi di RT3 :	24,0
12	Numero di Interventi di VIS :	3,0
13	Valvola di sicurezza guasta :	5,1

Il valor medio della disponibilità dell'intero impianto GPTA nell'arco dei nove anni simulati è pari a 0.61.

5. Il GPTA con supporto diagnostico

Il sistema diagnostico

L'obiettivo dello studio è quello di sviluppare sul GPTA un sistema di diagnostica in grado di garantire, a medio-breve termine, il raggiungimento del valore di affidabilità complessiva fissato. Nella prima fase è stato possibile individuare le cause maggiori di indisponibilità grazie ad un diagramma di Pareto, riportato in Figura 8, che indica principali le cause di guasto.

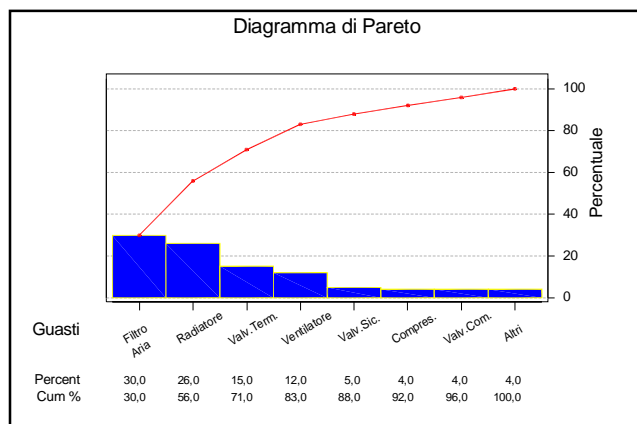


Figura 8: Diagramma di Pareto dei guasti accorsi al GPTA.

Il grafico tiene conto, oltre che del numero dei guasti per ciascun componente, anche della relativa criticità tramite un coefficiente moltiplicativo che attribuisce un peso diverso a seconda della gravità delle conseguenze.

I modi di guasto che hanno richiesto maggiore attenzione sono:

- intasamento del filtro dell'aria;
- mancata efficienza dello scambio termico nel radiatore:
 - sporczia sul radiatore;
 - rottura della ventola di raffreddamento del radiatore;
- cattivo funzionamento della valvola termostatica (con conseguente errata ripartizione delle portate dell'olio).

L'implementazione di un sistema di monitoraggio si è posta come obiettivo la conoscenza in tempo reale dell'andamento di tali fenomeni di guasto.

È stato perciò necessario misurare le grandezze del GPTA ritenute caratterizzanti. Per ciascun componente è stato scritto il sistema di equazioni che lo governa e che ne garantisce una conoscenza completa, individuando così le grandezze incognite da misurare. Per avere un rapporto completo dello stato di degrado dei componenti facenti parte del circuito interno di gestione dell'olio del GPTA, sono sufficienti otto misurazioni:

- velocità (V1) e temperatura dell'aria esterna (Te) aspirata dalla ventola del radiatore;
- pressione dell'aria (P1) nella condotta di ingresso al compressore;
- temperatura dell'aria compressa in ingresso ed uscita dal radiatore (T1, T2);
- temperatura di ingresso dell'olio nella valvola termostatica, temperatura di uscita dell'olio dal radiatore e temperatura dell'olio una volta miscelato (T3, T4, T5).

Si è così creato una diagnostica composta da tre sottosistemi:

1. un sistema di monitoraggio, con la misurazione di 8 grandezze;
2. un sistema di diagnosi, con l'elaborazione di 4 parametri;
3. un sistema di prognosi, di competenza dei tecnici manutentivi.

In Figura 9 si riporta uno schema a blocchi del sistema diagnostico in questione.

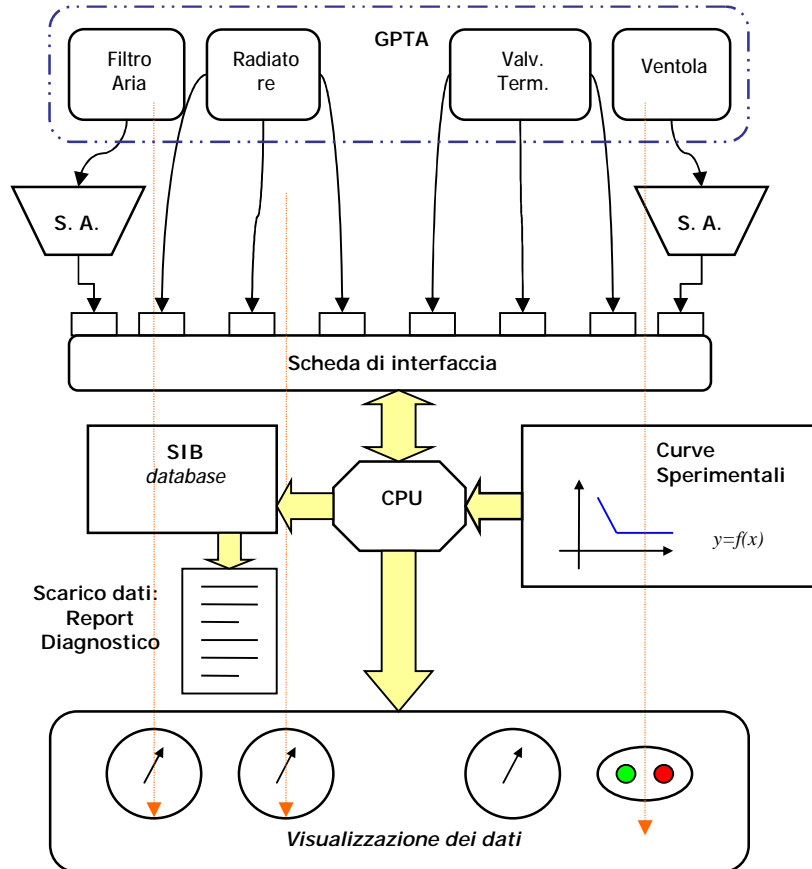


Figura 9: Schema a blocchi del sistema di monitoraggio.

Modellazione ed Implementazione

Nella modellazione del sistema su SPAR si è usata la variabile "current age of l.r.u. X" per avere l'andamento della funzione di probabilità di guasto $F(t)$ dei componenti.

In questo modo si è garantito il controllo di un parametro che, durante la simulazione, tracci istante per istante lo stato di degrado del componente.

La grandezza $F(t)$ può essere facilmente legata a tutte le altre funzioni caratteristiche in campo manutentivo (Affidabilità $R(t)$, Tasso di guasto $\lambda(t)$ e p.d.f. $f(t)$)

$$F(T) = \int_0^T f(T_i) dt \quad R(T) = \int_T^{\infty} f(T) dt = 1 - F(T) ;$$

$$I(T) * R(T) = f(T) \quad F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\int_0^t I(t) dt}$$

A questo punto, avendo a disposizione un parametro, indice dello stato di degrado del componente, l'applicazione di una logica diagnostica è relativamente semplice. Basta confrontare periodicamente il valori di tali variabili con quelli dei coefficienti diagnostici per decidere se sia o meno il caso di intervenire sull'elemento considerato. Una delle possibilità offerte dalla simulazione è l'ottimizzazione del coefficiente diagnostico. È possibile infatti valutare quale sia il valore di soglia migliore del parametro di monitoraggio per ottenere la maggior disponibilità possibile per il componente.

In Figura 10 si riporta la rappresentazione di quanto appena detto prendendo di riferimento la variabile manutentiva tasso di guasto $\lambda(t)$.

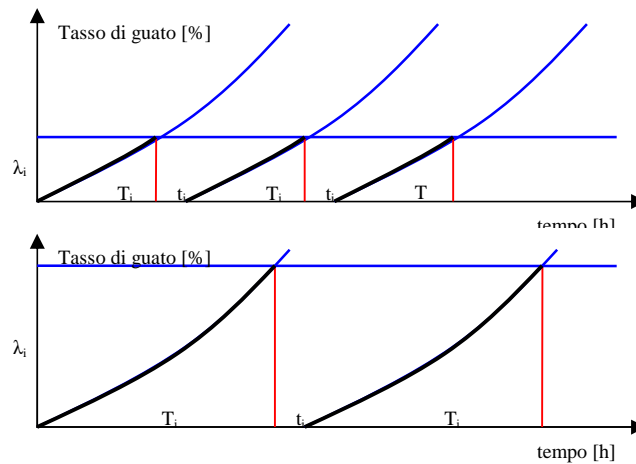


Figura 10: Andamento del tasso di guasto con differente taratura del parametro diagnostico.

Dove le grandezze λ_i , T_i , t_i stanno ad indicare rispettivamente:

- valore del tasso di guasto al raggiungimento del quale è previsto l'intervento manutentivo;
- intervalli di tempo in cui il componente funziona correttamente;
- intervalli di tempo necessario per le operazioni di manutenzione.

È evidente come, al variare del valore di questi parametri, si ottengano disponibilità complessive ben diverse.

Le prove sperimentali svolte in officina sono servite per individuare un parametro di funzionamento che fosse una misura dello stato di degrado del componente e quindi potesse essere correlato alla grandezza manutentiva caratteristica rappresentata nel codice.

Analisi delle simulazioni e confronto delle due configurazioni

L'indice di maggiore interesse è la disponibilità complessiva dell'impianto riportata in Figura 11

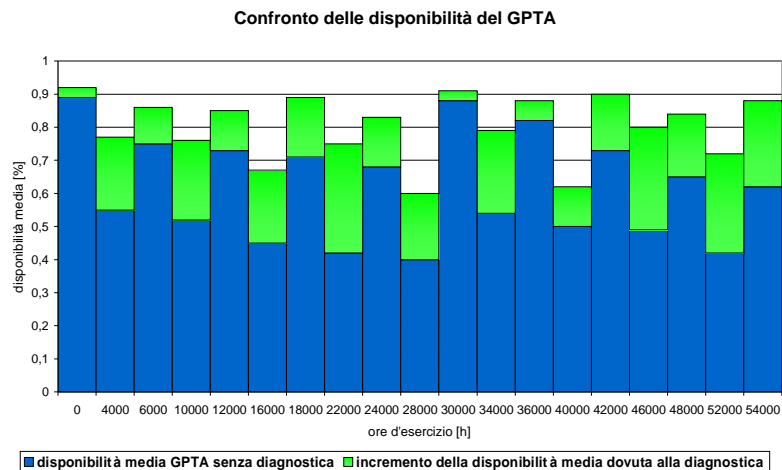
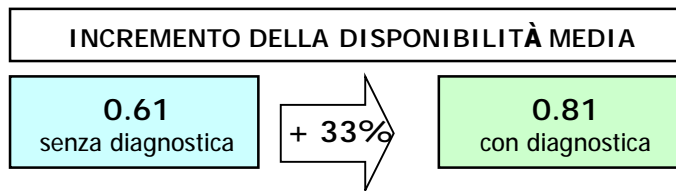


Figura 11: Confronto delle disponibilità del GPTA nelle due diverse configurazioni; in evidenza l'incremento di prestazione dovuto alla diagnostica.

Ciascun intervallo temporale è caratterizzato da una barra di istogramma: la sezione colorata in scuro è quella relativa al livello di disponibilità attuale del GPTA nel periodo di riferimento, mentre la sezione in chiaro indica l'incremento del valore dell'indice di prestazione dovuta alla diagnostica.

In particolare si è ottenuto un notevole incremento del valore medio del principale indice di prestazione manutentivo.



Un ulteriore confronto tra le due configurazioni è possibile valutando i differenti valori medi finali dei contatori inseriti all'interno delle simulazioni per tracciare l'andamento delle performance.

Tabella 3: Confronto delle variabili contatore

Monitoraggio eventi			
Evento	n. SD	n. CD	Riduzione evento critico 65%
Temp. Max	62.5	27.53	
Olio in impianto	62.5	27.53	
Acqua in impianto	4.3	4.13	
Impianto non in sicurezza	0.1	0.14	
Monitoraggio Componente			
Componente	n. SD	n. CD	n. interv. diagn.
Filtro Aria	34.1	15.3	45.4
Valvola Termostatica	3.3	1.4	2.7
Radiatore	20.9	8.4	15.2
Ventola	4.2	2.5	2.05
Valvola Sicurezza	5.1	5.3	-

La Tabella 3 mette in evidenza come l'introduzione del sistema diagnostico relativamente al filtro aria, alla valvola termostatica, al radiatore e alla ventola abbia portato ottimi benefici con una drastica riduzione degli eventi critici e dei guasti legati a questi componenti. La numerosità

di alcuni eventi diagnostici è, invece, rimasta invariata poiché legati a parametri o accadimenti su cui il sistema di monitoraggio non aveva alcuna influenza.

Facendo riferimento ai due diagrammi di Pareto dei guasti relativi ai componenti dell'impianto, si nota come il sistema di monitoraggio, provocando una diminuzione dei guasti per gli elementi critici del sistema, abbia generato una cumulata più appiattita, caratterizzata da un tasso di crescita pressoché costante. Questo a testimonianza della bontà della scelta per quanto riguarda la selezione dei componenti su cui intervenire.

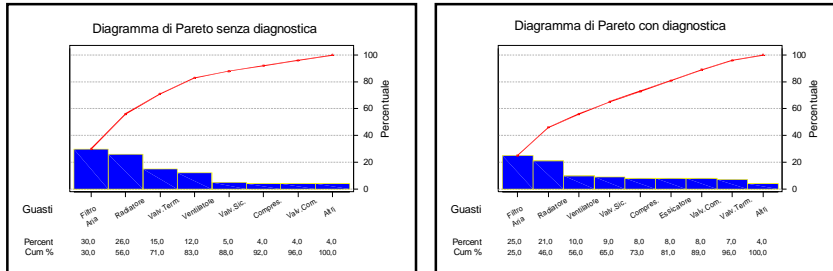


Figura 12: Diagrammi di Pareto dei guasti nelle due configurazioni.

6. Valutazione economica

È stata condotta una analisi economica relativa all'introduzione del sistema diagnostico sul treno.

L'analisi ha riguardato il valore dei costi differenziali, sia diretti che indiretti, nascenti dal confronto delle due configurazioni: GPTA nelle condizioni attuali (C_{isd}) e con supporto diagnostico (C_{icd}).

Voci di costo dirette

- Costo dei componenti del sistema di monitoraggio, voce di costo $\Delta C_1 = C_{1sd} - C_{1cd}$. Naturalmente $C_{1sd} = 0$;
- Costo delle risorse per installazione del sistema, voce di costo $\Delta C_2 = C_{2sd} - C_{2cd}$, anche in questo secondo caso $C_{2sd} = 0$. Le operazioni da svolgere sono:
 1. montaggio delle sonde, centraline e schede a bordo del treno;
 2. taratura e collaudo del sistema diagnostico per ciascun GPTA;
 3. addestramento all'uso del sistema per gli addetti alla manutenzione.

$$\Delta C_{2cd} = (200) \cdot p_u [\text{€}]$$

- Costo delle risorse per la gestione ed il mantenimento del sistema, voce di costo $\Delta C_3 = C_{3sd} - C_{3cd}$, dove $C_{3sd} = 0$: manutenzione programmata, controlli funzionali e manutenzione correttiva.

$$\Delta C_{3cd} = (0,5 \cdot 1 \cdot 2) \cdot c_m [\text{€}]$$

Voci di costo indirette

- Riduzione dei tempi di manutenzione sul GPTA, voce di costo ΔC_4 . L'introduzione del sistema diagnostico garantisce l'automatizzazione delle fasi di controllo, diagnosi e prognosi riducendo di circa 90% i tempi di ricerca del guasto;
- Riduzione degli interventi di manutenzione poiché si hanno meno guasti grazie alla nuova politica manutentiva, voce di costo ΔC_5 ;

$$\Delta C_5 = [(n_{msd} - n_{mcd}) \cdot h_{msd} \cdot c_m] [\text{€}] \text{ dove:}$$

- n_{msd} sono il numero medio delle fermate dovute ad interventi correttivi senza supporto diagnostico;
- n_{mcd} sono il numero medio delle fermate dovute ad interventi correttivi con supporto diagnostico;

- o h_{msd} è il valore medio del tempo, espresso in ore, impiegato per un intervento correttivo senza supporto diagnostico;
- o c_m è il costo medio di un'ora di manutenzione all'interno dell'impianto comprensivo della risorsa umana e delle attrezzature utilizzate.
- Aumento della disponibilità, voce di costo ΔC_6 : maggiore opportunità di articolazione dei servizi con conseguente incremento della produttività del capitale.

$$\Delta C_6 = [\Delta A_m \cdot H \cdot g \cdot e \cdot j] \text{ [€]} \text{ dove:}$$

- o ΔA_m è la differenza della disponibilità media del GPTA con e senza supporto diagnostico;
- o H sono le ore medie di esercizio effettuate dal treno in un anno;
- o g è il valore commerciale medio di un'ora di treno;
- o e rappresenta la percentuale di utilizzazione, ovvero la percentuale delle ore di disponibilità che effettivamente si riescono a sfruttare a fini commerciali;
- o j è il peso della disponibilità del GPTA rispetto a tutto il resto del sistema treno.
- Riduzione dei ritardi, voce di costo ΔC_7 . Si valuterà il risparmio che deriva da un suo abbattimento. È costituita dalle seguenti componenti:
 - o Maggiore occupazione, da parte del convoglio, della traccia treno assegnata, $c_1 = m_1 \cdot t$ con $m_1 = tg(a)$;

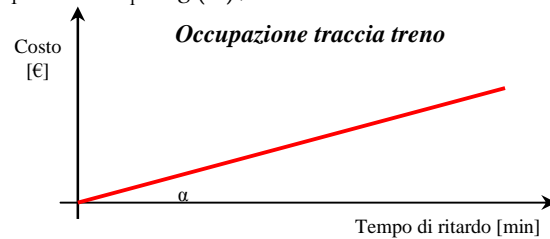


Figura 13: Voce di costo relativa all'occupazione della traccia treno.

- o Maggiore utilizzazione del personale viaggiante (detto "di macchina" e "di bordo"). È necessario mettere in campo più risorse umane del dovuto, $c_2 = m_2 \cdot t$ con $m_2 = tg(b)$;

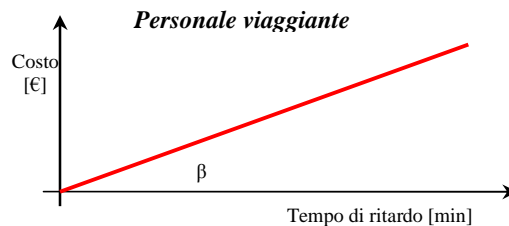


Figura 14: Voce di costo relativa all'utilizzazione del personale viaggiante.

- Minor tutela del criterio del "Price Cup" (principio stabilito dal garante governativo per cui la possibilità di aumentare i prezzi dei biglietti è legata al raggiungimento di standard di qualità e prestazioni fortemente vincolati ai ritardi);
- Miglioramento della proiezione del *brand*, costi di immagine;
- Costi dei bonus da restituire ai viaggiatori per non aver garantito il servizio stabilito nel contratto;

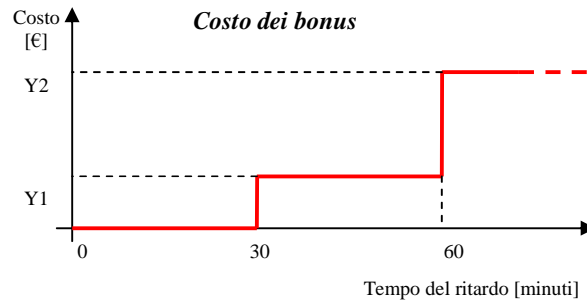


Figura 15: Curva dei costi dovuti ai ritardi

Dove:

- Y1 è il valore che l'azienda assegna al bonus per un ritardo, compreso tra i 30 ed i 60 minuti;
- Y2 è il valore che l'azienda assegna al bonus per un ritardo, di oltre 60 minuti.

La funzione costi complessivi $\Delta C7$ è riportata di seguito.

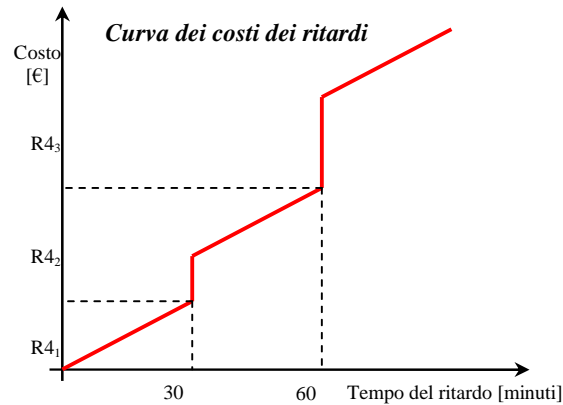


Figura 16: Curva dei costi relativi ai ritardi.

La curva è caratterizzata da tre intervalli:

- $\Delta C7_1 = (m_1 + m_2) \cdot t$;
- $\Delta C7_2 = (m_1 + m_2) \cdot t + Y1$;
- $\Delta C7_3 = (m_1 + m_2) \cdot t + Y2$.

Il ricavo dovuto alla riduzione dei ritardi è valutabile tramite l'espressione: $\Delta C7 = \Delta N_{<30} \cdot \Delta C7_1 + \Delta N_{30-60} \cdot \Delta C7_2 + \Delta N_{>60} \cdot \Delta C7_3$

dove:

- $\Delta N_{<30}$ è la differenza media annuale del numero di ritardi, inferiori a 30 minuti, dovuti ad un guasto al GPTA;
- ΔN_{30-60} è la differenza media annuale del numero di ritardi, compreso tra i 30 ed i 60 minuti, dovuti ad un guasto al GPTA;
- $\Delta N_{>60}$ è la differenza media annuale del numero di ritardi, superiori a 60 minuti, dovuti ad un guasto al GPTA.

In Tabella 4 si riporta in forma parametrica il valore finale per tutti le voci sopraelencate ed il risparmio in termini di ΔC totale ottenibile.

Tabella 4: Analisi Costi-Ricavi per l'implementazione del sistema diagnostico

Costi	
Voce	Valore [€]
ΔC_1	-750
ΔC_2	$-200 \cdot p_u$
ΔC_3	$-2 \cdot c_m$
ΔC_4	-
ΔC_5	$3,2 \cdot 23 \cdot c_m$
ΔC_6	$40 \cdot g$
ΔC_7	$0,037 \cdot (m_1 + m_2) \cdot t +$ $+ 0,023 \cdot [(m_1 + m_2) \cdot t + Y1] +$ $+ 0,015 \cdot [(m_1 + m_2) \cdot t + Y2]$
ΔC_{TOT}	$\Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3 + \Delta C_4 + \Delta C_5 + \Delta C_6 + \Delta C_7$

Affinché ci sia reale vantaggio nell'implementazione del sistema diagnostico proposto, è necessario che il valore finale del ΔC_{TOT} sia positivo. Tale grandezza rappresenta il risparmio che si ottiene con l'introduzione della soluzione tecnica avanzata.

I valori risultanti dall'applicazione in studio, derivanti dalla conoscenza dei parametri indicati in Tabella 4 e protetti da riserbo industriale, dimostrano la bontà dell'applicazione della diagnostica

7. Conclusioni

I sistemi produttivi si muovono oggi nel contesto di un mercato altamente competitivo all'interno del quale le esigenze prestazionali sono sempre più restrittive e vincolanti. Al centro delle nuove istanze di prestazione si trovano spesso i processi manutentivi dei macchinari e degli impianti industriali, anello debole e a volte trascurato del ciclo di vita di un sistema produttivo.

In quest'ottica si sono rivelate in tutti i loro limiti le metodologie classiche di approccio alla manutenzione che non riescono a garantire gli standard richiesti. La nascita di tecnologie molto complesse, supportate spesso dall'elettronica, infatti, non permette più un riscontro visivo dell'avaria, evidenziando la necessità di abbandonare analisi di tipo probabilistico per passare a sistemi di ricerca deterministici.

L'analisi di questo case-study dimostra come i sistemi diagnostici siano una naturale risposta a queste esigenze. La loro implementazione è sinonimo di evoluzione tecnica nell'approccio manutentivo poiché garantiscono l'introduzione di un potente strumento di azione.

A fronte di investimenti relativamente limitati, per lo più a livello progettuale e riguardanti l'analisi e lo studio del sistema, si riescono ad ottenere notevoli miglioramenti riguardanti la gestione di un impianto.

I primi beneficiari dell'impiego della diagnostica sono proprio i processi manutentivi, che diventano più efficienti ed efficaci. In secondo luogo aumentano le prestazioni affidabilistiche dirette ed indirette, con un aumento della disponibilità e una riduzione dei costi. Come ultimo vantaggio i risultati costituiscono un feed-back per la riprogettazione del sistema.

Bibliografia

1. S. Bagnoli "Sviluppo di tecniche per la diagnostica dei sistemi meccanici", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Firenze, 1986.
2. G. Ciatti, "Metodiche di monitoraggio e diagnostica in impianti con turbine a gas", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Firenze, 1989.
3. R. Benvenuti, "Elaborazione di uno strumento software per la diagnostica remota", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Firenze, 2002.
4. L. Furlanetto "Manuale di manutenzione degli impianti industriali e servizi", Franco Angeli Milano, 1998.
5. Lindley R. Higgins "Maintenance Engineering Handbook" fifth edition, Mc Graw-Hill, 1995
6. H. Gray "Handbook for Process Plant Project Engineers", Mc Graw-Hill, 1989.
7. A. Baldin, "Manuale della manutenzione degli impianti industriali", F. Angeli, Milano 1978.
8. M. Masserdotti, G. Zafferani "La diagnostica manutentiva on-line del macchinario elettrico come investimento strategico" Manutenzione, tecnica e management, Anno 10 Novembre 2003, pag. 13-25.
9. G. Malagola "Misurare per Mantenere" Manutenzione, tecnica e management, Anno 10 Novembre 2003, pag. 25-31.
10. Y. A. Cengel "Termodinamica e trasmissione del calore", McGraw-Hill, 1998.
11. Bonacina C., Cavallini A., Mattarolo L., "Trasmissione del calore", CLEUP Padova 1992..
12. Kreith F., "Principi di trasmissione del calore", Liguori, Napoli 1975.
13. Turco F., "Principi generali di progettazione degli impianti industriali", CittaStudi, Milano 1993.
14. Pareschi A. , "Impianti industriali : criteri di scelta, progettazione e realizzazione", Società Editrice Esculapio, Bologna 1996.
15. Bandelloni M., Rinaldi R., "Studio di fattibilità degli impianti industriali : l'analisi economico-finanziaria", Pitagora, Bologna 1998.