

CRITERIO DI OTTIMIZZAZIONE DELLA DOTAZIONE PRIMARIA RICAMBI NELL'INDUSTRIA CANTIERISTICA

M. Lando	Dipartimento di Progettazione e Gestione Industriale Università degli studi di Napoli "Federico II"
M. E. Nenni	Dipartimento di Progettazione e Gestione Industriale Università degli studi di Napoli "Federico II"
M. M. Schiraldi	Dipartimento di Ingegneria Meccanica Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

Sommario

Ai fini delle specifiche scelte di primo equipaggiamento si prende in considerazione il problema dell'assortimento ottimale della scorta ricambi da costituire a corredo base di una unità *tanker*, opportunamente caratterizzata attraverso specifici parametri dimensionali e funzionali¹.

L'attenzione riservata al problema in esame è motivata dalla peculiarità intrinseca al prodotto dell'industria cantieristica, in vista delle condizioni cui è sottoposto in esercizio e delle prestazioni cui è chiamato nel corso della sua vita utile. In tal senso si riscontra l'improprietà di affrontare il problema ricorrendo ad approcci che possono riuscire validi in altro ambito applicativo.

Il criterio in questa sede prospettato, manifestamente orientato a soddisfare fondamentali requisiti di sicurezza e affidabilità, al tempo stesso tiene conto dell'imprescindibile limite di budget destinato alla scorta ricambi, nonché della frequenza con cui vengono effettuati gli interventi manutentivi per il sistema in esame. Utilizzando un opportuno indice di criticità dei ricambi, lo studio è stato sviluppato in modo del tutto originale con l'impiego di efficaci strumenti di ricerca operativa. La validità dei risultati conseguiti trae riscontro dall'interesse al riguardo manifestato da una primaria industria cantieristica, che con gli autori è coinvolta in un progetto di ricerca di respiro pluriennale, finalizzato ad accrescere l'efficienza dei servizi manutenzione offerti alle compagnie di navigazione.

1. Premessa

La gestione delle parti di ricambio nei sistemi produttivi *capital intensive* riveste una importanza di comprensibile rilievo dal momento che le attese di disponibilità di impianto sono per necessità commisurate alla dimensione degli investimenti in corrispondenza richiesti.

Per i sistemi in questione si tratta infatti di gestire ricambi la cui alta criticità si associa d'altra parte ad oneri di immobilizzo che non consentono di fronteggiare i rischi di mancanza attraverso la costituzione di scorte di dimensione non adeguatamente ponderata. In tal senso, pur riscontrando la rilevanza del costo di fermata derivante dalla indisponibilità di talune *parti di rispetto*, si resta alquanto perplessi di fronte al risultato emerso da una recente indagine condotta dagli autori, secondo cui la dotazione ricambi normalmente allestita su un sistema complesso qual è una unità *tanker* raggiunge un indice di rotazione annuale di magazzino pari a 0.2. Un valore tanto esiguo risulta ancora più sorprendente alla luce delle specifiche in materia da parte degli appositi organi di controllo, secondo cui la nave è tenuta ad effettuare un completo rimessaggio (*intervento di bacino*) almeno una volta ogni due anni e mezzo.

La palese incoerenza è frutto non della scarsa attenzione che viene riservata al problema (l'immobilizzo richiesto per la dotazione ricambi supera sovente i 250 K€ per unità *tanker*), bensì della carenza di metodologie davvero appropriate per affrontarlo.

In letteratura, in verità, abbondano gli approcci al problema della gestione delle parti di ricambio. Le trattazioni a nostro parere più valide sono opera di Cohen [1], il quale ha preferito per lo più approcci basati sullo studio del livello di servizio [2]; sulla stessa scia, altri autori hanno avuto poi il merito di approfondire l'importante concetto di riparabilità delle parti [3, 4]. In differenti ricerche il focus è invece concentrato sull'analisi delle caratteristiche di macchine ed attrezzature, oggetto di attività manutentive [5]; o in alternativa sulle caratteristiche delle parti di ricambio stesse [6]. La maggior parte dei lavori sono però studi empirici sul trade-off ottimale tra costi e disponibilità [7], oppure si richiamano a condizioni troppo particolari per poter ricoprire una casistica sufficientemente ampia. In definitiva i principali limiti riscontrati in materia nella letteratura competente riguardano soprattutto l'ottica parziale che in molti casi è stata assunta per affrontare un problema peraltro caratterizzato da una spiccata varietà di fattori di influenza.

Il criterio in questa sede prospettato, ispirato alla criticità del problema di allestimento delle dotazioni di bordo per unità navali, è inteso a dimensionare ed assortire in maniera ottimale la scorta ricambi.

L'algoritmo euristico di risoluzione è stato appositamente sviluppato per accordare i requisiti di disponibilità invocati per il sistema con i vincoli imposti dallo specifico budget di spesa. Aspetto peculiare del lavoro è

¹ Il presente lavoro si inquadra in un progetto di ricerca svolto presso il DPGI-Università di Napoli "Federico II" in collegamento con Fincantieri Cantieri Navali Italiani SpA

l'approccio adottato per trattare il problema del dimensionamento della scorta ricambi dei cosiddetti *componenti comuni*: per il presente lavoro gli autori sono stati per altro indotti ad approfondire i contributi già disponibili in letteratura tecnica in materia di gestione ricambi; il testo non manca pertanto di richiamare gli studi che a giudizio degli autori possono ritenersi di maggiore rilievo. Per ognuno di essi, oltre ai riferimenti essenziali, vengono anche messi in evidenza i limiti principali che giustificano lo sforzo migliorativo.

2. Procedura per ottimizzare assortimento e dimensionamento della scorta ricambi

La procedura proposta muove a partire dall'identificazione delle sub-unità critiche all'interno del sistema in esame. A questo scopo si procede con la scomposizione dell'unità tanker in base al suo schema strutturale ovvero attraverso la ESWBS (Extended Ship Work Breakdown Structure); il criterio studiato prevede la distinzione degli elementi costituenti il sistema in tre livelli distinti:

- impianti;
- sub-unità, all'interno di ciascun impianto;
- componenti, all'interno di ciascun sub-unità.

A valle della scomposizione del sistema, si potrà immediatamente riscontrare che uno stesso tipo di componente sarà presente su diverse sub-unità e su diversi impianti. Le parti appartenenti a tale tipologia sono dette *parti comuni* e la loro presenza costituisce una significativa complicazione del problema del calcolo della scorta ottimale di ricambi.

2.1 Gestione dei ricambi delle parti comuni

Relativamente alla gestione di sub-unità con parti – e quindi ricambi – comuni, la letteratura scientifica in ambito *operations management* è ricca di contributi: alcuni Autori [8, 9, 10, 11] si sono concentrati nell'analisi delle opportunità di scelta di sub-unità con parti comuni e delle relative implicazioni sui modelli di gestione delle attrezzature industriali; l'aspetto economico derivante dal principio del *risk pooling* e la riduzione dell'inventario viene invece affrontato in [12, 13] e successivamente in [14]; uno studio del compromesso tra i maggiori costi unitari dei ricambi comuni ed i minori livelli di scorta è stato condotto in [15]; più recentemente, la scelta di comunanza d'uso come precauzione operativa è stata descritta in [16].

Nei lavori fin qui citati, tuttavia, la risoluzione analitica del problema del dimensionamento delle scorte di ricambi comuni non viene affrontata. Nel presente studio, allo scopo di determinare il dimensionamento e l'assortimento ottimale della scorta di parti di ricambio comuni, è stata ideata una opportuna funzione che descrive la probabilità di esaurire la scorta di x ricambi condivisi tra un numero n di componenti, tutte ugualmente affidabili. Detta funzione è stata ottenuta apportando opportune modifiche alla funzione che descrive l'affidabilità dei sistemi con *ridondanza parziale* [17]. Infatti, riferendoci ad n componenti di un unico tipo j presenti all'interno di una sub-unità – assumendo come implicito l'indice j per ogni variabile al fine di semplificare la notazione – se si indica con

R = l' affidabilità del singolo componente calcolata al termine del periodo di analisi;

n = il numero di componenti attivi nel sistema;

x = il numero di parti di ricambio del componente disponibili in scorta,

si può allora scrivere la funzione $R_t(x)$ che descriva l'affidabilità di un sistema complessivamente composto da n componenti e x ricambi, ovvero

$$R_t(x) = \begin{cases} \sum_{h=1}^{x+1} \binom{x+1}{h} \cdot R^h \cdot (1-R)^{x+1-h} & \text{se } x \geq n \\ \sum_{h=n-x}^n \binom{n}{h} \cdot R^h \cdot (1-R)^{n-h} & \text{se } x < n \end{cases} \quad (1)$$

La funzione assume diversa espressione a seconda del caso in cui le dotazioni di ricambi eccedano o meno il numero di componenti attivi nel sistema. Nel primo caso, in cui $x \geq n$, la funzione fornisce in generale una sottostima dell'affidabilità, di entità proporzionale al rapporto x/n poiché si considera che gli eventi di guasto interessino l'intera popolazione di componenti, compresi quelli presenti nel magazzino ricambi che solitamente, non essendo attivi, non sono soggetti a malfunzionamenti. La funzione fornisce invece il valore corretto nei casi in cui l'evento di guasto non sia correlato all'usura del componente bensì solamente ad un deperimento temporale.

Si noti che a questo punto la $R_t(x)$ può essere evidentemente interpretata come la funzione che descrive la probabilità di non esaurire una scorta di x ricambi: infatti, prendendo ad esempio l'espressione di $R_t(x)$ nel caso $x < n$, la probabilità di guasto di un sistema di n componenti in cui almeno $n-x$ devono essere funzionanti

risulta uguale alla probabilità di esaurire la scorta di x parti di ricambio in un sistema di n componenti in cui tutti devono essere funzionanti.

Ora, è possibile descrivere la funzione $B(x)$ che restituisca il tempo in cui il componente j rimane indisponibile, nel momento in cui si verifica un funzionamento irregolare; tale funzione deve quindi tenere conto sia dei tempi medi di attesa per la sostituzione del componente sia dei tempi medi per l'eventuale approvvigionamento della parte di ricambio, qualora questa non sia presente in magazzino; omettendo anche qui l'indice j in ogni variabile per semplificare la notazione ed indicando con

$MTTR$ = il tempo medio impiegato per un intervento di sostituzione del componente, essendo il relativo ricambio disponibile nel magazzino;

$MTWS$ = il tempo medio impiegato per l'approvvigionamento del ricambio del componente quando questo non è disponibile nel magazzino,

si ha dunque

$$B(x) = MTTR \cdot R(x) + (MTTR + MTWS) \cdot [1-R(x)] \quad (2)$$

Attraverso tale funzione è quindi possibile calcolare la disponibilità del componente soggetto al funzionamento irregolare.

2.2 Rispetto del vincolo di disponibilità minima del sistema

È pratica comune, in letteratura, determinare la politica di gestione delle parti di ricambio in base ad un vincolo sul livello di servizio; si vedano ad esempio [7, 18]. In questo lavoro il livello di servizio del sistema viene tradotto nella disponibilità operativa ovvero nella percentuale del periodo di analisi in cui il sistema o sottosistema è in condizione di operare correttamente. Se dunque indichiamo con

D_k = la disponibilità operativa minima desiderata per l'impianto k ; $D_k < 1$;

n_j^i = il numero di componenti j presenti nella sub-unità i ;

N^i = il numero di diverse tipologie di componenti presenti nella sub-unità i ;

M_k = il numero di sub-unità presenti nell'impianto k ;

c_j^i = la probabilità che il funzionamento irregolare del componente j influisca sulla funzionalità del sub-unità i a cui appartiene; $c_j^i < 1$;

d_i^k = la probabilità che il funzionamento irregolare della sub-unità i influisca sulla funzionalità dell'impianto k a cui appartiene; $d_i^k < 1$;

$B(x_j)$ = il tempo in cui il componente j è indisponibile nel momento in cui si verifica un funzionamento irregolare, in base alla (2);

$MTBF_j$ = il tempo medio intercorrente tra due malfunzionamenti del componente j , misurato all'interno del periodo di analisi,

si può dunque ottenere un vincolo relativo alla disponibilità dell'impianto k :

$$\sum_{i=1}^{M_k} a_i^k \cdot \left(\sum_{j=1}^{N^i} \frac{n_j^i}{MTBF_j} \cdot c_j^i \cdot B(x_j) \right) \leq 1 - D_k \quad (3)$$

tale vincolo vale $\forall k$ ovvero per ogni impianto all'interno del sistema.

La determinazione dei parametri c_j^i e d_i^k può effettuarsi attraverso un'analisi statistica dei dati storici relativi al funzionamento irregolare dell'impianto, oppure attraverso una analisi MAGEC (Metodologia Analisi Guasti e Criticità) o ancora con una procedura che, a partire da uno studio delle avarie nei vari sub-unità, individui le cause tra le rotture di ciascun componente e prosegua quindi con un'analisi degli *alberi di guasto* (FTA) per risalire dal funzionamento irregolare della sub-unità a quello dell'impianto.

2.3 Vincolo del rispetto del massimo costo

Come accennato nel sunto iniziale, nel presente lavoro viene tenuto in conto il budget riservato dal management alla soluzione del problema delle parti di ricambio: specificamente, nel criterio proposto si è pensato di definire un vincolo in cui siano presenti due voci di costo, una relativa ai costi connessi con l'*indisponibilità* del sistema – stimata attraverso la (3) – e l'altra relativa all'investimento complessivo in ricambi. Introducendo pertanto le seguenti notazioni in aggiunta a quelle già descritte in precedenza, ovvero

CS_k = il costo relativo alla indisponibilità dell'impianto k per tutto il periodo di analisi;

C_j = il costo unitario di mantenimento a scorta del ricambio del componente j ;
 I = il numero di impianti presenti nel sistema,

si ha dunque che i costi relativi all'indisponibilità del sistema possono essere espressi attraverso la funzione

$$Cind(x_j) = \sum_{k=1}^I Cs_k \cdot \sum_{i=1}^{M_k} a_i^k \cdot \left(\sum_{j=1}^N \frac{n_j}{MTBF_j} \cdot c_j^i \cdot B(x_j) \right) \quad (4)$$

mentre i costi relativi al mantenimento a scorta dei ricambi possono essere espressi attraverso la funzione

$$Cm(x_j) = \sum_{j=1}^n C_j \cdot x_j \quad (5)$$

Per tal via si perviene facilmente alla formulazione di vincolo che descriva il costo massimo ammissibile. Indicando infatti con

B_{max} = la spesa massima ammissibile,

si ha

$$Cm + Cind \leq B_{max} \quad (6)$$

In tale formulazione non sono stati presi in considerazione i costi relativi all'approvvigionamento dei ricambi poiché tali costi dipendono strettamente dalle politiche instaurate con i fornitori e, nello specifico caso di gestione di flotte navali, dalle politiche di coordinazione delle varie unità.

2.4. Definizione della criticità di sub-unità e componenti

Occorre adesso effettuare una valutazione della criticità di ciascun sub-unità e componente in modo tale da poter distinguere, attraverso opportune priorità, le parti di ricambio in stoccaggio nei magazzini di bordo. La necessità di distinguere le attrezzature per criticità risulta evidente, considerato che a bordo dell'unità tanker, così come sempre accade per i sistemi complessi, ciascuna sub-unità ricopre un diverso ruolo e gli effetti del suo eventuale funzionamento irregolare possono essere più o meno gravi. Pochi sono i modelli di gestione riscontrabili in letteratura che contemplano il concetto di criticità come criterio strutturato di analisi dei ricambi. Ricordiamo solamente l'AHP (Analytical Hierarchy Process, si vedano [6, 19])

Si propone qui di effettuare tale valutazione attraverso un metodo quali-quantitativo, in modo tale da poter confrontare un parametro identificativo della criticità di ciascuna attrezzatura con una soglia prefissata. In questo modo potranno altresì essere identificate le apparecchiature su cui concentrare l'analisi, lasciando i tradizionali e più elementari criteri di gestione ai ricambi di quelle sub-unità la cui criticità non supera detta soglia.

Tale parametro risulterà dalla valutazione dei differenti aspetti, qui di seguito richiamati, che possono caratterizzare gli effetti di un funzionamento irregolare di una sub-unità:

- l'influenza del funzionamento irregolare sull'efficienza dell'impianto di cui la sub-unità fa parte;
- l'influenza del funzionamento irregolare sull'efficienza del sistema nel suo complesso e sulle sue prestazioni;
- l'influenza del funzionamento irregolare sulla sicurezza del sistema e delle persone coinvolte nel suo esercizio;

Per giungere alla formulazione di un parametro numerico indicativo della criticità delle sub-unità è stata formulata la griglia di pesi descritta in Tab. 1 attraverso cui sia possibile giungere ad una valutazione quantitativa degli anzidetti effetti. Nella tabella, sempre con riferimento alla sub-unità i -ma, si indica con

I_i = l'indice relativo alle ricadute del funzionamento irregolare sull'efficienza dell'impianto;
 S_i = l'indice relativo alle ricadute del funzionamento irregolare sulla sicurezza;
 V_i = l'indice relativo alle ricadute del funzionamento irregolare sull'efficienza del sistema.

TAB. 1

Valori dei pesi relativi al funzionamento irregolare di una sub-unità

Effetto sull'impianto	I_i	Effetto sul sistema	V_i	Effetto sulla sicurezza	S_i
Nessuno	1	Nessuno	1	Nessuno	1
Uso componenti stand-by	2	Riduzione funz. Accessorie	5	<i>PSC related</i>	75
Funzionamento ridotto	3	Riduzione performance	25	Assenza di manovrabilita'	500
Fermata dell'impianto	4	Fermata del sistema	125	Inquinamento	600
				Danni a persone	750

Nel dettaglio, l'effetto di un funzionamento irregolare della sub-unità i -ma sull'efficienza dell'impianto in cui esso è inserita viene classificato alla luce delle seguenti condizioni:

- con l'indicazione "nessun effetto" si rappresenta il caso in cui l'avaria della sub-unità non comporta sostanzialmente alcuna conseguenza sull'impianto a cui appartiene, il cui funzionamento non risulta quindi compromesso dal guasto;
- con l'indicazione "uso del componente in stand-by" si rappresenta il caso in cui il funzionamento irregolare compromette la sub-unità in maniera tale da avere una qualche influenza sull'impianto, ma la prevista attivazione di un'altra sub-unità in *stand-by* evita il propagarsi dell'effetto; nessuna conseguenza si rileverà quindi a livello di efficienza dell'impianto ma il sistema sarà da quel momento in poi più vulnerabile; chiaramente non tutte le sub-unità sono *protette* da componenti in stand-by quindi non sempre è possibile ricondurre un funzionamento irregolare a questo caso;
- con l'indicazione "funzionamento ridotto" si rappresenta il caso in cui il funzionamento irregolare della sub-unità induce una riduzione delle prestazioni dell'impianto;
- con "fermata impianto" chiaramente si rappresenta il caso in cui l'effetto si propaga all'impianto fino a costringerlo alla fermata, ciò che incide sulla disponibilità dell'impianto stesso.

L'effetto di un funzionamento irregolare della sub-unità i -ma sull'efficienza del sistema nel suo complesso viene invece classificato alla luce delle seguenti condizioni:

- con "nessun effetto" si rappresenta il caso in cui il funzionamento irregolare della sub-unità non comporta sostanzialmente alcuna conseguenza sul sistema nel suo complesso; l'efficienza dell'unità tanker non è quindi compromessa;
- con "riduzione funzionalità accessorie" si rappresenta il caso in cui il funzionamento irregolare influisce su funzionalità non primarie del sistema nel suo complesso e quindi non incide sulla possibilità di completare la missione con le prestazioni prestabilite;
- con "riduzione prestazioni" si rappresenta il caso in cui il funzionamento irregolare induce una riduzione delle prestazioni con cui il sistema deve completare la missione;
- con "fermata del sistema" chiaramente si rappresenta il caso in cui l'effetto si propaga al sistema fino a costringerlo alla fermata, ciò che impedisce il completamento della missione.

Infine, l'effetto di un funzionamento irregolare della sub-unità i -ma sugli aspetti connessi alla sicurezza viene classificato alla luce delle seguenti condizioni:

- con "nessun effetto" si rappresenta il caso in cui il funzionamento irregolare della sub-unità non comporta sostanzialmente alcuna conseguenza sulla sicurezza del sistema;
- con "*PSC (Port State Control) related*" si rappresenta il caso specifico in cui il funzionamento irregolare dell'unità tanker deve essere necessariamente segnalato alle autorità portuali in caso di transito nelle acque territoriali. Gli eventi che rientrano in tale casistica rivestono una certa criticità poiché solitamente costringono alla immediata riparazione del guasto per poter riprendere la navigazione;
- con "assenza di manovrabilità" si rappresenta il caso specifico in cui il funzionamento irregolare riduce la capacità di manovra dell'unità tanker, rendendone quindi difficoltosa – e spesso pericolosa – la conduzione;
- con "inquinamento" si rappresenta il caso in cui il funzionamento irregolare provoca un danno ambientale, ad esempio la mancata ritenzione di liquidi o gas inquinanti;
- infine, con l'indicazione "danni a persone" chiaramente si fa riferimento al caso in cui il funzionamento irregolare è atto a provocare lesioni di diversa natura e gravità ai conduttori ed agli utilizzatori del sistema; tale evenienza è evidentemente considerata la più catastrofica.

Nella fattispecie, i valori assegnati sono stati individuati attraverso apposita indagine effettuata a nostra cura presso il personale di bordo dell'unità tanker nonché presso quello della società armatoriale, che ha poi ampiamente condiviso i risultati con l'industria cantieristica. Nella determinazione dei pesi inoltre si è tenuto conto, come indicazione di carattere generale, che le ripercussioni a livello di impianto, seppur importanti, rappresentano comunque conseguenze locali e circoscritte, mentre quelle a livello di sistema influenzano direttamente la possibilità di raggiungere l'obiettivo dell'azienda armatoriale cui fa capo l'unità tanker in questione. Inoltre il mantenimento delle condizioni di sicurezza del sistema ha priorità su entrambi i precedenti aspetti.

Distinguendo quindi n sub-unità all'interno del sistema-nave, a ciascuno di essi verrà associato un parametro di criticità m_i pari a:

$$m_i = S_i \cdot V_i \cdot I_i \quad (7)$$

Una sub-unità i può dunque dirsi *critica* quando il valore m_i supera una certa soglia L che deve essere determinata in base alla strategia dell'azienda interessata. Nell'applicazione nel seguito illustrata per detta la soglia è stato stabilito il valore $L = 20$, interpretando le esigenze dell'azienda armatoriale, in base alla importanza che generalmente si dà nella pratica a condizioni quali:

- pericolo di danni a persone;
- pericolo di inquinamento;
- pericolo di assenza di manovrabilità dell'unità tanker;
- pericolo di fermo nave;
- pericolo di funzionamento irregolare *PSC related*;
- pericolo di riduzione delle performance;
- pericolo di riduzione servizio causata dal fermo di un impianto.

Per le sub-unità con parametro di criticità $m_i < L$ potranno comunque essere ottimizzati i costi di gestione applicando i modelli tradizionali di gestione delle relative parti di ricambio.

Un analogo metodo quali-quantitativo è stato usato in [20] con applicazione alla valutazione del rischio connesso all'uso delle macchine operatrici, ed in [7, 18, 19] con applicazione alla valutazione della criticità dei ricambi. Chiaramente l'esito della delicata operazione di scelta dei pesi è fortemente dipendente dalla politica aziendale e dal criterio di gestione del sistema stesso.

A questo punto il calcolo della criticità dei componenti può essere quindi facilmente effettuato. Indicando con

D_j = la disponibilità teorica del componente j

e scrivendo

$$T_j = 1 - D_j$$

si ottiene

$$k_j = m_i \cdot p_i^j \cdot T_j \quad (8)$$

Una volta definito un parametro di criticità per sub-unità e componenti, impostati i vincoli e risolto il problema del calcolo della scorta di parti di ricambio comuni a più sub-unità si può passare alla determinazione della soluzione ottima.

2.5. Algoritmo utilizzato per la ricerca della soluzione ottimale

Nel lavoro è stato sviluppato un algoritmo euristico che risolve il problema dell'assortimento e dimensionamento della scorta di parti di ricambi in un tempo $O(n)$, ovvero di complessità lineare nel numero delle tipologie di parti di ricambio. Omettendo la completa ed esaustiva descrizione dell'algoritmo, che di per sé non costituisce un elemento di nota particolarmente significativo all'interno del lavoro, ci si limita qui a descrivere brevemente alcuni particolari salienti: specificamente, l'algoritmo – partendo da una situazione di inizializzazione in cui le variabili decisionali sono poste uguali a zero (assenza di scorte nel magazzino ricambi) – aggiunge uno per volta le parti di ricambio alla soluzione e valuta se vengono rispettati i vincoli del modello; l'ordine con cui vengono valutati e scelti i componenti da inserire nella scorta dei magazzini ricambi è però fondamentale: per ogni tipologia di componente presente nel sistema, dato il numero x_j di componenti di quella tipologia già presenti nella soluzione, viene valutato il parametro:

$$W_j = k_j \cdot \left(\frac{R(x_j + 1)}{R(x_j)} \right) \cdot \left(\frac{Cind(x_j + 1) - Cind(x_j)}{C_j} \right) \quad (9)$$

La (9) è utile per rappresentare il rapporto costo/convenienza derivante dallo stoccaggio della parte di ricambio incrementale; oltre al parametro di criticità del componente k_j in esso compare l'abbattimento marginale della probabilità di esaurimento dei ricambi procurato dallo stoccaggio di un ulteriore componente in aggiunta agli x_j già presenti, e compare anche il risparmio in termini di costo di indisponibilità del sistema rapportato al costo di stoccaggio della parte di ricambio. Una volta scelta la tipologia di componenti j con il più alto valore del parametro W_j la relativa scorta ricambi e quindi la variabile x_j viene incrementata di una unità, sempre che ciò non sia impedito dal vincolo di budget. Man mano che, aggiungendo ricambi alla scorta, ciascun impianto raggiunge la disponibilità minima desiderata – specificata nel relativo vincolo – le parti di ricambio relative unicamente a quel dato impianto vengono escluse dalle analisi successive, e l'algoritmo si concentra su impianti via via meno critici.

3. Validazione del criterio proposto – considerazioni finali

Il criterio descritto è stato da noi applicato con esiti particolarmente soddisfacenti per calcolare l'assortimento ed il dimensionamento ottimale della scorta ricambi per una delle sub-unità più critiche (in aggiunta all'impianto di propulsione) per un'unità navale tipo *tanker*. Si tratta in particolare della pompa per carico/scarico liquidi dalle cisterne, e specificamente la pompa "FRAMO CARGO PUMP HD-SD-200". Tale apparecchiatura è presente in otto esemplari all'interno dell'unità tanker considerata, lavora sotto elevati livelli di pressione all'interno delle cisterne e un suo eventuale funzionamento irregolare può impedire l'utilizzo della relativa cisterna, evenienza grave nel caso questa sia vuota (diminuzione della capacità della nave di 1/8), ma più grave nel caso essa sia piena (impossibilità di accedere al carico e necessità di allestire un sistema di pompaggio esterno). Nella peggiore delle ipotesi infine, un funzionamento irregolare della pompa può portare all'inquinamento del carico.

Solitamente, il magazzino ricambi dell'unità tanker in considerazione raggiunge un valore di immobilizzo di oltre 250 K€; a fronte di ciò conviene notare che mediamente, in un anno di attività, vengono utilizzati ricambi per un valore totale di circa 50 K€. In epoca antecedente all'applicazione del criterio proposto, a bordo dell'unità tanker analizzata erano stoccate parti di ricambio per tutte le FRAMO CARGO PUMP HD-SD-200 per un complessivo valore di immobilizzo di 8,2 k€, nella configurazione descritta in Tab. 2.

TAB. 2

SUB-UNITÀ		CARGO PUMP HD SD 200			
S.P. Critiche		Descrizione	x_j	Costo(€/unit.)	Costo Tot. (€)
N°	ID #				
1	96008	BALL BEARING	0	217,60	0,00
2	180125	O-RING	1	8,26	8,26
3	179952	FRAMO SEAL ELEMENT	1	74,10	74,10
4	167072	RING WEAR	6	213,91	1.283,46
5	161216	FRAMO SEAL ELEMENT	2	221,03	442,05
6	8110	O-RING	2	7,24	14,49
7	161224	FRAMO SEAL ELEMENT	1	523,40	523,40
8	161240	FRAMO SEAL ELEMENT	1	643,38	643,38
9	161232	FRAMO SEAL ELEMENT	1	496,07	496,07
10	9753	O-RING	2	15,51	31,01
11	34090	FRAMO SEAL ELEMENT	2	119,86	239,71
12	41913	SLEEVE	1	1.726,53	1.726,53
13	6	FRAMO CARGO SEAL SET	3	348,13	1.044,38
14	166850	UPPER SLEEVE	0	639,69	0,00
15	167031	MECHANICAL SEAL	1	1.584,81	1.584,81
16	A2596	O-RING LINE	3	41,30	123,90
			TOTALE		8.235,55

Tale valore viene per altro maggiorato per tenere in considerazione oltre agli interessi passivi anche gli alti costi di obsolescenza. Solitamente per tenere conto di tale incidenza addizionale si applica un incremento del 25%. Il costo reale della configurazione di magazzino per l'apparecchiatura presa in analisi raggiunge così il valore di 10,3 k€. Tale assortimento di ricambi, nel biennio di analisi 2001-2002, ha garantito all'impianto di movimentazione del carico una disponibilità pari a circa il 96%; i costi sostenuti per l'indisponibilità dell'impianto sono ammontati a circa 27 k€/anno.

Per l'applicazione del criterio proposto si è preso il via dal controllo della criticità della sub-unità, considerando che una avaria della pompa "FRAMO CARGO PUMP HD-SD-200" avrebbe potuto produrre i seguenti effetti:

- funzionamento ridotto dell'intero impianto di movimentazione carico;
- riduzione di performance del servizio erogato (rallentamento delle operazioni di carico/scarico dell'unità tanker).

Considerato inoltre che nessun effetto si sarebbe comunque riscontrato relativamente alla sicurezza del sistema, l'indice di criticità della pompa risulta essere quindi, secondo la (7),

$$m_i = 75$$

visto che

$$I_i = 3, V_i = 25, S_i = 1$$

il che conferma l'opportunità di inserire la pompa FRAMO CARGO PUMP HD-SD-200 tra le sub-unità di particolare criticità per l'unità tanker.

Successivamente nel modello è stata calcolata l'incidenza dell'evento di guasto della sub-unità sul livello di servizio dell'impianto, che ha assunto il valore di

$$d_i^k = 0,125.$$

Parallelamente la sub-unità è stata suddivisa nei suoi componenti; per ognuno di questi sono stati stimati i valori per i parametri operativi MTTR, MTWS, MTBF ed MTBM; inoltre attraverso un'analisi dei dati storici si è verificata quale fosse l'influenza dei guasti dei diversi componenti costituenti la pompa sul funzionamento della stessa; da tale analisi si sono calcolati i parametri p_j^i di ciascun componente, da cui i relativi indici di criticità, riportati in Tab. 3, in base alla (8).

TAB. 3

SUB-UNITÀ		CARGO PUMP HD SD 200	
S.P. Critiche		Descrizione	k_j
N°	ID #		
1	96008	BALL BEARING	1,260937961
2	180125	O-RING	0,617777231
3	179952	FRAMO SEAL ELEMENT	1,242808674
4	167072	RING WEAR	1,246435244
5	161216	FRAMO SEAL ELEMENT	1,242808674
6	8110	O-RING	0,617777231
7	161224	FRAMO SEAL ELEMENT	1,242808674
8	161240	FRAMO SEAL ELEMENT	1,242808674
9	161232	FRAMO SEAL ELEMENT	1,242808674
10	9753	O-RING	0,617777231
11	34090	FRAMO SEAL ELEMENT	1,242808674
12	41913	SLEEVE	1,257312816
13	6	FRAMO CARGO SEAL SET	1,246435244
14	166850	UPPER SLEEVE	1,246435244
15	167031	MECHANICAL SEAL	1,257312816
16	A2596	O-RING LINE	0,628656408
TOTALE			

Infine si è assunta in 12 mesi l'estensione del periodo entro cui ricercare la validazione del criterio, in quanto la documentazione relativa al piano di manutenzione ed al piano degli acquisti di ricambi viene emessa una sola volta per tutto l'anno. La soluzione fornita dal criterio proposto ha quindi indicato il dimensionamento e l'assortimento ottimale di ricambi da immagazzinare a bordo della nave affinché nei 12 mesi successivi sia possibile garantire il livello di disponibilità richiesto per gli impianti critici.

Impostato quindi il valore della disponibilità dell'impianto di movimentazione del carico e il massimo livello di spesa ammissibile, ovvero,

$$D_k = 96,25\%;$$

$$B_{max} = 25 \text{ k€},$$

ed impostato il costo relativo all'indisponibilità dell'impianto, ovvero,

$$C_{S_k} = 400 \text{ k€},$$

l'algoritmo di ricerca della soluzione è pervenuto alla soluzione del problema di assortimento e dimensionamento di parti ricambio della pompa FRAMO CARGO PUMP HD-SD-200. Tale soluzione, riportata nella colonna " x_j ottimo" della Tab. 4, viene confrontata con la situazione iniziale del magazzino riportata nella colonna " x_j iniziale".

TAB. 4

SUB-UNITÀ		CARGO PUMP HD SD 200		
S.P. Critiche		Descrizione	x_j ottimo	x_j iniziale
N°	ID #			
1	96008	BALL BEARING	1	0
2	180125	O-RING	3	1
3	179952	FRAMO SEAL ELEMENT	2	1
4	167072	RING WEAR	4	6
5	161216	FRAMO SEAL ELEMENT	1	2
6	8110	O-RING	4	2
7	161224	FRAMO SEAL ELEMENT	1	1
8	161240	FRAMO SEAL ELEMENT	1	1
9	161232	FRAMO SEAL ELEMENT	1	1
10	9753	O-RING	10	2
11	34090	FRAMO SEAL ELEMENT	2	2
12	41913	SLEEVE	0	1
13	6	FRAMO CARGO SEAL SET	1	3
14	166850	UPPER SLEEVE	1	0
15	167031	MECHANICAL SEAL	0	1
16	A2596	O-RING LINE	2	3
Costo totale delle parti di ricambio:			€ 4.634,30	€ 8.235,55

In altri termini il criterio descritto ha proposto un assortimento ricambi per un valore complessivo di circa 4,6 k€; il costo complessivo della soluzione raggiunge quindi i 5,78 k€ comprendendo anche l'incidenza addizionale del 25%; tale valore comporta una riduzione di oltre il 40% rispetto alla soluzione iniziale. La verifica a posteriori sui dati del 2002 ha confermato il raggiungimento dello stesso valore della disponibilità dell'impianto, superiore al 96%.

Effettuando poche iterazioni diventa quindi possibile determinare il compromesso ottimale tra costi relativi all'indisponibilità degli impianti e costi relativi alla scorta ricambi; ad esempio, nel caso in analisi si è tentato di innalzare la disponibilità desiderata per l'impianto di movimentazione del carico portandola al 97,50%; a fronte di una diminuzione del costo di indisponibilità, che ha raggiunto il valore di 9,77 k€, si è riscontrato un significativo aumento del costo del magazzino ricambi, che ha toccato il valore di 15,88 k€; da cui è stato possibile concludere che tale configurazione non fosse economicamente conveniente.

Le potenzialità di applicazione del criterio proposto assumono inoltre maggiore rilevanza alla luce della crescente diffusione dei modelli di business di *global service providing*, dove è prevista la fornitura di un servizio di gestione tecnica-operativa della manutenzione e dei materiale tecnici che rispetti parametri sul livello di servizio concordato tra le parti; in tale ottica, la possibilità di effettuare delle analisi *what-if* sul dimensionamento dei magazzini e sulle relative conseguenze a livello di disponibilità degli impianti diventa infatti di fondamentale importanza.

4. Principali riferimenti bibliografici

- [1] COHEN, M. A. – KLEINDORFER, P. R. – LEE, H. L. “Optimal stocking policies for low usage items in multi-echelon inventory systems”, *Naval Research Logistics*, Vol. 33 pag. 17 - 38 (1986).
- [2] COHEN, M. A. – KLEINDORFER, P. R. – LEE, H. L. - PYKE, D. F. “Multi-item service constrained (s, S) policies for spare parts logistics systems”, *Naval Research Logistics*, Vol. 39 pag. 561– 577 (1992).
- [3] BRIDGMAN, M. S. – MOUNT-CAMPBELL, C. A. “Determining the number of spares in an inventory/repair system which supports equipment with scheduled usage”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 30 - 31 pag. 501 - 518 (1993).
- [4] KIM, J. S. – SHIN, K. C. – YU, H. K. “Optimal algorithm to determine the spare inventory level for a repairable-item inventory system”, *Computers & Operations Research*, Vol. 23 pag. 289 - 297 (1996).
- [5] DEKKER, R. – KLEIJN, M. J. – DE ROOIJ, P. J. “A spare parts stocking policy based on equipment criticality”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 55 - 57 pag. 69 - 77 (1998).
- [6] GAJPAL, P. P. – GANESH, L. S. – RAJENDRAN, C. “Criticality analysis of spare parts using the analytic hierarchy process”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 35 pag. 293 - 297 (1994).
- [7] DESHPANDE, V. – COHEN, M. A. – DONOHUE, K. “A threshold inventory rationing policy for service differentiated demand classes”, Forthcoming in *Management Science* (January 2003).
- [8] COLLIER, D. A. “Aggregate safety stock levels and component part commonality” *Management Science* Vol. 28 pag. 1296 – 1303 (1982).
- [9] MC CLAIN, J. O. – MAXWELL, W. L. – MUCKSTADT, J. A. – THOMAS, L. J. – WEISS, E. N. “Comment on safety stock levels and component part commonality” *Management Science* Vol. 30 pag. 772 – 773 (1984).
- [10] BAKER, K. C. – MAGAZINE, M. J. – NUTTLE, H. L. “The effect of commonality on safety stock in a simple inventory model” *Management Science* Vol. 32 pag. 982 – 988 (1986).
- [11] GERCHAK, Y. – MAGAZINE, M. J. – GAMBLE, B. “Component commonality with service requirements” *Management Science* Vol. 34 (6) pag. 753 – 760 (1988).
- [12] EYNAN, A. “The impact of demands’ correlation on the effectiveness of component commonality” *International Journal of Production Research* Vol. 34(6) pag. 1581 – 1602 (1996).
- [13] EYNAN, A. – ROSENBLATT, M. J. “Component commonality effects on inventory costs” *IIE Trans.* Vol. 28 pag. 93– 104 (1996).
- [14] HILLIER, M. S. “Component commonality in a multi-period inventory model with service level constraint” *International Journal of Production Research* Vol. 37(12) pag. 2665 – 2683 (1998).
- [15] HILLIER, M. S. “Component commonality in a multiple-period assemble-to-order systems” *IIE Trans.* Vol. 32 pag. 755- 766 (2000).
- [16] VAN MIEGHEM, J. A. – RUDI, N. “Newsvendor networks: inventory management and capability investment with discretionary activities” Forthcoming in *Manufacturing & Service Operations Management* (2002).
- [17] ARATA A, STEGMAIER R., “Teoria delle sostituzioni”, in “Manuale di manutenzione degli impianti industriali e servizi”, a cura di L. Furlanetto, *Ed. Franco Angeli* (1998).
- [18] DESHPANDE, V. – COHEN, M. A. – DONOHUE, K. “An empirical study of service differentiation for weapon system service parts”, Forthcoming in *Operations Research* (August 2002).
- [19] SAATY, T. L. “The analytical hierarchy processes”, *McGraw-Hill* New York, 1980.
- [20] LANDO, M. – MOLÈ, S. – RIEMMA, S. “Valutare il rischio, un approfondito studio in grado di proporre una procedura per valutare i rischi legati alle macchine operatrici e identificare gli interventi per ridurli al minimo”, *Tendenze* (Novembre 1997).

5. Ulteriori riferimenti bibliografici

- ACHARYA, D. - NAGABHUSHANAM, G. - ALAM, S. S. “Jointly optimal block replacement and spare provisioning policy”, *IEEE Transactions on Reliability R* – 35 (4) pag. 447-451, (1986).
- AGOSTINI, A. D. “Critical survey of multi-echelon repairable inventory systems” *A thesis submitted to the graduated school of the University of Minnesota* (2001).
- BARLOW, R. E. - PROSCHAN, F. “Optimal preventive maintenance policies”, *Operations Research* Vol. 8 pag. 90 – 100 (1960).
- BECHMANN, M. J. “An inventory policy for repairs parts”, *Naval Research Logistics Quarterly* vol. 6 (3) (1959).
- CHELBI, A. – AÏT-KADI, D. “Spare provisioning strategy for preventively replaced systems subjectd to random failure”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 74 pag. 183 - 189 (2001).
- CLÉROUX, R. - AÏT-KADI, D. “A summary of periodic replacement policies with minimal repair”, *Investigation Operativa* Vol. 1 pag. 43 – 45 (1988).
- COCHRAN, J. K. – LEWIS, T. P. “Computing small-fleet aircraft availabilities including redundancy and spares” *Computers & Operations Research* vol. 29 pag. 529 – 540 (2002).
- DE MARZO, B. “Il percorso per arrivare a un contratto di global maitenance service”, *Manutenzione, Tecnica e Management* vol. xx pag. 27 – 34 (2002).

- DUCHESSI, P. - ET AL., "A conceptual approach for managing of spare parts", *International Journal of Physical Distribution and Materials Management Vol. 18 (5) pag. 8 – 15 (1988)*.
- FORNI, C. "L'audit preliminare: come il primo passo verso il global service di manutenzione", *Manutenzione, Tecnica e Management vol. xx pag. 37 – 44 (2002)*.
- FRENK, J. B. G. - KLEIJN, M. J. – DEKKER, R. "An efficient algorithm for a generalized joint replenishment problem", Forthcoming in *European Journal of Operational Research (1997)*.
- FURLANETTO, L. A CURA DI "Manuale di manutenzione degli impianti industriali e servizi", *Ed. Franco Angeli (1998)*.
- GUDUM, C. K. – DE KOK, T. G. "A safety stock adjustment procedure to enable target service levels in simulation of generic inventory systems".
- HUISKONEN, J. "Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices", *International Journal of Production Economics, Vol. 71 pag. 125 - 133 (2001)*.
- KENNEDY, W. J. – PATTERSON, J. W. – FREDENDALL, L. D. "An overview of recent literature on spare parts inventories", *International Journal of Production Economics, Vol. 76 pag. 201 – 215 (2002)*.
- KLEIJN, M. J. "Demand Differentiation in Inventory Systems", *Erasmus University Rotterdam, Tinbergen Institute Research Series Vol. 189 (1998)*.
- LAU, A. H.L. – LAU, H.S. – PYKE, D. F. "Degeneracies in order-quantity, reorder-point inventory models" (2002).
- PETROVIC, D. - ET AL., "SPARTA II: Further development in an expert system for advising on stocks of spare parts", *International Journal of Production Economics Vol. 24 (3) pag. 291 - 300 (1992)*.
- RUSTENBURG, W. D. – VAN HOUTUM, G. J. – ZIJM, W. H. M. "Spare parts management at complex technology-based organizations: An agenda for research", *International Journal of Production Economics Vol. 71 pag. 177 - 193 (2001)*.
- SHIBUYA, T. – DOHI, T. – OSAKI, S. "Optimal continuous review policies for spare part provisioning with random lead times" *International Journal of Production Economics Vol. 55 pag. 257 – 271 (1998)*.