

# Dal modello gerarchico alla gestione del rischio: evoluzione del TCO negli asset complessi



**Donatella Fochesato,**  
Responsabile Asset Management, RFI, Gruppo FS

## Il modello gerarchico

Per affrontare la sfida della stima del TCO di asset complessi composti da più sottosistemi interdipendenti, è utile adottare un **modello gerarchico** di calcolo del costo totale di proprietà. In questo modello, l'asset complesso viene rappresentato con una struttura ad albero (gerarchia) in cui ogni **nodo** della gerarchia è un asset o componente, e i **nodi figli** rappresentano le sue parti o sottosistemi (Figura 1). Il concetto chiave è che il **TCO dell'asset "padre"** può essere calcolato in modo ricorsivo sommando i TCO dei suoi componenti diretti più i costi aggiuntivi dovuti all'integrazione tra questi componenti.

Questa logica si estende a strutture più ampie: ogni sottosistema a sua volta può essere composto da componenti di livello ancora inferiore, e così via, fino ad arrivare ai componenti atomici (che non hanno ulteriori suddivisioni).

L'adozione di questo modello gerarchico consente di **riutilizzare le analisi di costo** dei sottosistemi: ad esempio, il TCO di un certo tipo di stazione di pompaggio, una volta calcolato, può essere impiegato ogni volta che quella stazione compare come parte di un impianto più grande, senza dover rifare i conti da zero. Ciò risulta estremamente utile per infrastrutture modulari o reti composte da elementi ripetuti.

Un ulteriore vantaggio è che questo approccio permette di **modellare in dettaglio l'incertezza** di ogni voce di costo e osservarne l'effetto sul totale. Nel modello classico per asset singoli, si possono distinguere costi deterministici (noti a priori, ad es. prezzo d'acquisto pattuito) e costi aleatori (stimati probabilisticamente, ad es. costi di guasto futuri). Nel modello gerarchico, la stessa distinzione vale a ogni livello: ogni componente avrà costi certi e costi variabili, questi ultimi descritti con distribuzioni di probabilità (ad esempio, un intervallo di possibili spese di manutenzione straordinaria basate su dati

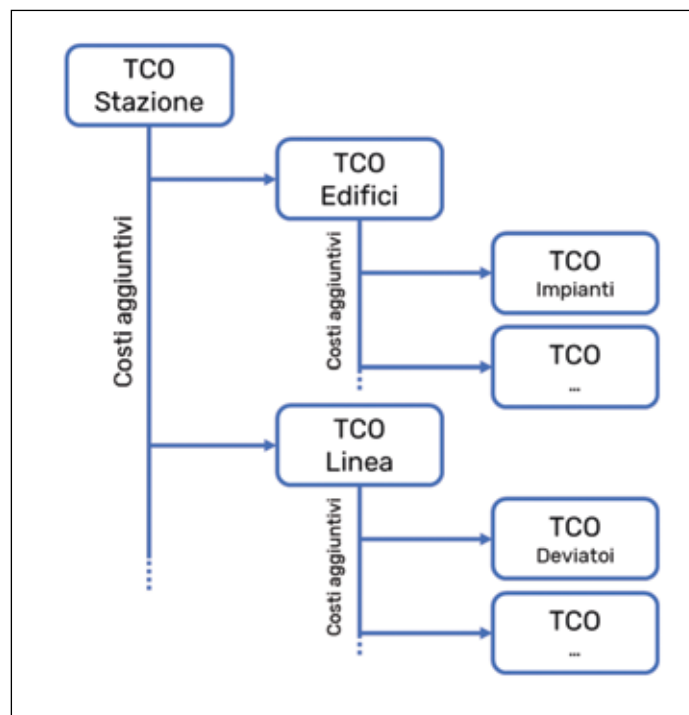


Figura 1 - Vista gerarchica dell'asset complesso



**Lorenzo Di Pasquale,**  
Asset Management, RFI, Gruppo FS

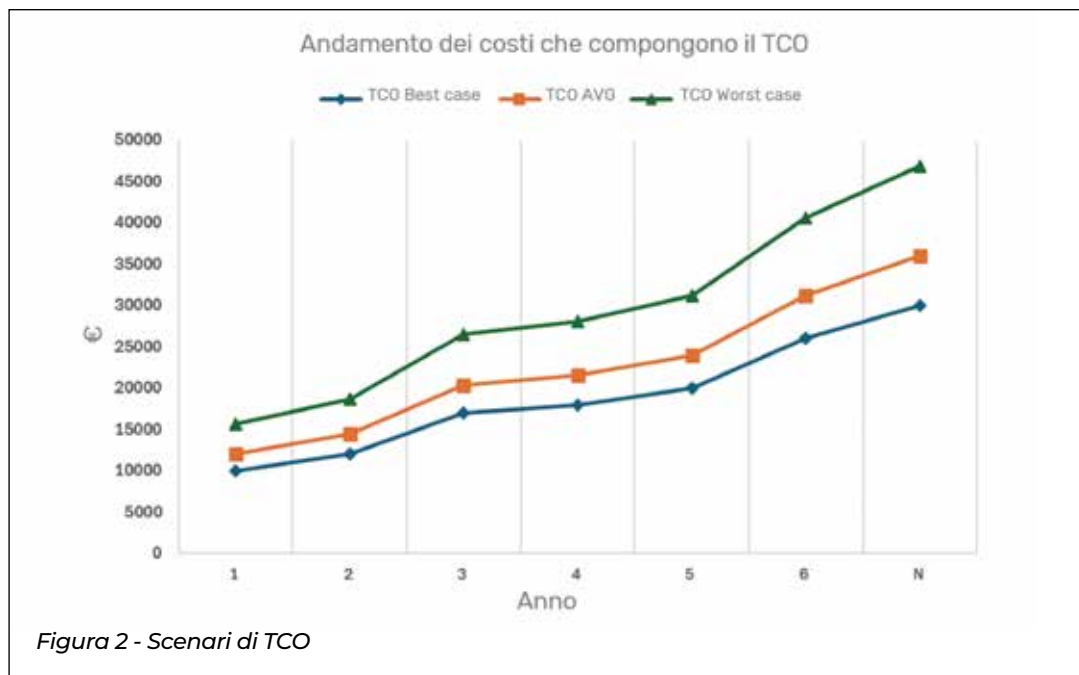


Figura 2 - Scenari di TCO

storici di affidabilità). Il TCO totale dell'asset complesso, essendo somma di variabili aleatorie, **diventa anch'esso una variabile aleatoria**. Possiamo dunque stimarne non solo il valore atteso (la media), ma anche la **variabilità** (varianza, deviazione standard) e altri indicatori di rischio. In altre parole, il risultato del calcolo non sarà un singolo valore puntuale di TCO, ma una distribuzione di possibili valori, ciascuno associato a una certa probabilità di accadimento. Questa distribuzione rappresenta l'incertezza intrinseca legata ai costi futuri dell'asset e consente di valutare scenari differenti, dalla situazione più favorevole (TCO minimo) a quella più critica (TCO massimo). Questo consente al management di rispondere a domande del tipo: "Con quale probabilità il costo totale supererà una certa soglia?" oppure "Qual è lo scenario pessimistico (worst case) da considerare per allocare un fondo di contingenza?" (Figura 2)

Un aspetto critico da tenere presente è la **correlazione tra costi**. Nella vita reale, molte voci di costo non sono indipendenti l'una dall'altra. Per esempio, i prezzi di più componenti potrebbero dipendere dallo stesso fornitore (e quindi aumentare insieme), oppure l'andamento del costo dell'energia influenzerà contemporaneamente tutti gli impianti energivori, o ancora l'inflazione e i tassi di cambio possono far lievitare in parallelo i costi di materiali diversi. Dal punto di vista statistico, ciò significa introdurre **covarianza** nel calcolo: se i costi di due sottosistemi sono po-

sitivamente correlati (tendono ad aumentare o diminuire insieme), la **varianza totale** del TCO aumenta rispetto al caso in cui fossero indipendenti. Al contrario, in casi rari di correlazione negativa (quando un costo sale, l'altro scende), l'incertezza complessiva può ridursi leggermente. Ignorare le correlazioni porterebbe a valutare erroneamente il rischio: spesso i modelli semplici assumono indipendenza e quindi **sottovalutano la probabilità di sforamenti** (poiché sommano varianze senza considerare che le oscillazioni possono allinearsi tutte nello stesso verso sfavorevole). È quindi importante identificare e quantificare i principali fattori di correlazione tra costi: fornitori comuni, componenti condivisi, processi produttivi analoghi, esposizione alle stesse fluttuazioni di mercato (valute, inflazione, costo del lavoro o dell'energia, ecc.). Incorporando queste dipendenze nel modello gerarchico, si ottiene una stima del TCO più realistica sulla **dispersione** dei possibili esiti. Un interessante effetto derivante dal modello gerarchico è che, **in presenza di molti componenti relativamente indipendenti**, il costo totale aggregato tende ad essere più stabile e prevedibile grazie alla diversificazione. Per fare un paragone, è come avere un portafoglio di investimenti: se i rendimenti (in questo caso i costi) non sono correlati, le fluttuazioni tendono in parte a compensarsi. Di conseguenza, all'aumentare del numero di componenti indipendenti, la distribuzione del TCO si concentra maggiormente intor-



**Emanuele Dovere,**  
Vice Direttore  
Master MeGMI



**Giovanni Ruggeri,**  
Collaboratore  
CELS, Università  
degli studi di  
Bergamo



**Mattia Galimberti,**  
Collaboratore  
CELS, Università  
degli studi di  
Bergamo



**Enrico Cagnoni,**  
Collaboratore CELS,  
Università degli  
studi di Bergamo



**Roberto Pinto,**  
Professore,  
Università degli  
studi di Bergamo

no al valore medio atteso e la **probabilità di deviazioni estreme diminuisce**. Questo non significa che i rischi spariscano, ma che gli intervalli di variabilità diventano più delineati e stimabili, facilitando la pianificazione. Naturalmente, se invece molti costi si muovono insieme (correlazioni positive elevate), questo beneficio si riduce e rimane una notevole **asimmetria verso l'alto** nei possibili esborsi: in altre parole, è sempre più probabile avere extra-costi impreveduti piuttosto che risparmi inattesi, e tale asimmetria può essere accentuata dalle correlazioni. Questa consapevolezza aiuta i manager a non sottovalutare le riserve economiche necessarie per coprire gli impreveduti.

Un concetto derivato da questa impostazione è il **“percorso critico di costo”** (*cost critical path*). Analogamente al cammino critico di un progetto (dove si individuano le attività che determinano la durata minima del progetto), nel contesto del TCO si possono individuare i componenti la cui incertezza di costo incide maggiormente sulla variabilità complessiva. In pratica, attraverso analisi quantitative come quelle menzionate (contributo alla varianza, sensibilità, simulazioni Monte Carlo, ecc.), si mette in luce una **catena di elementi critici** dal punto di vista economico. Identificare il percorso critico dei costi significa sapere **dove concentrare le azioni di mitigazione del rischio**: ad esempio, se dal modello risulta che un particolare componente costoso e soggetto a forte incertezza domina la varianza totale, si potrà valutare di adottare strategie mirate su di esso. Tali strategie possono includere **mitigazioni mirate** (ridondanza o alternative per il componente critico, accordi di fornitura a prezzo fisso, hedge finanziari su materie prime), **monitoraggio prioritario** (controlli più frequenti e indicatori *early warning* per segnali di aumento costo su quella voce) e **allocazione di riserve** specifiche (budget di contingenza proporzionato al rischio associato a quel componente). In questo modo, il modello TCO gerarchico non solo quantifica i costi, ma informa attivamente la strategia di gestione, indicando dove è più efficace investire risorse per prevenire sforamenti e ottimizzare la spesa.

### TCO tra sfide e maturità aziendale

L'adozione di un modello di TCO comporta indubbi vantaggi, ma richiede anche il superamento di alcune **sfide operative** che non vanno sottovalutate. Prima tra tutte, la **dispo-**

**nibilità di dati consuntivi** affidabili e sufficientemente **granulari**: stimare i costi lungo il **ciclo di vita** implica poter disporre di informazioni storiche accurate sui singoli asset, spesso suddivise per **sottosistema** o per **centro di costo**. Inoltre, per affrontare in modo credibile l'**incertezza** associata ai costi futuri, è necessario ricavare i **parametri di input** significativi per le simulazioni (ad esempio per l'approccio **Monte Carlo**), che derivano a loro volta da una conoscenza dettagliata di tutte le variabili che contribuiscono al calcolo delle singole categorie di costo. Un ulteriore aspetto riguarda la capacità di rappresentare e **visualizzare** efficacemente i risultati del modello, traducendo le simulazioni in informazioni leggibili per il management.

In questo senso, l'attività di costruzione di un modello TCO può essere vista anche come un utile esercizio di **self-assessment** della propria **maturità organizzativa**: consente di verificare il livello di **integrazione tra i sistemi** aziendali (**ERP, CMMS**, sistemi di monitoraggio, ecc.), la **qualità dei dati** raccolti sul campo e la profondità della conoscenza interna rispetto agli asset gestiti. Non è raro che, nelle fasi iniziali, i **benefici diretti** siano difficili da quantificare; tuttavia, l'investimento in questa direzione contribuisce a creare una **base dati strutturata** e una cultura orientata al **ciclo di vita**, che nel tempo abilita decisioni sempre più **consapevoli**. I vantaggi diventano particolarmente evidenti quando il modello evolve fino a riflettere quanto più fedelmente la realtà operativa e diventa un **supporto quotidiano** alle scelte **strategiche e operative**.

### Implicazioni manageriali e conclusioni

L'adozione di un modello TCO gerarchico per asset complessi porta con sé importanti **benefici gestionali**. In primo luogo, offre una **visibilità completa e granulare** sui costi: i manager possono vedere l'incidenza di ogni singolo fattore di costo nel quadro generale. Questo aiuto visivo e analitico rende più semplice giustificare investimenti o interventi di manutenzione, poiché si può mostrare quantitativamente come una certa spesa oggi (ad esempio una manutenzione preventiva extra) possa ridurre il costo totale futuro evitando fermate impreviste. In termini di **decision making**, disporre di un modello TCO dettagliato significa poter prendere decisioni basate su dati e scenari, anziché su intuizioni o approcci puramente contabi-

li. Si pensi alla pianificazione di **budget pluriennali**: con il TCO gerarchico, i responsabili finanziari e operativi possono stimare con maggiore affidabilità i fabbisogni di cassa anno per anno, identificando gli anni in cui sarà opportuno accantonare risorse extra (magari per overhaul di componenti critici giunti a fine vita) e quelli in cui il profilo di costo sarà più lieve.

Un altro aspetto cruciale è l'allineamento con la **Manutenzione 4.0**. Nell'era dell'Industria 4.0, la manutenzione degli impianti sta diventando sempre più **predittiva** e basata sui dati: sensori IoT forniscono in tempo reale informazioni sullo stato delle apparecchiature, piattaforme software analizzano questi dati per prevedere guasti e ottimizzare gli interventi, e l'intelligenza artificiale supporta i tecnici nel prendere decisioni. In questo contesto, il modello TCO gerarchico funge da **struttura di riferimento** in cui inserire tutte queste informazioni. Ad esempio, i dati raccolti dai sensori su utilizzo e usura di un componente possono essere inseriti nel modello per aggiornare in tempo quasi reale la stima dei costi di manutenzione attesi di quel componente. Man mano che il sistema "impara" dal campo (grazie ai big data raccolti), le distribuzioni di costo di ciascun sottosistema diventano più precise, e il TCO complessivo può essere ricalcolato per fornire un **forecast aggiornato** ai manager. Questo significa che il TCO diventa uno strumento vivo, che accompagna le attività operative: un cambiamento nello stato di salute di una macchina critica viene subito tradotto in un impatto previsto sui costi annuali, permettendo di attuare correttivi immediati (come ordinare per tempo ricambi o ridurre carichi di lavoro su quell'unità per estenderne la vita). In sintesi, l'integrazione del TCO con le tecnologie di Manutenzione 4.0 crea un **circolo virtuoso**: i dati sul campo alimentano il modello di costo, e il modello di costo orienta le decisioni sul campo.

Dal punto di vista organizzativo, abbracciare la logica del costo totale di proprietà per asset complessi promuove una maggiore **collaborazione interdisciplinare**. Le funzioni di ingegneria, manutenzione, operations e finanza condividono un linguaggio comune (quello dei costi lungo il ciclo di vita) e possono meglio allineare i propri obiettivi. Ad esempio, la manutenzione non viene più vista solo come un centro di costo da comprimere annualmente, ma come una leva per ridurre il TCO.



I dirigenti, dal canto loro, possono impostare **strategie di asset management** più robuste, supportando le decisioni con analisi what-if: "Cosa accade al TCO se estendiamo la vita operativa di questo impianto di 5 anni? E se invece anticipiamo la sua sostituzione con una tecnologia più moderna e efficiente energeticamente?". Il TCO fornisce le cifre su cui basare queste valutazioni strategiche.

In conclusione, il Total Cost of Ownership rappresenta oggi uno strumento imprescindibile per le aziende che gestiscono asset industriali e infrastrutturali di elevata complessità. Passare da un semplice calcolo aggregato a un **modello gerarchico** consente di catturare tutte le sfaccettature dei costi, dalle singole voci elementari alle sinergie (o diseconomie) dovute all'integrazione di sistema. Ciò si traduce in **decisioni più consapevoli**, minori sorprese sul fronte dei costi e una capacità migliorata di **indirizzare gli investimenti** dove generano il massimo valore lungo l'intero ciclo di vita dell'asset. In un'epoca in cui l'efficienza e la sostenibilità finanziaria delle infrastrutture sono sotto i riflettori, saper dominare il TCO degli asset complessi dà un vantaggio competitivo significativo: permette di **ottimizzare la spesa** senza compromettere affidabilità e prestazioni, creando le basi per una gestione davvero **proattiva** e orientata al futuro. □