

POLITECNICO DI TORINO

**Collegio di Ingegneria Gestionale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale**

Tesi di Laurea Magistrale

**Sviluppo di una soluzione software di dominio per il calcolo
del costo pieno dei motori turbofan di generazione GE9X**



Relatore
prof. Giulio Mangano

Candidato
Carmelo Pullara

Anno Accademico 2018/2019

Un ringraziamento a chi mi ha supportato.

Indice

Indice delle figure	6
Indice delle tabelle	8
Introduzione	10
1 Il settore, il prodotto, il suo processo di sviluppo	13
1.1 Presentazione del settore aerospaziale	14
1.1.1 Evoluzione storica del settore aerospaziale.....	15
1.1.2 L'odierna struttura della supply chain.....	17
1.2 I principi di funzionamento dei motori a turbina	20
1.2.1 I principi termodinamici su cui poggia il funzionamento di un motore a turbina di tipo turbofan	20
1.2.2 Le relazioni tra le principali stazioni di un motore a turbina di tipo turbofan.....	23
1.2.2.1 Stazioni 0-2: ingestione della massa d'aria libera	23
1.2.2.2 Stazioni 2.5-3: compressione della massa d'aria in ingresso nel core engine	25
1.2.2.3 Stazione 4: combustione della massa d'aria compressa	26
1.2.2.4 Stazioni 4.5-5: espansione del fluido e conversione dell'energia.....	26
1.2.2.5 Stazioni 7-8: eliminazione dei gas combusti a bassa energia	27
1.3 La Gestione della Configurazione ed il processo di sviluppo prodotto in ambito aerospaziale	28
1.3.1 L'importanza di una corretta Gestione della Configurazione	28
1.3.2 Lo sviluppo di un nuovo motore a turbina, le metodologie Stage-Gate® e Tollgate. 31	
2 Product-costing, End-User software development.....	38
2.1 L'importanza di valutare preventivamente il costo del prodotto	39
2.2 Classificazioni dei modelli di stima del costo del prodotto.....	41
2.2.1 Modelli di stima intuitivi.....	43
2.2.2 Modelli di stima analogici.....	43
2.2.3 Modelli di stima parametrici	44
2.2.4 Modelli di stima analitici	45
2.2.5 Riepilogo dei modelli di stima dei costi e flowchart decisionale.....	46
2.3 Limitazioni connesse al sistema di classificazione dei modelli utilizzati per il product-costing.....	49
2.4 L'End-User software development in risposta alle richieste di dominio	51
2.4.1 Un confronto con gli approcci strutturati per la programmazione software	52
2.4.2 L'impiego degli spreadsheet softwares come ecosistemi di sviluppo.....	55
3 Metodologia	60
3.1 I requisiti dell'applicativo e l'approccio alle implementazioni.....	61

3.2 Pianificazione delle attività progettuali.....	62
3.3 Programmazione temporale delle attività.....	66
4 La soluzione generata.....	75
4.1 La terminologia adoperata all'interno del processo di calcolo.....	77
4.2 Generazione del database propedeutico al calcolo.....	79
4.3 Il processo di calcolo analitico su cui poggia il funzionamento dell'applicazione	84
4.3.1 Calcolo del costo diretto delle componenti lavorate	84
4.3.2 Calcolo del costo diretto delle componenti acquistate	90
4.3.3 Calcolo dei costi indiretti	94
4.3.4 Calcolo del costo pieno dei motori.....	95
4.4 Valutazione dei rischi.....	100
5 Conclusioni	107
Allegati.....	112
Allegati A: formule di calcolo impiegate all'interno dell'applicazione.....	112
A1: istruzioni di calcolo per l'ottenimento del costo diretto delle componenti lavorate ..	112
A2: istruzioni di calcolo per l'ottenimento del costo diretto delle componenti acquistate	114
A3: istruzioni di calcolo per l'ottenimento dei costi indiretti da allocare sugli item di	
configurazione.....	115
A4: istruzioni di calcolo per l'ottenimento del costo pieno per ogni item di configurazione	
.....	116
Allegati B: digrammi di flusso UML® relativi al processo di calcolo contenuto	
nell'applicazione	117
B1: flowchart relativo alla gestione delle Anagrafiche.....	117
B2: flowchart relativo al calcolo del costo diretto delle componenti lavorate	118
B3: flowchart relativo al calcolo del costo diretto delle componenti acquistate	119
B4: flowchart relativo al calcolo dei costi indiretti dal allocare.....	120
B5: flowchart relativo al calcolo del costo pieno dei motori	121
Allegati C: layout delle principali sezioni dell'applicazione di calcolo.....	122
C1: layout della sezione relativa al database propedeutico al calcolo	122
C2: layout della sezione dedicata al calcolo del costo diretto delle lavorazioni	123
C3: layout della sezione dedicata alla gestione FIFO e al calcolo dei materiali acquistati	124
C4: layout della sezione dedicata al calcolo dei contributi indiretti.....	125
C5: layout della sezione dedicata al calcolo del costo pieno dei motori	126
Riferimenti bibliografici e sitografici.....	127

Indice delle figure

Figura 1: Boeing 787 Dreamliner, componenti sviluppate in outsourcing, fonte [5]	18
Figura 2: Supply Chain su 5 livelli per il settore aerospaziale, elaborato da [6].....	19
Figura 3: sezione di un motore a turbina turbofan con le principali stazioni in evidenza, fonte [13]	21
Figura 4: ciclo termodinamico di Brayton-Joule per il funzionamento di un motore a turbina..	22
Figura 5: variazione della pressione e della temperatura della massa d'aria coinvolta nel ciclo di Brayton-Joule all'interno di un motore a turbina di tipo turbofan, fonte [7]	23
Figura 6: ricostruzione CAD del fan, fonte [12]	24
Figura 7: separazione dei flussi di Bypass e Core all'interno del motore turbofan, fonte [7]	25
Figura 8: rapporti TSFC-BPR sulla sinistra e risparmio carburante-BPR sulla destra, fonte [10]	25
Figura 9: ricostruzione CAD del compressore (sinistra), fonte [12].....	27
Figura 10: ricostruzione CAD del combustore (destra), fonte [12]	27
Figura 11: ricostruzione CAD della turbina, fonte [12].....	27
Figura 12: evoluzione dei requisiti di prodotto, fonte [14]	29
Figura 13: Gestione della Configurazione e sotto-processi, elaborato da [14]	30
Figura 14: processo di sviluppo di un motore a turbina, elaborato da [15].....	32
Figura 15: modello decisionale Stage-Gate®, fonte [17].....	33
Figura 16: dettaglio di una singola iterazione all'interno del processo Stage-Gate®, elaborato da [17].....	34
Figura 17: processo di sviluppo Tollgate per un nuovo motore a turbina.....	36
Figura 18: cost committed-incurred nel caso di sviluppo di un nuovo prodotto.....	40
Figura 19: terminologia per il product-costing, elaborato da [19]	42
Figura 20: classificazione PCE e applicabilità nelle diverse fasi di NPD, elaborato da [18, 21]	43
Figura 21: raffigurazione del processo di stima del costo per analogia, elaborato da [20].....	44
Figura 22: raffigurazione del processo di stima del costo parametrico, elaborato da [20]	45
Figura 23: raffigurazione del processo di stima del costo analitica, elaborato da [20]	46
Figura 24: flowchart decisionale per la scelta del corretto modello, elaborato da [18]	48
Figura 25: confronto End User Programming e il software engineering, fonte [22]	53
Figura 26: vantaggi e svantaggi nell'introduzione dei metodi IT nel contesto EUSE, fonte [22]	54
Figura 27: Struttura WBS per il progetto di sviluppo presentato dall'elaborato.....	63
Figura 28: Struttura OBS per il progetto di sviluppo presentato dall'elaborato	65
Figura 29: Agile Project Management e gestione dello sprint, fonte [31]	69
Figura 30: Roadmap di prodotto con le principali implementazioni per l'applicazione.	70
Figura 31: diagramma di Gantt relativo al progetto di sviluppo dell'applicazione di calcolo	72
Figura 32: panoramica generale del processo di calcolo integrato all'interno dell'applicazione di dominio	76
Figura 33: diagramma di classe UML® per l'Anagrafica di Configurazione, software AsthCommunity	80
Figura 34: diagramma di classe UML® per l'Anagrafica delle Lavorazioni, software AsthCommunity	81
Figura 35: diagramma di classe UML® per l'Anagrafica delle Commesse, software AsthCommunity	82
Figura 36: diagramma di classe UML® per il database di calcolo, software AsthCommunity	83
Figura 37: processo di calcolo delle quantità e dei costi netti per i singoli lotti di lavorazione..	88
Figura 38: flusso dei dati per il calcolo del costo diretto delle componenti lavorate.....	90

Figura 39: modello di attribuzione delle quantità di materiale immagazzinato ai singoli seriali	92
Figura 40: flusso dati per il calcolo del costo diretto delle componenti acquistate.....	93
Figura 41: flusso dati per il calcolo dei costi indiretti.....	95
Figura 42: calcolo del costo pieno dei motori secondo l'approccio black-box.....	96
Figura 43: calcolo del costo pieno dei motori secondo l'approccio breakdown.....	98
Figura 44: processo di accadimento di un evento rischioso.....	100
Figura 45: matrice decisionale per la risposta al rischio.....	103
Figura 46: matrice di intervento dei rischi per l'applicazione e per il modello di calcolo progettati	105

Indice delle tabelle

Tabella 1: punti di forza e di debolezza degli approcci al product-costing, fonti [18, 20].....	47
Tabella 2: confronto tra l'approccio EUD e i processi consolidati di acquisizione software, fonte [22].....	51
Tabella 3-A: scostamenti EUSE e software engineering in merito a 6 fattori di sviluppo fondamentali, fonte [22].....	53
Tabella 3-B: scostamenti EUSE e software engineering in merito a 6 fattori di sviluppo fondamentali, fonte [22].....	53
Tabella 4: revisione critica della letteratura relativa alla classificazione degli errori presenti negli spreadsheet softwares, fonte [28].....	58
Tabella 5: descrizione dell'ambito di progetto, riferimenti teorici da [30].....	62
Tabella 6-A: Modello CCM e motivazioni per il suo impiego, riferimenti teorici da [30].....	67
Tabella 6-B: Modello CCM e motivazioni per il suo impiego, riferimenti teorici da [30].....	67
Tabella 7: informazioni contenute all'interno dell'Anagrafica di Configurazione.....	79
Tabella 8: informazioni contenute all'interno dell'Anagrafica delle Lavorazioni.....	80
Tabella 9-A: informazioni contenute all'interno dell'Anagrafica delle Commesse.....	81
Tabella 9-B: informazioni contenute all'interno dell'Anagrafica delle Commesse.....	81
Tabella 10: ricostruzione di una porzione del database usato per il successivo calcolo dei contributi al full cost del GE9X.....	83
Tabella 11: ricostruzione di una porzione del database per il calcolo delle lavorazioni.....	85
Tabella 12: processo di aggiustamento dei valori derivati dall'ERP aziendale.....	86
Tabella 13: variabili da derivare ai fini del corretto funzionamento del modello.....	86
Tabella 14: formule per il calcolo dei parziali netti delle lavorazioni (complemento ERP).....	88
Tabella 15: ricalcolo dei parziali netti a complemento delle informazioni derivate dall'ERP ...	89
Tabella 16: esempio del calcolo del costo diretto delle componenti lavorate.....	89
Tabella 17: ricostruzione del database per le componenti acquistate.....	90
Tabella 18: ricostruzione del database per i costi indiretti.....	94
Tabella 19: ricostruzione di una porzione della sezione di output dell'applicazione di calcolo .	96
Tabella 20: confronto tra gli approcci black-box e breakdown al calcolo del costo pieno dei motori.....	99
Tabella 21: esempio di analisi What-if per il presente studio.....	101
Tabella 22: scala di misura associata alla probabilità di accadimento dell'evento rischioso....	102
Tabella 23: scala di misura associata alla magnitudo dell'evento rischioso.....	102
Tabella 24: Risk-assessment per l'applicazione e il modello di calcolo progettati.....	104

Introduzione

Il presente elaborato di tesi ha lo scopo di illustrare i principi di funzionamento dell'applicazione di calcolo costruita ad-hoc per la stima del costo pieno dei motori a turbina di tipo turbofan appartenenti alla generazione GE9X. Il sistema costruito opera attraverso la piattaforma software ampiamente diffusa Microsoft Excel®. Considerati gli accordi di riservatezza cui sono soggetti i dati di costo del prodotto, essi dovranno essere omessi dal contenuto del presente testo. Al loro posto, si punterà l'attenzione verso le logiche di funzionamento che caratterizzano l'applicativo progettato.

Il processo di sviluppo ha avuto una durata semestrale ed è stato svolto presso gli uffici di Rivalta di Torino (TO) della società GE Avio S.r.l. Al progetto hanno partecipato il program manager responsabile del motore turbofan GE9X e un team composto da due risorse. Sono stati altresì coinvolti ulteriori soggetti, tra cui la funzione aziendale Finance con il compito di fornire supporto in merito alla verifica della correttezza degli output di costo ottenuti dal sistema di calcolo.

Considerato il carattere estremamente complesso e diversificato di un motore a turbina, l'azienda ha maturato l'idea di sviluppare un'applicazione che potesse automatizzare l'attività di acquisizione del suo costo pieno, abbandonando il tradizionale approccio puntuale basato sull'aggregazione progressiva delle molteplici voci di costo. Sfruttando le informazioni archiviate all'interno del proprio Enterprise Resource Planning (ERP), l'azienda ha deciso di strutturare un'applicazione domain specific basata sulle relazioni logico-matematiche instaurabili tra le diverse variabili in esso contenute. A tal proposito, sono stati sfruttati i diversi modelli presentati dalla letteratura in merito al calcolo del costo delle lavorazioni, dei pezzi acquistati e immagazzinati, nonché degli indiretti da allocare sul prodotto. Partendo da una base fornita dallo stesso program manager, relativa ai principi generali di funzionamento richiesti per il sistema di calcolo da sviluppare, esso è stato modellato con l'obiettivo di garantire una stima granulare e poco onerosa dal punto di vista delle risorse occupate.

Al fine di spiegare in modo esaustivo il processo di ricerca, il testo si articola in cinque sezioni oltre alla presente di carattere introduttivo. Viene, anzitutto, fornita una descrizione del corpo letterario strettamente legato agli argomenti costituenti lo studio. L'approccio utilizzato prevede un graduale avvicinamento agli elementi core della ricerca. Per tale ragione, un primo capitolo sarà dedicato alla presentazione degli aspetti di carattere contestuale rispetto alla stessa. Al suo interno, vengono illustrati il settore di appartenenza del soggetto aziendale e la categoria di prodotto di cui si intende formalizzare il sistema di calcolo del costo pieno. A tal proposito, si discutono i principi termodinamici generali relativi al funzionamento dei motori a turbina e si presentano i principali moduli che li compongono. Considerando, inoltre, la fase di sviluppo in cui, alla data del presente elaborato, permane ancora la serie GE9X, si ritiene utile fornire un quadro generale delle best practices relative alla corretta gestione della configurazione e al processo di sviluppo prodotto per il contesto aerospaziale. A tal proposito, si discute la metodologia decisionale Stage-Gate® e si offre una panoramica dell'approccio Tollgate adottata all'interno del settore.

Una volta chiarito il quadro contestuale in cui si innesta la presente ricerca, una seconda sezione procede all'illustrazione delle basi teoriche fondanti la metodologia adoperata dal team di sviluppo. Innanzitutto, trattandosi lo studio qui illustrato dello sviluppo di un'applicazione impiegata per il product costing, ne verranno fornite le principali classificazioni contenute all'interno del corpo letterario. Nello specifico, si discuteranno gli approcci intuitivi, analogici, parametrici e analitici per la stima del costo del prodotto in riferimento alle diverse fasi del suo ciclo di vita, si valuteranno i principali punti di forza e di debolezza di ognuno dei metodi illustrati, e si forniranno alcune riflessioni in merito alle limitazioni connesse al loro impiego. Una tale trattazione chiarifica le basi teoriche da cui si è attinto per la definizione delle logiche di calcolo utilizzate all'interno dell'applicativo. Diversi studi suggeriscono come le pratiche di sviluppo di soluzioni informatiche di dominio siano piuttosto diffuse presso i soggetti aziendali, a tal punto da essere categorizzate all'interno degli approcci definiti con l'espressione End-User Software Development (EUD). Rientrando il progetto di sviluppo negli stessi confini, ne verranno discusse le principali caratteristiche, nonché gli scostamenti rispetto alla metodologia più strutturata tipica dell'ingegneria del software. Alla trattazione dell'emergente EUD seguono una serie di riflessioni in merito all'impiego degli spreadsheet softwares, il cui maggior esponente è dato dallo stesso sistema MS Excel®, in qualità di ambienti per lo sviluppo di applicazioni di calcolo complesse. A tal proposito, verranno messe in evidenza alcune debolezze intrinseche di tali sistemi, tra cui le difficoltà connesse alla creazione di una base teorica per la classificazione degli errori in essi contenuti.

La terza sezione del presente elaborato fornisce i dettagli della metodologia impiegata per il processo di sviluppo dell'applicazione di calcolo. A tal proposito, si discutono la definizione dei requisiti di soddisfazione dell'applicativo, la pianificazione delle attività progettuali, nonché la loro programmazione temporale. Gli argomenti esposti saranno accompagnati, quando necessario, dalle relative definizioni contenute all'interno del testo di riferimento PMBOK®. In merito alla fase di pianificazione di progetto, si ricorre ai costrutti delle Work Breakdown Structure (WBS) e Organizational Breakdown Structure (OBS) per illustrare i work packages costituenti il processo di sviluppo e le relative responsabilità. Per quanto riguarda la programmazione temporale, verranno presentate la metodologie della Critical Chain (CCM) e AGILE adoperate per lo scheduling delle attività costituenti lo studio. La prima è stata impiegata per il progetto nella sua globalità, mentre la seconda per le sole fasi iterative di sviluppo e verifica delle releases dell'applicazione di calcolo. Le diverse tasks progettuali saranno, infine, racchiuse all'interno del relativo diagramma di Gantt.

La descrizione della soluzione generata, contenuta all'interno del quarto capitolo dell'elaborato, predilige un approccio teorico. Essa si struttura in cinque contributi, ognuno dei quali si riferisce a una precisa sezione dell'applicazione. Risulta, innanzitutto, necessario definire un database contenente l'insieme delle informazioni utili per la successiva attività di calcolo. Il costo pieno dei motori viene a sua volta ottenuto con un processo di graduale aggregazione dei contributi diretti, i costi delle componenti acquistate e lavorate, e di quelli indiretti, sulla base della loro rispettiva struttura di prodotto. Una volta descritto il modello di calcolo progettato, esso verrà sottoposto ad analisi di risk assessment, con lo scopo di individuare e classificare in modo quantitativo i rischi residuali ancora persistenti.

L'ultima sezione del testo fornisce alcune considerazioni conclusive in merito alla replicabilità del sistema di calcolo progettato per tutti quei contesti esterni a quello specificatamente illustrato. Tale trattazione sarà accompagnata dalla discussione relativa alle limitazioni della stessa applicazione, nonché alle implicazioni teoriche e pratiche connesse allo stesso processo di sviluppo presentato all'interno dell'elaborato.

1 Il settore, il prodotto, il suo processo di sviluppo

All'interno del presente capitolo verrà innanzitutto fornita una panoramica del settore aerospaziale con particolare attenzione alla sua storia evolutiva, alle relazioni all'interno della supply chain odierna, nonché ai relativi trend di sviluppo futuri. Con questa prima trattazione si intende presentare il contesto di appartenenza del prodotto per il quale è stato progettato l'applicativo per la stima del costo pieno.

Una volta analizzato il settore di appartenenza, verrà fornita una descrizione della famiglia di motori aerei basati sui principi di funzionamento della turbina a gas. L'attenzione verrà posta sulla categoria dei motori a turbina di tipo turbofan a cui appartiene la serie GE9X per la quale è stato modellato il processo di calcolo illustrato dal presente elaborato. A tal proposito, l'approccio prevede sia la descrizione dei principi termodinamici generali sottostanti il loro funzionamento, il cosiddetto ciclo ideale di Brayton-Joule, sia la presentazione delle principali stazioni componenti i motori e le relative relazioni all'interno dello stesso ciclo.

Chiarito il prodotto di cui l'applicazione di calcolo costruita intende stimare il costo pieno, si procede con l'illustrazione delle best practices presenti in letteratura in merito alle attività di New Product Development (NPD) per una nuova turbina a gas. Una tale esposizione è direttamente correlata alla fase di sviluppo in cui permane ancora la serie GE9X. Ciò che emerge è l'imprescindibilità della corretta implementazione delle pratiche di gestione della configurazione (CM), in special modo per quei settori a elevata densità informativa come l'Aerospace. Alla discussione sul CM segue l'illustrazione, debitamente adattata agli scopi del presente elaborato, delle principali attività costituenti la sequenza di sviluppo di un nuovo motore a turbina. Tra i diversi approcci alla gestione dei processi decisionali nel contesto delle attività di sviluppo prodotto per il settore aerospaziale sarà qui illustrato il modello Stage-Gate®. Come verrà reso noto più avanti, la sola metodologia Stage-Gate®, nella sua accezione più generale, risulta insufficiente per la corretta gestione delle numerose fasi costituenti il processo di sviluppo di un intero motore a turbina. A tal proposito, si ricorre alla variante Tollgate, suddivisa in 9 fasi, con la quale si segue l'introduzione di un nuovo prodotto dalla sua concezione, tramite l'analisi del business case decisionale, alla sua progettazione, prima concettuale e poi di dettaglio, sino alla certificazione per l'entrata in servizio e all'offerta post-vendita garantita al cliente.

1.1 Presentazione del settore aerospaziale

Risulta utile fornire una definizione preliminare per il settore aerospaziale. L'AeroDynamic Advisory e la Teal Group Corporation, lo dipingono come l'insieme delle imprese impegnate nelle operazioni di sviluppo, produzione, manutenzione, e supporto per tutti quei velivoli di natura sia militare che civile [1].

Prima di offrire una panoramica storica riguardante l'evoluzione del settore e dei rapporti tra gli stessi operatori, nonché mostrare un'istantanea dell'odierna struttura della supply chain, risulta utile porre lo sguardo verso i futuri trend di sviluppo forniti dall'International Air Transport Association (IATA) [2]. Nella sua ricerca, l'ente suggerisce una crescita sostenuta, nell'arco dei prossimi anni, per il settore aerospaziale. I dati elaborati mostrano che al giorno d'oggi risulta impiegata di una flotta di 26.000 velivoli adibiti al trasporto di 3,5 miliardi di passeggeri e di 51 milioni di tonnellate di cargo, per un totale di 100.000 voli giornalieri. La stessa IATA prevede il manifestarsi di una crescita più che raddoppiata del numero di passeggeri entro il 2035, sino al raggiungimento di 7,2 miliardi di individui per anno, basandosi su un tasso di crescita annuale medio del 3,7%. Come già avvenuto per altri settori, l'ente stima che le regioni appartenenti al Sud-Est asiatico, tra cui la Cina e l'India, diventeranno i maggiori driver della domanda di velivoli a livello globale in sostituzione dei paesi occidentali. Nello specifico, lo studio dimostra che la Cina prevarrà sugli Stati Uniti, leader storici per il settore, e che l'India scavalcherà il Regno Unito ponendosi al terzo posto. Una crescita così dirompente pone i produttori situati sui diversi livelli della catena distributiva dinnanzi a una sfida senza precedenti. Considerata, infatti, la spiccata natura capital intensive delle imprese componenti il settore, risulterà determinante l'investimento in tecnologia ai fini dell'incremento della capacità produttiva, e in modo da far fronte alla crescente domanda. A tal proposito, la IATA stima una crescita della flotta di velivoli del 44% entro il 2034, passando dagli attuali 26.000 mezzi ai 37.500 previsti. Una tale espansione della domanda provocherà inevitabilmente una crescita degli ordini per i produttori, con conseguente notevole incremento del proprio backlog di magazzino. Poiché l'industria in questione si pone in totale antitesi rispetto alla produzione di massa, una crescita degli ordini in corso provocherà sicuramente uno slittamento dei relativi tempi di consegna nel caso in cui non si intervenga in favore dell'incremento della capacità produttiva. Osservazioni intervenute nel decennio compreso tra il 2004 e il 2015 hanno già chiaramente mostrato l'emergere del trend sopracitato. Nello stesso decennio, la quantità di ordini di velivoli è più che quintuplicata. Si è, difatti, passati dalle 2.500 unità in backlog equivalenti a 4 anni di lavoro nel 2004, alle 13.467 unità richieste per il 2015, stimate questa volta in 9,6 anni di lavoro.

Per meglio comprendere la direzione seguita dallo sviluppo sopracitato, nonché l'odierna struttura caratterizzante il settore aerospaziale, risulta utile fornire una panoramica storica relativa al suo stesso processo evolutivo.

1.1.1 Evoluzione storica del settore aerospaziale

Il presente paragrafo mira a riassumere le vicende storiche che hanno accompagnato lo sviluppo del settore aerospaziale. A tal proposito, si pone particolare attenzione all'evoluzione della struttura della supply chain e dei rapporti tra gli stessi soggetti che la compongono.

Sebbene l'invenzione del primo aeroplano risalga al 1903 a opera dei fratelli Wilbur e Orville Wright, la nascita del settore aerospaziale viene situata solamente intorno al 1910. Secondo Rose-Andersen et al. [3], l'evoluzione all'interno del settore ha sempre avuto un carattere che può essere definito olistico. Nel corso degli anni, essa ha abbracciato tutti gli aspetti caratterizzanti il settore, a partire da quelli tecnologici legati ai processi di produzione sino a quelli organizzativi legati al management intra e interaziendale. Storicamente, il principale driver che ha sospinto l'evoluzione del settore è stata la ricerca militare: legata prima ai Conflitti Mondiali, e in seguito alla Guerra Fredda. Le competenze acquisite in tali contesti sono state in seguito riversate in ambito civile, a beneficio dei produttori di velivoli commerciali adibiti a cargo e trasporto umano.

Il primo decennio del '900 si è caratterizzato per una produzione artigianale di velivoli destinati a pochi facoltosi clienti. In tale contesto, la progettazione assumeva un carattere di tipo trial-and-error ed era completamente affidata alle mani di pochi esperti artigiani. Negli anni immediatamente successivi alla concezione dei primi aeroplani, non esisteva ancora il minimo cenno della nascita di un tessuto industriale attorno alla loro produzione. Con l'avvento della corsa agli armamenti conseguente l'emergere del primo conflitto Mondiale, il nascente settore dell'aviazione ha subito una brusca accelerata. Il forte impegno economico immesso dal Governo degli Stati Uniti ne ha rapidamente favorito lo sviluppo tecnologico, rendendo gli USA il principale attore a livello globale. Nello stesso periodo, sono emersi due aspetti che avrebbero caratterizzato l'evoluzione futura del settore: l'outsourcing e la segmentazione del lavoro. Del primo, il Governo statunitense ne fece ampio uso per i propri programmi militari scegliendo i fornitori più congeniali. Nello specifico, si avvale della collaborazione dei soggetti dedicati alla produzione dei powerplants, ovvero delle unità deputate alla spinta propulsiva del velivolo. A tal proposito, il motore costituisce l'elemento fondamentale di tali sistemi. Per quanto riguarda il secondo elemento, l'introduzione della segmentazione del lavoro, questi è stato naturale conseguenza dell'eccesso di domanda creatasi per via della corsa agli armamenti. Difatti, il considerevole ingresso di manodopera scarsamente specializzata all'interno degli impianti produttivi ha comportato la necessità di frammentare il lavoro in innumerevoli attività a scarso valore aggiunto.

Il decennio successivo alla conclusione del primo conflitto Mondiale, complici l'emergere della Grande Depressione del 1929 e il surplus di produzione avvenuto durante lo sforzo bellico, ha visto un crollo della domanda di velivoli, causando un'imponente paralisi produttiva del settore. All'interno della stessa cornice storica, si sono rafforzate le tecniche manageriali a disposizione delle imprese, complici le numerose trattative con i propri lavoratori richiedenti condizioni lavorative più adeguate.

L'emergere del secondo conflitto Mondiale ha conferito una nuova spinta al settore. Tra tutti, gli USA sono stati la nazione a trarne maggiore beneficio. Come affermano Rose-Andersen et al. [3], l'attività di outsourcing avviata nei decenni precedenti trovò la

propria consolidazione negli anni '40, grazie a una migliore diffusione delle competenze sia esplicite che tacite tra i soggetti appartenenti al settore aeronautico. Tuttavia, nonostante tali progressi persistevano ancora delle remore da parte dei produttori nell'affidare in subappalto la produzione di componenti ritenuti strategicamente significativi. Per tale ragione, essi erano propensi a esternalizzare lo sviluppo di tecnologie semplici, producendo internamente quelle suscettibili di vantaggio competitivo. Tale contesto storico ha visto l'emergere delle prime forme strutturate di supply-chain costruite attorno alla figura dell'airframe manufacturer, ovvero del soggetto incaricato dell'assemblaggio finale del velivolo. Lo sforzo bellico ha, inoltre, permesso il rafforzamento delle competenze degli operatori appartenenti alla catena di fornitura, cosicché negli anni immediatamente successivi alla conclusione del conflitto si sono consolidati diversi cluster maturi sia in Europa che oltreoceano.

Intorno al 1960 si svilupparono le prime collaborazioni internazionali basate sul processo di sourcing delle diverse tecnologie. Al fine di mitigare il rischio di dipendenza dal singolo partner, molte imprese decisero di sviluppare rapporti multipli con i propri fornitori o clienti. Un chiaro esempio è fornito dalla stessa Roll Royce, la quale si poneva già come partner produttore di unità powerplant per imprese sia americane che europee [3].

In Europa gli anni '70 videro la nascita del consorzio Airbus per la produzione di velivoli in aperta competizione con gli Original Equipment Manufacturers (OEM) statunitensi dominanti il mercato sin dai suoi albori. Tale evento segnò una netta biforcazione nel processo evolutivo del settore. Da un lato, la supply chain di stampo europeo si caratterizzava per i suoi processi decisionali decentralizzati coinvolgenti molteplici attori. Negli USA, al contrario, dominava e avrebbe ancora dominato per diversi anni la figura centrale dell'OEM posta sull'apice della catena di fornitura [3].

L'ultimo decennio del ventesimo secolo si è contraddistinto per una forte crisi nella domanda di velivoli da parte delle compagnie di trasporto, nonché per una profonda ristrutturazione dei processi operati dalle stesse imprese produttrici. Considerata l'alta specificità del prodotto, all'interno della stessa finestra temporale si è consolidato il processo di Total Quality Management (TQM) per il suo sviluppo, ed è stato introdotto il modello Just in Time (JIT) per la minimizzazione delle scorte in magazzino. L'affermarsi di tali metodologie è stato ampiamente facilitato dalla consolidazione delle tecnologie IT all'interno del tessuto industriale.

Gli inizi del 2000 furono segnati dalla tragedia delle Twin Towers. L'evento causò una brusca flessione dell'aviazione civile, con una netta riduzione della domanda di passeggeri. Un tale calo si è attestato al 30% nell'immediato successivo l'accaduto, mentre si è verificata una riduzione strutturale della domanda pari al 7% negli anni successivi [4]. I primi anni del nuovo millennio si caratterizzarono anche per la concentrazione del settore attorno ai principali Prime Manufacturers Boeing e Airbus. Tali soggetti, nel corso della loro storia, furono capaci di erigere forti barriere all'ingresso per i nuovi entranti, richiedenti considerevoli investimenti in capitale al fine del raggiungimento di una scala minima efficiente.

Il settore odierno ha un carattere assolutamente globale e segue il trend dettato all'inizio del millennio. Esso pone gli operatori sui diversi livelli della supply chain alla continua ricerca della frontiera tecnologica, ritenuta fonte di vantaggio competitivo sulle imprese concorrenti.

1.1.2 L'odierna struttura della supply chain

Dalla ricerca presentata dall'AeroDynamic Advisory e dalla Teal Group Corporation [1] è emerso un valore complessivo per il settore aerospaziale nel 2017 pari a 838 trilioni di dollari¹. Gli stessi OEM valgono complessivamente il 54% dell'intero indotto, per un totale di 452,5 trilioni di dollari. Il continente Americano, dal canto suo, concentra più della metà dell'intero valore del settore con una quota pari al 54%. Seguono le regioni appartenenti all'EMEA (Europe, Middle East, Africa) con il 31%, e l'APAC (Asia Pacific) con il 15% del prodotto totale. Emerge, inoltre, una forte concentrazione del settore, con l'87% del prodotto globale racchiuso nei primi 10 paesi classificati. Gli USA, ad esempio, si pongono in posizione di assoluta dominanza con un indotto di 410 trilioni di dollari pari al 49% del prodotto totale. Una tale percentuale risulta superiore al valore cumulato delle quote appartenenti ai 25 paesi che seguono in lista [1]. I risultati mostrati sembrerebbero predire l'impossibilità di affacciarsi a qualsiasi nuovo entrante. Tuttavia, come in precedenza accennato e affermato da Luna et al. [2], l'ingresso di paesi quali Cina e India all'interno del settore ha portato alla creazione di cluster emergenti in aperta competizione a quelli occidentali più maturi.

Al giorno d'oggi la supply chain poggia su solide relazioni internazionali tra le diverse imprese operanti nel settore. Diversi Prime Manufacturers (PM) riescono a stipulare molteplici contratti di partnership con imprese specializzate nella realizzazione, ad esempio, di componenti con elevata densità tecnologica come le unità powerplant di propulsione dei velivoli. Un esempio lampante, è derivato dal caso di Boeing. Per il suo 787 Dreamliner, l'azienda ha stipulato contratti con subfornitori esterni per il 65% dei suoi componenti, scegliendone addirittura 28 al di fuori del territorio statunitense [5]. La **Figura 1** mostra un esplosivo delle componenti del 787 Dreamliner prodotte in outsourcing. Un modello di business così strutturato trasforma il PM in integratore di sistemi, offrendogli la possibilità di spalmare i costi di sviluppo e gli oneri di progettazione lungo la catena di fornitura, nonché di affacciarsi a nuovi mercati grazie alle rinnovate relazioni internazionali [5].

¹ Relazione annuale pubblicata il 16 luglio 2018. Il riferimento alla stessa è contenuto in fondo al testo.

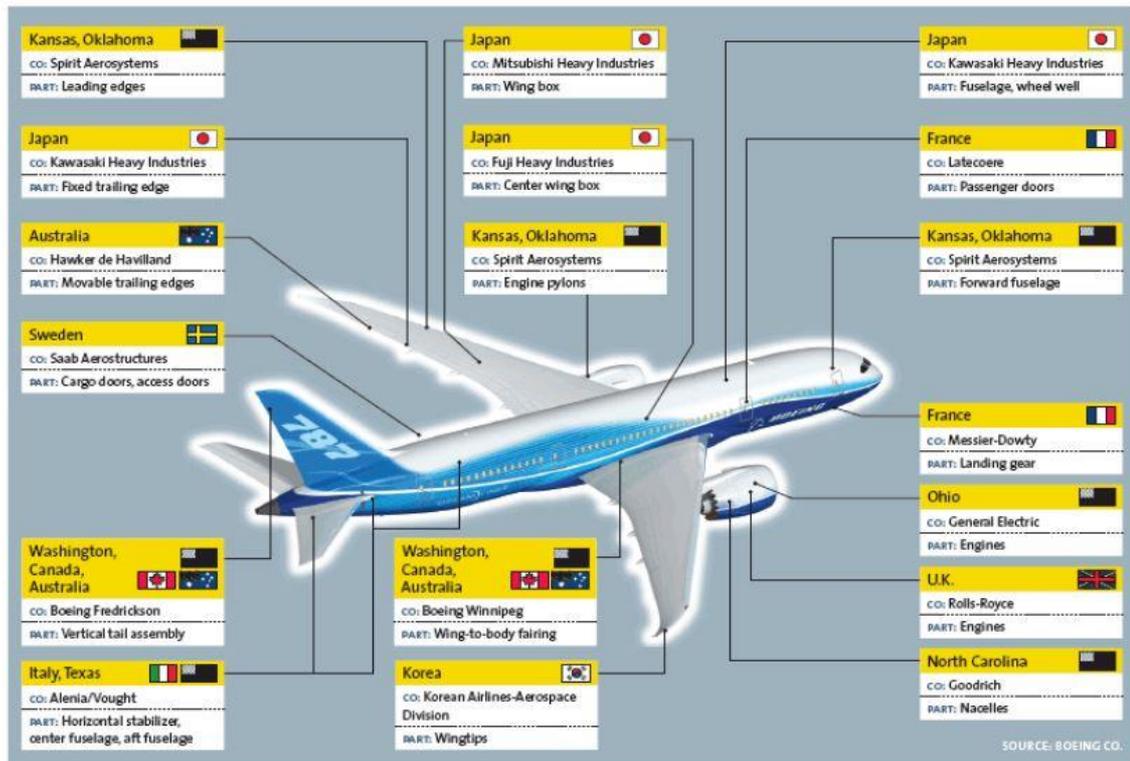


Figura 1: Boeing 787 Dreamliner, componenti sviluppate in outsourcing, fonte [5]

La successiva **Figura 2** schematizza la struttura della supply chain per il settore aerospaziale. La sua ricostruzione è stata eseguita a partire dalla ricerca svolta da TresVista Financial Services [6]. In cima alla struttura piramidale si collocano gli Airframe Manufacturers che hanno il ruolo di controllare la progettazione, nonché di produrre e assemblare il velivolo nella sua globalità. Come affermato in precedenza, essi si caratterizzano per essere il componente più critico e a più elevato valore aggiunto dell'intera catena di fornitura. I maggiori soggetti operanti sul mercato su tale livello della supply chain sono Boeing, Airbus, Bombardier e Embraer. Immediatamente più in basso nella catena, si situano i fornitori di livello 1 (tier-1), i quali supportano gli assemblatori del livello superiore fornendo loro sistemi complessi quali unità powerplant, sistemi alari, carrelli di atterraggio oppure fusoliere. Come nel precedente caso, esistono poche imprese a elevato valore aggiunto. Nello specifico, gettando uno sguardo alla produzione dei sistemi powerplant contenenti gli stessi motori a turbina, si contano tre principali imprese: General Electric nella sua divisione Aviation, Roll Royce e Pratt & Whitney. I sottostanti produttori di livello 2, dal canto loro, sviluppano componenti coerentemente alle specifiche fornite dai PM e dai fornitori tier-1. In generale, procedendo verso la base della struttura piramidale aumenta il numero delle imprese e diminuisce il valore aggiunto dalle stesse apportato alla supply chain. Al secondo livello si possono annoverare Goodrich, Messier Dowty, Honeywell e K&F come produttori di pneumatici e sistemi frenanti facenti parte del carrello di atterraggio del velivolo. Le imprese appartenenti al terzo strato costituiscono un mercato più ampio e frammentato rispetto ai livelli superiori e, in generale, si occupano di rifornire sia gli OEM che i rispettivi subappaltatori di hardware, componenti elettrici e semilavorati. Infine alla base della struttura piramidale si colloca

un numero vasto di soggetti tier-4, i quali riforniscono i propri clienti con materiale grezzo e con minuteria impiegata per le lavorazioni e per i montaggi.

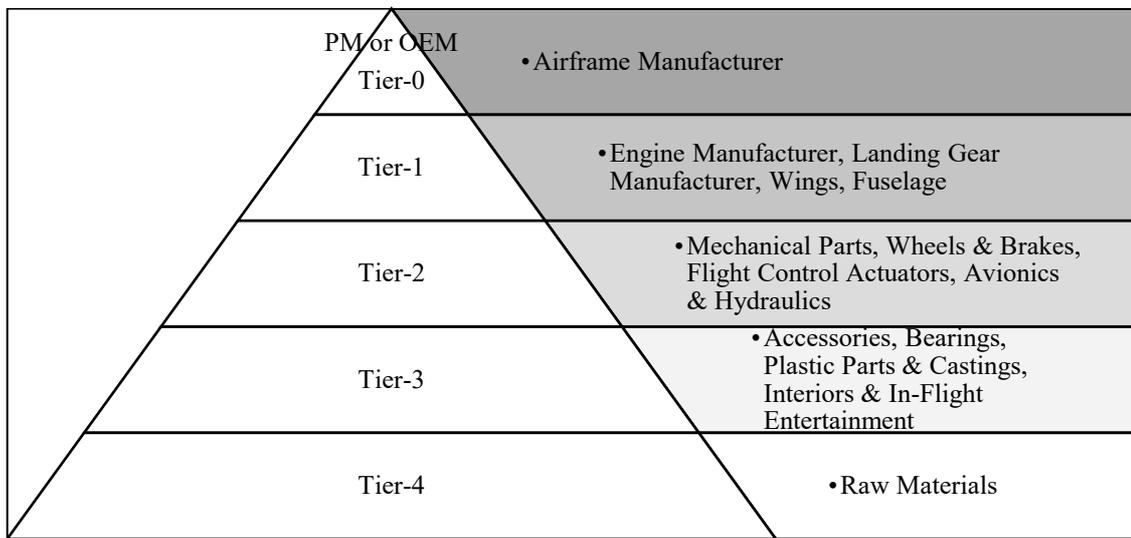


Figura 2: Supply Chain su 5 livelli per il settore aerospaziale, elaborato da [6]

Questo primo paragrafo descrittivo dell'industry aerospaziale ha permesso di inquadrare il contesto nel quale è stato innestato il processo di ricerca illustrato nel presente elaborato. Nello specifico, l'azienda ospitante l'attività qui esposta si pone all'interno del tier-2 mostrato in **Figura 2** essendo responsabile del manufacturing delle principali componenti del motore a turbina del velivolo. A tal proposito, al fine di fornire una migliore comprensione del prodotto trattato, all'interno del prossimo paragrafo ne vengono illustrati i principi termodinamici generali per il funzionamento e le relazioni tra le principali componenti che lo costituiscono.

1.2 I principi di funzionamento dei motori a turbina

All'interno del presente paragrafo verranno illustrati i motori basati sul principio di funzionamento della turbina a gas. Il riferimento teorico agli argomenti trattati, debitamente adattato agli scopi del testo, è da ricercare nel contributo fornito dal Glenn Research Center [7], nei testi di Farokhi [8] e Walsh [9], nonché negli articoli di Dankanich et al. [10], Kroeger [11] e Ahmad et al. [12]. L'attenzione sarà posta unicamente sulla famiglia dei motori a turbina di tipo turbofan, a cui appartiene la serie GE9X per la quale è stato svolto il progetto di ricerca finora discusso. Le ulteriori tipologie di motori basate sullo stesso principio termodinamico – tra cui i turbojet, i turboprop ed i turboshaft – non sono incluse all'interno del presente elaborato, in quanto non centrali per gli argomenti che si intendono esporre.

1.2.1 I principi termodinamici su cui poggia il funzionamento di un motore a turbina di tipo turbofan

Oggigiorno i motori a turbina di tipo turbofan costituiscono la stragrande maggioranza delle unità powerplant montate sui velivoli adibiti al trasporto commerciale di cargo e di passeggeri. Il loro funzionamento di massima risulta del tutto sovrapponibile a quello di una comune turbina a gas. Esso si basa, infatti, su un processo ciclico nel quale il fluido, ovvero l'aria proveniente dall'ambiente esterno, viene ingerito, compresso, combusto, espanso e infine espulso dal motore al fine di generare una spinta propulsiva capace di muovere il velivolo e di contrastare le forze inerziali del movimento. Le trasformazioni termodinamiche descritte si legano ad altrettante principali componenti, o stazioni, costituenti la struttura motore. Si annoverano rispettivamente: l'inlet e il fan per l'ingestione della massa d'aria, il compressore (a bassa e alta pressione) per la riduzione del volume del fluido ingerito, il combustore per l'incremento della sua energia termica, la turbina (ad alta e bassa pressione) per la conversione in energia cinetica, il nozzle o ugello di scarico per l'espulsione dei combustibili. La **Figura 3** fornisce una rappresentazione della sezione trasversale di un motore turbofan, nella quale si mettono in evidenza le principali componenti numerate che vengono coinvolte dal ciclo termodinamico.

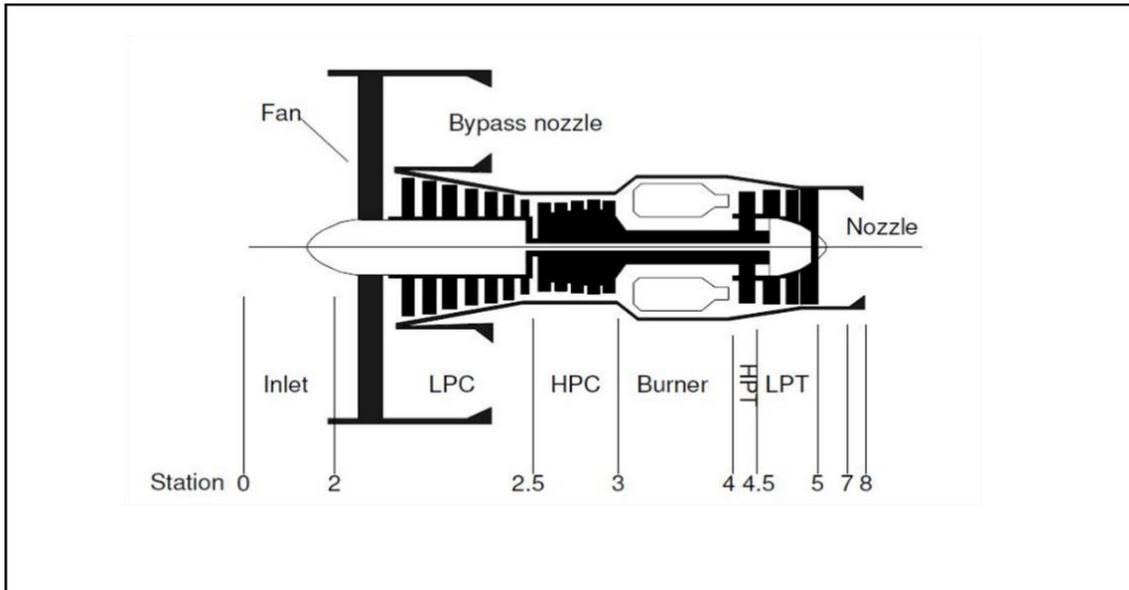


Figura 3: sezione di un motore a turbina turbofan con le principali stazioni in evidenza, fonte [13]

L'approccio utilizzato nell'illustrare il funzionamento del motore segue il flusso che coinvolge la massa d'aria. Si procede, dunque, dalla sua ingestione attraverso le serie di pale rotanti costituenti la coppia inlet-fan, sino alla sua espulsione a opera del nozzle di scarico. Il ciclo descritto poggia sulla nota Legge dei Gas Ideali, formulata nel 1834 da Émile Clapeyron, secondo cui la pressione P , il volume V e temperatura assoluta T dei fluidi ideali sono correlati dall'espressione $PV=nRT$, dove si assumono n (numero di moli del gas) ed R (costante dei gas perfetti) di trascurabile influenza ai fini della valutazione del processo. L'equazione citata conduce a risultati noti. Se il gas viene compresso, ovvero ne viene forzatamente ridotto il volume, il bilanciamento della relazione richiede un proporzionale aumento dei valori di pressione e di temperatura, mantenendo costanti le grandezze n ed R . Viceversa se il fluido viene espanso. L'assunto di perfezione del fluido, sebbene relativamente forte e nella realtà poco riscontrabile durante il normale funzionamento del motore, risulta utile all'illustrazione dei principi termodinamici generali che si vogliono mettere evidenza all'interno del testo. Da tale punto di vista, le trasformazioni coinvolte all'interno del funzionamento globale di un motore turbofan fanno diretto riferimento al ciclo ideale di Brayton-Joule (**Figura 4**).

Siano P , V , T , S rispettivamente la pressione, il volume, la temperatura e l'entropia del fluido ideale coinvolto nel ciclo termodinamico di Brayton-Joule. Il compressore, dopo aver ricevuto la massa d'aria proveniente dalla coppia inlet-fan nelle condizioni 1, la comprime isoentropicamente sino alla pressione P_2 , con scambio di lavoro L negativo ($L_{12}<0$) assorbito dal sistema. A valle della prima trasformazione si ottiene un fluido a più alte pressione e temperatura e a minor volume, coerentemente al bilanciamento della relazione dei gas ideali sopraccitata. L'aria compressa viene successivamente inviata, assieme a un'adeguata quantità di propellente, all'interno del combustore ove ha luogo un riscaldamento isobaro (trasformazione 2-3) che porta alla formazione dei prodotti della combustione ad elevata temperatura (T_3). I gas caldi così ottenuti vengono espansi isoentropicamente (trasformazione 3-4) dalla turbina sino al raggiungimento della

pressione iniziale P_1 , con scambio di lavoro positivo ($L_{34} > 0$) ceduto dal sistema, nonché riduzione della temperatura sino al valore T_4 . A questo punto, la massa d'aria viene espulsa a pressione costante nell'ambiente esterno a opera del nozzle di scarico, il sistema si raffredda cedendo una quantità di calore QL , e il ciclo termodinamico è pronto a ripartire nuovamente dalle condizioni iniziali.

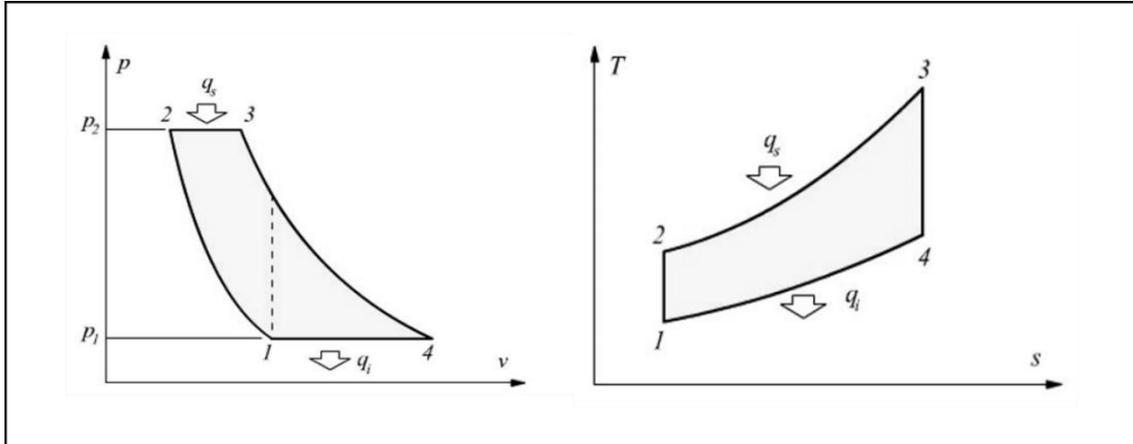


Figura 4: ciclo termodinamico di Brayton-Joule per il funzionamento di un motore a turbina

In riferimento a quanto appena descritto, la **Figura 5** tratta dal portale del Glenn Research Center [7] offre una rappresentazione della variazione subita dalle variabili termodinamiche P e T sopracitate in funzione dell'attraversamento, da parte della massa d'aria, delle diverse stazioni di un motore a turbina di tipo turbofan. Essa fa uso di una scala cromatica il cui gradiente tendente verso le tonalità più calde è indicativo dell'aumento del valore assunto dalle variabili in esame. Per le ragioni sopraesposte, i valori più elevati di temperatura si riscontrano in ingresso alla turbina, mentre le temperature più basse corrispondono al flusso in entrata e parte di quello in uscita al motore. Per quanto riguarda la pressione della massa d'aria, invece, il picco massimo corrisponde al prodotto della compressione, mentre il minimo si riscontra nelle stesse regioni rispetto a quanto visto per la temperatura. La stessa figura mette, inoltre, in evidenza una particolarità dei motori turbofan, ovvero la biforcazione del flusso seguito dalla massa d'aria ingerita. Come verrà reso noto nel paragrafo dedicato alla coppia inlet-fan (1.2.2.1), una parte del fluido viene convolta direttamente nel ciclo termodinamico di Brayton-Joule, mentre un quota più significativa attraversa un condotto di bypass che permette di espellere direttamente l'aria verso l'ambiente esterno.

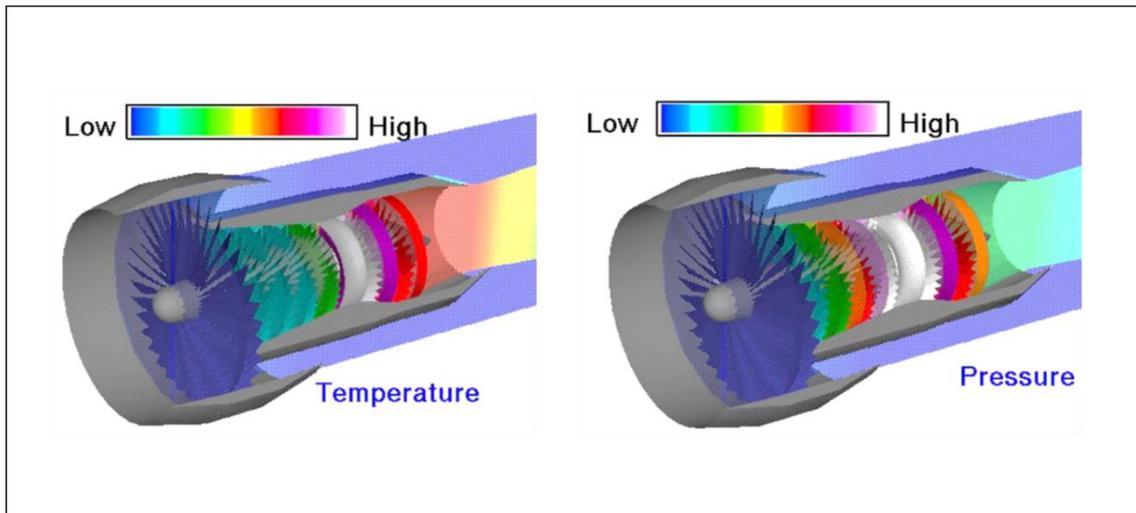


Figura 5: variazione della pressione e della temperatura della massa d'aria coinvolta nel ciclo di Brayton-Joule all'interno di un motore a turbina di tipo turbofan, fonte [7]

1.2.2 Le relazioni tra le principali stazioni di un motore a turbina di tipo turbofan

Con il presente paragrafo, si intende fornire un maggiore dettaglio in merito alle singole stazioni costituenti il motore a turbina di tipo turbofan. Con l'ausilio nuovamente della **Figura 3**, si descrivono le principali relazioni tra le stesse componenti in riferimento alla singola iterazione del ciclo termodinamico in precedenza illustrato.

1.2.2.1 Stazioni 0-2: ingestione della massa d'aria libera

Come mostrato dalla precedente **Figura 3**, le stazioni 0-2 del motore turbofan sono definite dalla inlet e dallo stesso fan. La prima costituisce l'imbocco attraverso il quale la massa d'aria proveniente dall'ambiente esterno viene portata verso l'interno del motore. Il fan, invece, mettendo in rotazione le sue diverse serie di pale, è l'autore della forza attrattiva esercitata sul fluido libero. La **Figura 6** ne fornisce una ricostruzione ottenuta tramite un software di modellazione CAD. In sede di montaggio, il fan viene direttamente collegato al compressore a bassa pressione (LPC) e alla turbina a bassa pressione (LPT) per mezzo dell'albero di trasmissione assiale a bassa pressione. Come già anticipato, la tipica configurazione assunta dai motori a turbina di tipo turbofan prevede la biforcazione del flusso d'aria in ingresso (**Figura 7**). L'aria assorbita dal motore viene, difatti, incanalata in due condotti. Una prima porzione di natura minoritaria procede verso il core engine, dove viene utilizzata per il ciclo termodinamico di Brayton-Joule. Essa viene, di conseguenza, definita con l'espressione flusso core. La rimanente quota, generalmente sensibilmente maggiore rispetto alla prima, viene incanalata nel condotto di bypass e non partecipa direttamente al ciclo termodinamico. Per il suo caratteristico percorso, essa viene anche rinominata come flusso di bypass. Il rapporto tra lo stesso e il flusso core, definisce il cosiddetto Bypass Ratio (BPR), o rapporto di bypass, considerato un

importante indicatore di performance per l'efficienza del motore turbofan. Al crescere della sezione trasversale del fan, aumenta difatti la massa d'aria in ingresso al motore, cresce il numeratore del BPR, e migliora la sua efficienza propulsiva. Infatti, il rapporto di bypass si dimostra essere inversamente proporzionale a un secondo importante indicatore di performance relativo all'efficienza del motore, ovvero il Thrust Specific Fuel Consumption (TSFC) [10]. Questo è indicativo della quantità di combustibile impiegato per unità di propulsione. Stanti le precedenti affermazioni, al crescere del diametro del fan aumenta proporzionalmente la massa d'aria che attraversa il condotto di bypass; di conseguenza, a parità di carburante immesso nella camera di combustione, cresce la spinta propulsiva del motore e si ottiene una maggiore efficienza in termini di consumi [11]. La **Figura 8** riassume all'interno del diagramma posto sulla sinistra la relazione decrescente tra BPR e TSFC, mentre in quello situato sulla destra mette in evidenza i benefici, nella misura di minori consumi, che si ottengono da un incremento del rapporto di bypass. Come si può notare dai due diagrammi, entrambi il TSFC e il risparmio di carburante tendono al proprio valore asintotico, in quanto i benefici marginali di una maggiore superficie adibita all'ingestione della massa d'aria si scontrano con una maggiore massa di motore, e quindi con una peggiore resa in termini di efficienza propulsiva.

Volendo riassumere quanto esposto all'interno del paragrafo, la stazione 0-2 del motore turbofan hanno il compito di ingerire l'aria dall'ambiente esterno e di biforcarla verso due condotti separati. All'interno della sezione di bypass, la massa d'aria fredda viene direttamente guidata verso il nozzle di scarico, generando la maggiore porzione della spinta propulsiva per il movimento del velivolo. Una quota minoritaria, invece, viene coinvolta all'interno del core engine, dove subisce le trasformazioni descritte dal ciclo termodinamico ideale di Brayton-Joule.

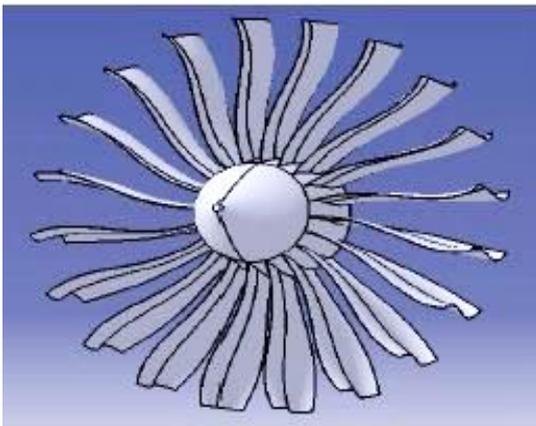


Figura 6: ricostruzione CAD del fan, fonte [12]

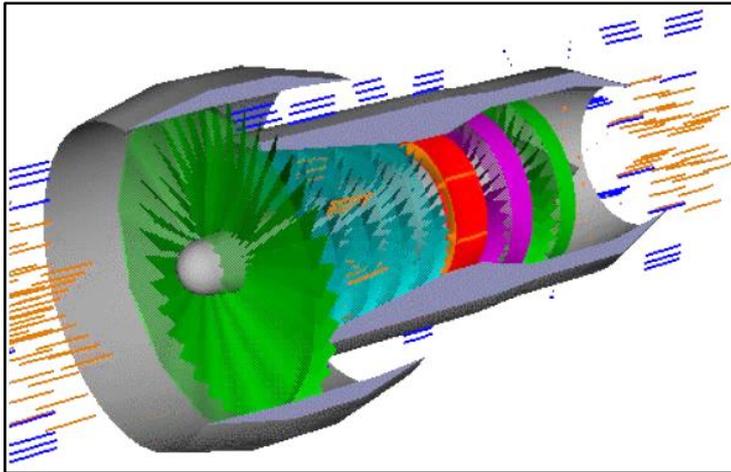


Figura 7: separazione dei flussi di Bypass e Core all'interno del motore turbofan, fonte [7]

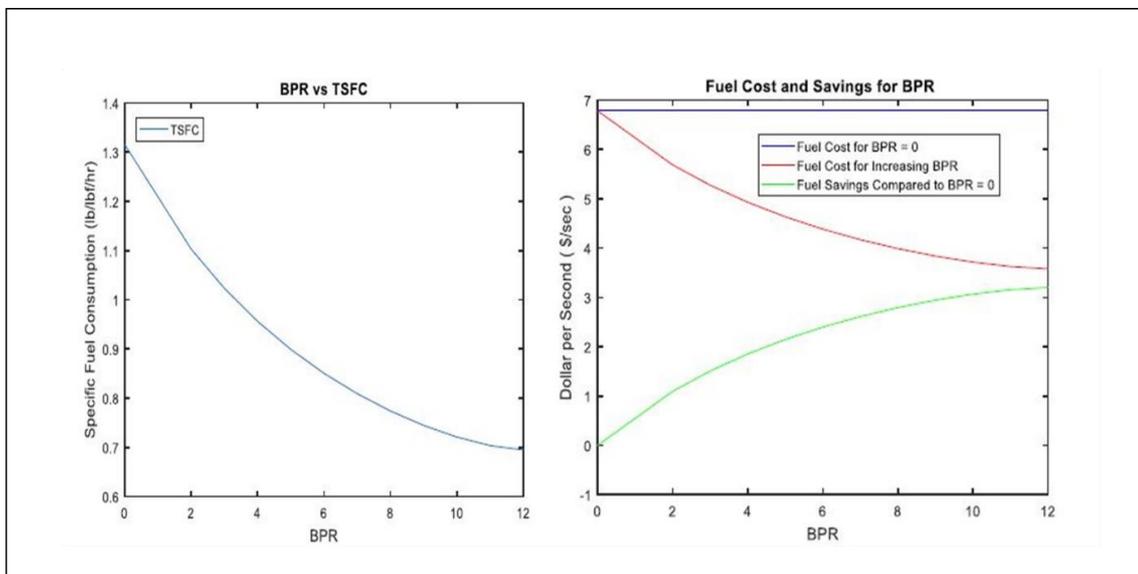


Figura 8: rapporti TSFC-BPR sulla sinistra e risparmio carburante-BPR sulla destra, fonte [10]

1.2.2.2 Stazioni 2.5-3: compressione della massa d'aria in ingresso nel core engine

Come già ampiamente illustrato, l'obiettivo della fase di compressione consiste nell'incremento dell'energia termica della massa d'aria in ingresso attraverso una riduzione forzata del suo volume. Il compressore è composto da due distinte sezioni. La prima, a bassa pressione, denominata con la sigla LPC, si pone immediatamente a valle del fan, la seconda, ad alta pressione (HPC), si situa invece a monte della camera di combustione (stazione 4 in **Figura 3**). La **Figura 9**, al pari di quanto mostrato nel caso del fan, offre una ricostruzione del compressore a opera di un software di modellazione CAD.

La sezione a bassa pressione del compressore, ovvero la stazione LPC, è connessa al fan e alla turbina a bassa pressione (LPT) per mezzo dell'albero assiale a bassa pressione. Essa assume il compito di spingere l'aria nelle sezioni più interne del motore. Man mano che il fluido procede in tale direzione, il diametro della stazione 2.5 si riduce, causandone una riduzione di volume con conseguente incremento delle rispettive pressione e temperatura. L'aria in uscita dal LPC confluisce direttamente nel compressore ad alta pressione (stazione 3). L'HPC, a sua volta, viene connesso alla turbina ad alta pressione (HPT) per mezzo del rispettivo albero assiale di trasmissione a elevata pressione. Similmente al compressore a bassa pressione, su di esso sono montate diverse file di pale rotanti che comprimono ulteriormente la massa d'aria e la guidano verso le sezioni più interne del motore, nello specifico verso la camera di combustione (burner).

1.2.2.3 Stazione 4: combustione della massa d'aria compressa

La combustione avviene all'interno della rispettiva camera montata immediatamente a valle del compressore ad alta pressione (HPC), nonché a monte della turbina a elevata pressione (HPT). In **Figura 3** essa viene identificata come la stazione 4 del motore turbofan. La **Figura 10**, dal canto suo, mostra il componente attraverso una sua rappresentazione CAD.

Il processo che avviene all'interno del combustore è alquanto semplice. La massa d'aria pressurizzata, proveniente dal compressore ad alta pressione, viene qui miscelata al carburante incamerato all'interno del motore al fine di innescare un processo di ignizione. I gas caldi ottenuti vengono, poi, direttamente dirottati verso la turbina ad alta pressione (HPT), affinché possa innescarsi il processo di conversione dell'energia termica in essi contenuta in energia cinetica utile al ripristino del ciclo.

1.2.2.4 Stazioni 4.5-5: espansione del fluido e conversione dell'energia

Il fluido caldo pressurizzato proveniente dal combustore viene prima espanso all'interno della turbina ad alta pressione (HPT), e successivamente in quella a bassa pressione (LPT). La **Figura 11** mostra una ricostruzione CAD della turbina all'interno di un motore turbofan. Similmente al compressore, essa possiede di diverse file di pale rotanti utili alla movimentazione della massa d'aria. L'obiettivo della turbina è quello di estrarre l'energia potenziale dal fluido caldo in ingresso e di convertirla in energia cinetica, capace di innescare la rotazione del compressore e del fan. In questo modo, si genera un processo di natura circolare che coinvolge interamente il fluido confluyente all'interno del core engine.

La turbina ad alta pressione (stazione 4.5 in **Figura 3**) viene montata direttamente a valle del combustore, nonché connessa al HPC per mezzo dell'albero assiale a elevata pressione. L'aria che ivi confluisce ha temperatura e pressione elevate per via del recente processo di combustione. Contrariamente a quanto avviene per il compressore, l'aria all'interno della turbina viene espansa, con conseguente riduzione delle relative pressione e temperatura per via della crescente sezione trasversale dello stesso componente. A valle

dell'HPT si colloca la turbina a bassa pressione (stazione 5). Essa opera in totale continuità con la sezione che la precede. All'interno della LPT, dunque, l'estrazione di energia cinetica dal fluido ancora caldo mette in rotazione, attraverso l'albero a bassa pressione, il fan e il compressore a bassa pressione. Questi, a sua volta, veicola l'aria nell'HPC che, alimentando il combustore, offre nuovamente il fluido caldo alla LPT, descrivendo perciò un processo di natura ciclica. Una volta trasformata l'energia termica contenuta all'interno dei gas combusti, essi vengono inoltrati in direzione del nozzle di scarico attraverso il quale confluiscono nuovamente nell'ambiente esterno.

1.2.2.5 Stazioni 7-8: eliminazione dei gas combusti a bassa energia

Il nozzle di scarico si colloca immediatamente a valle della turbina, formando perciò l'ultima stazione tra quelle mostrate in **Figura 3**. Nel caso del motore turbofan, esso viene attraversato sia dal flusso caldo coinvolto nel ciclo del core engine, sia dalla massa fredda attraversante il condotto di bypass. Possedendo, il flusso d'aria attraversante il motore, una maggiore energia potenziale rispetto al corrispettivo libero dell'ambiente esterno, si innesca una spinta propulsiva capace di sovrastare le forze inerziali che si oppongono al movimento del velivolo.

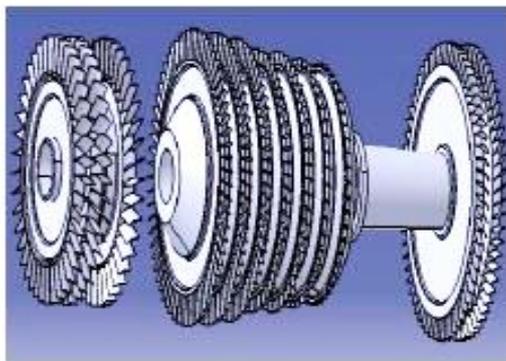


Figura 9: ricostruzione CAD del compressore (sinistra), fonte [12]

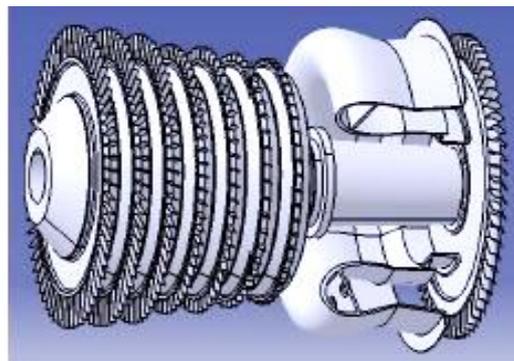


Figura 10: ricostruzione CAD del combustore (destra), fonte [12]

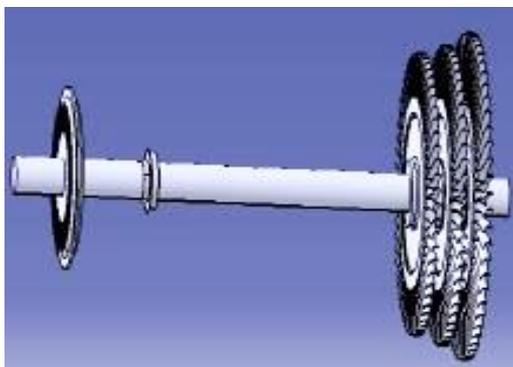


Figura 11: ricostruzione CAD della turbina, fonte [12]

1.3 La Gestione della Configurazione ed il processo di sviluppo prodotto in ambito aerospaziale

Una volta che le precedenti sezioni hanno chiarito il quadro contestuale e la struttura del prodotto per il quale si intende stimare il costo pieno, il compito del presente paragrafo consiste nel fornire una panoramica delle best practices derivate dalla letteratura in merito ai processi di New Product Development (NPD) e di Gestione della Configurazione per quelle imprese appartenenti a settori con elevata densità informativa, tra cui va considerato quello aerospaziale. La logica di esposizione degli argomenti prevede, innanzitutto, l'introduzione alla metodologia generale, seguita dalla relativa declinazione applicata al settore di cui nel presente elaborato. Prima di definire il processo di sviluppo prodotto adottato dagli stessi soggetti, verrà svolta un'importante digressione sulle pratiche di Configuration Management (CM) descritte dalla letteratura e declinate per l'ambito aerospaziale. In seguito, sarà fornita una panoramica del processo di sviluppo prodotto di una nuova turbina a gas adattata agli scopi del presente elaborato. Affinché il progetto possa avviarsi, esso deve soddisfare i requisiti a priori definiti dal produttore e dai clienti. A tal proposito, si presentano i rispettivi parametri di accettazione dei business cases decisionali. Una volta il progetto intrapreso, la letteratura fornisce diverse metodologie decisionali per valutarne la progressione, nonché l'aderenza con i requisiti stabiliti in sede contrattuale. Nello specifico, verrà illustrato il modello Stage-Gate®. Considerata l'elevata complessità di un progetto di sviluppo di una nuova turbina a gas, gli operatori del settore hanno riconfigurato il modello Stage-Gate® originale secondo la struttura del Tollgate a nove livelli. Una sua panoramica, accompagnata dalle principali attività costituenti ogni singola fase, viene fornita nella sezione conclusiva del paragrafo.

1.3.1 L'importanza di una corretta Gestione della Configurazione

In accordo con quanto postulato da Xu et al. [14], il Configuration Management (CM) si occupa della gestione dei cambiamenti lungo l'intero ciclo di vita di un prodotto. La sua importanza viene pienamente riconosciuta da diverse discipline quali il design, l'ingegneria, gli ambiti della produzione e dei servizi. Lo stesso studio definisce il CM come la gestione di tutte quelle attività che forniscono una particolare direzione tecnologica e amministrativa allo sviluppo, alla produzione, e al supporto di un determinato oggetto di configurazione. Le best practices relative alla sua applicazione sono raccolte nel manuale dell'International Council on Systems Engineering (INCOSE), il quale descrive il CM come un fondamentale mezzo per il controllo e la documentazione della storia evolutiva dei requisiti di un particolare prodotto. Difatti, come illustrato dalla successiva **Figura 12**, questi hanno spesso una natura fluida e tendono a evolvere e sostituirsi nell'arco del ciclo vitale di uno stesso prodotto.

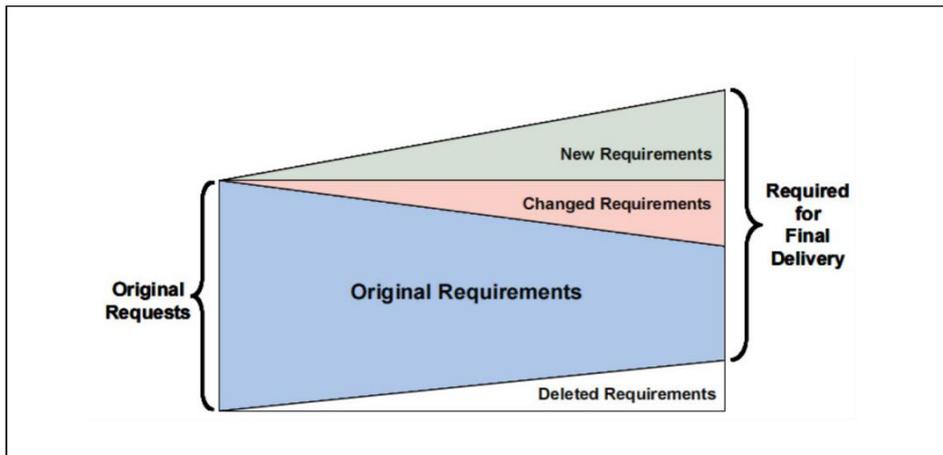


Figura 12: evoluzione dei requisiti di prodotto, fonte [14]

Gli stessi Xu et al. [14] suddividono l'approccio al Configuration Management in quattro sotto processi. Essi vengono nominati, rispettivamente, Configuration Identification, Change Management, Configuration Status Accounting, Configuration Auditing. Ognuno viene di seguito approfondito, mentre la **Figura 13** ne riassume le principali caratteristiche.

Innanzitutto, l'attività di Configuration Identification, critica per l'approccio al CM, si occupa dell'individuazione degli oggetti di configurazione (configuration items), nonché della rispettiva documentazione descrittiva. In tal modo, si possiede una base dati ordinata e univoca delle componenti costituenti prodotto.

Il Change Management, dal canto suo, gestisce i diversi cambiamenti occorrenti nella configurazione del prodotto nell'arco del suo ciclo di vita, con l'obiettivo di mantenere la consistenza con la relativa documentazione. Una tale responsabilità spetta sia al Configuration Identification Manager, sia al Configuration Change Control Board (CCB). A tal proposito, il CCB è un ente comprensivo degli stakeholders di progetto, i quali ne valutano i cambiamenti rispetto agli elementi critici, quali la sicurezza, i costi, i risparmi, nonché gli eventuali trade-offs rispetto a quanto inserito nella baseline.

Terzo componente del CM, il Configuration Status Accounting si occupa di preservare la validità delle informazioni sui prodotti e sui relativi processi nel caso in cui vengano sottoposti a verifiche. Esso funge, perciò, da fonte di accesso alle informazioni in merito alla configurazione, allo scopo di soddisfare quesiti relativi, ad esempio, alle design changes introdotte, a quelle in fase di attuazione oppure scartate.

Infine, il Configuration Auditing ha il compito di assicurare il soddisfacimento delle attività in precedenza illustrate. Gli audits possono essere svolti in diverse fasi del ciclo di vita del prodotto. Ad esempio, un'interrogazione svolta prima della definizione della baseline assicura una maggiore aderenza ai requisiti progettuali. Un audit funzionale, invece, ha lo scopo di verificare le caratteristiche funzionali del prodotto a seguito del processo di Configuration Identification. Infine, un audit fisico può essere svolto su un prodotto finito (as-built) per verificarne la conformità rispetto alla relativa documentazione registrata.

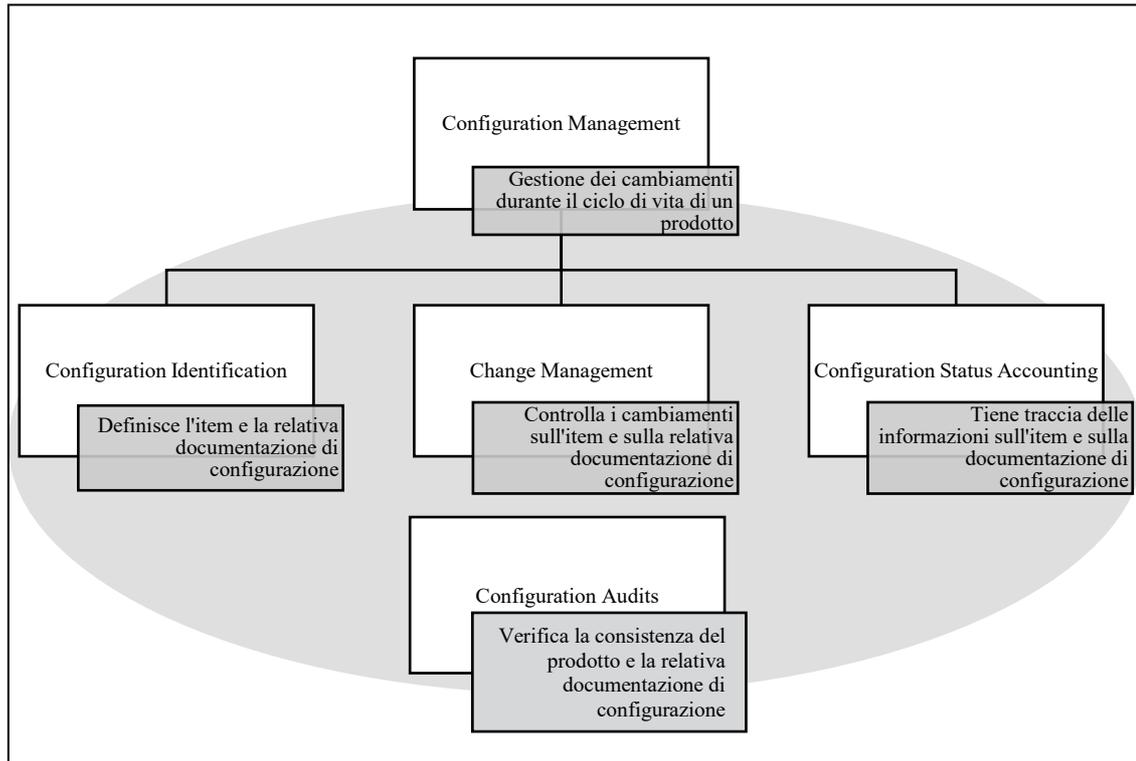


Figura 13: Gestione della Configurazione e sotto-processi, elaborato da [14]

Sulla base quanto affermato, risulta alquanto evidente come molte imprese appartenenti al settore aerospaziale stiano già applicando le pratiche più aggiornate del Configuration Management. Difatti, come si può facilmente desumere, un'erronea o mancata applicazione del CM può sfavorevolmente impattare la qualità del prodotto, può ritardarne la data di lancio, nonché incrementarne esponenzialmente il relativo Life-Cycle-Cost (LCC) [14]. Dai dati contenuti in letteratura, è emerso che diverse imprese in ambito Aerospace stanno già implementando tre sistemi per una migliore Gestione della Configurazione. Con riferimento alla ricerca di Xu et al. [14], essi vengono di seguito elencati:

- **Standardizzazione dei processi.** Al fine di implementare correttamente il CM, diverse imprese decidono di standardizzare l'insieme dei processi applicati ai propri dipartimenti. Tale attività include la formalizzazione di tutti i livelli dell'organizzazione, nonché l'introduzione di un sistema di controllo centralizzato che possa gestire i processi di cambiamento e monitorare la rispettiva configurazione di prodotto.
- **Estensione del CM con capabilities avanzate.** Il CM implementato dalle imprese più affermate in ambito aerospaziale utilizza una definizione di prodotto molto più ampia inclusiva, tra gli altri, dei processi di design, di engineering e di manufacturing. Un tale approccio permette di tenere conto dell'insieme dei dettagli emersi in tutte le fasi del suo ciclo di vita. Considerando i vincoli normativi imposti dalle autorità regolatrici in merito allo sviluppo e all'impiego di tale tipologia di prodotti, una pratica consueta impiegata dai soggetti appartenenti al settore aerospaziale consiste nell'integrazione della

documentazione tra gli elementi da considerare per la corretta implementazione del CM.

- **Abilitazione del Configuration Management.** Affinché possano implementare le migliori pratiche relative al CM, diverse imprese appartenenti al settore aerospaziale detengono un database informativo centralizzato. Il suo impiego favorisce un miglioramento delle performance legate alla gestione della configurazione, con una netta riduzione della proporzione di errori all'interno degli stessi dati. Un tale miglioramento può venir reso possibile grazie all'impiego di tecnologie dedicate al Product Data Management (PDM) o al Product Lifecycle Management (PLM).

Quanto descritto dimostra che per le imprese operanti all'interno del settore aerospaziale, produttrici di oggetti tecnologicamente complessi e vincolati da stringenti requisiti normativi, una corretta applicazione della Gestione della Configurazione risulta di vitale importanza per il successo del processo di sviluppo di un nuovo prodotto da immettere sul mercato. Una tale evidenza trova riscontro anche nel caso del soggetto aziendale ospitante lo studio illustrato dal presente elaborato. Al suo interno vengono difatti implementati gli stessi tre punti sopracitati. La loro trattazione, e in generale la presentazione delle best practices relative al CM, risultano utili per meglio comprendere l'organizzazione assunta dalle fonti da cui si è attinto per lo sviluppo dell'applicazione di calcolo dedicata alla stima del costo pieno dei motori appartenenti alla serie GE9X.

1.3.2 Lo sviluppo di un nuovo motore a turbina, le metodologie Stage-Gate® e Tollgate

Prima di entrare nel dettaglio dell'approccio metodologico usato dai soggetti aziendali per lo sviluppo di un nuovo motore a turbina, risulta utile fornire una panoramica generale del processo che lo caratterizza, come riassunto da Mattingly et al. [15] nel relativo testo dedicato alla progettazione degli aeroengines. La **Figura 14** ne fornisce una rappresentazione semplificata, utile ai fini della trattazione contenuta all'interno del presente elaborato.

Il punto iniziale dell'intero processo di sviluppo consiste nella presentazione della Request for Proposal (RFP), con la quale si sancisce l'effettivo avviamento del progetto. La corretta strutturazione della RFP necessita, tuttavia, della definizione dei requisiti di progettazione del motore da sviluppare, nonché dello svolgimento di diverse analisi di mercato propedeutiche alla comprensione dei parametri di costo e di diffusione del prodotto. Entrambe le attività vengono soddisfatte in sede di definizione del business case decisionale, con il quale si decide o meno l'avviamento del progetto. Una descrizione alle attività appena citate viene fornita più avanti. Una volta validata la RFP, il modello di Mattingly prevede l'inizio degli studi preliminari alla progettazione del motore, volti, rispettivamente, alla creazione del concept, alla scelta del ciclo produttivo, nonché alla definizione del layout dello stesso impianto. Conclusasi la fase di progettazione preliminare, prende il via una sequenza di attività iterative e reciprocamente correlate, con le quali si analizzano gli aspetti termodinamici, aerodinamici, meccanici e strutturali

del concept, al fine di pervenire gradualmente a un prodotto la cui configurazione sia del tutto aderente ai requisiti iniziali.

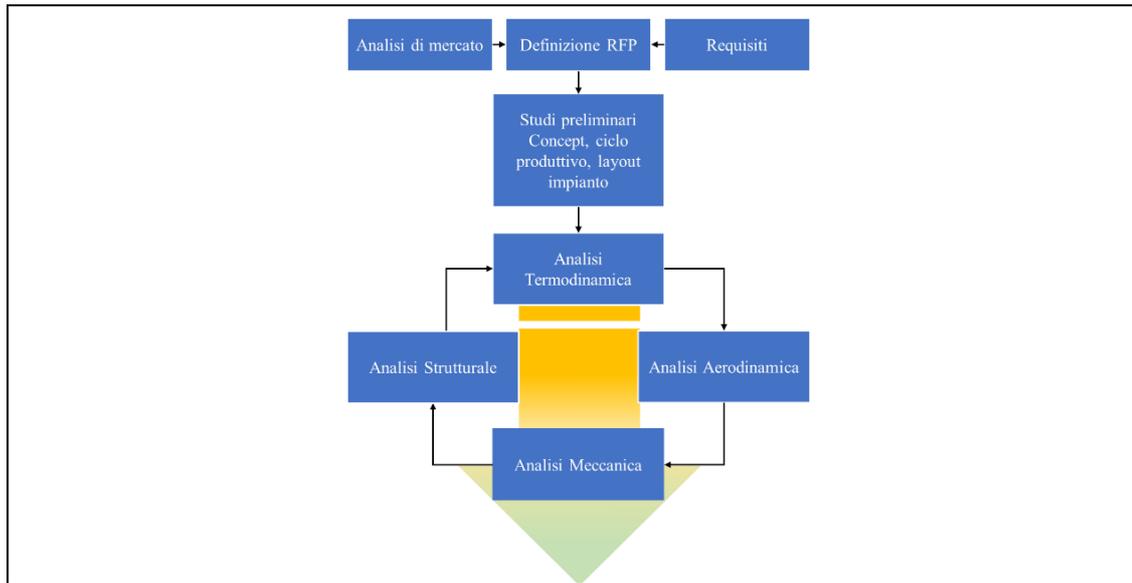


Figura 14: processo di sviluppo di un motore a turbina, elaborato da [15]

Come in precedenza accennato, un prerequisito fondamentale all'avviamento di un progetto di sviluppo di un motore a turbina è la definizione di un business case a opera del produttore e del richiedente. Considerando, infatti, i circa tre anni necessari per sviluppare ex-novo un motore per velivoli civili, nonché l'esborso di circa un miliardo di dollari per l'intero processo, risulta ovvio che gli aspetti economici connessi alle attività di sviluppo prodotto hanno un'importanza quantomeno pari a quelli tecnologici [16]. Difatti, negli ultimi anni le analisi tecnico-economiche sono diventate una prassi piuttosto che un'eccezione. D'altro canto, le performance del prodotto sono ormai inseparabili dal business case ad esso correlato, in quanto, ad esempio, il consumo di carburante di un motore impatta per circa l'85% dei costi operativi durante tutto l'arco del suo ciclo di vita.

Ognuno dei soggetti interessati valuta il relativo business case sulla base dei propri parametri di interesse. Da un lato, il produttore che si occupa di sviluppare il motore deve poter prevedere un soddisfacente ritorno sull'investimento richiesto per il processo di sviluppo. Ciò include un saldo positivo sull'investimento in capitale a supporto del progetto, oltre all'ovvio ritorno sui costi di progettazione e di sviluppo del prodotto. I ricavi percepiti non devono, inoltre, derivare esclusivamente dalla vendita delle nuove unità. Essi possono anche giungere dal supporto post vendita di parti sfuse, nonché dalle attività di riparazione e manutenzione offerte al cliente. Dall'altro lato, il cliente che andrà ad acquistare il prodotto secondo il modello di business più conveniente dovrà percepire un ritorno finanziario positivo basandosi sui propri parametri di performance. Affinché il prodotto abbia successo, entrambi i modelli devono risultare robusti e provvedere una situazione win-win per i soggetti interessati.

Ognuno valuta il proprio business case sfruttando particolari parametri di input, alcuni dei quali sono illustrati nel presente elaborato. Il richiedente valuta innanzitutto il costo del carburante, il quale costituisce il parametro più critico all'interno del proprio

business case. Diverse analisi suggeriscono una proporzione di costi relativi ai consumi che si attesta intorno all'85% della spesa operativa annuale correlata all'engine [16]. Il cost driver che andrà a utilizzare l'operatore sarà il costo per kWh di energia fornita dal carburante. Seguono come ulteriori parametri di valutazione il prezzo di vendita emesso dal produttore, nonché i costi previsti per manutenzioni e riparazioni. Per quanto concerne il produttore, egli svolge un'analisi previsionale delle vendite basandosi sui propri parametri storici e facendone inferenza. Una volta definita la propria quota, il produttore valuta il proprio business case sulla base del prezzo attribuito al motore, del numero di ordini che prevede di soddisfare, e dell'ammontare a cui verranno erogati i servizi post vendita. Il modello generalmente adottato è quello del cost plus. In tale situazione, i costi cui incorre il soggetto produttore sono presi come parametri fissi, da cui consegue un prezzo di vendita ottenuto tramite l'aggiunta di un mark-up che soddisfi il modello di business adoperato.

Una volta fornito un quadro generale per il processo di sviluppo di un nuovo motore a turbina e aver giustificato l'importanza della corretta definizione del business case propedeutico al suo avviamento, si pone l'attenzione verso modelli di gestione delle singole fasi che costituiscono l'attività. A tal proposito, la letteratura presenta il modello Stage-Gate® come uno dei principali approcci al decision-making nel contesto dello sviluppo di nuovi prodotti per quei settori a elevata densità informativa, come ad esempio quello aerospaziale [17]. Lo Stage-Gate® è processo strutturato per fasi durante le quali le singole attività vengono identificate, pianificate, eseguite, verificate e infine concluse. Al termine di ogni fase (stage) segue un processo di verifica (gate) su quanto svolto. A ogni riesame si decide se proseguire il processo di sviluppo allocandovi ulteriori risorse, oppure fermarlo nel caso in cui le previsioni di perdita superino benefici attesi. Il modello Stage-Gate® sviluppato da Cooper è stato per la prima volta implementato dalla NASA negli anni '60. Nella sua forma più conosciuta, esso viene raffigurato come mostrato in **Figura 15**.

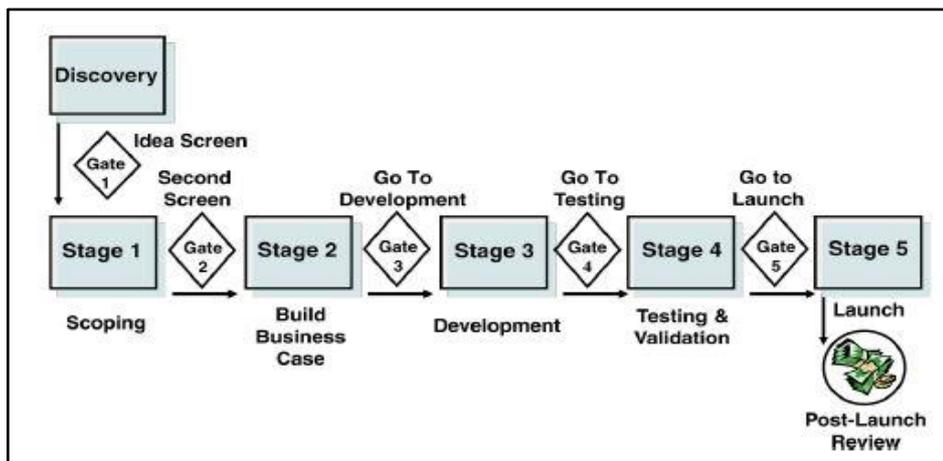


Figura 15: modello decisionale Stage-Gate®, fonte [17]

Potendo osservare il dettaglio di una singola iterazione all'interno della **Figura 15** soprastante, dentro di ogni stage si noterebbero una serie di attività predefinite, le quali risultano soggette a giudizio del successivo gate. Johansson et al. [17] affermano che ogni stadio del progetto si caratterizza per la raccolta delle informazioni necessarie all'attività,

per la sua esecuzione, nonché per l'analisi dei risultati conseguiti. In fase di gating, una commissione di esperti valuta se proseguire, e dunque investire risorse materiali e umane, con il progetto di sviluppo, oppure fermarlo nel caso in cui le analisi previsionali mostrino perdite superiori agli stessi benefici (**Figura 16**). In realtà, secondo quanto definito da Cooper [citato in 17], oltre alle decisioni rinominate "GO" e "KILL" con le quali si decide rispettivamente di proseguire un progetto promettente oppure fermare un'attività che non porti benefici, esistono due risposte intermedie con cui si prevede di sospendere temporaneamente l'attività progettuale ("HOLD"), oppure applicarvi le dovute manovre correttive ("RECYCLE") ai fini della prosecuzione verso le successive fasi.

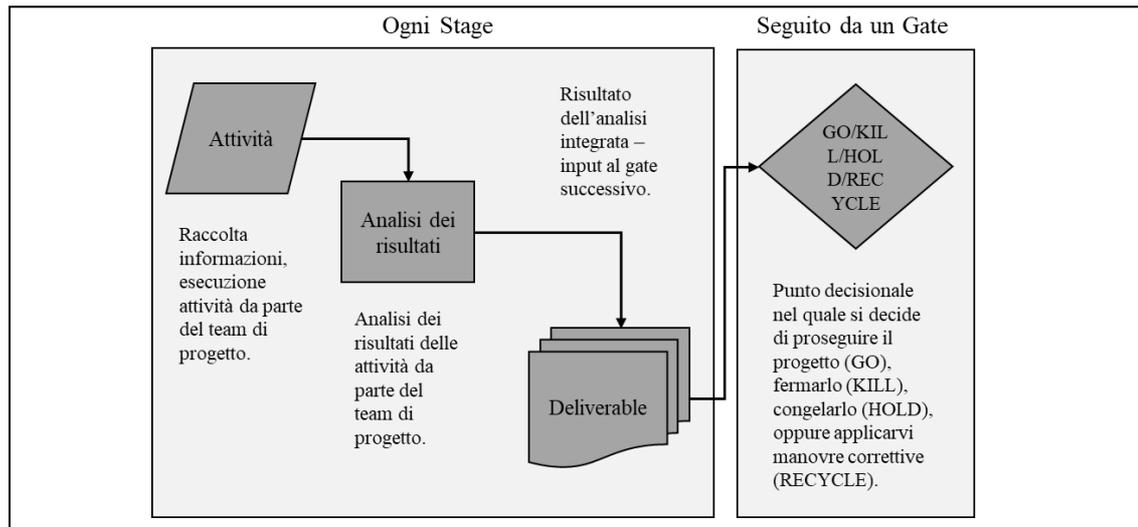


Figura 16: dettaglio di una singola iterazione all'interno del processo Stage-Gate®, elaborato da [17]

Muiño et al. [33] giustificano l'impiego del modello per fasi elencando alcuni dei benefici che questi porta alle organizzazioni che ne fanno uso. Innanzitutto, va precisato che tali benefici variano in base alla tipologia e alla dimensione del progetto che si sta considerando, alla natura e alla cultura organizzativa dell'impresa, nonché in base al livello di maturità raggiunto nell'impiego di tale disciplina. Di seguito un'elencazione dei principali aspetti ritenuti portatori di valore aggiunto:

- Grazie al processo strutturato, le informazioni fornite al decision maker sono spesso portatrici di un livello di incertezza a priori noto. Il loro allineamento, rispetto alle più recenti variazioni macroeconomiche esterne e alle più aggiornate strategie aziendali, garantisce, per ogni fase, la coerenza del progetto rispetto al contesto in cui esso si innesta.
- La natura progressiva del processo di sviluppo per fasi e la validazione svolta alle fine di ogni stadio assicurano un migliore allineamento del deliverable di progetto rispetto ai suoi requisiti iniziali, nonché una riduzione del rischio connesso agli investimenti svolti per la sua esecuzione.
- A tal proposito, la stessa metodologia garantisce una progressiva allocazione delle risorse al progetto, evitando un utilizzo improprio dei fondi per attività a scarso, o nullo, valore aggiunto.

- L'approccio per fasi garantisce una minore necessità di modifiche in corso d'opera, con conseguente abbattimento dei tempi e dei costi correlati al progetto. Un tale traguardo viene raggiunto con la corretta pianificazione dell'ambito e dei costi di tutte le attività progettuali.
- La metodologia strutturata offre, infine, la possibilità creare conoscenza all'interno dell'azienda. Difatti, la natura estremamente documentale del processo garantisce di trarre giovamento dalle lessons learned relative ai progetti passati e riduce il rischio connesso alle future attività.

All'interno del contesto aerospaziale, l'applicazione del modello Stage-Gate® tradizionale sopradescritto necessita di alcuni aggiustamenti. Di solito, per ogni singola iterazione caratterizzante il processo di sviluppo si aggiungono ulteriori punti di verifica in fase di gating, sino al massimo di tre qualora sia prevista la partecipazione del cliente alle riunioni decisionali. Viene, innanzitutto, convocato un technical-review meeting, durante il quale sono soggetti a revisione gli aspetti di natura tecnica e di fattibilità per i diversi aspetti del progetto. Agli incontri partecipano il dipartimento di Ingegneria aziendale e il core team. Segue il gate meeting per il quale viene anche coinvolto il management aziendale, in cui si pone l'attenzione sugli elementi di rischio, di scheduling e di costo del progetto di sviluppo. Nel caso fosse anche richiesta la partecipazione del cliente, si procederebbe a reiterare in sua presenza quanto discusso durante il gate meeting. Ne consegue, perciò, che nel caso del settore aerospaziale (nel nostro caso per lo sviluppo dei motori a turbina) il modello teorico sopraesposto subisca una variazione per meglio aderire allo specifico contesto. Il classico modello Stage-Gate® si riconfigura, infatti, secondo l'approccio denominato Tollgate². Il Tollgate è definito come un processo strutturato in nove fasi con il quale si gestisce lo sviluppo di un nuovo motore a turbina. Questi accompagna lo sviluppo di un nuovo prodotto dalla sua concezione, confermata dal business case decisionale, alla sua progettazione concettuale e di dettaglio, sino alla sua entrata in servizio successiva all'ottenimento delle certificazioni richieste dalle autorità regolatrici. Ogni fase componente il modello viene di seguito elencata, mentre la **Figura 17** dispone i principali passi di sviluppo lungo un asse temporale ideale.

² L'approccio Tollgate qui presentato deriva da nozioni relative a pratiche interne al soggetto ospitante lo studio. La documentazione in proposito è soggetta a vincoli di riservatezza.

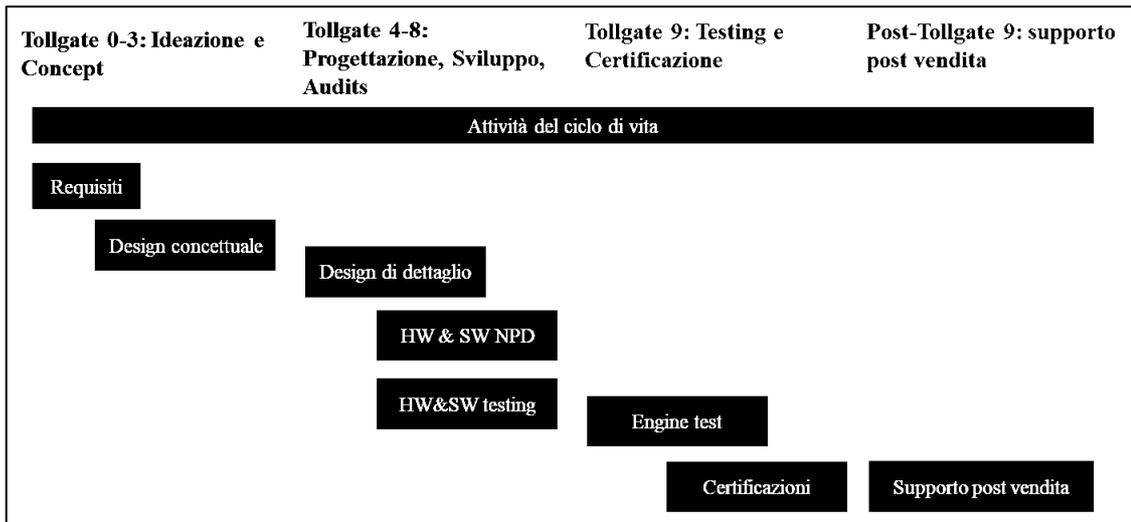


Figura 17: processo di sviluppo Tollgate per un nuovo motore a turbina.

- Tollgates 0-3: Ideazione e Concept.** Nei primi Tollgates si pone l'attenzione sulla decisione di avviare il progetto di sviluppo del motore a turbina ricorrendo allo studio del relativo business case. Viene, perciò, svolta un'analisi di fattibilità relativa ai requisiti del prodotto e del progetto ricorrendo anche ai parametri tecnico-economici in precedenza elencati. Una corretta definizione di tali requisiti permette di creare un prodotto aderente alle aspettative del cliente, nel pieno rispetto dei vincoli imposti dalle autorità regolatrici. Una volta approvato il processo di sviluppo, lo sforzo del soggetto aziendale si riversa sulla progettazione concettuale del motore, inclusiva, tra l'altro, di un piano di maturazione tecnologica degli impianti produttivi. Quest'ultima valutazione serve a garantire un corretto accompagnamento ad una attività che, per sua natura, assume un carattere pluriennale. Durante la fase di design concettuale, il team di progetto valuta le configurazioni di prodotto possibili misurandone le performance attraverso l'introduzione di diversi indicatori tecnico-economici (concept screening/ concept scoring). Considerato il notevole investimento che comporta un progetto di sviluppo di una nuova turbina, in sede di definizione del concept l'impresa tende a spingersi verso la frontiera tecnologica per cercare di acquisire, o di mantenere, un vantaggio competitivo sugli attuali concorrenti. Il Tollgate 3 si conclude con la presentazione di un concetto di prodotto coerente con i requisiti stabiliti in sede di avviamento progettuale.
- Tollgates 4-8: Progettazione, Sviluppo, Valutazione.** Durante queste fasi, il soggetto aziendale completa la progettazione di dettaglio del prodotto, svolge le analisi sulle singole componenti e sull'intero motore per verificare la validità di quanto creato, definisce le responsabilità degli impianti produttivi per la creazione delle diverse parti. Le stesse fasi vedono la finalizzazione dei requisiti funzionali della turbina. A tal proposito, ci si pone l'obiettivo di soddisfare la regola "delle tre f", ovvero fit/form/function del prodotto rispetto a quanto pianificato. Vengono altresì svolte diverse analisi con lo scopo di valutare l'aderenza del motore con i requisiti relativi alle proprie performances tecniche, al rumore generato a regime, al livello di emissioni, al peso oppure allo stesso costo. Com'è

noto, le preventive misurazioni sulle performances del prodotto garantiscono un maggior margine per l'applicazione delle eventuali manovre correttive sul progetto. In questo modo, risulta possibile evitare delle perdite rilevanti nelle sue fasi avanzate, causate dall'inconsistenza di quanto ottenuto rispetto ai requisiti definiti in sede di concezione.

- **Tollgate 9: Test e Certificazione.** Una volta giunto al Tollgate 9, il motore ha assunto la sua configurazione definitiva ed è pronto all'entrata in servizio (Entry to Service, ETT). Un prerequisito relativo a quest'ultima è il conseguimento delle dovute certificazioni di operabilità richieste dalle autorità regolatrici. Nel contesto del presente elaborato si omette, tuttavia, una loro trattazione dettagliata in quanto non pertinenti allo scopo dello studio che si sta illustrando.
- **Post Tollgate 9: Supporto post vendita.** Una volta il prodotto finito in possesso del cliente, il compito dell'azienda consiste nel supportarlo e nel mantenere il motore integro e adeguato al volo. All'operatore possono essere forniti svariati servizi sul campo sulla base degli specifici obblighi contrattuali stipulati, come, ad esempio, la sostituzione di componenti difettosi o obsoleti.
- **Attività del ciclo di vita, Life-Cycle activities.** Alcune categorie di attività coprono l'intero ciclo di vita del motore applicandosi a ognuno dei Tollgates in precedenza illustrati. Si possono includere, ad esempio, la gestione del programma di sviluppo e della configurazione del prodotto, la crescita del personale impegnato, il perseguimento degli obiettivi finanziari dell'azienda, la protezione della proprietà intellettuale, il rispetto della normativa regolatrice, il mantenimento della documentazione relativa agli item di configurazione, nonché il soddisfacimento dei requisiti del cliente.

2 Product-costing, End-User software development

Questo secondo capitolo si pone l'obiettivo di fornire un quadro della letteratura dedicata alle più diffuse tecniche di product-costing e agli approcci End-User per lo sviluppo di applicazioni software utili alla risoluzione delle richieste di dominio dei soggetti aziendali. Come si vedrà più avanti, entrambi gli argomenti presentati risultano strettamente correlati allo studio illustrato all'interno dell'elaborato.

Per quanto riguarda le tecniche relative al product-costing, esse sono state utilizzate come base teorica per lo sviluppo del modello di calcolo del costo pieno dei motori GE9X. A tal proposito, il capitolo 4 dell'elaborato illustra nel dettaglio la soluzione generata a valle dell'attività di ricerca che è stata svolta. Tornando al contenuto illustrato all'interno della presente sezione, in merito ai processi di product-costing ne verrà fornita l'importanza connessa al preventivo impiego. Con l'ausilio degli studi di Niazi et al. [18], di Zhao et al. [19] e di Hueber et al. [20], verranno presentate le classificazioni più significative dei modelli impiegati per il calcolo del costo dei prodotti nelle sue diverse fasi del ciclo vitale. Verranno, infine, analizzati gli aspetti legati alla replicabilità di tali sistemi, nonché le difficoltà connesse alla stima del costo del prodotto e all'inquadramento degli stessi approcci in categorie univoche dai confini delineati.

La descrizione delle tecniche di sviluppo End-User fornisce alcuni spunti riflessivi sull'utilità e sul pericolo connessi al loro impiego, nonché sulla loro differenza rispetto alla tradizionale, e più strutturata, metodologia usata per il software engineering. Le argomentazioni contenute negli studi presentati fanno emergere la necessità di definire in modo più strutturato i processi di sviluppo di soluzioni software di dominio per la risoluzione dei bisogni interni alle aziende. All'analisi degli approcci End-User, segue una trattazione degli spreadsheet softwares impiegati come ecosistemi di sviluppo per applicazioni di calcolo complesse. A tal proposito, si mettono in luce alcuni rischi intrinseci di tali sistemi, e si fornisce una descrizione delle principali criticità legate alla creazione di una base teorica dedicata al loro utilizzo.

Nel contesto del presente studio, tali argomenti sono stati utilizzati per definire un processo di sviluppo fortemente ispirato alla metodologia strutturata usata in ambito IT, e che fosse il più possibile esente dalle problematiche che affliggono gli approcci End-User.

2.1 L'importanza di valutare preventivamente il costo del prodotto

Niazi et al. [18] affermano che le chiavi per la sopravvivenza di un'impresa del 21-esimo secolo facente parte di un'economia globale si basano essenzialmente sulla qualità del prodotto e del servizio che vengono offerti, sulla competitività dei prezzi proposti rispetto ai propri concorrenti, sulla rapidità dei processi di manufacturing e di consegna, nonché sulla flessibilità di risposta alle varianti di customizzazione che vengono richieste dai propri clienti. A proposito di quest'ultimo aspetto, accade molto spesso che i clienti richiedano di ottenere i loro preventivi di costo del prodotto in modo immediato, senza alcuna cura per la sua complessità di progettazione o di manufacturability. A rendere le cose ancora più complesse, esistono quelle situazioni nelle quali l'impresa stessa disconosce il livello di accuratezza e i tempi richiesti per il processo di valutazione del costo del prodotto [18]. Nel caso descritto si possono presentare due scenari, entrambi decisamente spiacevoli. Da un lato, l'impresa potrebbe incorrere in una sottostima del costo e di conseguenza del prezzo del prodotto, con risultante perdita di profitti nel breve periodo dovuti al mancato recupero di quanto sostenuto durante le fasi di sviluppo. Dall'altro, invece, questa potrebbe sovrastimare il prezzo del prodotto, con effetti strategici più rilevanti nel lungo periodo dovuti alla perdita di importanti quote di mercato in favore dei concorrenti. Quanto appena affermato dimostra l'importanza di effettuare un'efficace stima del costo del prodotto già nelle sue fasi di progettazione iniziali. Una stima preventiva del costo del prodotto deve, perciò, costituire un punto focale di ogni strategia aziendale che si rispetti [18].

A conferma di tale argomentazione, si può menzionare la nota relazione coinvolgente i costi impegnati ed i costi sostenuti, entrambi relativi a un singolo progetto di sviluppo prodotto. Il grafico mostrato in **Figura 18** ne offre una rappresentazione. Osservandolo, si nota come la cumulata dei costi effettivamente sostenuti dall'impresa segua il tipico andamento di una curva ad "S". Una tale forma è spiegata dal fatto che le prime fasi di design concettuale sono relativamente poco onerose, mentre la maggior parte dei costi sono sostenuti nelle successive fasi di progettazione di dettaglio, di prototipazione e di ramp-up di produzione. La cumulata dei costi impegnati segue, invece, un andamento del tutto differente. Essa si configura secondo una curva crescente a tassi decrescenti. Le motivazioni sottostanti tale forma risiedono nel fatto che le principali scelte di allocazione dei costi, sia per motivi tecnologici che strategici, vengono prese durante le prime fasi di pianificazione del prodotto e di design concettuale. Alle successive fasi rimane, invece, un margine decisionale sui soli aspetti residuali. Zhao et al. [19] affermano, infatti, che circa l'85% dei costi del prodotto vengano impegnati già nelle fasi di design preliminare. La proporzione cresce ulteriormente e raggiunge circa il 95% durante la successiva fase di progettazione di dettaglio. Niazi et al. [18] e Hueber et al. [20] concordano, dal canto loro, che l'80% dei costi futuri che il prodotto deve sostenere risultano già impegnati nelle prime fasi di design concettuale. Nonostante le sensibili differenze tra le evidenze emerse dalle fonti consultate, risulta chiara l'importanza di una valutazione tempestiva del costo del prodotto nelle fasi iniziali della sua definizione. Con il progredire del suo sviluppo, infatti, le modifiche richieste avranno

un margine di applicabilità decrescente e un costo crescente, con conseguenti importanti scostamenti rispetto al budget allocato in sede di definizione della baseline dei costi.

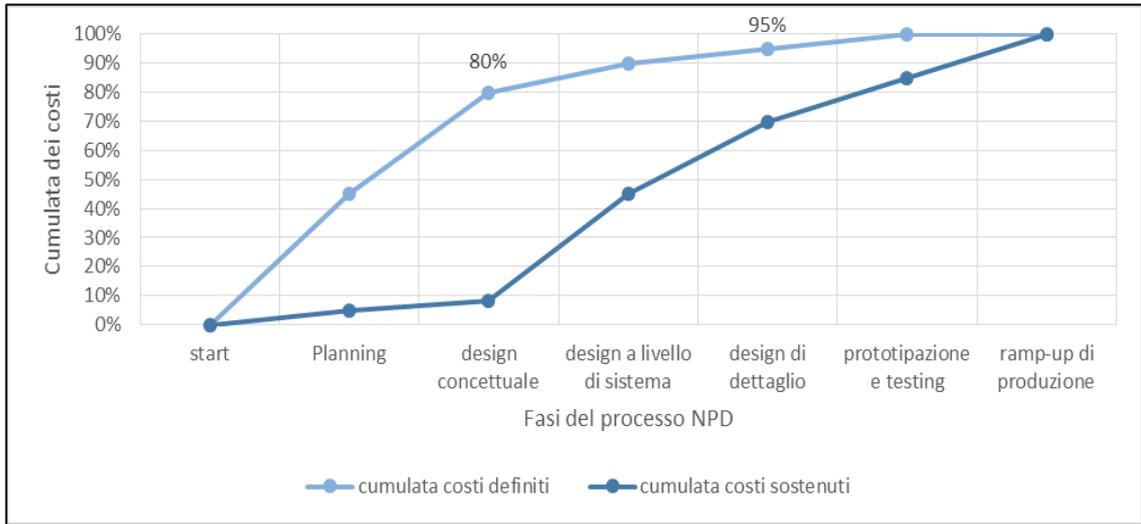


Figura 18: cost committed-incurred nel caso di sviluppo di un nuovo prodotto

2.2 Classificazioni dei modelli di stima del costo del prodotto

Prima di fornire una classificazione estensiva degli approcci usati per la stima del costo del prodotto nelle differenti fasi del suo ciclo di vita, risulta utile offrire una spiegazione sulla terminologia impiegata nella presente sezione. Zhao et al. [19] estrapolano quattro elementi fondamentali per la valutazione dei processi di product-costing, ognuno dei quali viene schematizzato nel diagramma raffigurato in **Figura 19**. I fattori rilevanti per la loro categorizzazione sono: il processo di stima, il modello di stima, il metodo di calcolo e le tecniche di supporto.

Partendo dal primo, il processo di stima definisce l'approccio utilizzato per la valutazione del costo del prodotto nei confronti delle relative Product Breakdown Structure (PBS) e Cost Breakdown Structure (CBS). Esso può avere sia un carattere top-down che bottom-up. Il primo, partendo dal prodotto nella sua globalità, mira al calcolo del costo delle singole componenti che lo costituiscono. L'approccio bottom-up, invece, parte dall'analisi delle singole componenti, con i rispettivi costi unitari di lavorazioni e materiali, e procede verso l'aggregazione del prodotto finito e del suo costo complessivo di produzione. Procedendo nel dettaglio, si giunge alla definizione del modello di stima. Questo rappresenta l'insieme delle assunzioni fondamentali sottostanti il processo di stima, e descrive le relazioni intercorrenti tra le variabili indipendenti (ad es. la geometria del prodotto, i materiali coinvolti, i processi di produzione) e la variabile dipendente costo. Il modello di stima ha altresì il compito di definire i cost drivers del prodotto, ovvero gli elementi fondamentali usati per le stime di carattere parametrico. Il metodo di calcolo determina, invece, le relazioni logico-matematiche tra le variabili definite in precedenza dal modello di stima. A titolo di esempio, si può citare il caso in cui il costo di una particolare barra di acciaio risulta funzione lineare crescente del parametro lunghezza espresso in centimetri. In questo caso, la lunghezza della barra costituisce il cost driver usato dal modello di stima, mentre la relazione lineare crescente descrive il metodo di calcolo implementato. A proposito rapporto tra modelli di stima e metodi di calcolo, risulta utile fornire un'importante precisazione. I primi si focalizzano semplicemente sugli assunti su cui si basa il processo e sulla logica di scelta dei cost drivers usati per la stima del prodotto. I secondi, invece, si concentrano esclusivamente sulla formulazione matematica delle relazioni tra variabili indipendenti e costo. In generale, possono coesistere molteplici metodi di calcolo per singolo modello di stima. Gli ultimi elementi utili alla classificazione dei diversi approcci per il product costing sono costituiti dalle tecniche di supporto, come ad esempio le analisi regressive sui dati storici, le quali costituiscono gli strumenti utili alla risoluzione delle relazioni logico-matematiche definite dal precedente metodo di calcolo.

Fatta questa doverosa premessa integrativa ai successivi argomenti, si possono fornire i dettagli delle classificazioni comprese all'interno del corpo letterario. Il presente elaborato prende a modello il risultato ottenuto dalla ricerca di Niazi et al. [18] in merito all'organizzazione degli approcci per la stima del costo del prodotto, e ne riassume i principali aspetti in **Figura 20**. Sebbene la ricerca abbia più volte constatato la difficoltà di un inquadramento univoco delle metodologie esistenti, gli autori hanno fornito una loro classificazione delle tecniche relative al product cost estimate, conosciute anche con l'acronimo PCE, ottenendo su una struttura ad albero capovolta suddivisa in tre livelli.

Innanzitutto, si fa una distinzione tra approcci alla stima di tipo qualitativo e di tipo quantitativo. I primi si dividono in modelli intuitivi e modelli analogici, e si basano principalmente sulle analisi comparative tra il nuovo prodotto e le iterazioni precedenti. In questo modo, essi tentano di coglierne le similitudini e le differenze, sia di configurazione che di processo. Gli aspetti simili tra le generazioni successive vengono direttamente travasati sull'oggetto della valutazione. Gli scostamenti, invece, possono essere stimati ex-novo con valutazione puntuale. A tal proposito, può essere svolta un'analisi regressiva, se i dati storici risultano statisticamente significativi, oppure può essere richiesto il parere di un esperto di dominio al fine di ottenere un valore che più si avvicini al costo reale dell'oggetto che si sta stimando. In generale, risulta piuttosto evidente che il principale vantaggio legato all'utilizzo di un approccio qualitativo risiede nella velocità di esecuzione del processo di stima, a patto che esistano dati storici rilevanti, e nella sua applicabilità nelle fasi iniziali planning e design concettuale di un nuovo prodotto [21]. Al contrario, le stime quantitative poggiano su una dettagliata analisi della configurazione del prodotto e dei processi correlati. Esse procedono alla valutazione del costo sia individuando particolari relazioni, note come Cost Estimate Relationships (CER), tra le variabili indipendenti (cost drivers) e la variabile dipendente, sia procedendo all'aggregazione puntuale delle voci di costo appartenenti alle singole componenti elementari del prodotto. Il primo approccio definisce i modelli parametrici, mentre il secondo è tipico di quelli analitici. Sebbene l'approccio quantitativo fornisca risultati indubbiamente più accurati rispetto alla controparte qualitativa, la necessità di possedere informazioni dettagliate in merito all'architettura del prodotto e dei suoi processi ne limita il campo di applicazione alle sole fasi finali di progettazione di dettaglio del suo ciclo di sviluppo [21]. A tal proposito, risulta utile porre nuovamente attenzione al dilemma tra costi impegnati e costi sostenuti discusso nel precedente paragrafo. Stante quanto appena affermato, risulta quasi inevitabile uno scostamento tra il costo stimato e quello consuntivato per via delle differenti granularità dei modelli di stima adottati durante le diverse fasi del ciclo di vita del prodotto. Difatti, alcune ricerche dimostrano che nella maggior parte dei progetti di rilevante dimensione come in ambito aerospaziale, la stima dei costi differirà per difetto dal valore effettivamente sostenuto a causa di una loro crescita endogena indipendente dalla baseline inizialmente stabilita [20].

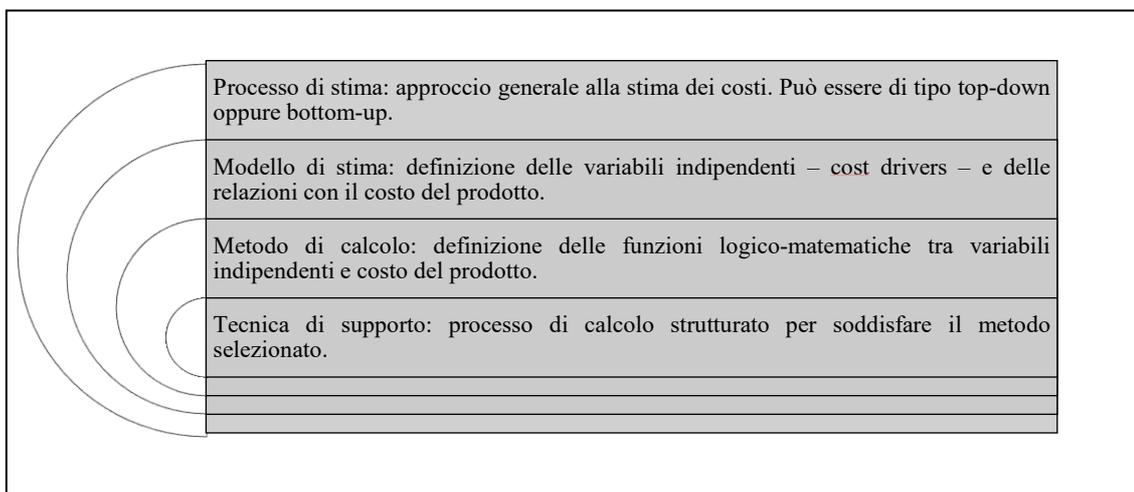


Figura 19: terminologia per il product-costing, elaborato da [19]

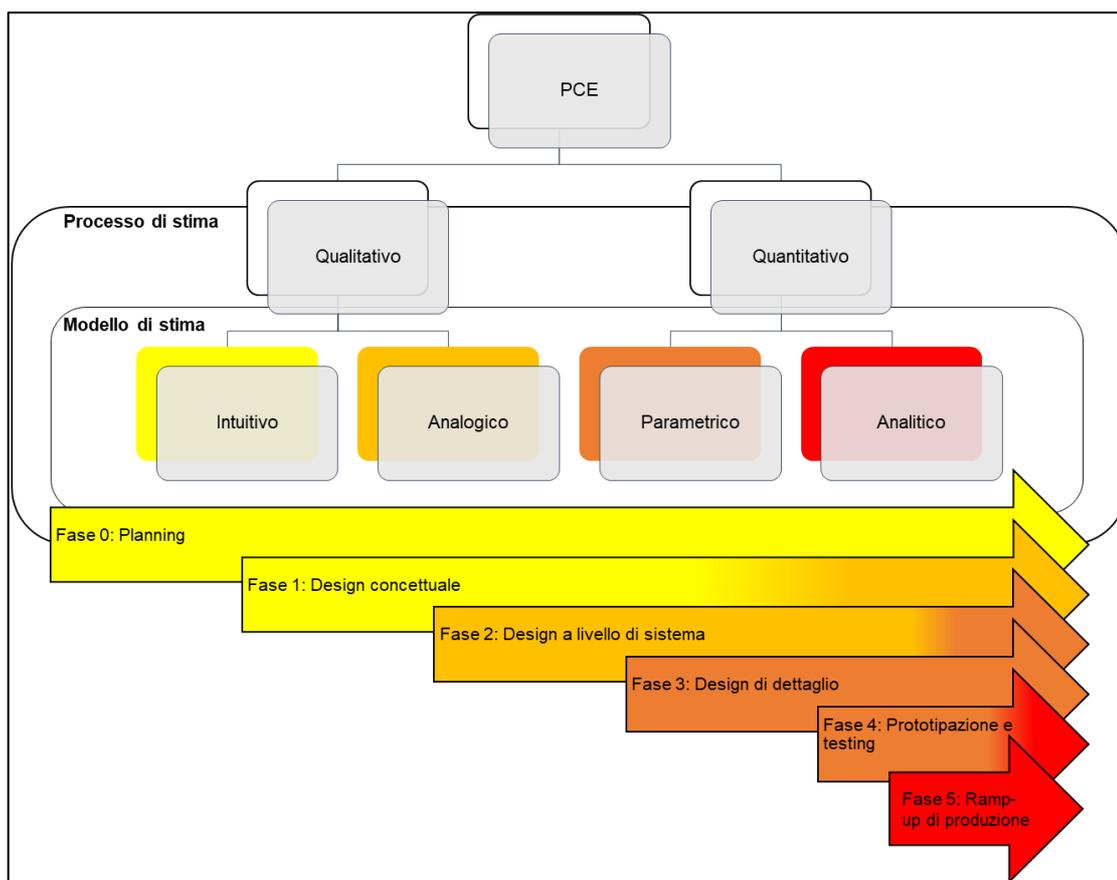


Figura 20: classificazione PCE e applicabilità nelle diverse fasi di NPD, elaborato da [18, 21]

2.2.1 Modelli di stima intuitivi

I modelli intuitivi costituiscono l'approccio più semplice alla stima del costo del prodotto. Essi dipendono quasi univocamente dal know-how del cost engineer, il quale, sfruttando le sue conoscenze sul prodotto e sui processi correlati, ha un ruolo preponderante nell'intera attività di valutazione del costo. Secondo Hueber et al. [20], il maggior problema connesso all'utilizzo dei modelli di stima intuitivi consiste nella loro scarsa comprensibilità e nella difficile replicabilità da parte un soggetto terzo che non possieda gli elementi di conoscenza tacita a disposizione del cost engineer.

2.2.2 Modelli di stima analogici

I modelli di calcolo analogici si basano essenzialmente su un'analisi degli scostamenti delle caratteristiche del prodotto rispetto alle sue eventuali versioni precedenti, da cui deriva un graduale aggiustamento del processo di stima del costo. Secondo Hueber et al. [20], i modelli analogici poggiano sull'assunto secondo il quale prodotti simili hanno costo simili. Per tale ragione, essi fanno ampio uso di database storici da cui estrapolare le voci di costo corrispondenti a componenti di prodotto con configurazione simile a quella dell'oggetto della stima. Le rimanenti parti, se assenti dalla

banca dati, sono di solito stimate tramite il coinvolgimento di modelli di natura parametrica o analitica. La **Figura 21** schematizza l'approccio alla stima per analogia. Le motivazioni sottostanti l'utilizzo di un tale sistema sono del tutto sovrapponibili a quelle più generali relative all'adozione delle stime qualitative. Il processo, infatti, risulta di rapido utilizzo, richiede relativamente poco sforzo alle risorse coinvolte, e può essere applicato già nelle fasi iniziali del processo di sviluppo prodotto. Ciò gli conferisce il forte vantaggio poter essere utilizzato come supporto alle attività preliminari di decision making correlate all'attività progettuale.

Tra le stime per analogia si possono annoverare le analisi regressive in cui una variabile dipendente, il costo, viene posta come funzione lineare di una o più variabili indipendenti, altresì chiamati fattori di complessità. Oltre ai metodi di calcolo basati sulle regressioni lineari, Niazi et al. [18] ne elencano diversi poggianti sulle reti neurali, come ad esempio la Back Propagation Neural Network (BPNN). Tali approcci hanno dalla loro il vantaggio di superare le limitazioni basate sul presupposto di linearità tipiche delle analisi regressive, ma di contro richiedono un elevato sforzo computazionale al soggetto responsabile della stima.

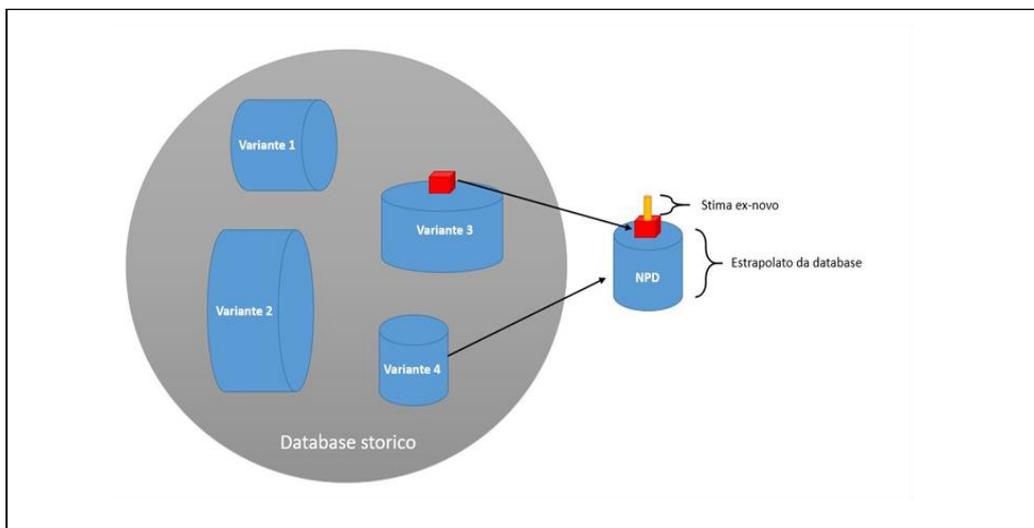


Figura 21: raffigurazione del processo di stima del costo per analogia, elaborato da [20]

2.2.3 Modelli di stima parametrici

L'obiettivo primario dei modelli di stima di natura parametrica è la costruzione delle cosiddette Cost Estimation Relationships, altresì note con l'acronimo CER. Queste sono costituite da relazioni logico-matematiche tra la variabile dipendente, il costo, e uno o più parametri indipendenti noti con il nome di cost drivers. Un semplice esempio di applicazione di un modello parametrico è fornito in **Figura 22**. Si consideri, ad esempio, un cilindro metallico il cui costo C è funzione lineare positiva del suo diametro D secondo la CER: $C=n*D$, con n pari a una costante arbitraria. Secondo l'approccio parametrico, data una variazione unitaria del cost driver all'interno del campo di applicabilità (oltre il quale possono intervenire diversi fattori esogeni perturbatori della relazione sopraccitata), il suo impatto sul costo del prodotto sarà un valore n -uplicato rispetto al delta unitario iniziale. Hueber et al. [20] affermano che uno dei principali vantaggi delle stime

parametriche rispetto alle più dettagliate stime quantitative di natura analitica, risiede nella loro possibilità di venire impiegate in fasi antecedenti del processo di sviluppo prodotto, quando le informazioni di configurazione sono ancora scarse, e nella capacità di fornire risposte alle analisi di tipo what-if misuranti la variazione del costo in base agli scostamenti assunti dai diversi driver di costo.

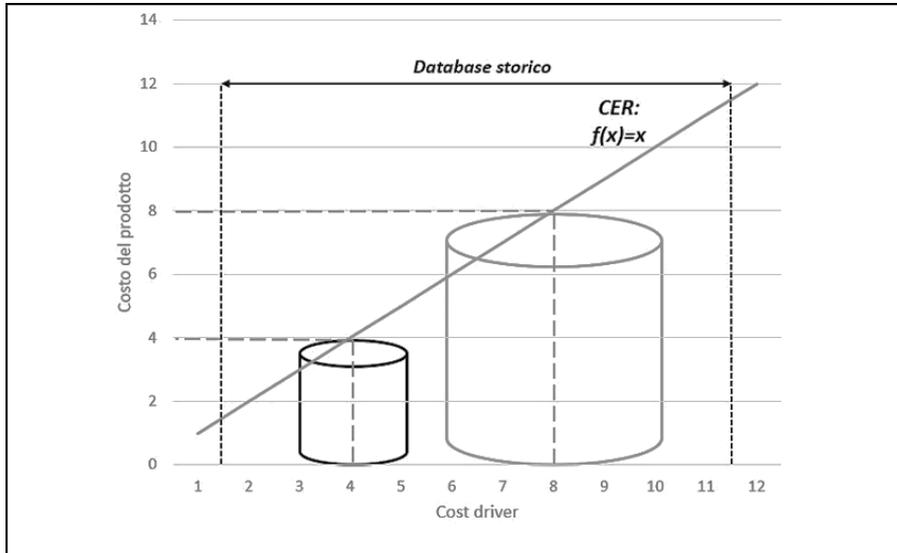


Figura 22: raffigurazione del processo di stima del costo parametrico, elaborato da [20]

2.2.4 Modelli di stima analitici

Con i modelli di stima del costo di natura analitica si procede alla graduale ricostruzione delle Product Breakdown Structure (PBS) e Cost Breakdown Structure (CBS) del prodotto tramite l'aggregazione delle unità elementari e le loro rispettive voci di costo. La **Figura 23** riassume il processo appena descritto. Tra i modelli citati all'interno dell'elaborato, quelli analitici offrono il maggior grado di dettaglio per via della natura granulare della loro stima. Un altro vantaggio che gli si può attribuire, consiste nella loro totale indipendenza dalla presenza di dati storici relativi alle versioni di prodotto precedenti, come avviene invece nel caso dei modelli analogici e parametrici. Di contro, le stime analitiche trovano applicazione soltanto nelle fasi avanzate del processo di sviluppo prodotto, ovvero a partire dalla progettazione di dettaglio. Esse richiedono, difatti, un'ampia conoscenza dell'architettura di prodotto, delle relazioni tra le diverse interfacce, nonché delle caratteristiche del processo di produzione ad esso correlato. Tra i metodi di calcolo appartenenti alle stime analitiche che trovano maggiore diffusione, si possono senza dubbio citare quelli basati sulle attività, noti come Activity-Based. Tali metodi vengono generalmente impiegati per stimare il costo delle attività di manufacturing di uno specifico prodotto. In generale, si considerano i costi associati a tre intervalli temporali ben precisi: intervallo di lavorazione, di setup macchina, e non produttivo. Uno dei maggiori esponenti in proposito è il modello di Jung fornito dallo studio Niazi et al. [18].

$$Cost = (R_0 + R_m) * \left(\frac{T_{su}}{Q} * T_{ot} + T_{no} \right) + material\ cost + overheads \quad (2.1)$$

All'interno dell'equazione (2.1), R_o e R_m rappresentano i tassi orari degli operatori e dei macchinari, il terzetto (T_{su}, T_{ot}, T_{no}) costituisce le variabili indicative dei tempi di setup, operativi e di fermata produzione, mentre la variabile Q rappresenta, infine, la dimensione del lotto di lavorazione. All'interno del modello Junghiano, il costo del componente si ottiene come sommatoria dei costi delle operazioni macchina e dei materiali acquistati, entrambi attribuiti, a cui viene aggiunta una quota di costi indiretti sulla base di uno specifico principio di allocazione. Esso non viene menzionato in maniera del tutto casuale, in quanto costituirà un importante riferimento teorico per il calcolo del costo pieno dei moduli costituenti il motore a turbina, come verrà illustrato nel capitolo 4 del presente elaborato.

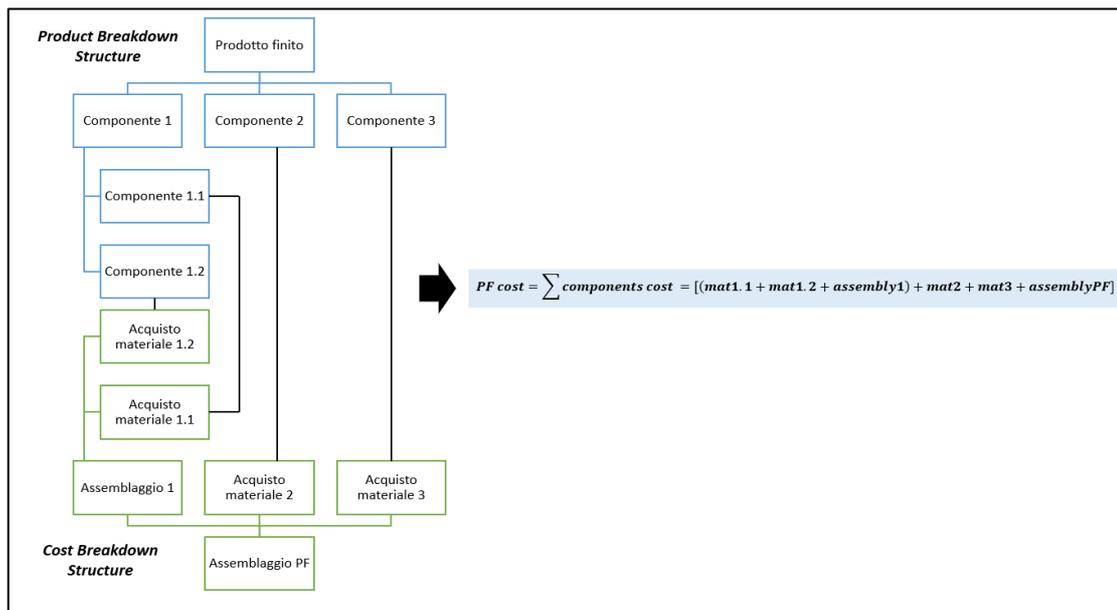


Figura 23: raffigurazione del processo di stima del costo analitica, elaborato da [20]

2.2.5 Riepilogo dei modelli di stima dei costi e flowchart decisionale

La **Tabella 1** offre un riepilogo delle informazioni contenute all'interno della precedente classificazione discussa. Essa attinge dagli studi di Hueber et al. [20] e Niazi et al. [18] e, per ognuno dei modelli di stima discussi, illustra i rispettivi vantaggi e svantaggi legati ad una loro applicazione.

Tabella 1: punti di forza e di debolezza degli approcci al product-costing, fonti [18, 20]

Processo di stima	Modello di stima	Vantaggi	Svantaggi
<i>Qualitativo</i>	Intuitivo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Semplicità e velocità di ottenimento del risultato della stima 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Know-how tacito e scarsa replicabilità per i soggetti terzi oltre il cost engineer
	Analogico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chiare relazioni causa-effetto ▪ Semplicità e velocità di ottenimento della stima ▪ Accurata nel caso di cambiamenti di lieve entità nella struttura di prodotto 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Richiede un insieme consistente di dati storici relativi al prodotto ▪ Richiede la baseline di prodotto ▪ L'identificazione delle analogie può essere complesso ▪ Richiede ancora expert judgement
<i>Quantitativo</i>	Parametrico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Le CER sono utili per le successive analisi what-if al variare dei cost drivers ▪ Permettono di quantificare i rischi ▪ Non richiede expert judgement 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Individuare i cost drivers significativi può essere complesso ▪ Le CER potrebbero non avere dirette relazioni causali ▪ Fattori esogeni potrebbero inficiare la capacità predittiva delle CER
	Analitico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stima granulare (interpolazione delle singole unità in PBS e CBS) ▪ Ampia consapevolezza delle voci di costo associate al prodotto ▪ Aderenza alla realtà 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Richiesta di una considerevole mole di dati sul prodotto e sui processi ad esso correlati ▪ Time consuming ▪ Non fornisce informazioni dirette sulle CER ▪ Non responsiva alle analisi what-if

La **Figura 24** è stata, invece, elaborata a partire da quanto suggerito da Niazi et al. [18]. Essa offre una linea guida in merito ai criteri di scelta del modello di stima più adatto alle diverse fasi del ciclo di vita del prodotto. Come si può vedere, una prima distinzione viene svolta in base al superamento o meno della progettazione concettuale. Qualora il prodotto si trovi ancora in tale fase, si esclude l'impiego di un modello di calcolo quantitativo, in quanto risulta molto probabile che le informazioni relative alla sua architettura siano ancora indefinite. Nel caso risulti preponderante l'intervento dell'esperto di dominio, si può optare per un modello di calcolo di natura intuitiva. Altrimenti, se esiste un database contenente le informazioni storiche su prodotti con simile architettura, risulta possibile l'implementazione di una stima analogica. Nel caso in cui, invece, si abbiano sufficienti informazioni sulla struttura di prodotto e sugli elementi che ne influenzano il costo, si possono scegliere le vie parametriche o analitiche. Le prime richiedono la preventiva definizione delle CER, mentre le seconde necessitano l'esistenza di una prima fase produttiva nella quale si iniziano a registrare i costi unitari dei singoli componenti di prodotto. Sulla base delle argomentazioni esposte, nonché sullo stato di sviluppo pre-produttivo (Tollgate 8) cui permangono i motori appartenenti alla serie GE9X, tra i modelli presentati all'interno del paragrafo quello implementato nell'applicazione di calcolo specificatamente progettata per la stima del loro costo pieno

assume un carattere quantitativo di natura analitica. I dettagli in proposito sono illustrati all'interno del capitolo 4 dell'elaborato.

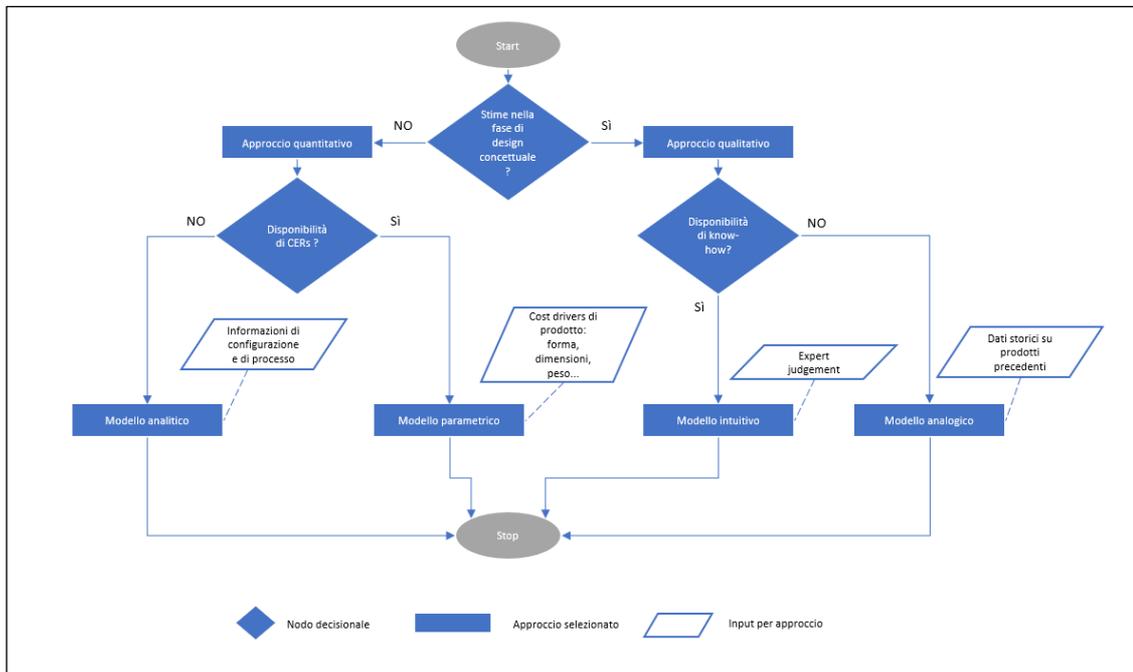


Figura 24: flowchart decisionale per la scelta del corretto modello, elaborato da [18]

2.3 Limitazioni connesse al sistema di classificazione dei modelli utilizzati per il product-costing

Hueber et al. [20] sottolineano alcuni problemi connessi al processo di stima del costo di un prodotto. Difatti, qualunque sia l'approccio utilizzato, questi non può prescindere da un insieme di dati facilmente accessibili. A tal proposito, nel caso dei modelli analogici e parametrici ci si riferisce alle informazioni storiche sulle versioni di prodotto precedenti, mentre per i modelli analitici si pone lo sguardo verso le informazioni aggiornate sulla configurazione del prodotto e sui suoi processi di produzione. Secondo gli stessi autori, lo sforzo richiesto alle imprese per costruirsi il proprio database informativo risulta tutt'altro che indifferente dal punto di vista delle risorse coinvolte. Inoltre, a tale fattore si aggiunge la necessità di possedere un consistente portafoglio di progetti che possa alimentare la base dati appositamente creata. Nel caso di produzione seriale di prodotti dall'architettura semplice e altamente standardizzata aventi cicli vitali brevi, i criteri sopracitati risulterebbero facilmente soddisfacenti. Risulta, invece, necessario impostare un discorso differente per tutte quelle imprese che producono prodotti complessi e altamente diversificati, come ad esempio i motori a turbina creati dall'industria aerospaziale. Considerata, infatti, la natura pluriennale dei progetti contenuti all'interno del portafoglio di attività di tali imprese, il tempo necessario alla costruzione di un database informativo soddisfacente risulta tutt'altro che trascurabile.

Zhao et al. [19], a loro volta, raccolgono una lista di possibili limitazioni relative al processo di stima del costo e alla sua modellazione. Secondo i ricercatori, le attività di cost-estimate sono affette dalle seguenti problematiche:

- La perdita di correlazione tra la geometria del prodotto ed il suo costo porta a risultati incoerenti. L'affermazione risulta particolarmente vera nel caso dei modelli di stima parametrici che poggiano su attributi geometrici in qualità di cost driver. Per tale ragione, un vincolo alla correttezza del processo di calcolo è definito dal suo stesso campo di applicabilità, oltre il quale possono intervenire elementi di perturbazione esogeni.
- La stima dei costi è un'attività decisamente labour intensive e time consuming. Le informazioni per il calcolo sono molto spesso numerose e prevalentemente immagazzinate in fogli di calcolo di notevoli dimensioni. In tale contesto, accade spesso che le logiche di aggregazione delle singole voci di costo siano note soltanto al cost engineer che ha sviluppato il modello. Per tale ragione, si può incorrere in problematiche legate alla sua stessa replicabilità.
- Il livello di accuratezza della stima dipende dalla precisa fase del ciclo di vita del prodotto. Nelle fasi iniziali, infatti, a causa della mancanza di informazioni sulla sua architettura e sui processi a esso correlati, si può incappare risultati meno accurati con scostamenti tutt'altro che trascurabili.
- La replicabilità di determinati approcci è limitata dalle diverse varianti di progettazione. Alcuni modelli di stima incorporano parametri di produzione fissi per valutare il costo del prodotto. Una volta presentatasi una variante di progettazione, riguardante ad esempio la geometria dello stesso o l'utilizzo di

particolari materiali, il processo produttivo subisce un conseguente aggiornamento, con possibile inapplicabilità dei modelli esistenti.

- La tracciabilità del processo di stima risulta molto spesso scarsa per via dei collegamenti carenti tra configurazione di prodotto e rispettivi costi. Il più delle volte il legame tra PBS e CBS è labile e scarsamente implementato all'interno dei modelli di calcolo. Di conseguenza, la distribuzione dei costi sui singoli componenti di configurazione del prodotto risulta molto spesso artificiosa e soggetta a manovre correttive da parte del cost engineer.

Hueber et al. [20] fanno emergere ulteriori problematiche legate ai modelli di calcolo per la stima del costo del prodotto, alla loro impossibilità di essere categorizzati in maniera univoca, nonché alle difficoltà applicative cui sono soggette le aziende che ne fanno uso. Di seguito si elencano le evidenze in proposito:

- Non esistono modelli univoci da usare per la valutazione del costo del prodotto. Diversi approcci, infatti, risultano applicabili in diverse fasi del ciclo di vita del prodotto. Ergo, non esiste una stima univoca che garantisca l'assoluta correttezza dell'output generato.
- Di conseguenza, un confronto tra i diversi modelli potrebbe non risultare significativo, in quanto progettati per diverse fasi del ciclo di vita del prodotto. Infatti, approcci analitici potrebbero disporre di variabili non accessibili al momento della stima analogica, per cui il confronto perde di significatività.
- I modelli quotati dalla letteratura hanno molto spesso un carattere generico e risultano di difficile applicazione all'interno dello specifico contesto aziendale se presi nel loro formato originale. Affinché possano essere correttamente utilizzati, bisogna ampiamente calibrarli ai fini dell'adesione alle specifiche intra-aziendali.
- Di conseguenza, gli aggiustamenti introdotti sono frutto della discrezionalità del cost engineer incaricato del processo di stima. Ciò porta inevitabilmente all'inserimento di elementi esogeni che possono perturbare la logica originaria del modello.

Dall'analisi delle criticità sopraesposta è emersa una chiara difficoltà nella categorizzazione dei modelli di stima dei costi per via della forte presenza di elementi specifici ai singoli contesti. Di contro, una volta generalizzati gli stessi modelli trovano difficile applicazione da parte dei soggetti aziendali. Ciò detto, non si intende togliere valore alla preventiva attività di stima del costo del prodotto, e nemmeno alla classificazione degli approcci in categorie delineate. Bisogna, però, tener presente che qualsiasi declinazione pratica di un modello teorico presente in letteratura necessita dei dovuti aggiustamenti per calzare al contesto nel quale lo si vuole implementare.

Il processo di sviluppo di una soluzione software per il calcolo del costo pieno dei motori a turbina presentato nell'elaborato si è caratterizzato per l'esser stato soggetto a diversi degli elementi sopracitati. Come verrà mostrato nel successivo capitolo 4 del testo, i modelli teorici generali per il calcolo dei contributi del costo pieno del prodotto sono stati sensibilmente adattati al contesto trattato e alla natura dei dati utilizzati. Inoltre, è stato riscontrato che la natura stessa del prodotto influenza la struttura del sistema di calcolo. A tal proposito, una serie di riflessioni in merito alla replicabilità del processo mirano a comprendere l'impatto che hanno su di essa i parametri fissi su cui poggia il modello di calcolo.

2.4 L'End-User software development in risposta alle richieste di dominio

Considerando le analogie che mostra il processo di sviluppo illustrato dal presente elaborato con la famiglia dell'End-User-Development (EUD), risulta utile fornire alcune nozioni in merito. Sakal et al. [22] presentano l'EUD come l'attività di progettazione di soluzioni informatiche nella quale l'end-user, definito come qualsiasi individuo avente formazione e obiettivi differenti da un programmatore di professione, sfrutta le possibilità messe a disposizione dai diversi software circolanti sul mercato (come ad esempio la categoria degli office-suites) per rispondere ai quesiti intra-aziendali specifici al rispettivo dominio. Oggigiorno, infatti, all'interno delle realtà aziendali si assiste di frequente a un gap tra le soluzioni messe a disposizione dai pacchetti software tradizionali e quelle richieste per la gestione di particolari situazioni. Considerando il notevole sforzo nello sviluppo di una soluzione IT domain-specific, nonché il suo carattere anti economico, si tende a ricorrere sempre più spesso alle soluzioni di natura End-User. Difatti, si è notato come tale approccio si ponga quasi allo stesso livello dei metodi di acquisizione software più consolidati. Una comparazione in proposito può essere consultata nella sottostante **Tabella 2**.

Tabella 2: confronto tra l'approccio EUD e i processi consolidati di acquisizione software, fonte [22]

	End-User Computing	Information Systems Department	Vendors (Off-the-Shelf)	Outsourcing
Cost	Low/None	Moderate	Moderate	High
Schedule	Immediate	Slow	Fast	Slow
Size	Small	Moderate	Large	Moderate/Large
Control	Low	High	High	High
Risk	Low	Moderate	Low	High
Influence	Local	Local to organizational levels	Local to Organizational Levels	Local to Organizational Levels
Fit to user task	High	Moderate	Low	Moderate
Support (help desk, documentation, training)	Low/None	Moderate	Moderate	Moderate
Integration	Low	Moderate	Low	High
Security	Low	High	High	High
Data quality and integrity	Questionable, sometimes higher quality than corporate systems	High	Moderate	High
Duplication of effort	High	Low/none	Low/None	Low/None
Acceptance	High	Low	Moderate	Moderate

La tabella mostra una sostanziale differenza tra il modello emergente EUD e i rispettivi più consolidati. Ad esempio, una motivazione in merito al diverso approccio alla qualità che hanno i sistemi EUD può essere imputabile al background e agli obiettivi che si pone un end-user rispetto a un programmatore di professione. Nella maggior parte dei casi, infatti, egli non ha l'obiettivo di generare il miglior codice possibile che possa essere utilizzato da una moltitudine di individui; piuttosto, sfrutta i sistemi messi a disposizione per raggiungere rapidamente i propri obiettivi interni, siano essi di natura

finanziaria o legati, ad esempio, al monitoraggio della movimentazione di materiali in magazzino. Un discorso analogo può essere svolto per il livello di integrazione che hanno tali sistemi sviluppati ad-hoc, e per gli aspetti legati alla loro sicurezza. Sulla base di quanto appena affermato, sembrerebbe che le soluzioni basate sul sistema EUD non costituiscano una via che valga la pena di seguire. In realtà, nonostante le problematiche che le affliggono, esse godono di notevoli vantaggi. La stessa **Tabella 2** ne illustra alcuni. Il valore aggiunto di tali soluzioni è racchiuso all'interno delle prime cinque righe presentate. Rispetto ai processi più consolidati, infatti, gli approcci basati sull'EUD godono di un costo e di un rischio decisamente inferiori per la creazione di particolari applicazioni domain-specific, di una minore formalizzazione delle attività, nonché di un maggiore controllo da parte del creatore della stessa soluzione. Il loro carattere informale, rende perciò le metodologie EUD sensibilmente diverse dalla tradizionale programmazione IT. Tali differenze vengono messe in evidenza all'interno del prossimo paragrafo, in cui si illustrano anche gli spunti di miglioramento per i processi di sviluppo End-User auspicati dagli studi di riferimento.

2.4.1 Un confronto con gli approcci strutturati per la programmazione software

Concordemente alla teoria di Burnett e Scaffidi [23], la metodologia EUD può essere suddivisa in due ulteriori componenti, End-User-Programming (EUP) e End-User-Software-Engineering (EUSE). Tale suddivisione viene svolta sulla base del grado di attenzione posto alle pratiche di qualità che caratterizzano gli approcci strutturati per lo sviluppo software. Secondo la definizione formale introdotta Ko et al. (citati in [23]), se da un lato l'EUP si focalizza semplicemente sul processo di creazione di un software (più o meno complesso) a opera dell'end-user, l'EUSE, dal canto suo, sfrutta un approccio più sistematico nella gestione delle problematiche relative alla qualità del prodotto (efficienza, affidabilità, usabilità etc.), con un orizzonte temporale corrispondente al suo intero ciclo di vita.

Per meglio comprendere l'approccio con cui è stata strutturata la metodologia di sviluppo dell'applicazione di dominio per il calcolo del costo pieno dei motori a turbina GE9X, le cui informazioni sono contenute nel successivo capitolo 3 dell'elaborato, risulta utile confrontare i metodi EUP e EUSE rispetto alle tradizionali pratiche di software engineering in modo da individuarne il rispettivi punti di congiunzione e di biforcazione.

Conviene iniziare con il sistema più semplice, ovvero l'End-User-Programming. Come già accennato in precedenza, la conoscenza specifica sulla materia posseduta dall'end-user developer non è paragonabile a quella del programmatore IT di professione. Inoltre, a differenza di quest'ultimo, per il quale lo sviluppo del software costituisce lo stesso deliverable susseguente alla sua attività, nel caso dell'end-user il codice consiste semplicemente in un mezzo strumentale utile al perseguimento di un diverso traguardo. Le condizioni sopracitate possono essere mappate come mostrato in **Figura 25**.

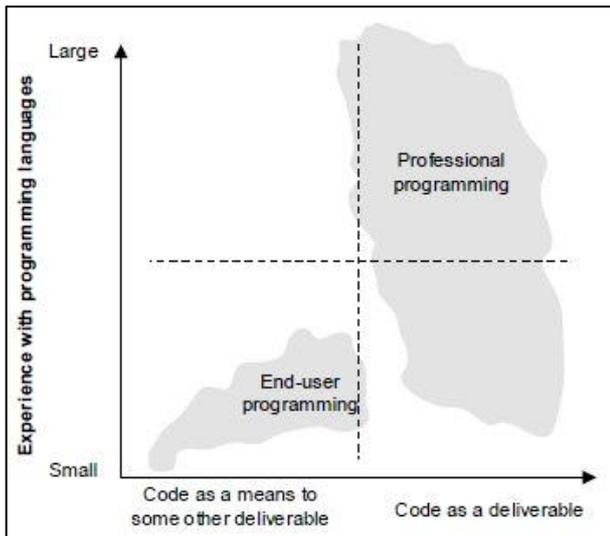


Figura 25: confronto End User Programming e il software engineering, fonte [22]

Volendo descrivere le tipologie più diffuse di EUP, si può ricorrere a quelle elencate da Sakal et. al [22] all'interno della rispettiva ricerca. Esse sono di seguito elencate:

- programmazione svolta con il tramite di attributi visivi, come nel caso degli spreadsheet softwares in cui la semantica visiva è composta dal layout assunto dal foglio di calcolo e dalle celle visibili;
- programmazione attraverso la dimostrazione, in cui l'utente mostra una certa sequenza logica al programma, il quale crea poi il codice (si può citare il caso delle macro registrate e associate a precisi comandi nei sistemi MS Office);
- programmazione attraverso le specifiche, in cui l'utente fornisce le istruzioni per lo sviluppo, sfruttando anche il linguaggio naturale;
- parametrizzazione attraverso cui l'utente personalizza l'applicativo in base alle proprie esigenze, scegliendone i pacchetti che più gli servono.

Nonostante l'EUSE mantenga un'identità simile all'EUP, questi tenta un approccio più strutturato allo sviluppo delle soluzioni di dominio, simile in certi punti a quello disciplinato dalla Computer Science. Tuttavia, permangono ancora delle sostanziali discrepanze rispetto, tra gli altri, a 6 degli elementi fondamentali per il processo di sviluppo software. La **Tabella 3** ne riassume i risultati esposti all'interno dello studio di Sakal [22].

Tabella 3-A: scostamenti EUSE e software engineering in merito a 6 fattori di sviluppo fondamentali, fonte [22]

Fattore	End User Engineering	Software Engineering
<i>Obiettivi</i>	Sviluppare una soluzione ad-hoc per la risoluzione di un problema specifico al dominio cui appartiene lo sviluppatore end-user.	Sviluppare un codice funzionante secondo i requisiti dei molteplici utilizzatori.
<i>Tempo dedicato alle procedure di qualità</i>	Di solito di trascurabile entità.	Definito a priori dalla metodologia.

Tabella 3-B: scostamenti EUSE e software engineering in merito a 6 fattori di sviluppo fondamentali, fonte [22]

Fattore	End User Engineering	Software Engineering
<i>Individuazione dei requisiti del software</i>	Molto spesso trascurata, in quanto l'end-user developer fa soltanto riferimento alla sola risoluzione del problema di dominio.	Fondamentale per la fase di pianificazione delle attività di sviluppo del software.
<i>Progettazione e specifiche del software</i>	Molto spesso, l'end-user developer trova difficoltà nel tradurre in codice i requisiti a priori definiti, anche con l'impiego del linguaggio naturale. Per tale ragione, nella maggior parte dei casi egli procede per tentativi.	In tale fase, si determina il modo in cui il software funzionerà, assicurando il soddisfacimento di tutti i requisiti definiti a priori tramite l'individuazione delle corrette specifiche che deve possedere l'applicativo.
<i>Testing e verifiche sulla bontà del codice</i>	Di solito, l'attività è relativamente superficiale e si concentra sulle problematiche più evidenti.	Vengono applicate tecniche di verifica strutturata definite a priori dalla stessa metodologia.
<i>Eliminazione degli errori contenuti nel software</i>	Molte volte, l'end-user developer si trova nell'impossibilità di rimuovere gli errori contenuti all'interno dell'applicativo per via della sua mancata conoscenza sul debugging.	A seguito della verifica vengono rimossi con delle dovute azioni correttive.

Diversi studi, tra cui quelli di Taylor et al. e McBride et al. (entrambi citati in [22]), hanno affermato che l'implementazione delle metodologie strutturate tipiche dello sviluppo software possono portare numerosi benefici anche nel contesto EUSE, risolvendo tra l'altro le problematiche evidenziate nella tabella sovrastante. Tuttavia, come già evidenziato in precedenza, l'end-user developer, oltre a mancare della formazione necessaria al raggiungimento di un risultato equivalente a quello ottenuto dai programmatori di professione, rivolge la sua attenzione alle problematiche (reali) definite dal suo stesso contesto di lavoro, per le quali cerca di sviluppare un sistema che possa aiutarlo a risolverle nel minor tempo possibile. Lo stesso studio di Taylor et al. (citati in [22]), riassume i potenziali benefici e gli svantaggi scaturiti dall'implementazione dei processi strutturati di software engineering all'interno del contesto EUSE (**Figura 26**).

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> ▪ reduce duplication ▪ reduce difficulty of maintenance ▪ improve application quality ▪ improved security ▪ improved back-up copies and their recovery ▪ align IT department and EUC systems 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ unnecessary bureaucracy ▪ time required to follow methodology ▪ cost of following methodology ▪ not all techniques in methodology may be appropriate

Figura 26: vantaggi e svantaggi nell'introduzione dei metodi IT nel contesto EUSE, fonte [22]

A tal proposito, McBride et al. (citati in [22]) sono convinti che gli svantaggi riassunti all'interno della **Figura 26** derivino esclusivamente dalle reticenze sull'impiego della metodologia strutturata espresse dagli stessi end-user. Difatti, tali soggetti, a causa

dell'intromissione delle figure IT all'interno del progetto, si ritroverebbero nella situazione in cui verrebbe meno la loro centralità in qualità di esperti di dominio. Inoltre, l'introduzione di un eccessivo livello burocratico su attività affidate prima alla loro sola conoscenza specifica, li priverebbe dell'autonomia decisionale, espressa in precedenza come punto a favore dell'impiego dei sistemi EUD. Diversi studi riassunti in [22] elencano, tuttavia, alcune delle problematiche radicate negli approcci EUSE che potrebbero risolversi con l'introduzione delle metodologie strutturate tipiche dei contesti IT. Si possono citare:

- la crescente complessità delle applicazioni programmate con l'approccio EUSE/EUP;
- le ridotte competenze nella scelta dei tools di sviluppo più adeguati che possono portare a irrealistiche aspettative sulla qualità dell'applicativo finale;
- l'assenza di un'adeguata documentazione informativa e di supporto, nel caso in cui l'applicazione venga utilizzata da un soggetto diverso dallo stesso end-user developer;
- la mancanza di procedure di verifica formali relativamente al codice e alle relazioni contenute all'interno del software;
- l'assenza di informazioni storiche sulle diverse versioni dell'applicazione sviluppata, ove nella maggior parte dei casi esse vengono semplicemente sovrascritte le une sulle altre.

Nonostante le criticità emerse, la diffusione degli approcci EUD per lo sviluppo di soluzioni domain-specific all'interno dei vari contesti aziendali viene oggi favorita dalla necessità di pervenire, in tempi brevi, a soluzioni non facilmente ottenibili tramite l'utilizzo dei pacchetti software predefiniti. Rakal et al. [22] sono convinti che tali applicativi assumono sempre più un carattere permanente all'interno dei rispettivi contesti aziendali. Risulta, perciò, semplice capire che il rischio connesso al loro utilizzo cresce proporzionalmente con la rilevanza che hanno i risultati da essi ottenuti sul processo decisionale aziendale. Per tale ragione, la letteratura auspica una graduale contaminazione dell'emergente metodologia End-User a opera dei modelli strutturati appartenenti alla teoria del software engineering.

2.4.2 L'impiego degli spreadsheet softwares come ecosistemi di sviluppo

Una volta analizzato l'approccio End-User per la generazione di soluzioni software domain-specific, si pone l'attenzione sulle più comuni applicazioni utilizzate come ecosistema per il loro sviluppo, ovvero i sistemi basati su foglio di calcolo più comunemente noti come spreadsheet software. Osservando il mondo delle imprese, infatti, si può facilmente notare come esse, oggigiorno, ne facciano un utilizzo estensivo. Volendone brevemente descriverne la struttura, tali software sono costituiti, nella loro globalità, da una griglia nelle cui celle sono contenute diverse informazioni sia in formato numerico che testuale. Le relazioni tra le singole celle vengono comunemente definite con il termine formula. L'utente, agendo sulla griglia, ha la possibilità di modificare i dati in base alle rispettive necessità e di vederne l'immediato risultato all'interno dell'area preposta. Considerando un livello puramente astratto delle informazioni, Obrenović [24]

afferma che lo stesso spreadsheet software può essere pensato come un grafo orientato all'interno del quale le celle costituiscono i nodi, mentre gli archi sono definiti dalle relazioni logico-matematiche, le formule, tra le molteplici variabili. A tal proposito, svariate ricerche hanno evidenziato una maggiore predisposizione degli utenti nell'effettuare calcoli, anche complessi, su spreadsheet software, piuttosto creare un codice sequenziale ad-hoc che portasse allo stesso risultato con maggior efficienza. Si è, difatti, notato che gli individui risultano più propensi a sfruttare il proprio ragionamento spaziale rispetto a quello temporale. Lo stesso Obrenović è convinto che gli applicativi di questo genere siano stati sviluppati sfruttando tale consapevolezza acquisita sulle percezioni degli utenti.

Considerata l'enorme diffusione degli spreadsheet software, le informazioni in essi contenute assumono, molte volte, una notevole rilevanza ai fini del processo di decision-making aziendale. Si può tranquillamente affermare che la qualità dei fogli di calcolo ha dirette ripercussioni sulla qualità dei processi decisionali, quanto più pesanti se essi sono strategicamente rilevanti per l'impresa [25]. Una tale prorompente diffusione ha provocato negli anni la standardizzazione delle competenze aziendali intorno a precise piattaforme (tra tutte il sistema Microsoft Excel® dominante sul mercato per via dell'integrazione con l'omonimo sistema operativo), dando vita al noto fenomeno del lock-in con cui si è vincolati a un preciso standard. Tuttavia, l'affermazione di un sistema dominante non è per definizione direttamente correlato al fatto che lo stesso sia la migliore soluzione tra cui poter scegliere.

Come evidenziato da diversi autori, gli spreadsheet softwares soffrono di una carenza strutturale che li rende pericolosi qualora si vogliano utilizzare come ecosistemi di sviluppo per applicazioni di calcolo relativamente complesse. Secondo Roy et al. [26], una tale mancanza si manifesta nell'esistenza, all'interno della stessa applicazione, di due distinte strutture: una visibile e l'altra nascosta. La prima, definita superficiale (o surface structure, secondo la terminologia originale) contiene ciò che l'utente può direttamente consultare, ovvero l'output del processo di calcolo. Lo stesso studio paragona tale sovrastruttura alla parte anatomica visibile del corpo umano. Tuttavia, ciò che risulta manifesto all'utente è soltanto la punta dell'iceberg virtuale costituente il modello di calcolo costruito. Esiste, infatti, una sottostruttura nascosta al primo sguardo rinominata computazionale (computazionale/deep structure secondo la terminologia originale), nella quale vengono esplicitate le logiche di calcolo del modello e i riferimenti tra le diverse celle di input/output dello stesso spreadsheet. Questa viene paragonata, a sua volta, al sistema nervoso nel quale viaggiano gli impulsi per il funzionamento di un corpo umano. Per rafforzare quanto appena espresso, si ricorre a un semplice esempio pratico. Quando si scrive un documento elettronico o uno stesso programma, un semplice scorrimento del testo permette di avere una panoramica globale dell'oggetto che si sta creando. In uno spreadsheet software come Microsoft Excel®, al contrario, una volta inseriti i dati e le formule all'interno delle celle e aver avviato il calcolo, tali relazioni verranno nascoste all'utente, mostrando solamente il risultato del processo computazionale. Si può, dunque, affermare che le logiche sottostanti il funzionamento dello spreadsheet di calcolo risultano nascoste allo stesso spreadsheet [25]. Risulta perciò evidente che, a causa di questa duplice natura, si dimostra piuttosto difficile per l'utente avere una chiara visione del funzionamento del processo di calcolo all'interno dell'applicativo che è stato progettato, e di conseguenza risulta complesso potervi apporre le dovute modifiche. Le

stesse, risultano tanto più di difficile implementazione se svolte da un soggetto diverso dallo stesso end-user developer. Secondo Roy et al. [26], una tale situazione si presenta piuttosto comunemente all'interno del contesto aziendale, dove si è notato che la vita media delle applicazioni basate su foglio di calcolo si attesta intorno ai cinque anni, ovvero un periodo sufficiente per garantire la presenza di una rotazione delle responsabilità tra soggetti diversi per la gestione del sistema in questione.

Traendo spunto da quanto presentato nel precedente paragrafo relativo all'approccio EUD, una delle principali cause scatenanti la problematica sopracitata è senz'altro la progettazione ad-hoc e scarsamente strutturata di tali sistemi di calcolo. Essi vengono difatti sviluppati con relativa poca attenzione verso i meccanismi di controllo qualità, e con lo scopo di rispondere immediatamente alle esigenze specifiche al dominio cui appartiene l'utente. In accordo con Panko et al. [27], sebbene numerosi studi abbiano messo in evidenza che la proporzione di errori presenti in tali applicazioni sia molte volte incompatibile con gli obiettivi aziendali per le cui misurazioni esse vengono adoperate, molte realtà ignorano ancora tale monito bypassando l'implementazione delle metodologie strutturate tipiche del processo di sviluppo software. Un tale approccio comporta, com'è prevedibile, delle conseguenze spiacevoli qualora il sistema di calcolo progettato si arricchisca per ospitare nuove funzionalità. Difatti, l'approccio destrutturato adoperato da un gran numero di soggetti tende costituire una fonte di pericolo e di proliferazione di errori all'interno dello stesso applicativo.

Nonostante la presenza di errori contenuti negli spreadsheet softwares sia una minaccia non trascurabile per della loro rilevanza all'interno dei processi decisionali aziendali, la letteratura in merito è ancora lontana da una loro esaustiva classificazione. A tal proposito, Powell et al. [28] si avvicinano in modo critico alla teoria vigente relativa alla gestione degli errori all'interno di tali applicativi. Gli autori, argomentando la loro discussione attorno alle tematiche dedicate alla classificazione, alla misura dell'impatto, alla frequenza di accadimento, e alla prevenzione degli errori all'interno degli spreadsheet softwares, dimostrano come sia ancora oggi difficile inquadrare l'utilizzo di tali applicazioni in una procedura strutturata. Considerando, perciò, l'indefinitezza appena citata, si dimostra nuovamente come l'incertezza sia ancora un elemento naturalmente presente all'interno delle procedure di sviluppo software di tipo End-User. I risultati derivanti dalle analisi di Powell possono essere di seguito consultati all'interno della **Tabella 4**.

Tabella 4: revisione critica della letteratura relativa alla classificazione degli errori presenti negli spreadsheet softwares, fonte [28]

Elementi analizzati	Informazioni dalla letteratura	Conclusioni tratte da Powell et al.
<i>Classificazione degli errori</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Panko e Halverson, suddivisione degli errori in quantitativi e qualitativi. I primi conducono a risultati numerici errati, i secondi si riferiscono a pratiche rischiose (hard coding); ▪ Rajalingham et al. offrono un'ulteriore suddivisione delle precedenti categorie. La prima, in strutturale e temporale, la seconda relativa al ragionamento, all'implementazione e agli eventi accidentali. 	<p>Le Tassonomie analizzate presentano le seguenti problematiche comuni:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Indefinitezza del contesto con cui vengono generate (effetto, forma, rischio dell'errore); ▪ Sovrapposizione tra errori qualitativi e quantitativi; ▪ Assente definizione della fase di sviluppo dello spreadsheet software; ▪ Mancanza di test rigorosi sulle categorie generate.
<i>Impatto degli errori</i>	<p>Costituisce l'elemento meno studiato tra quelli elencati. Non esiste significativa letteratura su tale aspetto. Una serie di errori e relativi impatti, contestualizzati in episodi reali, vengono documentati all'interno del portale dell'European Spreadsheet Risks Interest Group (EUSPRING).</p>	<p>Sono poche le informazioni relative all'impatto economico che hanno gli errori contenuti all'interno degli spreadsheet sulle decisioni aziendali. Una sua comprensione, deve essere legata alla tassonomia dell'errore e al contesto in cui viene osservato.</p>
<i>Frequenza di accadimento degli errori</i>	<p>Il corpo letterario non fornisce una risposta univoca in proposito. L'accadimento di un errore è funzione di molteplici variabili, tra cui lo stadio di sviluppo dell'applicativo su spreadsheet software, nonché sua stessa tassonomia. Una conclusione generale su cui la ricerca sembra concordare è la non trascurabilità degli errori all'interno di tali applicativi (quando, tra l'altro, correlati all'EUD).</p>	<p>Per il manager che ha compreso l'importanza che possono avere i risultati delle analisi svolte su spreadsheet software sulle proprie decisioni aziendali, una risposta in merito alle frequenze degli errori in essi contenuti è alquanto difficile per via della scarsa standardizzazione relativa a:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Definizione dell'errore; ▪ Metodo per la sua individuazione; ▪ Campione di spreadsheet software studiati.
<i>Prevenzione degli errori</i>	<p>Una metodologia di sviluppo strutturata permette una sensibile riduzione degli errori all'interno degli applicativi operanti su spreadsheet software. Kruck et al. identificano tre azioni da mettere in atto: la riduzione della complessità del problema, l'utilizzo di layout espliciti per l'applicativo, il testing e il debugging di eventuali errori.</p>	<p>Le verifiche di laboratorio appositamente costruite si dimostrano inconcludenti quando confrontate alle casistiche reali. La ricerca in proposito dovrebbe seguire due vie: individuale e organizzativa. La prima, valutando la validità degli approcci strutturati. La seconda, misurando l'effetto degli standard adoperati dai soggetti aziendali sull'incidenza degli errori all'interno di applicazioni basate su spreadsheet.</p>

Gli elementi descritti all'interno del capitolo si dimostrano utili alla comprensione dell'approccio metodologico impiegato per la progettazione della soluzione software di dominio usata per il calcolo del costo pieno dei motori a turbina di generazione GE9X. A tal proposito, facendo tesoro delle evidenze emerse sulle singolarità dei sistemi End-User e sui rischi connessi all'impiego degli spreadsheet softwares come ecosistemi di sviluppo di soluzioni di calcolo complesse, il team incaricato del progetto ha deciso di implementare una metodologia strutturata che ponesse l'attenzione verso gli elementi critici descritti all'interno della precedente **Tabella 3**. Come verrà reso noto all'interno del prossimo capitolo, gli accorgimenti gradualmente introdotti all'interno del sistema di calcolo sono stati programmati sulla base della roadmap di prodotto, ovvero l'insieme delle implementazioni da inserire per ognuna delle releases dell'applicazione. In merito, invece, all'individuazione e alla rettifica degli errori presenti all'interno dell'applicativo di calcolo operante sul sistema MS Excel®, il team ha deciso di predisporre degli slots temporali di verifica in modo da valutare la correttezza delle implementazioni inserite in ognuna delle releases. In questo modo, il team di sviluppo ha avuto, per ognuna delle fasi progettuali, una chiara visione delle attività da soddisfare, evitando in questo modo di procedere erroneamente per tentativi.

3 Metodologia

Con il presente capitolo si forniscono le informazioni relative alla metodologia che ha portato allo sviluppo dell'applicazione ospitante il sistema per il calcolo del costo pieno dei motori turbofan di generazione GE9X. Nello specifico, verranno rese note le modalità con cui sono stati definiti i requisiti dell'applicativo e le tecniche con cui sono state implementate le logiche di calcolo, verrà discusso l'approccio con il quale sono state pianificate le attività progettuali, nonché il sistema con cui è stata effettuata la programmazione temporale delle tasks all'interno del periodo concesso al team di sviluppo. Per ognuno degli argomenti citati, ne sono forniti i riferimenti teorici e le declinazioni tipiche del contesto trattato.

Sfruttando, innanzitutto, le argomentazioni esposte all'interno del precedente capitolo in merito agli approcci End-User per lo sviluppo di soluzioni software di dominio, saranno esposti i requisiti di soddisfacimento dell'applicativo di calcolo definiti dal team e le tecniche implementate all'interno del sistema MS Excel®.

Una volta chiarita la direzione stabilita per il progetto di sviluppo, si espone il processo di pianificazione delle attività propedeutiche al suo soddisfacimento. A tal proposito, i relativi riferimenti teorici sono estrapolati dal testo intitolato "Il Project Management" a opera di Cantamessa et al. [30]. Per la descrizione degli elementi della pianificazione del progetto discusso all'interno dell'elaborato vengono coinvolti i costrutti della Work Breakdown Structure (WBS) e dell'Organization Breakdown Structure (OBS). Il primo si dimostra utile alla presentazione dei singoli work packages progettuali. Il secondo, invece, attribuisce le rispettive responsabilità ai diversi ruoli coinvolti nel processo di sviluppo.

Per quanto riguarda la programmazione temporale delle attività, essa è stata fortemente influenzata dalla correlazione del progetto di sviluppo con gli approcci End-User in precedenza discussi. Per tale ragione, il team ha deciso di adoperare un sistema ibrido per la schedulazione progettuale. Come verrà specificato nelle sezioni più avanzate, sono stati adottati sia il modello della Critical Chain (CCM) introdotto da Goldratt che l'approccio AGILE a opera di Griffiths. Il riferimento teorico al primo si riconduce nuovamente a [30], mentre per il secondo viene consultato [31]. Il motivo di tale scelta risiede nella diversa trattazione che hanno necessitato il progetto nella sua globalità e le singole iterazioni di sviluppo dell'applicativo. Ognuna di esse si è, infatti, caratterizzata per il soddisfacimento di particolari requisiti, a priori stabiliti, relativi al modello di calcolo. A tal proposito, al fine di avere una visione ordinata delle caratteristiche da inserire all'interno dell'applicazione di calcolo è stato impiegato il costrutto della Product Roadmap. Questi racchiude l'insieme delle implementazioni che sono richieste per ognuna delle releases dell'applicazione. A conclusione dello stesso paragrafo si forniscono i dettagli relativi alla programmazione temporale del progetto. A tal proposito, viene utilizzato un diagramma di Gantt con il quale si discutono le singole attività facenti parte della schedule, con particolare attenzione alla loro durata nonché al cammino critico.

3.1 I requisiti dell'applicativo e l'approccio alle implementazioni

Come illustrato da Cantamessa et al. [30], ogni progetto nasce con la definizione di un concept o con l'identificazione di un'opportunità. In altri casi, esso nasce dal riconoscimento di un bisogno o di un problema, partendo dal quale si passa all'individuazione della possibile soluzione, alla stima delle risorse richieste, alla determinazione del piano di azione, sino al raggiungimento di un piano di progetto vero e proprio. I cosiddetti progetti di natura interna sono quelli che sorgono dentro l'organizzazione a causa dei bisogni percepiti o dei problemi identificati, i quali richiedono interventi mirati al miglioramento dell'efficacia o della stessa efficienza delle attività quotidiane aziendali. Nel caso specifico che si sta trattando, in un contesto in cui le precedenti valutazioni del costo dei motori a turbina venivano svolte in maniera puntuale, su centinaia se non migliaia di componenti, con notevole dispendio di tempo e di risorse impegnate, l'introduzione di un sistema di calcolo automatizzato basato su un modello strutturato avrebbe notevolmente alleggerito il carico di lavoro per i soggetti responsabili, nonché garantito un notevole beneficio in termini di rapidità di risposta alle richieste di preventivo da parte dei clienti.

In sede di concezione del progetto è bene che vengano definiti i requisiti che esso deve soddisfare. A tal proposito, il PMBOK® (citato in [30]) definisce un requisito come la condizione o la capacità che deve essere soddisfatta o posseduta da un sistema, prodotto, servizio, risultato o componente perché questo possa essere considerato conforme alle caratteristiche richieste da un contratto, da uno standard, dalle specifiche di prodotto o da altri documenti formali. Nel contesto dello studio che si sta illustrando, risulta possibile andare a definire i principali requisiti di soddisfacimento richiesti per l'applicazione di calcolo appositamente progettata al fine di stimare il costo dei motori a turbina GE9X. Di seguito, una loro elencazione:

- nella sua forma più generale, il modello di calcolo ospitato dall'applicativo deve garantire la possibilità di stimare il costo pieno di un intero motore a turbina nella valuta di riferimento, dei moduli che costituiscono la sua struttura di prodotto, nonché delle singole parti di configurazione;
- la stessa applicazione deve poter distinguere tra le componenti soggette a lavorazione, le componenti acquistate e immagazzinate e le voci di costo indirette;
- l'applicativo deve operare su sistema MS Excel® largamente diffuso, e deve estrapolare gli input necessari al modello di calcolo che ospita sfruttando le interrogazioni concesse dall'ERP aziendale SAP®.

Per quanto riguarda l'approccio operativo utilizzato, si può fare diretto riferimento a quanto esposto in precedenza da Sakal [22] in merito alle tecniche implementative usate dalla programmazione End-User. Nello specifico, trattandosi la piattaforma utilizzata del sistema MS Excel®, sono stati sfruttati gli approcci basati sugli attributi visivi e sulla dimostrazione. I primi fanno uso della percezione spaziale dell'utente che dispone le informazioni secondo precisi layout. Il metodo basato sulla dimostrazione, dal canto suo, pone le sue basi sull'utilizzo degli strumenti macro per la registrazione di particolari sequenze di attività.

3.2 Pianificazione delle attività progettuali

La pianificazione di progetto comprende l'identificazione e la definizione del suo ambito, l'impostazione del gruppo di lavoro e dei suoi compiti e responsabilità, la pianificazione dei livelli di qualità richiesti, delle risorse necessarie, nonché delle comunicazioni progettuali [30]. Nel caso del processo di sviluppo che si sta illustrando, una descrizione dell'ambito di progetto, concordemente alle prescrizioni fornite dal PMBOK®, può essere direttamente consultata dalla seguente **Tabella 5**.

Tabella 5: descrizione dell'ambito di progetto, riferimenti teorici da [30]

Informazione	Definizione PMBOK®	Dettagli relativi allo sviluppo discusso
Obiettivi del progetto	Si includono i criteri di accettazione dell'output progettuale.	Nello specifico contesto, si ritiene soddisfacente un sistema di calcolo che garantisca una stima granulare del costo pieno dei motori a turbina nella valuta di riferimento.
Requisiti di progetto	Vengono illustrate le condizioni o capacità che l'output di progetto deve possedere al fine di soddisfare le rispettive specifiche.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ l'applicazione progettata deve poter calcolare il costo pieno dell'intero motore e delle sue singole componenti; ▪ l'applicazione deve poter isolare le voci di costo relative alle componenti lavorate, acquistate e indirette; ▪ l'applicazione deve risultare compatibile con i dati provenienti dall'ERP SAP®.
Confini di progetto	Viene identificato ciò che risulta incluso nel progetto e ciò che da esso viene escluso.	Si includono interamente la definizione del modello, la sua implementazione e la verifica della correttezza delle soluzioni proposte. Si esclude la modifica della natura e dei criteri con cui sono organizzati i dati in ingresso al modello.
Deliverables del progetto	Si includono sia gli output del progetto, sia la reportistica ausiliaria.	Il progetto prevede: <ul style="list-style-type: none"> ▪ la creazione di un'applicazione MS Excel® di dominio ospitante un sistema di calcolo per il costo pieno dei motori turbofan GE9X; ▪ la stesura della relativa manualistica per il corretto impiego.
Organizzazione del progetto	Si identificano i membri del team, gli stakeholders e l'organizzazione di progetto.	Si identificano: <ul style="list-style-type: none"> ▪ il core team composto dal program Manager del programma GE9X e da due risorse; ▪ il team incaricato del programma GE9X; ▪ la funzione Finance interna all'organizzazione; ▪ il cliente richiedente il preventivo.
Milestones programmate	Si definiscono i vincoli di raggiungimento di particolari risultati entro delle date predefinite.	In generale, le milestones parziali coincidono con l'ottenimento del risultato di costo di uno o più seriali nella loro interezza.

Una volta definito l'ambito del progetto con i relativi risultati da raggiungere, il team si è incaricato della scomposizione del lavoro progettuale. La letteratura concorda sul fatto che la scomposizione gerarchica del lavoro è uno dei metodi migliori per la corretta gestione dei progetti complessi. Difatti, il primo strumento previsto per una corretta applicazione della metodologia per la gestione dei progetti è la definizione della relativa Work Breakdown Structure, definita anche con l'acronimo WBS. Tale costrutto viene definito da [30] come una scomposizione gerarchica dell'insieme delle attività di progetto. Una tale suddivisione viene svolta sino al raggiungimento dei compiti elementari, i quali risulteranno facilmente gestibili, controllabili e assegnabili alle risorse. Essa, perciò, rappresenta una scomposizione granulare dell'ambito generale di progetto in precedenza descritto.

La letteratura di riferimento suggerisce diversi criteri con cui scomporre le attività descritte all'interno della WBS. Nel contesto della ricerca qui presentata, è stata adottata una logica basata sul ciclo di vita del progetto, denominata altresì per processi di lavoro. Un tale approccio scompone le attività progettuali per stadi logici e/o per fasi di progetto [30]. L'ambito del progetto è stato, perciò, scomposto sino al raggiungimento dei singoli work packages elementari costituenti il livello più basso della struttura WBS al fine di poterne garantire il corretto controllo e la relativa misurabilità. La **Figura 27** mostra la struttura assunta dalla Work Breakdown Structure per il processo di sviluppo presentato all'interno dell'elaborato.

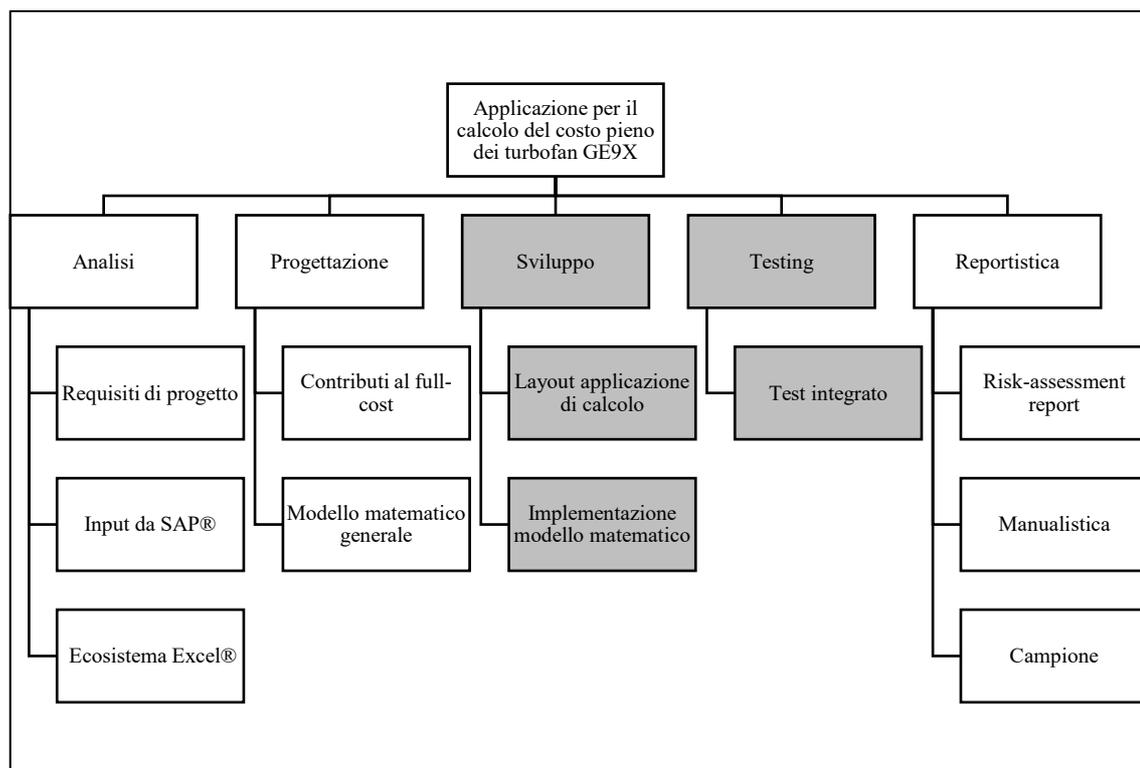


Figura 27: Struttura WBS per il progetto di sviluppo presentato dall'elaborato

Osservandola, si nota che la pianificazione delle attività progettuali è stata svolta tenendo a mente le cinque diverse fasi del ciclo di vita del progetto. Ognuna, può essere descritta nel seguente modo:

- **Analisi.** Per questa prima fase sono state pianificate tre attività: la definizione dei requisiti di successo del progetto (in precedenza illustrati), lo studio delle informazioni in input derivabili dall'ERP aziendale SAP®, nonché l'analisi dell'ecosistema di successiva progettazione End-User, ovvero lo spreadsheet software Microsoft Excel®.
- **Progettazione.** Due attività caratterizzano la fase dedicata alla progettazione del sistema di calcolo. Primo, vanno definiti i contributi significativi da utilizzare all'interno del processo di calcolo ai fini dell'ottenimento del costo pieno dei motori. In secondo luogo, va modellato il processo di calcolo nella sua interezza, definendo chiaramente la natura dell'approccio usato e le relazioni tra variabili dipendenti e non. I dettagli in proposito sono illustrati all'interno del capitolo 4 dell'elaborato.
- **Sviluppo.** Per questa terza fase, è stato pianificato un approccio iterativo di tipo AGILE. In merito allo sviluppo, sono state definite due precise attività. Innanzitutto, l'individuazione della configurazione o layout assunto dall'applicazione di calcolo in merito alla disposizione delle informazioni nelle singole sezioni. Come verrà reso noto più avanti, ognuno dei contributi significativi al calcolo del costo pieno dei motori è stato racchiuso in una precisa sezione dell'applicativo (vedi Allegati C). In secondo luogo, l'implementazione delle relazioni modellate in sede di progettazione, adottando il linguaggio specifico della piattaforma MS Excel® (vedi Allegati A).
- **Testing.** Similmente alla precedente fase di sviluppo, è stato qui adottato lo stesso approccio iterativo. Ai fini della verifica della bontà delle implementazioni introdotte nelle diverse fasi di sviluppo, sono state pianificate delle attività di testing consistenti nel calcolo completo del costo pieno di uno o più motori in concomitanza con i deliverables progettuali imposti. Gli errori individuati sono stati isolati tenendo traccia delle diverse versioni non sovrascritte dell'applicativo, sono stati classificati sulla base della tassonomia introdotta da Panko [28], e infine eliminati dal modello di calcolo.
- **Reportistica.** A conclusione delle precedenti fasi, sono state pianificate tre attività. Innanzitutto, la generazione di un risk assessment report relativo all'applicazione progettata e alle sue logiche di funzionamento, i cui dettagli sono contenuti all'interno del paragrafo 4.4 del testo. Sono state, inoltre, pianificate la stesura di un manuale utente per il corretto utilizzo dell'applicativo, nonché la creazione di una sua versione campione che potesse essere implementata in successivi contesti.

Una volta definita la WBS di progetto e individuati i suoi livelli più bassi di scomposizione, i cosiddetti work packages, è risultato necessario convertire questi ultimi in tasks assegnandovi le rispettive responsabilità. È stata perciò modellata l'Organization Breakdown Structure progettuale, più comunemente nota con la sigla OBS, ovvero l'organizzazione gerarchica delle responsabilità dei diversi soggetti partecipanti [30]. Nel caso del processo di ricerca illustrato, la struttura organizzativa può essere consultata

dalla **Figura 28**. Al Program Manager, responsabile del programma di sviluppo del motore GE9X, sono state affiancate due risorse, una interna impiegata parzialmente, l'altra esterna impiegata a tempo pieno. Entrambe si sono occupate dello sviluppo del modello di calcolo e della sua implementazione all'interno dell'applicazione Excel®. Gli ulteriori stakeholders coinvolti nel progetto sono la funzione Finance vigente in azienda, il team incaricato dello sviluppo del GE9X, nonché il cliente richiedente il preventivo sugli stessi motori.

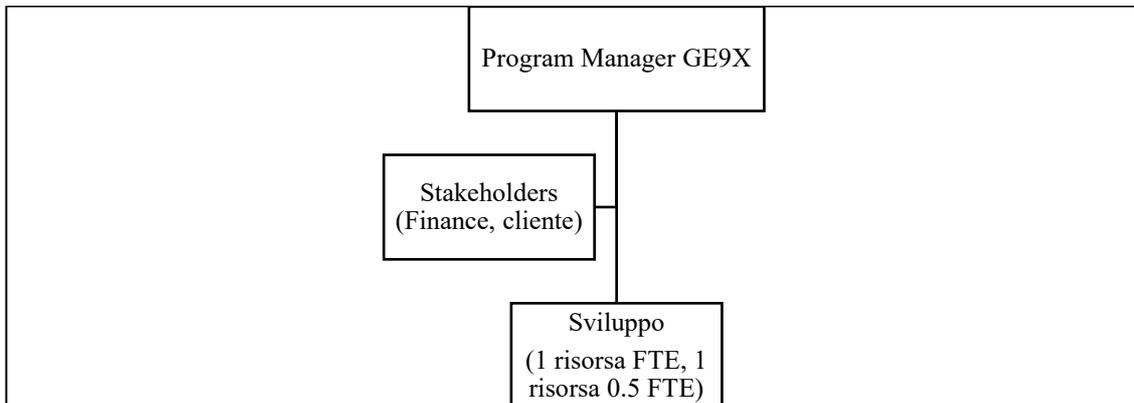


Figura 28: Struttura OBS per il progetto di sviluppo presentato dall'elaborato

Durante tutto l'arco del processo di sviluppo della soluzione software di dominio il core team ha avuto piena responsabilità delle cinque fasi in precedenza elencate. Al Project Manager, il quale ha svolto il compito di consulenza e di supporto alle attività di sviluppo, sono stati riportati i progressi raggiunti dal team per ognuna delle fasi progettuali. I rimanenti stakeholders, dal canto loro, sono stati coinvolti nelle reviews dedicate alla verifica dei deliverables, con il ruolo di fornire il proprio feedback in merito alla correttezza del processo di calcolo modellato.

3.3 Programmazione temporale delle attività

Come già affermato in precedenza, la programmazione delle attività progettuali risulta consequenziale alla loro pianificazione. Difatti, l'aggiunta dei tempi necessari al soddisfacimento di quanto pianificato può essere realizzata soltanto quando l'insieme delle attività propedeutiche al progetto è stato collocato all'interno della relativa Work Breakdown Structure. Gli elementi di base, definiti da [30], da tenere in considerazione quando si effettua la programmazione temporale delle attività progettuali sono di seguito elencati:

- Durata delle attività, ovvero l'intervallo temporale necessario al loro completamento espresso nelle unità di riferimento. Nel caso della presente ricerca l'unità temporale da tenere in considerazione è il giorno lavorativo da 8 ore, valutato in cinque giorni settimanali.
- Relazione di interdipendenza, ovvero il posizionamento reciproco tra le varie attività progettuali sulla base dei relativi vincoli di precedenza.
- Eventuali milestones, ovvero eventi significativi all'interno del ciclo di vita del progetto. Nel caso specifico, le milestones progettuali sono state poste in corrispondenza di particolari deliverables richiesti dal cliente, coincidenti con il calcolo del costo pieno dei diversi motori in via di sviluppo.

Una volta definiti i prerequisiti necessari alla programmazione, viene mostrato l'approccio utilizzato all'interno della presente ricerca. A tal proposito, è utile porre un'importante premessa. Come già accennato nel precedente paragrafo dedicato alla pianificazione progettuale, il carattere iterativo delle fasi di Sviluppo e Testing ha imposto una programmazione diversa, e più snella, delle attività ad esse appartenenti. Per tale ragione, l'approccio utilizzato ha un carattere ibrido, distinguendo da un lato il progetto nella sua globalità, dall'altro le due fasi sopracitate. Per quanto riguarda il primo, è stato adottato il modello di programmazione della catena critica, o Critical Chain Method (CCM), introdotto da Goldratt nel 1997. Nel caso, invece, del processo iterativo di Sviluppo e Testing delle diverse versioni dell'applicazione di calcolo è stato utilizzato l'approccio AGILE. In entrambi i casi, verranno definite le principali caratteristiche delle metodologie usate e le motivazioni sottostanti il loro impiego per il contesto analizzato. Il risultato della programmazione temporale delle attività propedeutiche al progetto di ricerca di cui nel presente elaborato è raffigurato nel diagramma di Gantt in **Figura 31** posto a conclusione del paragrafo.

L'innovazione proposta da Goldratt con l'approccio alla programmazione CCM è stata quella di inserire l'aspetto del comportamento umano all'interno degli algoritmi caratterizzanti la metodologia di schedulazione classica [30]. Le motivazioni sottostanti l'impiego del CCM nel contesto del presente studio verranno discusse parallelamente alla definizione degli stessi elementi caratterizzanti la metodologia. Goldratt, nella sua esposizione, ha suddiviso il processo in due fasi, rinominate rispettivamente pianificazione e monitoraggio. Entrambe sono discusse nella seguente **Tabella 6**.

Tabella 6-A: Modello CCM e motivazioni per il suo impiego, riferimenti teorici da [30]

Fase	Metodologia	Caratteristiche dell'approccio descritte da Goldratt	Declinazione dell'approccio generale all'interno del contesto di ricerca presentato
Pianificazione	Schedulazione backwards	<p>La programmazione delle attività progettuali viene svolta a ritroso, partendo da una o più date assegnate corrispondenti alla conclusione imposta per il progetto o per i suoi deliverables parziali.</p> <p>Partendo dalla fine, si è meno propensi a inserire delle riserve temporali e si definisce, perciò, la data ultima per l'inizio delle attività al fine non incorrere in ritardi.</p>	<p>Considerando le milestones a priori imposte dal cliente richiedente la fatturazione dei seriali, il team di sviluppo ha deciso di schedulare le attività a ritroso partendo da quest'ultime. In questo modo, è risultato possibile assegnare delle priorità alle diverse implementazioni richieste per l'applicazione ospitante il sistema di calcolo.</p>
	Schedulazione As-Late-As-Possible (ALAP)	<p>Le attività vengono ordinate in base alle loro rispettive priorità, e viene loro assegnato un istante iniziale tale che si riducano al massimo i loro margini non produttivi. Poiché una tale metodologia incrementa notevolmente il numero di cammini critici, vengono introdotti dei buffer temporali con lo scopo di difendersi dalla variabilità progettuale.</p>	<p>Una volta assegnate le priorità alle diverse implementazioni da inserire all'interno dell'applicativo di calcolo, il team di sviluppo ne ha stimato le rispettive durate al fine di individuarne la migliore collocazione temporale. La collocazione dei magazzini temporali viene esplicitata più avanti nel paragrafo.</p>
	Identificazione della catena critica	<p>La catena critica viene definita come la sequenza più lunga di attività che tiene in considerazione i vincoli tra le stesse e tra le risorse coinvolte. Il CCM riconosce, infatti, che l'indisponibilità delle risorse operanti sulla catena critica può causare un ritardo nelle attività progettuali.</p>	<p>Nel contesto del presente studio, l'insieme delle attività critiche risulta definito dalla sequenza caratterizzante il processo di sviluppo. I dettagli in proposito vengono resi noti all'interno del diagramma di Gantt contenuto in Figura 31.</p>
	Inserimento dei buffer temporali	<p>I buffer temporali vengono inseriti al fine di ridurre le incertezze causate dalla schedulazione ALAP. In generale, vengono definiti due tipi di buffer: di progetto, da inserire al termine della catena critica, utile a garantire il completamento entro la data prefissata; feeding buffer, da porre sulle attività non critiche che confluiscono sulla catena di modo che non creino dei ritardi.</p>	<p>Nel caso del progetto di sviluppo illustrato, sono stati inseriti:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Un buffer di progetto al termine della catena critica, al fine di garantire il corretto completamento delle attività entro la conclusione prefissata; ▪ Quattro feeding buffer posti immediatamente prima della deadline di un deliverable, con l'obiettivo di avere un margine di azione per l'applicazione delle misure correttive sul modello di calcolo e sui risultati di costo da fornire al cliente.

Tabella 6-B: Modello CCM e motivazioni per il suo impiego, riferimenti teorici da [30]

Fase	Metodologia	Caratteristiche dell'approccio descritte da Goldratt	Declinazione dell'approccio generale all'interno del contesto di ricerca presentato
<i>Monitoraggio</i>	Tracking Mode e gestione dei buffer	Il CCM valuta l'avanzamento del progetto in base al livello di consumo del buffer posto su un determinato percorso della catena. In fase di tracking si valuta perciò il residuo del buffer in modo da comprendere se il progetto rispetta le tempistiche programmate o meno.	Nel caso dello studio qui presentato, il metodo generale è stato impiegato "tel quel". Nello specifico, il team ha deciso di implementare o meno una nuova funzionalità sulla base del tempo stimato per l'attività, della sua priorità, nonché dello stato di consumo del magazzino temporale corrispondente alla rispettiva iterazione di sviluppo.

Sebbene il progetto nella sua globalità sia stato programmato attraverso la metodologia CCM, nel caso delle attività core di Sviluppo e Testing è stato adottato un approccio AGILE tipico dell'industria software. Gli elementi fondamentali caratterizzanti tale modello vengono citati da Griffiths [31], e sono di seguito elencati:

- viene adottato un approccio evolutivo, incrementale, e iterativo alla generazione delle soluzioni progettuali;
- la pianificazione e la schedulazione sono definite per milestones e deliverables parziali, posti anche in intervalli temporali ravvicinati;
- le micro-attività sono determinate sulla base dei risultati parziali in precedenza ottenuti. Esse sono, in generale, definite da miglioramenti incrementali rispetto all'esistente e richiedono una programmazione ridotta con un orizzonte temporale a breve termine.

A differenza dell'approccio classico, definito anche con il termine Waterfall per via della logica consequenzialità delle attività progettuali a priori pianificate, la metodologia AGILE predilige una progressione incrementale definita da piccoli passi facilmente monitorabili. Uno sprint, come definito dalla stessa letteratura AGILE, costituisce un intervallo temporale nel quale il team di progetto inserisce diversi miglioramenti di natura incrementale al prodotto (tipicamente nuove funzionalità o correzioni di bug all'interno di un software). La globalità delle funzionalità implementate appartiene a un insieme più grande definito backlog di prodotto. Questi racchiude l'insieme degli elementi, ordinati secondo la rispettiva priorità, che dovranno essere inseriti all'interno del prodotto al fine di soddisfare i requisiti di progetto. A tal proposito, l'avviamento di uno sprint sarà sempre preceduto dal relativo meeting nel quale si decide il sottoinsieme di elementi da implementare. La **Figura 29** offre una visione del modello introdotto da Griffiths.

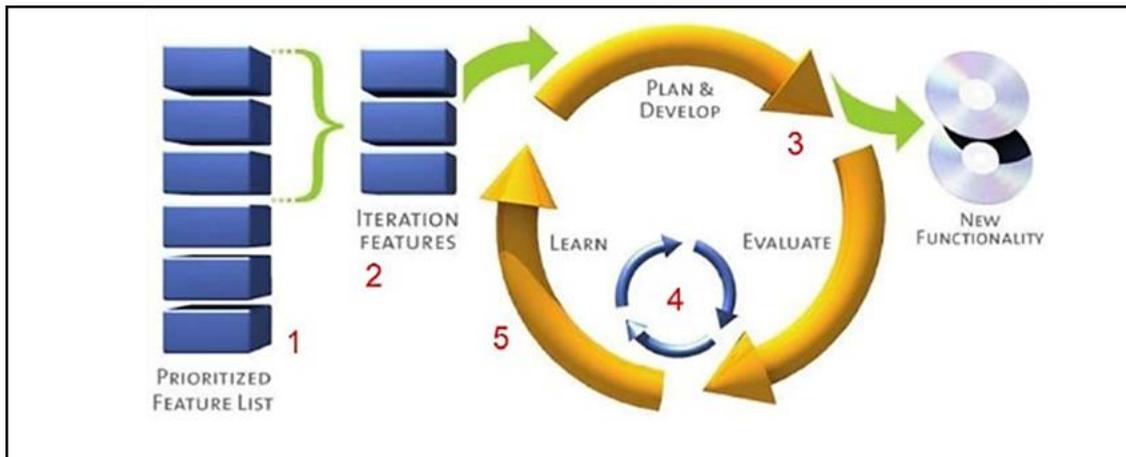


Figura 29: Agile Project Management e gestione dello sprint, fonte [31]

Essa è indicativa delle modalità con cui sono state gestite le fasi di Sviluppo e Testing durante tutto l'arco dello studio illustrato nel presente elaborato. Dal backlog di prodotto ordinato in base alle priorità concesse alle diverse micro-attività (1), per ogni sprint sono state prelevate quelle ritenute eseguibili nell'arco temporale predefinito (2). Ogniqualevolta che sono stati individuati dei rilevanti spunti di miglioramento per il processo di calcolo, il backlog è stato riordinato in base alle priorità aggiornate. Le funzionalità richieste per ogni iterazione di sviluppo sono state prima implementate all'interno dell'applicazione (3), ne è stato poi verificato l'impatto sul processo di calcolo (4), ed infine sono state tratte le diverse lessons-learned con (possibile) individuazione di nuovi elementi da inserire in concomitanza degli sprint successivi (5).

Permane ancora una domanda sul come siano state strutturate le singole iterazioni di sviluppo. La **Figura 30** ne fornisce una puntuale risposta in merito alle principali implementazioni caratterizzanti ognuna delle tre fasi di sviluppo. A tal proposito, si è ricorso alla cosiddetta Roadmap di prodotto ampiamente utilizzata nel contesto del software engineering. Questa risulta uno strumento del tutto equivalente alla WBS di progetto, con la sola differenza che i work packages in essa contenuti rappresentano le funzionalità che dovranno essere implementate all'interno dell'applicazione [32]. Nel contesto del presente studio, tale costrutto è stato esclusivamente impiegato per le fasi di Sviluppo e Testing. La Product Roadmap descrive, perciò, l'evoluzione dell'applicazione attraverso le diverse releases, ovvero l'insieme delle funzionalità che la rendono gradualmente completa e utilizzabile da parte dell'utente [32].

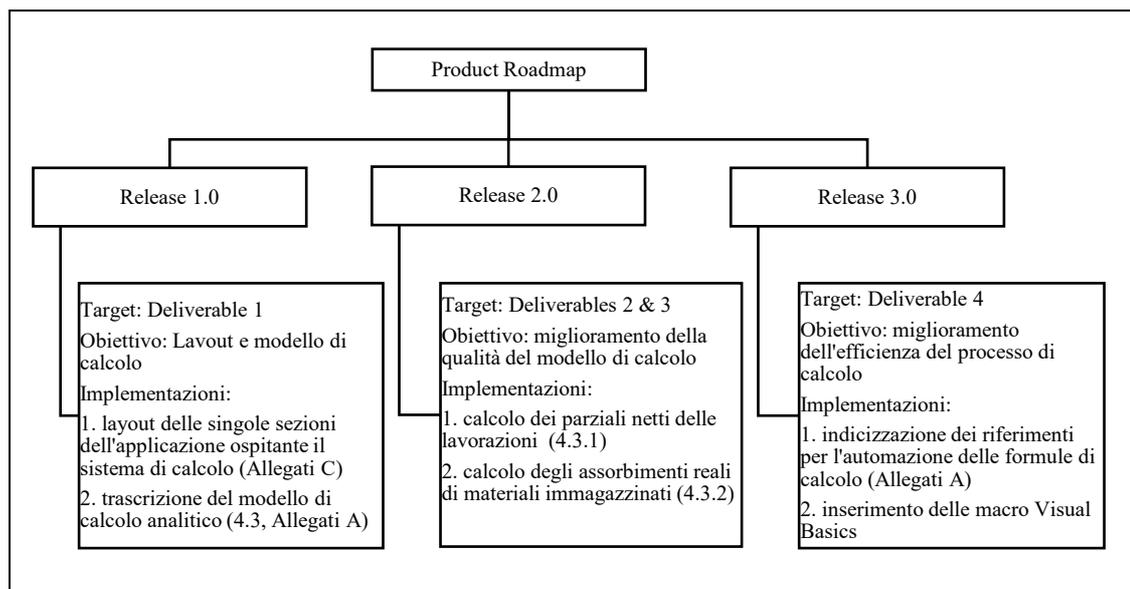


Figura 30: Roadmap di prodotto con le principali implementazioni per l'applicazione³.

Osservando la **Figura 30** si notano tre principali releases dell'applicazione progettata. Risulta utile confrontare il contenuto mostrato con la schedule corrispondente all'intero processo di sviluppo illustrata all'interno del diagramma di Gantt posto in **Figura 31**.

Per la prima release, il team di progetto ha deciso stabilire in modo esplicito il layout dell'applicazione e ha implementato il modello di calcolo analitico. Come già affermato, la scelta di una configurazione predefinita per un applicativo operante su spreadsheet software riduce l'insorgenza di futuri errori presenti nel calcolo, siano essi di natura quantitativa che qualitativa (Kruck citato da [28]).

Il focus della seconda release è stato incentrato sul miglioramento della qualità dell'output ottenuto tramite il processo di calcolo implementato all'interno dell'applicativo. A tal proposito, sono stati individuati due particolari contributi al full cost dei motori necessitanti di manovre correttive atte al miglioramento della granularità del risultato da essi fornito. Come verrà ampiamente discusso all'interno del paragrafo 4.3.1 dell'elaborato, il ricalcolo delle quantità di lancio e dei costi netti dei lotti di lavorazione ha risolto un problema di double-counting tipico della prima versione del modello. La causa a monte di tale problematica è consistita nella stessa organizzazione dei dati provenienti dall'ERP aziendale usato come input per il modello di calcolo. Va, tuttavia, ricordato che dall'ambito di progetto è stata esclusa una rilavorazione delle informazioni in esso contenute. Il secondo elemento soggetto a revisione è stato l'assorbimento di componenti acquistate da parte delle singole configurazioni dei motori soggetti a stima. Il paragrafo 4.3.2 ne fornisce un'ampia discussione. Volendo offrire un breve riassunto in proposito, piuttosto che attribuire le sole quantità richieste dalla Bill of Material (BOM) dello specifico seriale, è stato deciso di incrementare la precisione del calcolo correlando le stesse con l'ammontare richiesto e attribuito agli assemblati di livello superiore.

³ I paragrafi di riferimento per ognuna delle implementazioni sono mostrati dentro le relative parentesi.

Conclusasi la seconda release, l'applicazione di calcolo ha assunto una forma pressoché definitiva. Lo sprint dedicato alla realizzazione della terza, e ultima, release dell'applicativo si è caratterizzato per la spiccata attenzione posta al miglioramento dell'efficienza del processo di calcolo. Durante l'arco temporale ad esso dedicato, sono state introdotte diverse Macro (modellate in Visual Basic®) all'interno del sistema MS Excel® utili all'automazione delle attività ritenute maggiormente time-consuming.

Chiarite le principali implementazioni inserite all'interno del modello di calcolo per ognuna delle tre releases dell'applicazione di dominio progettata, si fornisce una trattazione dettagliata dello scheduling relativo alle singole attività costituenti il progetto di sviluppo presentato dall'elaborato. Il diagramma di Gantt ricostruito con il sistema MS Project® contenuto in **Figura 31** offre una panoramica globale dell'intero studio. Al suo interno vengono esplicitate le tasks facenti parte delle singole fasi progettuali e le relative durate espresse nelle unità temporali di riferimento, le milestones di progetto corrispondenti ai deliverables incrementali richiesti dal cliente, nonché il cammino critico assunto dalla schedule. Una legenda posta nella sezione inferiore della stessa figura fornisce i dettagli dei singoli elementi distintivi sopracitati.

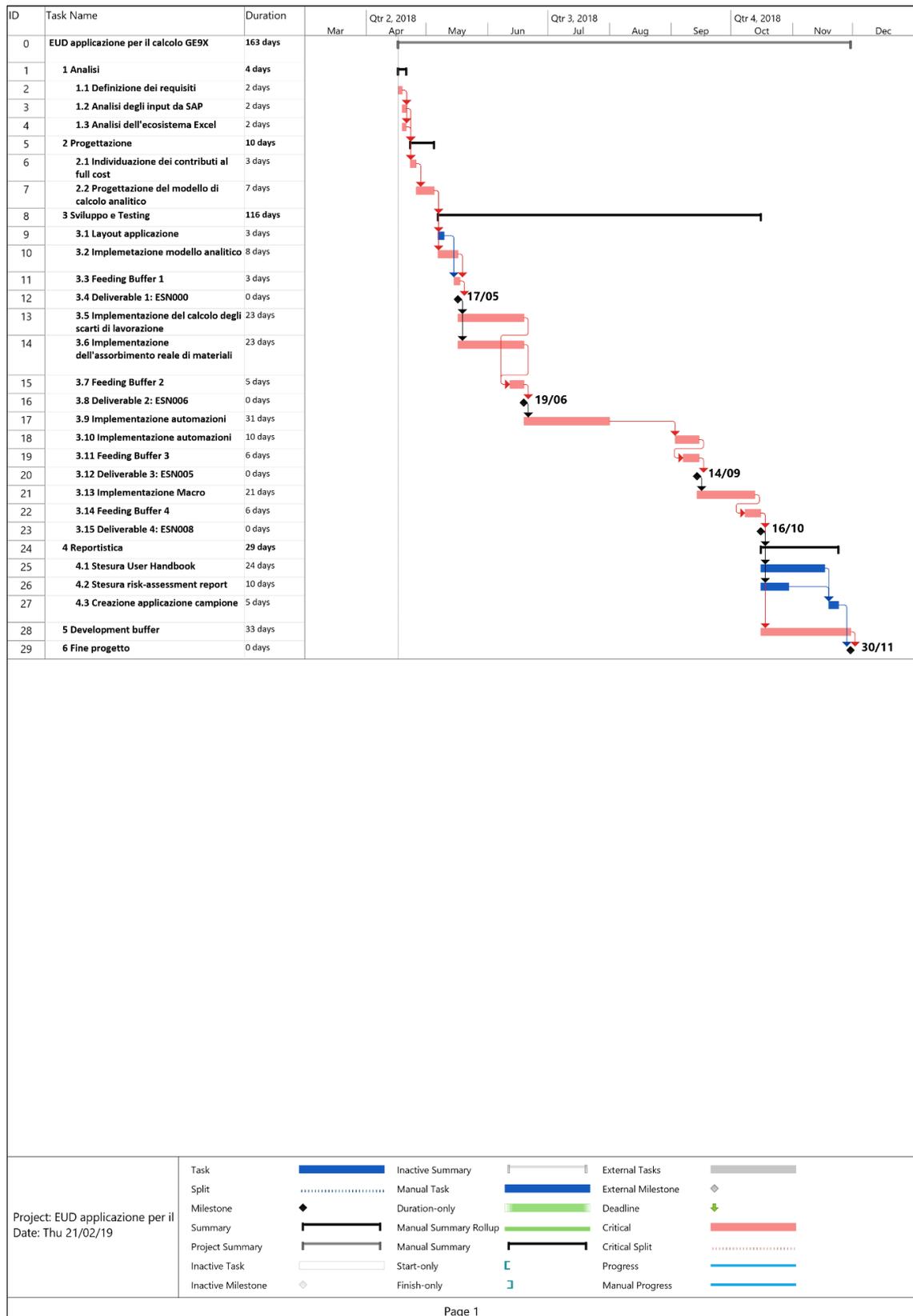


Figura 31: diagramma di Gantt relativo al progetto di sviluppo dell'applicazione di calcolo

Osservando il diagramma di Gantt in figura si nota come la programmazione delle attività si sia configurata in quattro macro fasi. Di seguito, i principali dettagli:

- **Fase 1, analisi dei requisiti di progetto, degli input provenienti dall'ERP SAP® e dell'ecosistema di sviluppo MS Excel®.** Questo primo periodo, della durata complessiva di cinque quattro lavorativi, è stato segnato dalle attività propedeutiche all'avviamento del progetto. Partendo da una base predefinita per l'applicazione di calcolo disposta dallo stesso program manager, il team ne ha prima di tutto definito i requisiti di soddisfacimento. All'interno dello stesso periodo, sono stati programmati due giorni lavorativi per valutare la natura ed il formato delle informazioni in input per il processo di calcolo provenienti dall'ERP SAP® (1.2), nonché per comprendere le caratteristiche strutturali della piattaforma ospitante l'applicazione, ovvero lo spreadsheet software Microsoft Excel® (1.3). A conclusione della fase di analisi, il team di sviluppo si è riunito e ha definito i criteri con cui procedere alla fase di progettazione del modello di calcolo.
- **Fase 2, progettazione analitica del modello di calcolo da implementare all'interno dell'applicazione.** Con la lesson-learned proveniente dalla precedente fase di analisi, il team ha programmato, su un arco temporale di 10 giorni lavorativi, le attività dedite allo studio dei contributi utili all'ottenimento del costo pieno dei motori (2.1), nonché relative alla progettazione analitica del modello calcolo (2.2) da implementare. Alla prima sono stati allocate tre giornate lavorative, mentre alla seconda, risultata più impegnativa e dipendente dalla prima, ne sono state allocate 7. Al termine della suddetta fase, il team partecipato a un review meeting con gli stakeholders di progetto durante il quale si sono discussi i risultati conseguiti e si sono definiti gli obiettivi per il successivo sviluppo dell'applicativo.
- **Fase 3, sviluppo dell'applicazione di calcolo e verifica integrata.** Come precedentemente illustrato, le micro-attività corrispondenti a tali fasi sono state gestite secondo un modello AGILE. Ognuno degli sprint caratterizzanti le tre releases dell'applicazione è stato preceduto dal relativo incontro propedeutico al loro avviamento. Come si può notare dalla figura, la macro-fase dedicata allo sviluppo dell'applicazione di calcolo e alla sua verifica integrata è durata 116 giorni lavorativi nell'unità di riferimento utilizzata. Il primo sprint, della durata di 10 giorni lavorativi, ha previsto il raggiungimento di due principali obiettivi: la definizione del layout assunto dalle singole sezioni costituenti l'applicativo di calcolo (3.1), l'implementazione del modello di calcolo analitico in precedenza progettato (3.2). Al termine della suddetta iterazione sarebbe stato richiesto il calcolo del primo dei motori soggetti a stima, indicato con la sigla del seriale ESN000 (3.4). Per garantire il completamento delle attività entro la fine prefissata, il team ha programmato un buffer intermedio della durata di 3 giorni (3.3) durante il quale sarebbe stata concessa la verifica dei risultati ottenuti prima della loro trasmissione al cliente. Una volta conclusa la prima iterazione di sviluppo, il team, valutando lo stato del processo di calcolo, ha programmato due principali tasks atte a migliorarne la qualità dell'output. La prima ha coinvolto il costo diretto delle componenti lavorate attribuite ai motori (3.5), mentre la seconda si è incaricata del contributo delle parti acquistate da fornitori esterni (3.6). Entrambe

le attività sono state svolte in parallelo e hanno avuto una durata complessiva di 23 giorni lavorativi. Per la conclusione del secondo sprint di sviluppo è stato posto dal cliente un secondo deliverable, corrispondente al calcolo del costo pieno del motore rinominato ESN006 (3.8). Come nel caso precedente, anche qui è stato programmato un buffer intermedio della durata, questa volta, di 5 giorni. Il terzo sprint si è caratterizzato per un intervallo temporale sensibilmente maggiore rispetto ai precedenti ed ha avuto lo scopo di migliorare l'efficienza del processo di calcolo. A tal proposito, sono stati innanzitutto dedicati 40 giorni lavorativi per l'implementazione delle funzionalità atte alla velocizzazione del calcolo all'interno dell'applicativo (3.9, 3.10). Tra tutte, si possono citare le indicizzazioni delle voci partecipanti al calcolo dei singoli contributi al costo dei motori. Al termine della suddetta fase è stato posto un terzo deliverable, corrispondente alla stima del costo pieno del seriale ESN005 (3.12), anticipato come di consueto dal relativo buffer intermedio (3.11). L'ultimo terzo dello sprint, pari a 21 giorni lavorativi, è stato dedicato all'implementazione delle Macro in Visual Basics ® all'interno delle sezioni dell'applicazione ritenute maggiormente time consuming (3.13). Il quarto buffer intermedio della durata di 6 giorni (3.14) ha garantito il corretto soddisfacimento del deliverable relativo al motore ESN008 (3.15). Al termine del calcolo del costo pieno dell'ultimo seriale, è stato infine programmato un buffer di progetto (5) valido sino al suo completamento. In questo modo, si è garantito il puntuale completamento delle attività appartenenti alla catena critica.

- **Fase 4, generazione della reportistica e creazione dell'applicazione campione.** In quest'ultima fase, il team ha programmato l'esecuzione di tre attività. La stesura della manualistica relativa all'utilizzo dell'applicazione di calcolo ideata (4.1) è stata programmata per il periodo immediatamente successivo alla consegna dell'ultimo deliverable richiesto dal cliente. L'attività ha avuto una durata complessiva di 24 giornate lavorative. In parallelo è stato programmato l'inizio del processo di risk-assessment per l'applicazione e per il modello di calcolo ospitato (4.2), durato 10 giorni e culminato nella generazione della relativa reportistica riportata all'interno del paragrafo 4.4 dell'elaborato. Come si può notare in **Figura 31**, entrambe le attività non appartengono alla catena critica. Conclusasi la stesura del manuale utente per il corretto impiego del tool di calcolo, ne è stato creato un campione funzionante (4.5) con l'obiettivo di verificare la coerenza delle procedura descritte, nonché con lo scopo di offrire la possibilità di un suo riutilizzo in successive interazioni di sviluppo prodotto. Come per le precedenti, l'attività in questione è stata esclusa dalla catena critica.

Con la descrizione dettagliata delle attività componenti la schedule di progetto, si conclude la trattazione della metodologia caratterizzante lo sviluppo dell'applicazione di dominio per il calcolo del full cost del GE9X. All'interno del prossimo capitolo verrà discussa la soluzione generata. Si parlerà dei diversi contributi coinvolti nel calcolo del costo pieno dei motori, degli assunti e degli approcci metodologici usati ai fini del loro soddisfacimento, dei modelli adoperati per la gestione e per l'aggregazione dei dati. Il punto di vista adottato sarà quello teorico. Per tale ragione, verrà utilizzato il linguaggio formale tipico della modellazione matematica. Le relazioni tra le variabili espresse nel linguaggio tipico della piattaforma Excel® ospitante possono, invece, essere consultate direttamente nella sezione degli Allegati del presente elaborato.

4 La soluzione generata

Con il presente capitolo si intende fornire un'esaustiva illustrazione del modello per la stima dei costi generato al fine di preventivare i motori turbofan di generazione GE9X. Come risulta già noto, l'applicazione di calcolo sviluppata poggia sulla piattaforma Microsoft Excel®. All'interno del capitolo, la descrizione dei contributi di calcolo per il costo pieno dei motori segue il medesimo flusso con cui i dati vengono impiegati dalla stessa applicazione.

Innanzitutto, risulta necessaria la creazione di un database che contenga l'insieme delle informazioni propedeutiche al calcolo. Nel caso in questione, vengono definite tre anagrafiche a partire dalle informazioni contenute all'interno dell'ERP aziendale SAP®. La prima contiene la totalità delle componenti di configurazione appartenenti ai diversi motori. La seconda, invece, racchiude le informazioni relative ai lotti di lavorazione. L'ultima anagrafica contiene i dati di costo delle commesse i cui codici sono attribuibili al progetto GE9X. Una volta estratti gli input provenienti dall'ERP, l'insieme dei dati viene raggruppato in un'unica matrice dinamica costituente il database univoco da utilizzare per il calcolo dei diversi contributi al costo pieno dei motori.

Giunti a questo punto, il flusso delle informazioni subisce una triforcazione. All'interno dell'applicazione, sono state difatti progettate tre specifiche sezioni, le quali stimano rispettivamente il costo delle componenti lavorate, il costo delle componenti acquistate e immagazzinate, nonché il valore dei costi indiretti. Le prime, vengono direttamente attribuite ai motori a seconda della loro precisa configurazione. Gli indiretti, dal canto loro, subiscono un'allocazione secondo una precisa logica illustrata nei successivi paragrafi. Ogni sezione dell'applicazione dei calcolo fa capo a una metodologia univoca presentata in modo esaustivo nei rispettivi paragrafi di competenza. Una volta stimato il contributo di ognuna delle tre sezioni appena descritte, il modello procede aggregando i costi delle singole componenti sino al raggiungimento del full cost del motore oggetto di studio.

L'applicazione progettata offre diversi livelli di lettura in merito al calcolo svolto. Difatti, coerentemente ai requisiti a priori definiti (vedi paragrafo 3.1), risulta possibile consultare il costo diretto e pieno di ogni singolo elemento di configurazione, dei rispettivi moduli che li aggregano, nonché dei motori appartenenti alla serie GE9X nella loro globalità. Una panoramica generale del processo di calcolo costruito viene raffigurato all'interno della **Figura 32**.

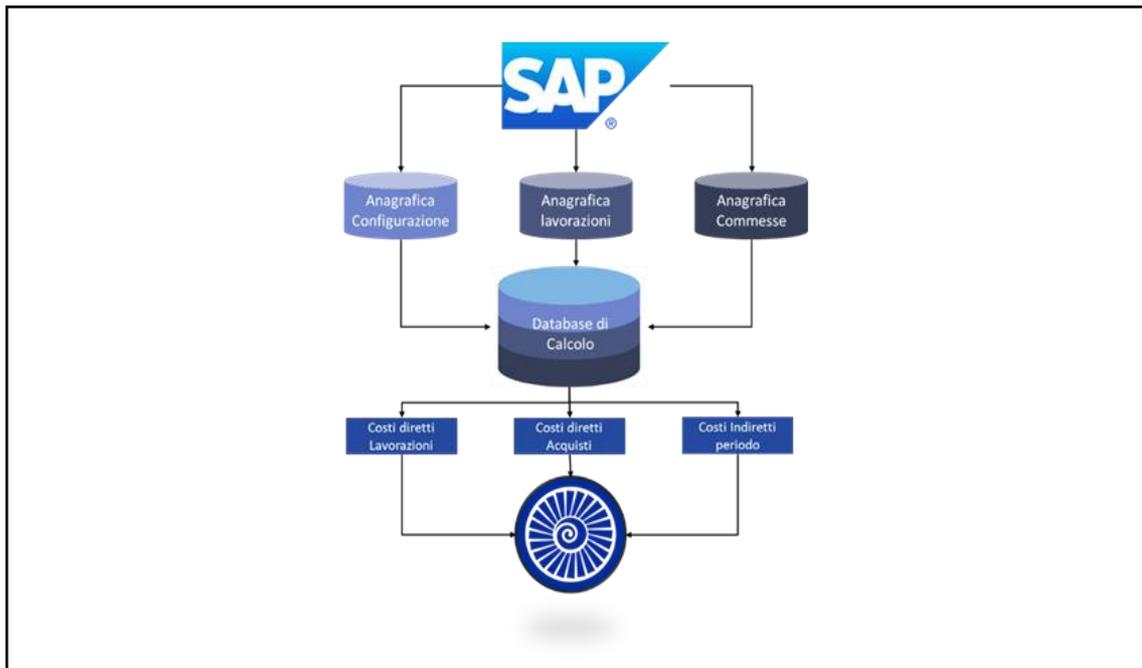


Figura 32: panoramica generale del processo di calcolo integrato all'interno dell'applicazione di dominio

Come risulterà noto dalle successive sezioni, il processo di calcolo generale, in modo coerente alle classificazioni del product-costing derivate dalla letteratura e mostrate all'interno del paragrafo 2.2 del presente elaborato, si configura come un approccio bottom-up di tipo quantitativo, analitico e Activity-Based con forti influenze dal modello di Jung. D'altronde, essendo la trattazione junghiana particolarmente adatta al contesto del Manufacturing, essa trova negli argomenti esposti il suo ecosistema più favorevole.

4.1 La terminologia adoperata all'interno del processo di calcolo

Giunti a questo punto, risulta utile fornire alcune nozioni in merito alla terminologia utilizzata per la trattazione dei successivi argomenti. Come risaputo, un motore aereo è un oggetto estremamente complesso composto da migliaia di pezzi. Essendo un prodotto altamente diversificato, fintanto che esso rimane in fase di sviluppo difficilmente assumerà una propria configurazione definitiva. Risulterà, perciò, alquanto probabile che i seriali prodotti in questa fase avranno strutture di prodotto sensibilmente differenti. Una volta il motore certificato, la sua configurazione tenderà a stabilizzarsi, e si passerà alla successiva fase produttiva di tipo make-to-order (MTO).

Nel proseguo del testo, i motori verranno indicati con la sigla ESN, acronimo dell'espressione Engine Serial Number. A ogni ESN sarà associata una lista gerarchica di componenti lavorati o acquistati su vari livelli, comunemente nota con il nome di Bill of Material (BOM). Tutti i componenti di prodotto presenti in BOM, siano essi elementi di minuteria acquistati all'esterno o assemblati di livello superiore, sono associati a un codice alfanumerico univoco definito Part Number (PN). La transcodifica di ogni PN permette di risalire al modulo di appartenenza e al livello dello stesso all'interno della BOM. Un modulo di configurazione altro non è che un assemblato posto al livello più alto della BOM, quale ad esempio la turbina a bassa pressione (LPT) illustrata nei precedenti paragrafi. A ogni Part Number, inoltre, viene associata la relativa quantità richiesta dalla Bill of Material del motore, nonché una coppia di etichette indicative, rispettivamente, della categoria di voce di costo a cui appartiene e della divisione (plant) all'interno del quale viene lavorato o assemblato. In merito alla seconda, l'utilità consiste nel potere attribuire al pezzo una quota percentuale nozionale di material burden, ovvero una fee da pagare per i materiali in ingresso dipendente dall'impianto produttivo che si sta considerando. La prima, invece, necessita di maggiori approfondimenti. I Part Numbers possono essere associati a due specifiche etichette (o tag): Machining per le lavorazioni macchina, Material per i materiali acquistati da fornitori esterni. Dei Part Numbers presenti nella BOM dei motori, alcuni vengono acquistati esternamente dal soggetto aziendale, di solito le componenti più semplici appartenenti ai livelli più bassi della struttura gerarchica, mentre altri, in genere i moduli di alto livello, vengono lavorati e assemblati in uno degli impianti di riferimento. Le parti più semplici, ovvero le quantità di materiali acquistati necessarie agli assemblati di livello superiore, vengono attribuite a ogni motore sulla base della rispettiva struttura BOM e di un modello di aggregazione di tipo First In First Out (FIFO). Coerentemente al modello, dunque, motori successivi assorbono quantità immagazzinate in momenti successivi. Gli aggregati relativi alle lavorazioni subiscono, invece, un trattamento diverso. Ogni assembly viene associata a molteplici Work Orders (WO), altresì Ordini di Lavoro (OL), ovvero i lotti di lavorazione di dimensione variabile in base alla componente considerata definiti da un codice alfanumerico a cinque o sei caratteri. La prima codifica indica il lotto originale o di partenza, mentre la seconda descrive lotti derivati (SPLIT) con numerosità inferiore al lotto primario, nati dalle necessità di rettifiche o rilavorazioni sui singoli pezzi.

Come già accennato, ogni Work Order viene valorizzato in modo del tutto simile a quanto teorizzato dal modello di Jung [18]. Si considerano, dunque, la numerosità del

lotto l , i tassi orari (in valuta corrente) dell'operatore R_o e della macchina R_m , i tempi (in ore) di lavorazione per pezzo T_{ot} , di setup per lotto di lavorazione T_{su} , non operativi sui pezzi T_{no} ; e si giunge al costo dell'ordine di lavoro attraverso l'equazione seguente:

$$Cost = (R_o + R_m) * \left(\frac{T_{su}}{l} * T_{ot} + T_{no} \right) * l \quad (4.1)$$

Nell'ipotesi di variabili indipendenti non negative, chiaramente verificata data la loro stessa natura, la (4.1) mostra una variazione positiva del costo al crescere di ognuna di esse.

Ogni ordine di lavoro lancia una quantità di pezzi l , e ne consegna una quantità $d \leq l$. La differenza tra i due valori è ovviamente costituita dagli scarti di lavorazione s . Il singolo motore riceve tanti pezzi consegnati d dagli ordini di lavoro quanti sono quelli richiesti dalla sua precisa configurazione. Poiché l'attribuzione viene effettuata sulla numerosità dell'intero ordine di lavoro, al seriale vengono associati anche gli scarti di lavorazione presenti sul lotto. A tal proposito, può essere svolta un'utile riflessione. Se si considera l'effetto delle curve di apprendimento, secondo cui il costo unitario di un componente diminuisce con il proprio volume di produzione, sui seriali successivi, a parità di configurazione, ci si aspetta un costo per componente attribuito inferiore per via della minore incidenza degli scarti.

Le operazioni di stima svolte sulle parti di acquisto e sulle lavorazioni permettono di estrarre soltanto il costo diretto di ogni componente di configurazione presente sul singolo motore. I costi indiretti valutati dal sistema di calcolo, dal canto loro, vengono associati alle etichette Shipment e Other. La prima, definisce i costi periodici connessi al trasporto delle merci acquistate, i quali vengono allocati alle componenti appartenenti alla categoria dei Material. La seconda, invece, si riferisce all'insieme degli overheads di produzione che trovano allocazione sugli assemblati etichettati Machining.

Una volta introdotta la terminologia adoperata per il modello di calcolo progettato, si passa alla descrizione dettagliata di ognuno dei contributi utili all'ottenimento del costo pieno dei motori turbofan di generazione GE9X. A tal proposito, si forniscono innanzitutto le informazioni in merito al processo di creazione del database informativo propedeutico al successivo calcolo dei costi.

4.2 Generazione del database propedeutico al calcolo

Per poter funzionare correttamente, il modello di calcolo progettato ha bisogno di un numero sufficiente di informazioni in input. A tale scopo, risulta necessaria l'interrogazione dell'Enterprise-Resource-Planning (ERP) SAP®, il quale contiene l'insieme delle registrazioni avvenute all'interno dell'azienda in merito a diversi contesti quali, ad esempio, gli acquisti e le movimentazioni di magazzino. Dal gestionale si estraggono tre principali tipologie di dati, ognuno dei quali viene immagazzinato in una precisa sezione dell'applicazione.

Con la prima interrogazione si ottengono le informazioni relative alle diverse configurazioni assunte dai motori. La **Tabella 7** offre un quadro completo dei dati usati per la creazione della cosiddetta Anagrafica di Configurazione. La **Figura 33**, a sua volta, sfruttando il linguaggio di programmazione per oggetti UML® (Unified-Modelling-Language), fornisce un quadro delle principali relazioni tra le variabili primitive contenute all'interno delle classi che compongono la stessa Anagrafica.

Tabella 7: informazioni contenute all'interno dell'Anagrafica di Configurazione

Voce	Descrizione	Impiego
PN	Part Number, o codice alfanumerico identificativo del componente.	Il codice componente è il perno di aggancio delle successive formule di calcolo utilizzate per la stima dei costi.
LVL	Livello del PN all'interno della Bill of Material.	Utile alla ricostruzione della Configurazione di uno specifico ESN, nonché al successivo calcolo dell'assorbimento di materiali (par. 4.3.2).
MOD	Codice identificativo del modulo cui appartiene il PN.	Utile al raggruppamento delle componenti in moduli (modulo della turbina LPT).
ITEM	Oggetto del motore cui appartiene il PN.	Utile all'attribuzione delle componenti su di uno specifico oggetto costituente il motore (turbina).
VdC	Etichetta relativa alla categoria di voce di costo cui appartiene il PN (Machining, Material). Le voci di costo relative agli indiretti sono svincolate dai PN.	Identifica il pezzo come oggetto acquistato esternamente o prodotto della lavorazione. Utile a associarvi il corretto modello di calcolo.
DIV	Codice divisionale identificativo dell'impianto di gestione del PN.	Il codice divisionale serve ad attribuire al componente la percentuale nozionale di fee per la maggiorazione del costo diretto del materiale (par. 4.3.2).
TEXT	Breve descrizione del componente.	Informazione di supporto
QTY	Quantità del PN richiesta dalla propria Bill of Material.	Utile alla corretta attribuzione dei costi diretti sul componente nei successivi calcoli.
UdM	Unità di misura con cui si quantifica il componente (n° pezzi per gli assemblati, kg per il materiale grezzo).	Informazione di supporto.
L1 PN	Part Number di livello 1 in BOM. Può anche coincidere con il PN di cui sopra.	Ulteriore informazione utile alla ricostruzione della Configurazione dello specifico ESN.
QTY L1	Quantità in BOM associate al PN di livello 1.	Utile alla corretta attribuzione dei costi diretti sul componente nei successivi calcoli.

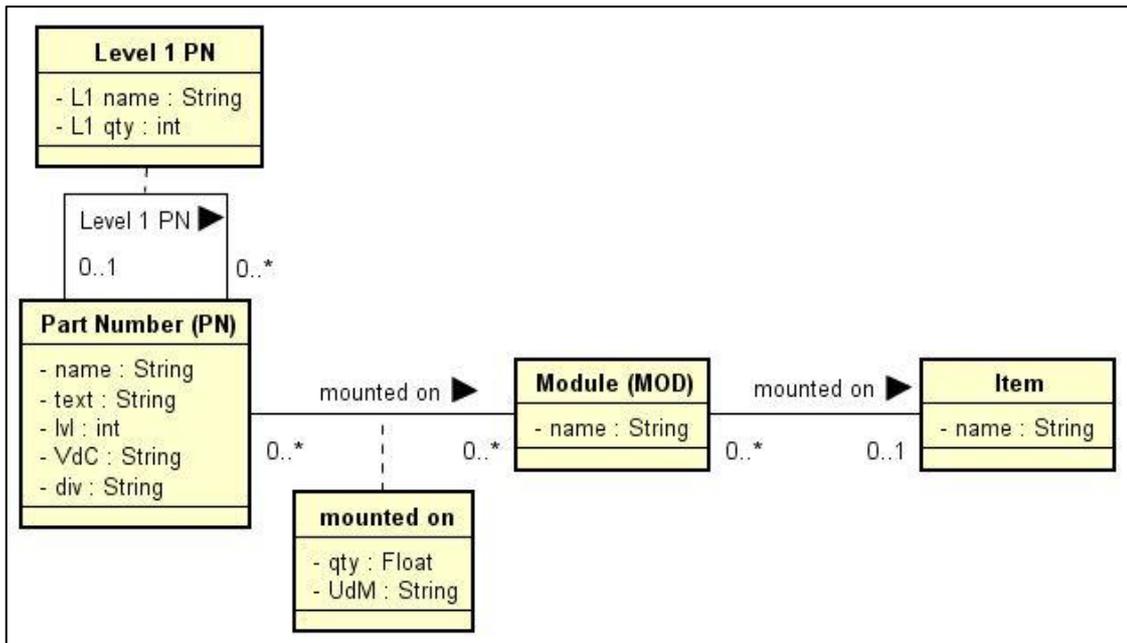


Figura 33: diagramma di classe UML® per l’Anagrafica di Configurazione, software AstahCommunity

La seconda interrogazione all’ERP aziendale ha lo scopo di ottenere le informazioni relative alle lavorazioni dei pezzi all’interno dei diversi impianti produttivi. Similmente a quanto mostrato per l’Anagrafica di Configurazione, i dati essenziali alla creazione dell’Anagrafica degli Ordini di Lavoro sono riassunti nella **Tabella 8** sottostante. Segue la **Figura 34** con la sua rappresentazione nel formato del Class-Diagram UML® delle relazioni tra le voci costituenti la stessa porzione di database.

Tabella 8: informazioni contenute all'interno dell'Anagrafica delle Lavorazioni.

Voce	Descrizione	Impiego
WO	Codice alfanumerico a 5-6 caratteri relativo all’ordine di lavoro.	Il lotto di lavorazione, di dimensione variabile, viene attribuito all’ESN sulla base dei requisiti di configurazione e della BOM.
PN	Codice alfanumerico del componente cui fa riferimento il WO.	Destinato alla configurazione del motore che lo richiede.
TEXT	Descrizione del tipo di lavorazione.	Informazione di supporto.
ql	Numerosità di lancio del lotto di lavorazione.	Il valore delle quantità attribuite al motore, comprensivo anche degli scarti di lavorazione.
qd	Quantità di pezzi consegnata sul lotto di lavorazione.	Le quantità consegnate di uno specifico lotto sono quelle che soddisfano i requisiti minimi di configurazione del prodotto. Se la domanda (QTY) eccede <i>qd</i> , si attribuiscono più ordini di lavorazione a uno stesso motore.
Completion date	Data di completamento del lotto di lavorazione.	Isola gli ordini di lavoro chiusi da quelli aperti. Si assume di attribuire ai seriali solo gli ordini di lavoro già completati.
MOD	Codice identificativo del modulo cui appartiene il PN associato al WO.	Stessa funzione rispetto alla precedente anagrafica.
ITEM	Codice identificativo dell’oggetto cui appartiene il PN associato al WO.	Stessa funzione rispetto alla precedente anagrafica.

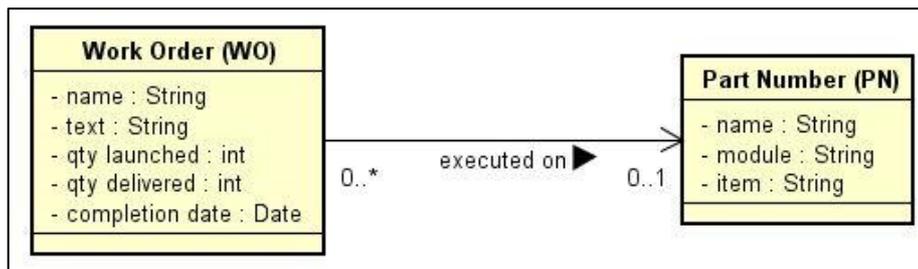


Figura 34: diagramma di classe UML® per l’Anagrafica delle Lavorazioni, software AstahCommunity

La terza interrogazione all’ERP aziendale consente, infine, di estrarre le informazioni relative all’insieme di commesse, ovvero le registrazioni contabili avvenute per lo specifico programma di sviluppo. L’Anagrafica delle Commesse racchiude in sé la globalità delle registrazioni relative gli acquisti esterni di materiali, alle lavorazioni interne, nonché ai costi di periodo. Essa ha lo scopo di valorizzare l’insieme dei Part-Numbers registrati nell’Anagrafica di Configurazione e degli ordini di lavoro contenuti all’interno dell’Anagrafica delle Lavorazioni. La **Tabella 9** offre l’insieme delle voci interessate dall’estrazione, mentre la **Figura 35** schematizza le informazioni contenute nel database attraverso la modellazione delle classi di tipo UML®.

Tabella 9-A: informazioni contenute all’interno dell’Anagrafica delle Commesse

Voce	Descrizione	Impiego
WP	Codice alfanumerico univoco della Commessa.	Identifica la commessa (Modulo, Componente e tipologia di voce di costo) e risulta utile al raggruppamento delle voci uniformi.
TEXT	Breve descrizione testuale del WP.	Informazione di supporto.
PN	Codice alfanumerico del componente registrato sulla commessa.	Destinato alla configurazione del motore che lo richiede.
WO	Ordine di lavoro connesso al PN. Assente qualora il PN sia un materiali acquistato.	Stesso impiego rispetto alla precedente Anagrafica delle Lavorazioni.
Month	Mese di registrazione della commessa.	Serve a raggruppare per trimestri le entrate in magazzino da gestire con il modello FIFO.
Year	Esercizio di registrazione della commessa.	Utile al raggruppamento nella matrice riepilogativa.
QTY	Identifica le quantità del PN registrate sulla commessa.	Le quantità del componente registrate vengono poi aggregate per trimestre, contribuendo al rispettivo saldo netto.
Curr	Mostra la valuta con cui è stata registrata la commessa.	Informazione di supporto, utile all’uniformità del calcolo.
Cost	Mostra il costo, nella valuta usata, associato alla commessa.	I costi registrati sulle commesse e relativi alle diverse componenti vengono usati per il successivo calcolo dei contributi.
VdC	Associa al PN la categoria di voce di costo (Material, Machining) di appartenenza. Le voci relative agli indiretti non contemplano la presenza di PN.	La voce estratta dalla precedente Anagrafica di Configurazione, e riportata nella presente, è utile alla successiva applicazione dei filtri di ricerca nella matrice riepilogativa.
MOD	Codice identificativo del modulo cui appartiene in PN.	Come nel caso della VdC.
ITEM	Codice identificativo dell’oggetto cui appartiene in PN.	Come nel caso della VdC.

Tabella 9-B: informazioni contenute all'interno dell'Anagrafica delle Commesse

Voce	Descrizione	Impiego
<i>ql</i>	Quantità di pezzi lanciata sul lotto di lavorazione.	La voce estratta dalla precedente Anagrafica degli Ordini di Lavorazione è utile al successivo calcolo delle lavorazioni macchina sui singoli motori.
<i>qd</i>	Quantità di pezzi consegnata sul lotto di lavorazione.	Come nel caso di ql.
<i>Completion date</i>	Data di completamento del lotto di lavorazione.	Come nel caso di ql.

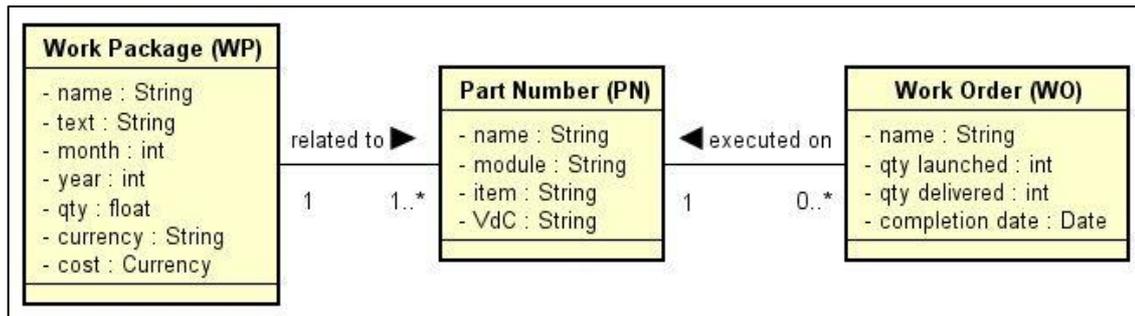


Figura 35: diagramma di classe UML® per l'Anagrafica delle Commesse, software AstahCommunity

Una volta generate le Anagrafiche di Configurazione, delle Lavorazioni e delle Commesse, l'insieme dei dati raccolti necessita di un'ulteriore aggregazione in un'unica struttura tabellare. A tale scopo, lo strumento ritenuto più adeguato per l'applicazione progettata è stato quello delle matrici pivot. La loro principale utilità si manifesta nella piena disponibilità, in un unico formato, della totalità delle informazioni utili al calcolo dei singoli contributi del costo pieno dei motori. Difatti, una tale unione offre la possibilità di interpolare le istruzioni di configurazione (Anagrafica di Configurazione) con i dettagli delle lavorazioni (Anagrafica delle Lavorazioni), associando a ogni componente un relativo costo registrato sulle singole commesse del programma di sviluppo dei motori GE9X (Anagrafica delle Commesse).

Le relazioni tra le diverse classi costituenti il database univoco, in modo del tutto simile a quanto mostrato in precedenza, sono illustrate in **Figura 36** ricorrendo al linguaggio standard di modellazione UML®. La **Tabella 10** offre invece una ricostruzione parziale dello stesso database generata ai fini del presente elaborato.

All'interno dei successivi paragrafi verranno trattati i modelli di calcolo progettati per stimare i costi diretti delle componenti lavorate e dei pezzi acquistati da attribuire ai motori, nonché i costi indiretti da allocarvi. A tal proposito, seguendo i vincoli di propedeuticità tra i tre contributi, verrà prima di tutto presentato quello legato alle lavorazioni.

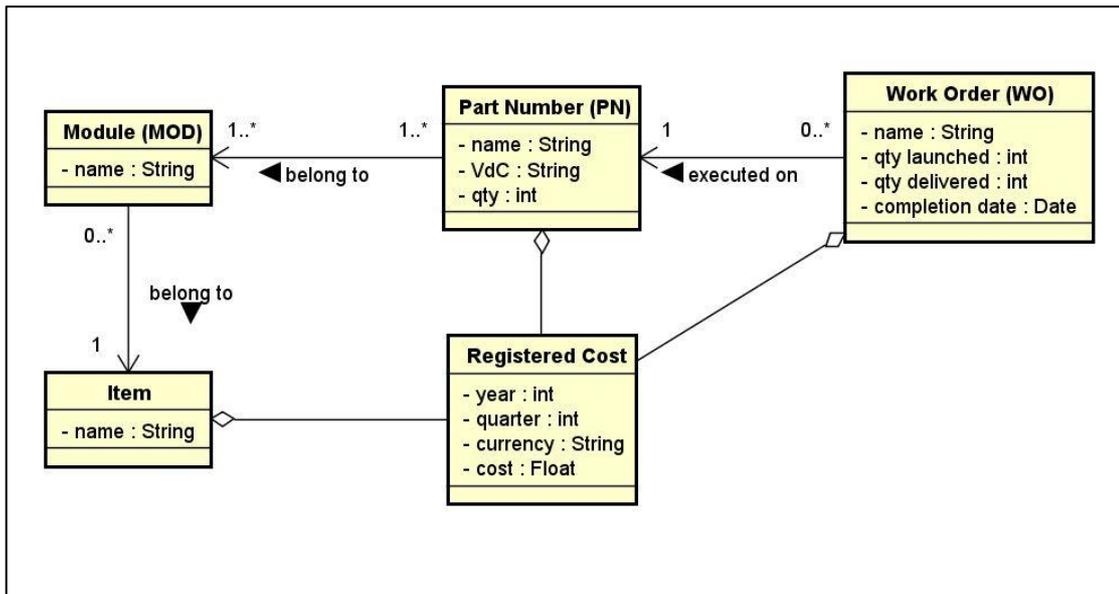


Figura 36: diagramma di classe UML® per il database di calcolo, software AstahCommunity

Tabella 10: ricostruzione di una porzione del database usato per il successivo calcolo dei contributi al full cost del GE9X

ITEM	MOD	PN	VdC	WO	Ql	Qd	Completion date	Year 2018											
								Quarter 1		Quarter 2		Quarter 3		Quarter 4		Total Year 2018			
								QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST		
ITEM 1	MOD 1.1	PN 1.1.1	Machining	88000	3	2	21/03/2018	0,00	897,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	897,00 €		
		PN 1.1.2	Material	-	0	0	-	16,00	4.501,00 €	5,00	0,00 €	8,00	653,00 €	17,00	4.992,00 €	46,00	10.146,00 €		
	MOD 1.2	PN 1.2.1	Machining	88001	5	5	17/04/2018	0,00	2.177,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	2.177,00 €		
		PN 1.2.2	Material	-	0	0	-	0,00	4.525,00 €	18,00	4.594,00 €	18,00	0,00 €	0,00	3.709,00 €	36,00	12.828,00 €		
ITEM 2	MOD 2.1	PN 2.1.1	Machining	89000	2	0	02/06/2018	0,00	0,00 €	0,00	4.787,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	4.787,00 €		
		PN 2.2.1	Machining	89010	4	4	27/09/2018	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	1.951,00 €	0,00	0,00 €	0,00	1.951,00 €		
	MOD 2.3	PN 2.3.1	Material	-	0	0	-	11,00	0,00 €	14,00	559,00 €	4,00	3.025,00 €	10,00	0,00 €	39,00	3.584,00 €		
		PN 2.3.2	Material	-	0	0	-	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €		
ITEM 3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM 4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM 5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM 6	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM 7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM 8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

4.3 Il processo di calcolo analitico su cui poggia il funzionamento dell'applicazione

La presentazione dei contributi caratterizzanti il modello progettato si articola all'interno dei quattro successivi paragrafi. I primi due illustrano il calcolo dei costi diretti delle lavorazioni e dei materiali acquistati, entrambi da attribuire alle singole configurazioni dei motori. Il terzo paragrafo si occupa, invece, del calcolo dei costi indiretti i quali subiscono un processo di allocazione secondo una loro precisa logica. All'interno dell'ultimo dei quattro paragrafi caratterizzanti l'esplosione del modello progettato, si procede all'individuazione del costo pieno dei tubofan GE9X attraverso l'aggregazione dei singoli contributi in precedenza calcolati.

L'approccio utilizzato dal presente paragrafo prevede un'esposizione analitica degli assunti e delle relazioni tra le diverse variabili costituenti il modello di calcolo implementato all'interno dell'applicazione operante sul sistema MS Excel®. Le formule espresse nel linguaggio proprio dello spreadsheet software sono, invece, contenute all'interno della sezione A degli Allegati del testo. Gli stessi forniscono, inoltre, una rappresentazione della sequenza delle attività seguite dall'utente (Allegati B), nonché il layout assunto dalle principali sezioni dell'applicativo di calcolo (Allegati C).

4.3.1 Calcolo del costo diretto delle componenti lavorate

Con il primo contributo al calcolo del costo pieno dei motori si valuta la componente delle lavorazioni attribuita ai seriali sulla base della loro precisa configurazione. L'obiettivo del presente calcolo è quello di ottenere il costo diretto delle parti lavorate sul motore, attribuendovi le corrette quantità contenute all'interno dei lotti di lavorazione. Come già illustrato, ogni lotto di lavorazione (WO) porta con sé cinque precise informazioni: il componente (PN) a cui risulta correlato, le quantità di lancio definite dal responsabile della produzione, le quantità consegnate (ovvero i pezzi risultati conformi alla fine del processo di lavorazione), il costo maturato, e la data di chiusura. Relativamente al costo delle lavorazioni sul singolo lotto di produzione, si fa diretto riferimento al modello di Jung (4.1) già ampiamente discusso all'interno del precedente paragrafo 4.1.

Siano ESN_i con $i = 1 \dots n$ il codice seriale del motore di sviluppo, PN_j con $j = 1 \dots m$ la sigla identificativa del componente di configurazione, WO_k con $k = 1 \dots p$ la codifica dell'ordine di lavorazione, $SPLIT_x$ con $x = 1 \dots w$ l'eventuale lotto derivato per i motivi in precedenza discussi. Siano, inoltre, $(ql_k, qd_k, cost_k)$ le quantità di lancio, di consegna e il costo del lotto di lavorazione, mentre $(ql_{xk}, qd_{xk}, cost_{xk})$ le rispettive sugli eventuali lotti derivati. La relazione di inclusione tra gli insiemi corrispondenti alle voci sopraelencate può essere espressa nel seguente modo: $SPLIT_{xkji} \subseteq WO_{kji} \subseteq PN_{ji} \subseteq ESN_i$.

Una volta definite le variabili di input per il modello, si può procedere al calcolo dei costi diretti delle componenti lavorate. A tal proposito, si fornisce la ricostruzione di una porzione del database generale appositamente filtrata per il loro calcolo (**Tabella 11**).

Risulta utile porre un'importante premessa in merito alle voci contenute in tabella. I pedici delle variabili sono organizzati in modo tale che il primo valore sulla sinistra si riferisca all'elemento stesso (sia esso SPLIT, WO o PN), mentre i successivi valori sulla destra fanno riferimento alla voce che lo include, in modo concorde a quanto mostrato dalla precedente relazione insiemistica.

Tabella 11: ricostruzione di una porzione del database per il calcolo delle lavorazioni

ITEM	MOD	PN	VdC	WO	ql	qd	cost	completion date	ESN
ITEM	MOD	PN_1	Machining	WO_11	ql_11	qd_11	cost_11	21/01/2018	tbd
			Machining	WO_21	ql_21	qd_21	cost_21	31/01/2018	tbd
			Machining	SPLIT_121	ql_121	qd_121	cost_121	02/02/2018	tbd
		PN_2	Machining	WO_12	ql_12	qd_12	cost_12	03/04/2018	tbd
			Machining	WO_22	ql_22	qd_22	cost_22	29/03/2018	tbd

Nella sua forma più generale, il modello di calcolo adotta un approccio bottom-up, ovvero attribuisce il costo pieno delle lavorazioni ai singoli motori ricorrendo alle formule di seguito mostrate:

$$ESN_i cost = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p net\ cost_{kji} \quad (4.2)$$

$$ESN_i ql = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p net\ ql_{kji} \quad (4.3)$$

$$ESN_i qd = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^p qd_{kji} \cdot \quad (4.4)$$

In questo modo si ottiene, per ogni seriale, il costo complessivo dell'insieme degli ordini di lavoro sulle componenti di configurazione, nonché il rispettivo numero di pezzi attribuiti. Le formule appena illustrate alimentano due importanti riflessioni.

Osservando le relazioni (4.3, 4.4) deve forzatamente valere, per ogni PN_{ji} , la condizione per cui $ql_{kji} \geq qd_{kji}$. Difatti, qd_k altro non è che il numero di pezzi risultati conformi dalla lavorazione del lotto con numerosità iniziale pari a ql_k ; per cui $s_k = ql_k - qd_k \geq 0$ coincide con gli scarti (scraps) incidenti sullo stesso lotto. Inoltre, l'aggregazione sul componente di lavorazione PN_{ji} dell'insieme delle quantità conformi qd_{kji} , coincide esattamente con i requisiti minimi di configurazione del motore ESN_i . La quantità di lancio ql_{kji} è, dal canto suo, indicativa della reale attribuzione di pezzi al motore. Risulta, perciò, evidente che il costo diretto delle lavorazioni sul motore è soggetto a maggiorazioni, più o meno evidenti, in funzione dell'incidenza degli scarti a esso assegnati. Quanto appena espresso, costituisce un importante assunto del modello di calcolo sviluppato.

La seconda riflessione coinvolge la coppia di relazioni (4.2, 4.3). Osservandole, si nota chiaramente l'introduzione dei valori netti per le quantità di lancio e per i costi dei lotti di lavoro. Il motivo di tale aggiustamento risiede nella necessità di riportare le informazioni contenute in database (**Tabella 11**) nel formato più consono per il corretto ottenimento dell'output del processo di stima. Si ricordi quanto in precedenza espresso in merito all'impossibilità di modificare la natura delle informazioni contenute all'interno dell'ERP aziendale. In merito alle quantità di lancio dei lotti di lavoro, il valore registrato dal gestionale coincide con il loro ammontare lordo, ovvero non ridotto delle quantità eventualmente derivate ($SPLIT_{xk}$). Ciò comporterebbe, qualora venissero

semplicemente usati i dati grezzi, una sovra-attribuzione degli scarti causati dal double-counting delle quantità di lancio dei lotti di lavorazione per tutti quei seriali cui sono stati associati gli ordini di lavoro primitivi. La **Tabella 12**, in riferimento a tale problematica, illustra la situazione originaria del database e quella a cui si vuole pervenire tramite il processo di graduale aggiustamento. Le aree in rosso sono quelle sulle quali bisogna intervenire, mentre quelle in verde non necessitano di nessuna rettifica.

Tabella 12: processo di aggiustamento dei valori derivati dall'ERP aziendale

As is					To Be			
PN	VdC	WO	ql	qd	cost	actual scrap	net ql	scrap adj
PN_1	Machining	WO_11	5,00	4,00	5.000,00 €	1,00	5,00	1,00
	Machining	WO_21	10,00	5,00	17.000,00 €	5,00	5,00	0,00
	Machining	SPLIT_121	3,00	2,00	750,00 €	1,00	3,00	1,00
	Machining	SPLIT_221	1,00	1,00	250,00 €	0,00	1,00	0,00
	Machining	SPLIT_321	1,00	0,00	250,00 €	1,00	1,00	1,00

Osservando la **Tabella 12** si nota chiaramente che sull'ordine di lavoro WO_21, soggetto a 3 suddivisioni, il valore registrato in database conta 7 pezzi scartati per il PN_1 (di cui 5 sull'ordine di lavoro radice). In realtà, le quantità veramente eliminate sull'intero lotto sono soltanto 2, mentre quelle ancora incidenti sul solo ordine di lavoro WO_21 sono 5, ottenute sottraendovi la sommatoria dei pezzi lanciati nei lotti derivati (3+1+1). Il tasso di scarto dell'ordine di lavorazione si riduce, quindi, dal 50% iniziale allo zero.

Per quanto riguarda i costi netti presenti nella formula (4.2), quanto viene registrato nel database cumula sull'ordine di lavoro primitivo il valore corrispondente alle quantità lanciate lorde, mentre sui suoi molteplici derivati associa soltanto il montante maturato a partire dall'istante $t + 1$ successivo alla suddivisione del lotto originario. In tale situazione, qualora venissero usate direttamente le informazioni contenute all'interno del database, si indurrebbe una sovrastima del valore degli ordini di lavoro originali, connessa a una rispettiva sottostima del costo dei derivati. Ciò comporta, ovviamente, uno sbilanciamento del calcolo dei diversi seriali, a seconda che vengano loro attribuiti pezzi appartenenti ai lotti primitivi o a quelli derivati.

Una volta definito il processo di calcolo del costo delle lavorazioni nella sua globalità, e aver dato ragione delle motivazioni sottostanti l'utilizzo delle variabili mostrate in (4.2, 4.3, 4.4), si procede all'esposizione analitica del modello. I dati da cui ripartire sono gli ordini di lavoro WO_{kj} e le rispettive scomposizioni $SPLIT_{xkj}$, ognuno con la terna di informazioni che li caratterizzano. A tal proposito, le celle con la dicitura "tbd" (to be defined) in **Tabella 13** corrispondono alle variabili che bisogna estrarre per risolvere le problematiche sopracitate.

Tabella 13: variabili da derivare ai fini del corretto funzionamento del modello

PN	VdC	WO	ql	qd	cost	deliver cost	scrap cost	net cost	net ql
PN_j	Machining	WO_kj	ql_kj	qd_kj	cost_kj	tbd	tbd	tbd	tbd
	Machining	SPLIT_1kj	ql_1kj	qd_1kj	cost_1kj	tbd	tbd	tbd	tbd
	Machining	SPLIT_2kj	ql_2kj	qd_2kj	cost_2kj	tbd	tbd	tbd	tbd

Ai fini dell'individuazione dei valori netti, si suddivide il costo lordo presente in database nelle sue componenti relative ai pezzi approvati (deliver cost) e scartati netti (scrap cost). Aggregando entrambe le voci, si perviene al costo netto dell'ordine di lavorazione da cui, infine, derivare le quantità reali incidenti sullo stesso. Dato il diverso trattamento che subiscono i lotti primitivi e quelli derivati, per ognuna delle voci di calcolo introdotte dal presente modello sarà mostrata una coppia di relazioni matematiche valide in una delle due specifiche situazioni. Partendo dal costo dei pezzi validati all'interno del lotto di lavorazione (deliver cost), troviamo le seguenti relazioni:

$$deliver\ cost_{kj} = yield_{kj} * cost_{kj} \quad (4.5)$$

$$yield_{kj} = \frac{qd_{kj}}{ql_{kj}} \quad (4.6)$$

nel caso degli ordini di lavoro primari WO_{kj} , e con (4.6) indicativo del complemento a uno del tasso di scarto dello stesso ordine di lavoro;

$$deliver\ cost_{xkj} = yield_{xkj} * cost_{xkj} + qd_{xkj} * unit\ cost_{kj} \quad (4.7)$$

$$unit\ cost_{kj} = \frac{cost_{kj}}{ql_{kj}} \quad (4.8)$$

nel caso in cui, invece, si tratta di un ordine di lavoro derivato $SPLIT_{xkj}$. A tal proposito, l'aggiunta del secondo addendo in (4.7) permette di stornare parte del costo registrato dal lotto primitivo verso il rispettivo lotto derivato, maggiorandone il valore e risolvendo l'incompletezza informativa citata in precedenza.

Per quanto riguarda, invece, il costo dei pezzi scartati all'interno del lotto di lavorazione (scrap cost), il modello adotta le seguenti relazioni:

$$scrap\ cost_{kj} = cost_{kj} * (scrap_{kj} - split\ rate_{kj}) \quad (4.9)$$

$$scrap_{kj} = 1 - yield_{kj} \quad (4.10)$$

$$split\ rate_{kj} = \left(\frac{\sum_{x=1}^w ql_{xkj}}{ql_{kj}} \right) \quad (4.11)$$

nel caso in cui si tratta di un ordine di lavoro primitivo, con (4.10) pari al suo tasso di scarto e (4.11) pari all'incidenza delle quantità già stornate sui lotti derivati;

$$scrap\ cost_{xkj} = cost_{xkj} * scrap_{xkj} + (ql_{xkj} - qd_{xkj}) * unit\ cost_{kj} \quad (4.12)$$

qualora si tratti, invece, di un ordine di lavorazione derivato. A tal proposito, la logica con cui vengono calcolati gli scarti in (4.12) mostra un'equivalente maggiorazione rispetto a quanto illustrato in (4.7).

Il costo netto dell'ordine di lavorazione (net cost) si ottiene, a questo punto, sommando i due diversi contributi in precedenza calcolati, ovvero adottando le seguenti relazioni:

$$net\ cost_{kj} = deliver\ cost_{kj} + scrap\ cost_{kj} = cost_{kj} * (1 - split\ rate_{kj}) \quad (4.13)$$

nel caso in cui l'ordine di lavorazione esaminato sia primitivo;

$$net\ cost_{xkj} = deliver\ cost_{xkj} + scrap\ cost_{xkj} = cost_{xkj} + ql_{xkj} * unit\ cost_{kj} \quad (4.14)$$

qualora si tratti, invece, di un lotto derivato.

Come già affermato in precedenza, le quantità di lancio che necessitano di aggiustamenti sono soltanto quelle relative agli ordini di lavoro primitivi. Ergo, la formula correttiva interviene soltanto su di essi, mantenendo inalterate le quantità ql_{xkj} dei lotti derivati già presenti all'interno del database originario.

$$net\ ql_{kj} = ql_{kj} * \left(\frac{net\ cost_{kj}}{cost_{kj}} \right) = ql_{kj} * (1 - split\ rate_{kj}) \quad (4.15)$$

Riepilogando quanto appena descritto, attraverso le operazioni sopraelencate sono state ricavate le variabili richieste dalla coppia di equazioni (4.2, 4.3) descriventi la porzione del modello di calcolo dedicato all'ottenimento dei costi diretti delle componenti lavorate, attribuite ai motori sulla base della rispettiva configurazione. A tal proposito, il diagramma di flusso mostrato in **Figura 37** offre una rappresentazione grafica del modello analitico esposto.

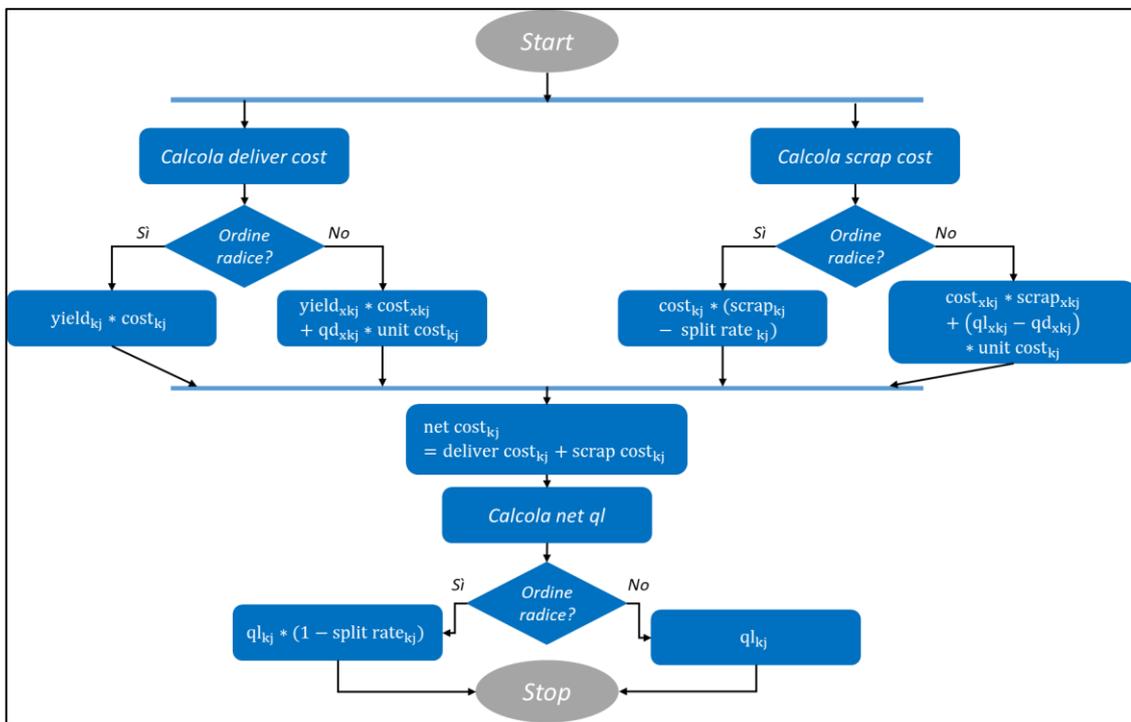


Figura 37: processo di calcolo delle quantità e dei costi netti per i singoli lotti di lavorazione

Il database di cui in **tabella 13**, dal canto suo, risulta così trasformato a seguito dell'applicazione del modello sopracitato.

Tabella 14: formule per il calcolo dei parziali netti delle lavorazioni (complemento ERP)

PN	VdC	WO	qd	net cost	net ql
PN_j	Machining	WO_kj	qd_kj	$cost_{kj} * (1 - split\ rate_{kj})$	$ql_{kj} * (1 - split\ rate_{kj})$
	Machining	SPLIT_1kj	qd_1kj	$cost_{1kj} + ql_{1kj} * unit\ cost_{kj}$	ql_{1kj}
	Machining	SPLIT_2kj	qd_2kj	$cost_{2kj} + ql_{2kj} * unit\ cost_{kj}$	ql_{2kj}

A titolo di esempio, sfruttando nuovamente la **Tabella 12**, i parziali netti ottenuti dal modello di calcolo sopra illustrato assumo i valori mostrati in **Tabella 15**.

Tabella 15: ricalcolo dei parziali netti a complemento delle informazioni derivate dall'ERP

PN	VdC	WO	ql	qd	cost	deliver cost	scrap cost	net cost	net ql
PN_1	Machining	WO_11	5,00	4,00	5.000,00 €	4.000,00 €	1.000,00 €	5.000,00 €	5,00
	Machining	WO_21	10,00	5,00	17.000,00 €	8.500,00 €	0,00 €	8.500,00 €	5,00
	Machining	SPLIT_121	3,00	2,00	750,00 €	3.900,00 €	1.950,00 €	5.850,00 €	3,00
	Machining	SPLIT_221	1,00	1,00	250,00 €	1.950,00 €	0,00 €	1.950,00 €	1,00
	Machining	SPLIT_321	1,00	0,00	250,00 €	0,00 €	1.950,00 €	1.950,00 €	1,00

Con i contributi ricalcolati dei molteplici ordini di lavoro, rimane soltanto da attribuire al singolo motore ESN_i l'insieme delle quantità richieste per ogni componente PN_{j_i} di configurazione. Tale attività viene svolta attraverso l'introduzione manuale di un'etichetta rappresentativa della sigla univoca del motore (e.g. ESN00x). Quest'ultima operazione permette di soddisfare l'insieme delle relazioni (4.2, 4.3, 4.4) garantendo la completa attribuzione ai motori dei costi diretti delle componenti lavorate.

A tal proposito, risulta utile fornire un esempio del processo sopradescritto facendo riferimento a un motore fittizio ESN_{01} . La sua BOM richiede rispettivamente 4 pezzi del PN_{01} e 6 pezzi del PN_{02} . La **Tabella 16** mostra il processo di attribuzione manuale dell'etichetta corrispondente al seriale e permette di fare emergere di due spunti di riflessione. Primo, come risulta evidente osservando la riga relativa al WO_{11} , si nota come l'operatore abbia attribuito uno scarto sull' ESN_{01} . Agendo in questo modo, si maggiora il costo attribuito al motore rispetto agli stretti requisiti di configurazione ($s_{11} = ql_{11} - qd_{11} = 1$). In secondo luogo, relativamente allo $SPLIT_{312}$, l'operatore ha potuto attribuire volontariamente una quantità unitaria di scarto sullo stesso motore, nonostante le precedenti associazioni avessero già soddisfatto gli stretti requisiti di configurazione. Il metodo così definito, ha perciò il vantaggio di garantire al soggetto operante un'importante flessibilità decisionale in merito all'attribuzione del corretto numero di pezzi sui singoli seriali. Qualora, infatti, intervengano delle varianti durante le stesse lavorazioni tali da rendere necessario un aggiornamento del costo stimato, l'utente ha la possibilità di agire direttamente sulle voci di interesse e di allinearsi alla nuova configurazione.

Tabella 16: esempio del calcolo del costo diretto delle componenti lavorate

PN	VdC	WO	ql	qd	cost	deliver cost	scrap cost	net cost	net ql	ESN_i	ESN_01		
											ql	qd	cost
PN_01	Machining	WO_11	5,00	4,00	5.000,00 €	4.000,00 €	1.000,00 €	5.000,00 €	5,00	ESN_01	5,00	4,00	5.000,00 €
PN_02	Machining	WO_12	10,00	5,00	17.000,00 €	8.500,00 €	0,00 €	8.500,00 €	5,00	ESN_01	5,00	5,00	8.500,00 €
	Machining	SPLIT_112	3,00	2,00	750,00 €	3.900,00 €	1.950,00 €	5.850,00 €	3,00	ESN_02	0,00	0,00	0,00 €
	Machining	SPLIT_212	1,00	1,00	250,00 €	1.950,00 €	0,00 €	1.950,00 €	1,00	ESN_01	1,00	1,00	1.950,00 €
	Machining	SPLIT_312	1,00	0,00	250,00 €	0,00 €	1.950,00 €	1.950,00 €	1,00	ESN_01	1,00	0,00	1.950,00 €

La **Figura 38** posta a conclusione del paragrafo raffigura il processo di calcolo del costo diretto delle lavorazioni presentato fino ad ora in maniera analitica. Essa mette in evidenza il flusso seguito dai dati partendo dal database contenuto in **Tabella 11**, passando per il calcolo dei contributi netti mostrati nelle equazioni (4.5-4.11), sino a

giungere all'ottenimento del costo diretto dei pezzi lavorati facenti parte della configurazione di un particolare seriale (4.2-4.4).

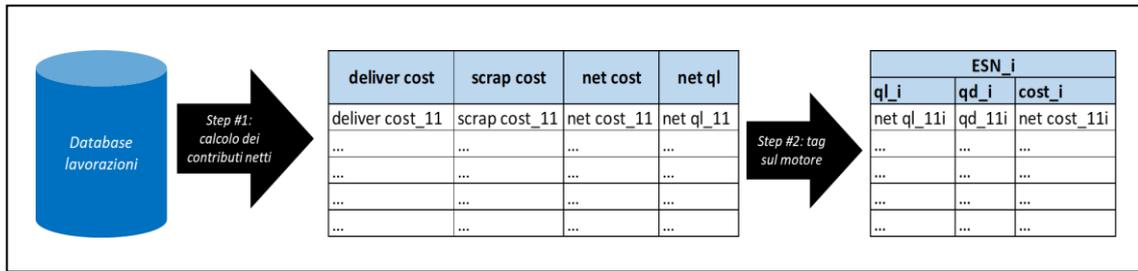


Figura 38: flusso dei dati per il calcolo del costo diretto delle componenti lavorate

4.3.2 Calcolo del costo diretto delle componenti acquistate

Va ora modellata la sezione del processo di calcolo dedicata all'insieme delle parti acquistate da fornitori esterni. Tali pezzi vanno attribuiti ai motori sulla base dei rispettivi requisiti di configurazione. In modo del tutto equivalente a quanto mostrato per il calcolo delle lavorazioni, viene qui mostrata una porzione di database relativa alle voci di costo dei materiali acquistati. La successiva **Tabella 17** porta a due importanti considerazioni relativamente alla tipologia di componenti trattate e al loro metodo di acquisizione. Primo, i materiali presenti in database sono perlopiù da considerarsi a domanda dipendente, ovvero si caratterizzano per il fatto di essere componenti semplici e materie prime. Il loro fabbisogno è, difatti, strettamente legato alla relativa posizione in distinta base, e dipende altresì dalla pianificazione della produzione. Una seconda riflessione coinvolge il di riordino dei materiali. Il modello di calcolo assume un sistema basato su intervalli temporali fissi di carattere trimestrale. Una tale situazione implica, contrariamente al modello basato su quantità di riordino fisse, la generazione di una domanda variabile da periodo a periodo in funzione del tasso di consumo dei materiali previsto, con conseguente incremento delle relative scorte di sicurezza. In generale, l'approccio a intervalli fissi viene esemplificato dalla relazione seguente:

$$\text{quantità da ordinare} = D * (T + L) + z_{\sigma(T+L)} - I \tag{4.16}$$

dove D è la domanda media giornaliera di materiali, T e L sono rispettivamente il tempo di reintegro e il Lead time di ordinazione, z è il numero di deviazioni standard associato a T e L , mentre I coincide con il livello di scorte al tempo t in cui viene svolta la valutazione in merito all'eventuale ordine.

Tabella 17: ricostruzione del database per le componenti acquistate

ITEM	MOD	PN	VdC	Year 2018							
				Quarter 1		Quarter 2		Quarter 3		Quarter 4	
				QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST
ITEM	MOD	PN_1	Material	Qin_11	Cost_11	Qin_21	Cost_21	Qin_31	Cost_31	Qin_41	Cost_41
		PN_2	Material	Qin_12	Cost_12	Qin_22	Cost_22	Qin_32	Cost_32	Qin_42	Cost_42
		PN_3	Material	Qin_13	Cost_13	Qin_23	Cost_23	Qin_33	Cost_33	Qin_43	Cost_43
		PN_4	Material	Qin_14	Cost_14	Qin_24	Cost_24	Qin_34	Cost_34	Qin_44	Cost_44

Il database mostrato in tabella associa, per ogni componente di acquisto PN_{ji} , l'insieme delle quantità in ingresso QTY_{tj} e dei rispettivi costi $Cost_{tj}$, con $t = 1 \dots T$ pedice relativo al trimestre di osservazione. Ogni motore ESN_i richiede, dal canto suo, una specifica quantità di materiali Q_{ji} , dipendente dalla rispettiva configurazione e dalle quantità di componenti lavorate di livello superiore in BOM effettivamente assorbite. Queste ultime coincidono con quanto richiesto dall'espressione (4.3) per ognuna delle componenti di configurazione dei motori. La relazione relativa al reale assorbimento di materiale si configura perciò nel seguente modo:

$$Q_{ji} = f(BOM_{ji}; ql_{ji}^{-1}) = BOM\ ratio_{ji} * ql_{ji}^{-1} \quad (4.17)$$

$$BOM\ ratio_{ji} = \left(\frac{BOM_{ji}}{BOM_{ji}^{-1}} \right) \quad (4.18)$$

dove (4.18) indica il rapporto tra i requisiti di distinta base del motore ESN_i per ciò che riguarda il materiale d'acquisto j-esimo e il relativo componente lavorato di livello superiore (vedi apice -1). I merito a quest'ultima relazione, le informazioni utili al suo soddisfacimento sono contenute all'interno dell'Anagrafica di Configurazione in precedenza descritta. Per quanto riguarda la variabile ql_{ji}^{-1} , essa deriva dal precedente calcolo del costo delle lavorazioni, e consiste nella quantità netta assorbita dal componente lavorato di livello superiore in distinta base appartenente alla configurazione dello stesso motore.

Una volta definita la reale quantità di materiale PN_{ji} assorbita dal seriale ESN_i , si ricorre al modello di gestione delle scorte First In First Out (FIFO) ai fini dell'attribuzione delle relative quantità immagazzinate nei diversi periodi oggetto di osservazione. L'approccio FIFO porta con sé due importanti implicazioni. La prima, strettamente legata alla metodologia utilizzata, vede attribuire ai primi seriali le quantità immagazzinate per prime, sino al soddisfacimento dei requisiti di configurazione Q_{ji} . Ciò ha perfettamente senso nel contesto del presente studio, in quanto i materiali acquisiti in un primo momento possono risultare obsolescenti rispetto alle configurazioni dei successivi motori. La seconda implicazione legata all'approccio FIFO si riferisce, invece, ai costi unitari registrati sul singolo componente PN_j nei diversi periodi t . Ciò comporta che sui primi seriali si possa registrare un costo per unità di pezzi sensibilmente diverso rispetto ai motori successivi, per cui equivalenti assorbimenti di materiale possono generare una diversa valorizzazione.

Definito l'approccio di massima per l'attribuzione delle quantità di materiale ai singoli motori, si mostrano ora i dettagli del modello elaborato per il presente studio. A tal proposito, si introduce una nuova variabile Qin_{tji} , la quale rappresenta la quantità di materiale j-esimo in ingresso nel periodo t che viene attribuita al motore ESN_i . Il suo valore si ottiene tramite un confronto iterativo tra l'assorbimento di materiale sul seriale Q_{ji} e le quantità cumulate in ingresso per ogni periodo di osservazione t , come mostrato dal modello seguente.

$\forall PN_{ji}$ con $j = 1 \dots m$, $\forall t = 1 \dots T$, sia $k \in T$

$$\text{se } Q_{ji} \geq \sum_{t=1}^k QTY_{tj} \rightarrow Qin_{kji} = QTY_{kj} \quad (4.19)$$

$$\text{invece, se } Q_{ji} \leq \sum_{t=1}^{k-1} QTY_{tj} \rightarrow Qin_{kji} = 0 \quad (4.20)$$

$$\text{altrimenti, quando } Q_{ji} \in (\sum_{t=1}^{k-1} QTY_{tj}; \sum_{t=1}^k QTY_{tj}) \rightarrow Qin_{kji} = Q_{ji} - \sum_{t=1}^{k-1} QTY_{tj}. \quad (4.21)$$

La logica sottostante il modello appena esposto può essere così descritta. Fintanto che l'assorbimento di materiale sul motore i-esimo non è soddisfatto dalle quantità acquistate e immagazzinate, gli si attribuisce l'ammontare residuo richiesto prelevandolo dagli ingressi in magazzino. Quanto descritto può altresì essere schematizzato tramite l'impiego di un diagramma di flusso decisionale, come mostrato dalla sottostante **Figura 39**.

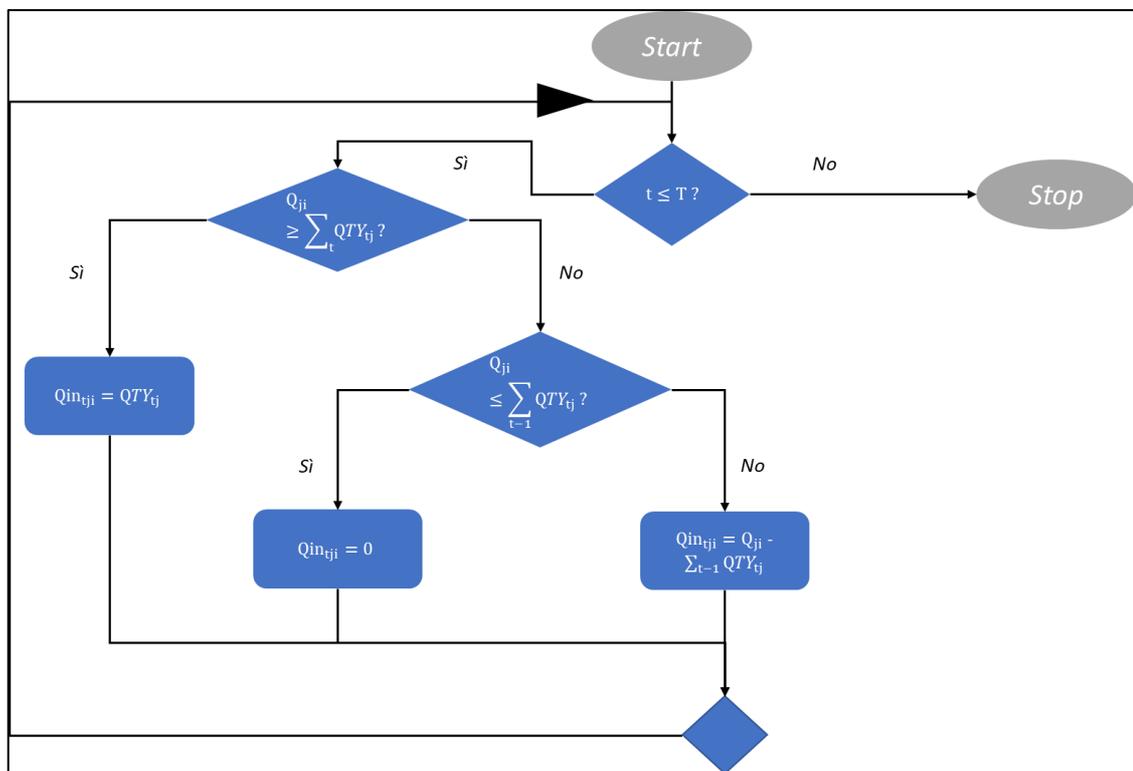


Figura 39: modello di attribuzione delle quantità di materiale immagazzinato ai singoli seriali

Una volta definite le quantità attribuite al motore i-esimo nei singoli periodi di osservazione, il prossimo passo consiste nel calcolarsi il loro costo per ogni componente di configurazione PN_{ji} . Segue, infine, l'aggregazione sul motore della totalità dei costi diretti relativi alle stesse componenti acquistate. Coerentemente alla metodologia FIFO sopraesposta, il primo viene ottenuto, per ogni periodo soggetto a osservazione, sommando il prodotto tra i vettori delle quantità attribuite al motore e del costo unitario registrato. Inoltre, il costo così ottenuto va maggiorato con una fee percentuale da versare per i materiali acquistati e immagazzinati, il cui valore è strettamente connesso al

componente j-esimo e trova riferimento nell'Anagrafica di Configurazione. In formule, si ha:

$$pure\ cost_{ji} = \sum_{t=1}^T Qin_{tji} * unit\ cost_{tj}, \forall j = 1 \dots m \quad (4.22)$$

$$unit\ cost_{tj} = \left(\frac{Cost_{tj}}{QTY_{tj}} \right) \quad (4.23)$$

con (4.23) pari al costo unitario del componente j-esimo nel periodo di osservazione t-esimo derivato direttamente dal database degli input di cui in **Tabella 17**.

Il reale costo legato all'assorbimento del componente j-esimo sul seriale è perciò ottenuto applicando la seguente maggiorazione percentuale fee_j :

$$Cost_{ji} = pure\ cost_{ji} * (1 + fee_j). \quad (4.24)$$

Una volta calcolati i costi diretti delle singole componenti presenti all'interno della configurazione del motore, il costo diretto complessivo dato dagli acquisti si deduce dalla seguente semplice sommatoria:

$$ESN_i\ cost = \sum_{j=1}^m Cost_{ji}. \quad (4.25)$$

Con la **figura 40** posta a conclusione del presente paragrafo, parimenti a quanto svolto per le lavorazioni, si intende fornire una panoramica del flusso dei dati coinvolti nel processo di calcolo del costo diretto delle componenti acquistate e attribuite ai motori.

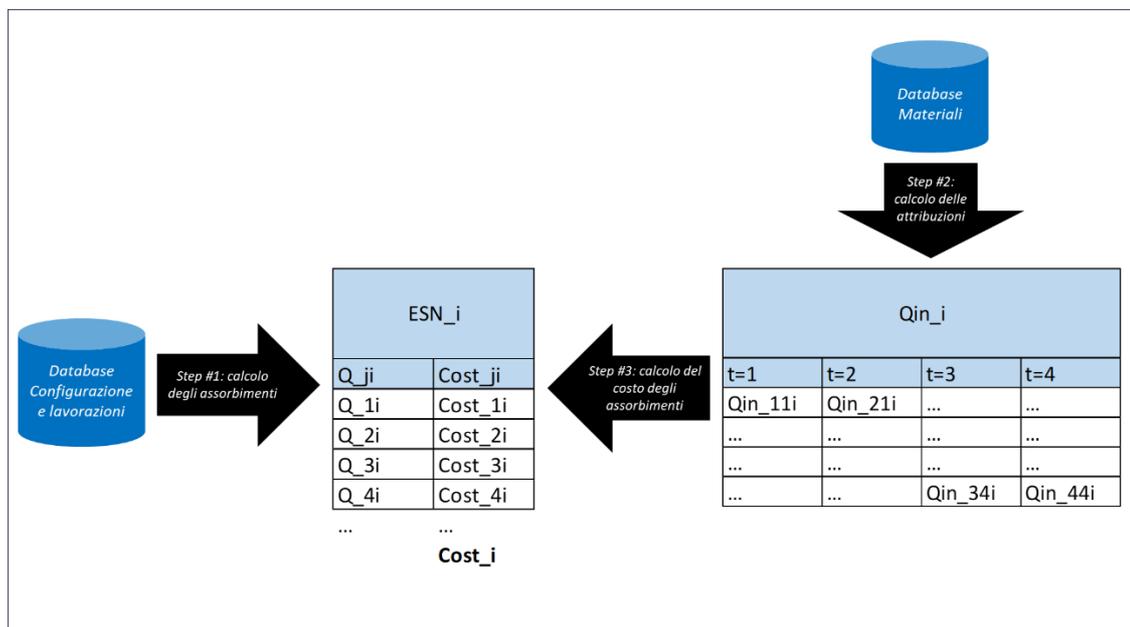


Figura 40: flusso dati per il calcolo del costo diretto delle componenti acquistate

4.3.3 Calcolo dei costi indiretti

I costi indiretti hanno, per definizione, un carattere fisso e periodale, e non risultano direttamente legati ai singoli prodotti di cui si vuole ottenere una valutazione. Per tale ragione, affinché se ne possa debitamente tenere conto ai fini dell'ottenimento del costo pieno dei motori è necessario individuare la migliore metodologia per la loro allocazione. Nel contesto del presente studio, le voci di costo accessorie soggette ad allocazione sui diversi seriali sono, rispettivamente, i costi dei trasporti e gli interessi doganali sulle spedizioni di materiale acquistato, nonché gli overheads connessi allo sviluppo dei seriali (l'insieme dei costi legati ai consumi e alla gestione degli impianti produttivi, i costi legati alla produzione di materiale tecnico, etc...). La seguente **tabella 18** ricostruisce una porzione del database di calcolo utilizzato, il quale associa l'etichetta "Shipment" agli indiretti legati ai trasporti, mentre usa il termine "Other" per indicare il secondo insieme più generale.

Tabella 18: ricostruzione del database per i costi indiretti

ITEM	MOD	PN	VdC	Year 2018							
				Quarter 1		Quarter 2		Quarter 3		Quarter 4	
				QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST
ITEM 1	none	none	Shipment	0,00	Shipment_11	0,00	Shipment_21	0,00	Shipment_31	0,00	Shipment_41
ITEM 1	none	none	Other	0,00	Other_11	0,00	Other_21	0,00	Other_31	0,00	Other_41
ITEM 2	none	none	Shipment	0,00	Shipment_12	0,00	Shipment_22	0,00	Shipment_32	0,00	Shipment_42
ITEM 2	none	none	Other	0,00	Other_12	0,00	Other_22	0,00	Other_32	0,00	Other_42

Osservando il database, si nota come i dati siano stati aggregati secondo la stessa logica temporale delle componenti acquistate. Il proposito di tale ripartizione consiste nella volontà di mantenere l'uniformità dei dati, nonché rimanere coerenti con il metodo di reportistica periodica adottato dal soggetto aziendale.

Il modello di allocazione dei costi indiretti adoperato sul singolo motore ESN_i ha una natura strettamente temporale. Il costo complessivo registrato viene perciò ripartito in modo equivalente sui diversi motori di competenza di un determinato periodo. Ciò implica la necessità di possedere a priori l'informazione relativa allo stato dei seriali in sviluppo. Ogni seriale i -esimo possiede, per definizione, un insieme di macro componenti di configurazione, qui indicati con l'espressione $Item_{pi}$ con $p = 1 \dots P$. A ogni item vengono associati in tabella due voci di costo per ogni periodo $t \in T$ di osservazione. Rispettivamente: il costo dei trasporti $shipment_{tp}$ e dei rimanenti overheads $other_{tp}$. Dal canto suo, il motore risulta di competenza nell'intervallo $[t_k; t_n] \in T$, allorché nello stesso periodo di osservazione ne sono lavorati un numero pari a q . In riferimento a quest'ultimo, si assume che i motori oggetto di stima, nonostante possano presentare delle differenti configurazioni, siano costituiti dallo stesso numero items.

Data una tale premessa, il modello di allocazione temporale dei costi indiretti sui motori è di seguito illustrato:

$$ESN_i \text{ shipment cost} = \left[\left(\sum_{p=1}^P \sum_{tk}^{tn} \text{shipment}_{tp} \right) / q \right]; \forall i = 1 \dots n \quad (4.26)$$

$$ESN_i \text{ other cost} = \left[\left(\sum_{p=1}^P \sum_{tk}^{tn} \text{other}_{tp} \right) / q \right]; \forall i = 1 \dots n \quad (4.27)$$

$$ESN_i \text{ indirect costs} = ESN_i \text{ shipment cost} + ESN_i \text{ other cost} . \quad (4.28)$$

Con i costi indiretti di periodo, sono stati calcolati i tre contributi al costo pieno dei motori in sviluppo definiti nell'introduzione al capitolo. Nella prossima sezione, verrà illustrato il processo di aggregazione di tali contributi sulle diverse di configurazioni dei seriali ed i criteri con cui esso viene svolto. A conclusione del presente paragrafo, parimenti a quanto mostrato nel caso delle lavorazioni e degli acquisiti di materiale, viene illustrata una sintesi del flusso dei dati coinvolti nel calcolo dei costi indiretti (**Figura 41**).

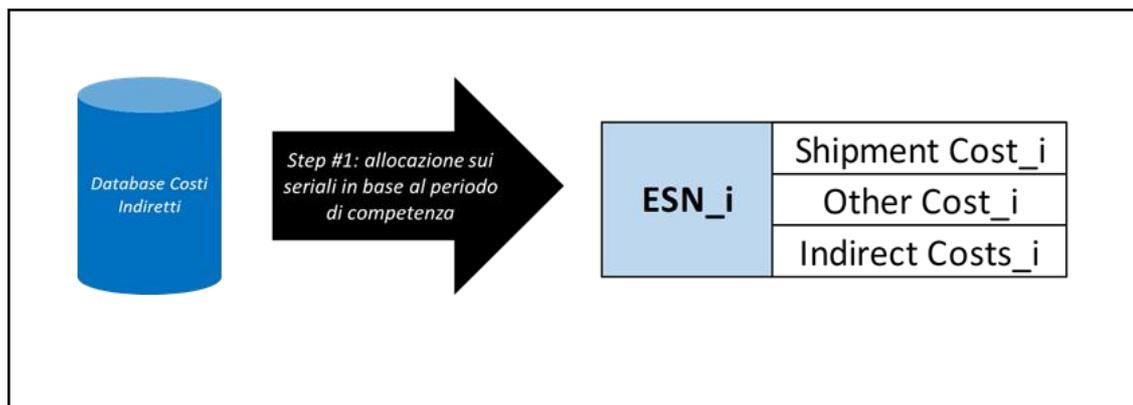


Figura 41: flusso dati per il calcolo dei costi indiretti

4.3.4 Calcolo del costo pieno dei motori

Una volta calcolati i tre contributi parziali, si può finalmente procedere alla loro aggregazione al fine di pervenire al costo pieno dei motori in sviluppo. Esistono essenzialmente due metodi per ottenere il valore desiderato. Entrambi vengono illustrati di seguito. Il primo, consiste semplicemente nella somma, sul singolo motore ESN_i , del valore complessivo dei contributi calcolati nelle precedenti sezioni. L'approccio, considerando il seriale alla stregua di una "black-box" (**Figura 42**), risulta di rapida esecuzione, ma incompleto dal punto di vista informativo riguardo al costo pieno delle singole componenti di configurazione PN_{ji} . Per tale ragione, si ricerca un metodo più soddisfacente dal punto di vista della granularità delle informazioni fornite.

$$ESN_i \text{ full cost} = \text{machining cost}_i + \text{material cost}_i + \text{indirect costs}_i \quad (4.29)$$

il cui risultato si ottiene sommando i contributi di cui in (4.2, 4.25, 4.28).

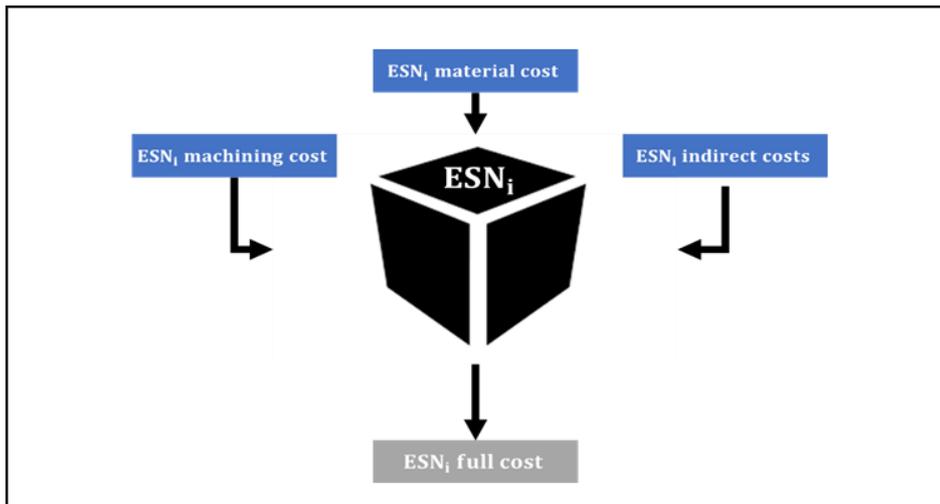


Figura 42: calcolo del costo pieno dei motori secondo l'approccio black-box

Il secondo metodo, più adatto al soddisfacimento dei requisiti di dettaglio informativo richiesti dal presente studio, calcola il costo pieno di ognuna delle componenti appartenenti alla configurazione del motore i -esimo allocando parte dei costi indiretti in modo proporzionale al valore diretto della categoria di voce di costo che si sta osservando. A questo punto, il costo pieno dell'intero motore si ottiene semplicemente sommando i valori dei suoi singoli contributi. Le operazioni appena citate vengono svolte all'interno della sezione dell'applicazione dedicata all'output del processo di calcolo. Una sua ricostruzione può essere consultata nella successiva **Tabella 19**, mentre il layout assunto dall'intera sezione è stato inserito all'interno degli Allegati C del presente elaborato.

Tabella 19: ricostruzione di una porzione della sezione di output dell'applicazione di calcolo

ITEM	MODULE	PN	LVL	SUP PN	Division	VdC	ESN_i		
							BOM	Direct Cost	Full Cost
LPT	LPT_1	PN_11	1	-	Div01	Machining	1	5.000,00 €	tbd
		PN_21	2	PN_11	Div01	Material	2	1.500,00 €	tbd
		PN_31	2	PN_21	Div01	Material	2	1.000,00 €	tbd
		PN_41	2	PN_31	Div01	Material	6	550,00 €	tbd
	LPT_2	PN_12	1	-	Div02	Machining	1	2.450,00 €	tbd
		PN_22	2	PN_12	Div02	Material	1	1.270,00 €	tbd
		PN_32	2	PN_12	Div02	Machining	1	3.600,00 €	tbd
		PN_42	3	PN_32	Div02	Material	2	780,00 €	tbd
		PN_52	3	PN_32	Div02	Material	2	457,00 €	tbd
	LPT_3	PN_13	1	-	Div01	Machining	1	7.000,00 €	tbd

Osservando la tabella, si nota che le informazioni contenute sulla sua parte sinistra derivano dalla precedente Anagrafica di Configurazione (paragrafo 4.2). Viene difatti fornito un elenco di tutte le componenti di configurazione PN_j appartenenti ai rispettivi moduli e item costituenti i motori di sviluppo (nel caso della tabella si tratta della turbina LPT). A ogni Part Number si associa un livello in BOM, nonché la sigla della rispettiva parte di livello superiore. Combinando queste informazioni con le quantità di configurazione richieste sui singoli seriali (colonna BOM nella sezione destra della tabella), si perviene al soddisfacimento dei requisiti necessari al funzionamento delle

relazioni (4.17, 4.18) utilizzate per individuare il reale assorbimento di materiale sul motore. Proseguendo, la colonna “Division” inserita in tabella risulta, dal canto suo, utile all’ottenimento del costo diretto dei materiali acquistati di cui in (4.24). L’etichetta “VdC” indicativa della specifica categoria di voce di costo del componente serve, invece, a individuare la natura del contributo, e di conseguenza l’ammontare calcolato in una delle due sezioni illustrate nei precedenti paragrafi. Dal punto di vista operativo, il valore desiderato viene qui riportato attraverso l’impiego di una ricerca verticale sul codice del Part Number condizionata a una funzione IF sulla natura della voce di costo (Allegati A4).

Risulta, a questo punto, necessario definire un modello di allocazione dei costi indiretti sulle singole componenti appartenenti alla configurazione del motore i-esimo. A differenza dell’approccio temporale utilizzato al fine di individuare la quota complessiva di competenza per un preciso motore, nel caso in questione viene maggiorato il costo diretto del singolo Part Number di un valore pari all’incidenza dei costi indiretti sul totale dei diretti appartenenti a una precisa categoria di voce di costo. Il modello assume di allocare alle componenti appartenenti all’insieme dei materiali i costi indiretti compresi nella categoria “Shipment”. A quelle costituenti le lavorazioni, invece, si allocano i rimanenti costi indiretti appartenenti all’insieme “Others”. Le relazioni di seguito mostrate utilizzano le stesse variabili impiegate nelle precedenti sezioni del capitolo.

Per ogni $PN_{jpi} \in Item_{pi}$ del ESN_i , nell’intervallo $[t_k; t_n] \in T$, il modello di allocazione dei costi indiretti segue quanto definito nelle formule sottostanti:

$$full\ cost_{jpi} = direct\ cost_{jpi} * \left[1 + \left(\frac{shipment_{pi}}{material\ cost_{pi}} \right) \right] \forall j, \forall p \quad (4.30)$$

nel caso di componenti appartenenti alla categoria di materiali, con $direct\ cost_{jpi}$ ottenuto da (4.24) e riportato nella rispettiva colonna in **Tabella 19**,

$$shipment_{pi} = \left(\frac{\sum_{tk}^{tn} shipment_{tp}}{q} \right) \quad (4.31)$$

corrisponde a sua volta al valore degli indiretti allocati sull’item p-esimo del motore i-esimo nel proprio periodo di competenza (vedi espressione 4.26), mentre $material\ cost_{pi}$ costituisce invece il valore del costo diretto totale dei materiali sullo specifico item di configurazione del motore;

$$full\ cost_{jpi} = direct\ cost_{jpi} * \left[1 + \left(\frac{other_{pi}}{machining\ cost_{pi}} \right) \right] \forall j, \forall p \quad (4.32)$$

qualora si tratti, invece, di componenti originate da lavorazioni, con $direct\ cost_{jpi}$ ottenuto dalla coppia (4.13, 4.14) e riportato nella rispettiva colonna in **Tabella 19**,

$$other_{pi} = \left(\frac{\sum_{tk}^{tn} other_{tp}}{q} \right) \quad (4.33)$$

corrisponde al valore degli indiretti allocati sull’item p-esimo del motore i-esimo nel proprio periodo di competenza (vedi espressione 4.26), mentre $machining\ cost_{pi}$

costituisce invece il valore del costo diretto totale delle lavorazioni sullo specifico item di configurazione del motore.

Calcolati i costi pieni delle singole componenti facenti parte della configurazione del motore oggetto di studio (riportati idealmente nell'ultima colonna a destra in **Tabella 19**), il relativo costo pieno nella valuta di riferimento si ottiene semplicemente dalla seguente sommatoria:

$$ESN_i \text{ full cost} = \sum_{j=1}^m \text{full cost}_{ji} . \quad (4.34)$$

Osservandola la relazione soprastante, essa risulta alternativa alla (4.29), ma porta al raggiungimento dello stesso risultato.

Coerentemente a quanto svolto per il precedente modello “black-box”, quanto esposto in maniera analitica viene riassunto da un diagramma di flusso posto in **Figura 43**.

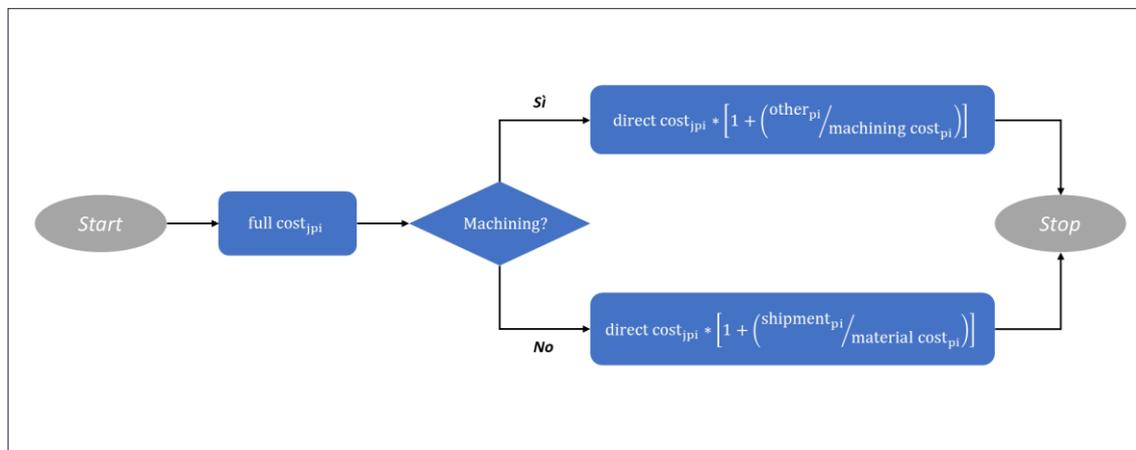


Figura 43: calcolo del costo pieno dei motori secondo l’approccio breakdown

Come si è visto, con il modello sviluppato è stato possibile pervenire al costo pieno dei motori in sviluppo seguendo due diverse strade. Entrambe, però, hanno prima necessitato di un preventivo calcolo dei tre singoli contributi al costo dei seriali. L’approccio “black-box”, da una lato, si è dimostrato di rapida esecuzione ma lacunoso dal punto di vista della completezza informativa. Il metodo “breakdown”, dal canto suo, è risultato più complesso, ma allo stesso tempo pienamente esaustivo per ciò che riguarda la granularità delle informazioni sul costo pieno delle parti di configurazione. Entrambi i sistemi elencati, riassunti nella successiva **Tabella 20**, appaiono soddisfacenti in funzione del particolare requisito. Tuttavia, l’approccio ritenuto canonico all’interno del sistema di calcolo progettato per l’applicazione di dominio risulta essere il modello “breakdown”.

Tabella 20: confronto tra gli approcci black-box e breakdown al calcolo del costo pieno dei motori

	Approccio	Pro	Contro
<i>ESN_i full cost</i>	Black-box: ESN _i direct costs + ESN _i indirect costs	Rapidità esecutiva, utile quando l'obiettivo è quello di ottenere una stima globale.	Incompletezza informativa sul costo pieno delle singole parti di configurazione.
	Breakdown: $\sum_{j=1}^m \text{full cost}_{ji}$	Esaustività informativa sul costo pieno delle singole componenti di configurazione, utile quando l'obiettivo è quello di ottenere una stima puntuale.	Time consuming, in quanto necessita l'inserimento di un'ulteriore tabella di supporto e del ricalcolo dei subtotali sui diversi item di configurazione appartenenti ai motori.

Volendo riepilogare il modello di calcolo che è stato progettato e che viene qui presentato, si può ricorrere al seguente elenco contenente i principali elementi che lo caratterizzano:

- basandosi sulle più note classificazioni, esso appartiene alla categoria dei processi di calcolo quantitativi con forte ispirazione dal modello Activity-Based di Jung;
- il modello generale si suddivide in tre contributi: calcolo dei costi diretti delle lavorazioni e dei pezzi immagazzinati, calcolo dei costi indiretti;
- i primi due vengono attribuiti sulla base delle precise configurazioni dei motori, i secondi sono invece allocati;
- per quanto riguarda le componenti lavorate, esse vengono attribuite al motore sulla base del numero di pezzi lanciati dai lotti di lavorazione, ovvero in misura maggiore o uguale ai requisiti minimi di configurazione;
- le componenti acquistate e immagazzinate vengono attribuite al motore sulla base del loro reale assorbimento seguendo un modello di aggregazione di tipo FIFO su base trimestrale;
- l'insieme dei costi indiretti viene suddiviso in due precise categorie, relative ai trasporti e agli overheads di produzione;
- il costo pieno delle componenti lavorate si ottiene maggiorandone il valore diretto tramite l'allocazione di una quota fissa, corrispondente all'incidenza degli overheads di produzione sul totale dei costi diretti delle lavorazioni;
- il costo pieno delle componenti acquistate si ottiene maggiorandone il valore diretto tramite l'allocazione di una quota fissa, corrispondente all'incidenza degli indiretti legati ai trasporti sul totale dei costi diretti relativi agli acquisti di materiale;
- il costo pieno del motore viene, infine, ottenuto sommando bottom-up il full-cost dell'insieme delle componenti di configurazione facenti parte della sua struttura di prodotto.

All'interno del prossimo paragrafo verrà esposta l'analisi dei rischi svolta sul modello di calcolo presentato e sulla stessa applicazione su cui esso opera. Una volta definiti gli assunti di base per la stessa analisi, si valuteranno, volta per volta, le strategie da mettere in atto in risposta ai rischi individuati.

4.4 Valutazione dei rischi

Definito il processo di calcolo usato per la stima del costo pieno dei motori in via di sviluppo, ci si concentra ora nell'effettuare un'analisi dei rischi in esso contenuti. A tal proposito, nel descrivere la metodologia ed i risultati ottenuti, si trarrà spunto da quanto presentato Cantamessa et al. all'interno del testo dedicato alle pratiche di project management [30]. Occorre, inoltre, precisare che i risultati mostrati all'interno del presente paragrafo fanno riferimento ai rischi individuati all'interno dell'applicazione e del modello progettati. Le criticità tipiche della natura del processo di sviluppo End-User illustrate all'interno del paragrafo 2.4 vengono omesse dalla presente trattazione, in quanto si è cercato di fornirne una puntale risposta tramite l'impiego della metodologia strutturata mostrata nel capitolo 3 dell'elaborato.

Prima di fornire i risultati derivanti dall'analisi sui rischi del processo, presentati in **Tabella 24**, occorre fornire alcune definizioni sull'attività di risk assessment, nonché le nozioni sottostanti tale metodologia. Un rischio è, per definizione, un accadimento incerto che può risultare condizionante sul risultato che si intende perseguire. Nonostante quanto appena detto non faccia emergere la reale natura del rischio, nel caso relativo al presente studio lo si considera solamente nella sua accezione negativa. Un singolo evento rischioso nasce da una causa, o fattore di rischio, interna o esterna al sistema, si evolve attraverso una manifestazione con una precisa probabilità di accadimento, e si concretizza infine con un impatto da cui derivano inevitabili conseguenze. La visione classica appena esposta viene pienamente adottata dal presente studio, e riassunta nella sottostante **Figura 44**.

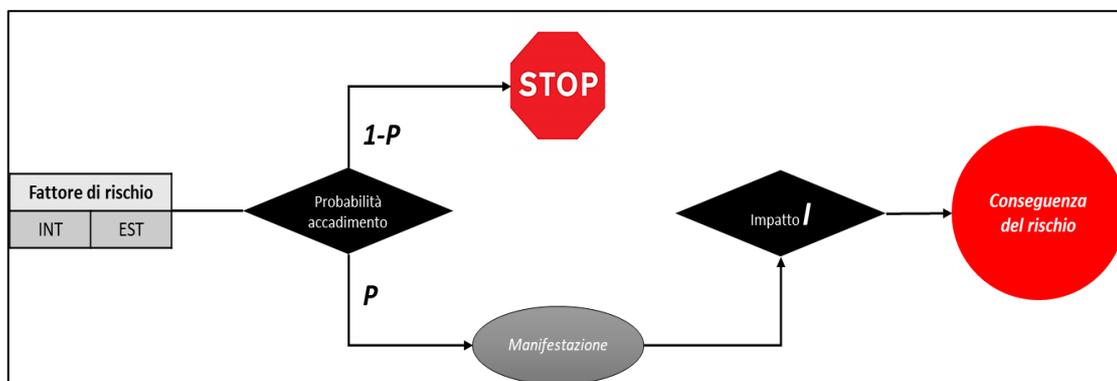


Figura 44: processo di accadimento di un evento rischioso

L'approccio al risk management presentato nei testi dedicati alla teoria del project management può essere tranquillamente utilizzato nel contesto del presente studio, e consiste nelle seguenti quattro macro-fasi [30]:

1. Analisi del rischio;
 - a. Identificazione del rischio (identification);
 - b. Valutazione del rischio qualitativa e quantitativa (assessment);
2. Risposta al rischio (risk response);
 - a. Pianificazione (response development);
 - b. Controllo (response control).

Iniziamo, innanzitutto, con il processo di identificazione dei rischi. Esso consiste nell'individuazione e nella descrizione degli eventi più significativi che possono presentarsi entro un certo contesto, e che possono influenzare l'ottenimento dell'output desiderato. Analizzando la letteratura, esiste una moltitudine di approcci atti all'identificazione dei fattori rischiosi. Nel contesto della presente ricerca, è stata anzitutto adottata una visione di tipo causa-effetto, più efficace nella ricerca delle potenziali minacce rispetto alla controparte effetto-causa. L'analisi "What-if" ha permesso poi l'emergere delle potenziali situazioni rischiose per ogni sezione del processo di calcolo, nonché di valutarne gli effetti su quelle a esse correlate (dipendenti, ad esempio, da vincoli di propedeuticità). Un esempio del processo di identificazione adoperato dallo studio può essere visionato nella sottostante **Tabella 21**.

Tabella 21: esempio di analisi What-if per il presente studio

What if (causa)	Manifestazione	Conseguenze
<i>Mancato calcolo dei contributi netti delle lavorazioni.</i>	Numerosità lorda dei lotti radice.	Sovra costo dei componenti attribuiti ai motori.
<i>Mancata attribuzione dei componenti lavorati ai motori.</i>	Quantità di materiale a domanda dipendente assorbita dal motore nulla.	Nessun costo misurato su tali pezzi, nonostante siano presenti in configurazione.

Una volta identificate le insorgenze rischiose più significative all'interno del processo, e dopo averne descritto le conseguenze prevedibili, prima di definire le più corrette strategie di risposta, occorre procedere a una loro valutazione. Il dimensionamento della portata del rischio viene svolto, a seconda delle necessità, attraverso una valutazione qualitativa o quantitativa dello stesso. Gli obiettivi della fase di assessment sono essenzialmente due: dimensionare il rischio e attribuirvi una priorità per la successiva fase di risposta. La letteratura offre una comune quantificazione del rischio R , denominato anche risk-exposure, adottata anche dal presente studio, e definita dalla seguente relazione [30]:

$$R_k = p_k * I_k \quad (4.35)$$

dove p_k esprime la probabilità di accadimento dell'evento k-esimo in base ai fattori di rischio identificati, mentre I_k rappresenta l'impatto causato dello stesso evento nel caso si concretizzi il rischio R_k .

All'interno della presente ricerca, la valorizzazione del rischio è stata eseguita sfruttando un approccio di tipo quantitativo. Ciò vuol dire che ad entrambi i fattori presenti nell'equazione (4.35) sono stati attribuiti precisi valori numerici indicativi, rispettivamente, della proporzione di incidenza dell'evento rischioso e del suo relativo impatto. Tali valori sono poi riconducibili a una scala bilanciata su cinque livelli, da cui derivare la reale portata del rischio.

Per quanto riguarda la probabilità di accadimento, la **Tabella 22** chiarisce le assunzioni appena esposte. I valori in essa contenuti derivano dall'osservazione empirica, avvenuta durante tutto l'arco della ricerca, sull'incidenza che le diverse operazioni hanno avuto sul processo di calcolo descritto, e di conseguenza sui relativi eventi di rischio a esse associati.

Tabella 22: scala di misura associata alla probabilità di accadimento dell'evento rischioso

Probabilità di accadimento	definizione	valore assunto	valore in scala
	<i>molto alta</i>	> 75%	5
	<i>alta</i>	(50%; 75%]	4
	<i>media</i>	(25%;50%]	3
	<i>bassa</i>	[10%;25%]	2
	<i>molto bassa</i>	< 10%	1

Per quanto riguarda la quantificazione della magnitudo, l'approccio utilizzato ha una natura prettamente finanziaria, e valuta la percentuale di errore della stima rispetto a quanto atteso dalla fatturazione. A tal proposito, i valori qui presentati, essendo la maggior parte dei rischi individuati a carico del soggetto incaricato del calcolo, derivano dalla valutazione empirica (effettuata nel corso della ricerca) della magnitudo di alcune operazioni sulle rispettive sezioni dell'applicazione di calcolo progettata. Ad esempio, un'errata attribuzione delle quantità di un componente di lavorazione posto sui livelli più alti della BOM ha sicuramente più impatto rispetto al sovra-attribuzione di un pezzo di minuteria acquistato da fornitore esterno, per via, tra gli altri, dei vincoli di propedeuticità che legano il secondo al primo (dagli assunti del processo di calcolo illustrati all'interno del paragrafo 4.3). Ciò detto, la scala di misurazione relativa alla magnitudo di un evento rischioso è presentata nella sottostante **Tabella 23**.

Tabella 23: scala di misura associata alla magnitudo dell'evento rischioso

Impatto	definizione	valore assunto	valore in scala
	<i>Elevato</i>	>10% del costo del motore	5
	<i>Significativo</i>	(5%;10%] del costo del motore	4
	<i>Moderato</i>	(2%;5%] del costo del motore	3
	<i>Minore</i>	[0,5%;2%] del costo del motore	2
	<i>Basso</i>	<0,5% del costo del motore	1

Una volta identificati e dimensionati gli eventi rischiosi impattanti sul processo di calcolo modellato, il successivo passo consiste nell'individuazione delle più corrette strategie di risposta da mettere in atto al fine di far fronte al loro realizzarsi. Essendo la quasi totalità dei rischi individuati di natura interna, risulta possibile attuare i più appropriati interventi di contrasto. Coerente a quanto definito dal PMBOK®, le strategie di risposta definite nella presente ricerca sono quattro, con incluso, nei pochi casi previsti, il trasferimento del rischio, in quanto la maggior parte delle attività descritte dal modello risulta a carico dell'unico soggetto responsabile del calcolo. Esse sono di seguito elencate [30]:

1. evitare, ovvero eliminare le cause che stanno alla base del rischio e far tendere la probabilità p_k di accadimento dell'evento k -esimo il più possibile allo zero;
2. mitigare, ovvero ridurre le conseguenze negative I_k legate all'evento rischioso;
3. trasferire, ovvero rendere responsabile dell'evenienza del rischio un soggetto terzo;

4. accettare il rischio con controllo del risultato se risulta di scarsa rilevanza sulla qualità dell'output.

Interpolando i valori assunti dai fattori costituenti il rischio, si perviene a una matrice le cui diverse aree sono associate ad altrettante strategie di risposta. Nel caso in questione, la struttura adottata è presentata nella **Figura 45**.

Matrice decisionale dei rischi		Impatto				
		Basso	Minore	Moderato	Significativo	Elevato
Probabilità	Molto alta					
	Alta					
	Media					
	Bassa					
	Molto bassa					

Figura 45: matrice decisionale per la risposta al rischio

Osservandola, la sezione in verde è indicativa di tutti quei rischi modesti incidenti sul processo, e perciò associati alla strategia di risposta legata alla loro accettazione (possono essere mitigati qualora si sia già operato sugli accadimenti a più elevata priorità). Al contrario, la sezione in rosso corrisponde all'insieme degli accadimenti a elevato impatto sul processo che devono assolutamente essere eliminati attraverso l'attuazione di azioni correttive a monte (il modello è più propenso, infatti, ad attribuire un maggior peso alla magnitudo piuttosto che alla probabilità). In mezzo si collocano quegli accadimenti affetti da vizi di procedura che possono essere mitigati, se interni, o trasferiti, altrimenti, attraverso l'inserimento delle rettifiche di processo (area in giallo).

In merito alla fase finale di controllo dei rischi, l'approccio utilizzato nella ricerca è stato quello analizzare gli scostamenti più significativi presenti nel calcolo rispetto all'expert judgement del project manager e a quanto successivamente fatturato sul seriale, e di utilizzare la lesson-learned relativa a quanto scoperto per migliorare l'applicazione di calcolo nella sua successiva iterazione di sviluppo.

Una volta che sono stati ampiamente definiti i criteri adottati per il processo di risk assessment, si procede alla presentazione dei risultati dell'analisi. La **Tabella 24** contenente l'insieme dei rischi di processo è stata strutturata in cinque sezioni, di seguito illustrate:

1. anagrafica del rischio, in cui si definisce l'evento rischioso, nonché la sua natura interna o esterna;
2. origine del rischio, ovvero la descrizione della causa scatenante l'evento rischioso (trigger);
3. quantificazione del rischio, in cui tramite la (4.35) si perviene a un valore basato sulle scale di valutazione a cinque livelli illustrate in precedenza;
4. risposta al rischio, in cui si definisce la corretta strategia di intervento e il soggetto su cui ricade tale responsabilità;
5. localizzazione del rischio, ovvero la/e porzione/i del processo di calcolo su cui esso ricade. Viene qui adottata una codifica binaria per evidenziare le aree di influenza del rischio (valore 1), da quelle in cui esso non si manifesta (valore 0).

Tabella 24: Risk-assessment per l'applicazione e il modello di calcolo progettati

Anagrafica del rischio		Origine del rischio		Quantificazione del rischio			Risposta al rischio		Localizzazione del rischio				
Rischio	Titolo	Natura	Trigger	P	I	R	Owner	Strategia	Database	Lavorazioni	Acquisto materiali	Costi indiretti	Aggregazione seriale
1	Errata configurazione	Interno	Si definisce un numero inappropriato di componenti di configurazione, o risultano addirittura mancanti.	3	5	15	Utente	Evitare	1	0	0	0	1
2	Errori nei riferimenti delle formule	Interno	All'interno del sistema, le formule di calcolo costimanti il modello sono richiamate in modo errato.	3	5	15	Utente	Evitare	0	1	1	1	1
3	Impossibile associare componenti a elevato valore	Interno	Può capitare che il database presenti incongruenze per cui al motore non risulti attribuibile un componente di lavorazione a elevato valore (nello specifico può accadere nel caso tag degli ordini di lavoro).	2	4	8	Utente	Mitigare	1	1	0	0	1
4	Impossibile associare minuteria a basso valore	Interno	Può capitare che il database presenti incongruenze per cui al motore non risulta attribuibile un componente acquistato a basso valore.	2	2	4	Utente	Accettare	1	0	1	0	1
5	Non uniformità dei dati nelle sezioni di calcolo	Interno	Potrebbe capitare che dati appartenenti a sezioni non di competenza convergano in una precisa area di calcolo.	2	3	6	Utente	Mitigare	0	1	1	1	0
6	Double-counting dei lanci sugli ordini di lavoro radice	Interno	Nel caso in cui non vengano ricalcolati i parziali netti delle lavorazioni, si può rischiare una sovra attribuzione di pezzi (e di costi) sui seriali che contengono gli ordini di lavoro radice.	2	5	10	Utente	Mitigare	0	1	0	0	1
7	Sottostima del costo degli ordini di lavoro scissi	Interno	Nel caso di mancato ricalcolo dei costi netti, agli ordini di lavoro scissivieni associato soltanto il costo ottenuto dopo la separazione (non comprensivo dei pezzi lanciati sul lotto originale di lavorazione).	2	5	10	Utente	Mitigare	0	1	0	0	1
8	Errata attribuzione dei pezzi di lavorazione	Interno	Durante l'attività di attribuzione dei componenti di lavorazione al motore può venir associata una quantità errata a causa del carattere manuale dell'operazione.	2	4	8	Utente	Mitigare	0	1	0	0	1
9	Quantità attribuite nulle sui componenti di acquisto in configurazione	Interno	Qualora non si proceda in modo sequenziale attribuendo, prima, le dovute quantità dei pezzi di lavorazione sul motore, i materiali acquistati a domanda dipendente avranno quantità assorbite nulle pur essendo presenti in configurazione.	2	4	8	Utente	Mitigare	0	1	1	0	1
10	Estrazione di dati incoerenti	Interno	L'utente potrebbe fornire le errate interrogazioni al database dell'ERP e di conseguenza inserire nel modello di calcolo informazioni non pertinenti.	1	5	5	Utente	Mitigare	1	1	1	1	1
11	Incompletezza informazioni inserite in database	Esterno	Può accadere che il database usato dal modello per le diverse iterazioni di calcolo sia incompleto o, addirittura, obsoleto a causa di una cattiva gestione dell'ERP aziendale.	1	5	5	Resp. ERP	Trasferire	1	1	1	1	1
12	Corruzione/errore critico del sistema di calcolo	Esterno	Data la notevole dimensione che può raggiungere il sistema di calcolo per oggetti complessi come quelli di cui nella presente ricerca, può accadere che si manifestino errori critici o la completa corruzione dei dati in esso contenuti.	1	5	5	Resp. IT	Trasferire	1	1	1	1	1

I rischi contenuti nella **tabella 24** sono riportati all'interno della seguente matrice di intervento.

Matrice decisionale dei rischi relativa al processo di calcolo per la stima del costo dei motori in via di sviluppo		Impatto				
		Basso	Minore	Moderato	Significativo	Elevato
Probabilità	Molto alta	Yellow	Yellow	Red	Red	Red
	Alta	Green	Yellow	Yellow	Red	Red
	Media	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red (1, 2)
	Bassa	Green	Green (4)	Yellow (5)	Yellow (3, 8, 9)	Yellow (6, 7)
	Molto bassa	Green	Green	Green	Green	Green (10, 11, 12)

Figura 46: matrice di intervento dei rischi per l'applicazione e per il modello di calcolo progettati

Definiti i rischi incidenti sul processo, si passa ora alla loro analisi. Osservando quanto esposto, uno primo esame del contenuto suggerisce una netta tendenza della distribuzione verso l'area dedicata all'applicazione delle misure correttive di mitigazione, se il rischio è di natura interna, e di trasferimento, se di natura esterna. Difatti, il 75% dei rischi qui individuati si caratterizza per il fatto di essere derivati da vizi legati alla procedura di calcolo stessa o alla gestione del software ERP utilizzato per l'acquisizione degli input utili al modello. All'interno di tale sottogruppo, gli elementi con natura interna costituiscono la proporzione dominante del 78% sul totale dei nove elementi individuati, mentre la rimanente quota è associata ai due rischi di natura esterna. Gli elementi in comune tra gli accadimenti 3-5-6-7-8-9-10 sono due. Il primo è relativo al fatto che essi emergono dalla debolezza strutturale tipica degli spreadsheet software (paragrafo 2.4.2) causata dai due distinti livelli di lettura in essi contenuti. Il secondo elemento di comunanza è quello di poter essere facilmente risolti dall'utente, primo responsabile delle azioni correttive, tramite il semplice ricorso alla procedura di calcolo nella sua sequenzialità. Nel caso dei rischi 11-12, invece, essendo essi di natura esterna risulta necessario l'intervento di una figura terza su cui ricade la responsabilità della rispettiva strategia di risposta. In primis, per quanto riguarda l'accadimento 11, deve essere incaricato un responsabile ERP che, insieme al suo team, ha il compito di organizzare e aggiornare puntualmente l'insieme delle registrazioni avvenute in azienda in merito

all'oggetto di cui si vuole effettuare una valutazione. Nella situazione in cui l'utente incaricato del calcolo dovesse constatare l'assenza di informazioni o l'obsolescenza degli input necessari al modello, la responsabilità va trasferita al responsabile di competenza. Un discorso del tutto simile può essere fatto nel caso del rischio 12. In tale situazione, infatti, il responsabile IT dovrebbe occuparsi di mantenere l'applicazione ospitante il modello di calcolo, nonché garantirne il corretto funzionamento per il soggetto incaricato della stima. L'unico rischio che risulta accettabile qualora fosse necessario impiegare le risorse limitate sugli eventi a più elevata priorità è il numero 4. In tale situazione, essendo gli elementi di configurazione acquisti di materiale esterno a basso valore (minuteria come, ad esempio, la bulloneria), un intervento correttivo potrebbe non aggiungere apprezzabile valore alla qualità della stima. Per tale ragione, la casistica in questione andrebbe affrontata puntualmente sui singoli casi. I rischi da evitare sono costituiti dalla coppia 1-2. Nel primo caso, si tratta di un'erronea definizione dello stesso prodotto, per cui la stima perde già di significatività prima che il processo di calcolo venga messo in atto. Ci si troverebbe difatti nella situazione in cui si starebbe valutando un oggetto diverso da quello desiderato. Nel caso dei motori a turbina in fase di sviluppo, piccole varianti di configurazione possono determinare prodotti sensibilmente differenti. È compito, perciò, del soggetto incaricato intervenire a monte al fine di venire in possesso della corretta struttura di prodotto. Nel secondo caso, invece, si contempla l'errata trasposizione del modello di calcolo all'interno dell'applicazione, o l'introduzione di elementi di contaminazione che possano pregiudicarne il risultato. Anche qui, il soggetto incaricato o lo stesso sviluppatore End-User, in funzione del punto di vista usato, ha il compito di evitare l'insorgenza di tale accadimento attenendosi alle procedure di calcolo analitiche definite in sede di creazione del modello e riassunte nella relativa documentazione di supporto.

L'analisi dei rischi mostrata all'interno del presente paragrafo ha messo in evidenza alcune pericolosità legate alla natura e all'impiego dell'applicazione progettata per il calcolo del costo pieno dei motori a turbina di generazione GE9X. Nella maggior parte dei casi, tuttavia, essi risultano risolvibili tramite l'impiego delle più consone azioni correttive, congruenti con la logica e con la sequenzialità dei passaggi illustrati all'interno del modello di calcolo. I rischi di natura esterna incombenti sull'applicativo di calcolo risultano, invece, evitabili tramite l'impiego delle più corrette pratiche legate alla gestione dei sistemi informatici.

L'ultimo capitolo contenuto all'interno del presente elaborato fornisce alcune riflessioni conclusive sulla validità dell'applicazione di calcolo che è stata progettata. Riferendosi agli aspetti che si ritiene siano caratteristici per la stessa soluzione, ovvero le piattaforme ospitanti il modello di calcolo, la natura dei dati in input e le relazioni costruite tra le diverse variabili, verrà svolta un'analisi sulla possibilità di replicazione del sistema progettato al di fuori dello specifico contesto in cui è stato concepito. Verranno inoltre discusse le limitazioni intrinseche del modello di calcolo e le implicazioni teoriche e pratiche del lavoro svolto sulle future attività del soggetto aziendale che ha ospitato lo studio.

5 Conclusioni

Alla luce di quanto illustrato all'interno del presente elaborato di tesi, è possibile trarre le dovute conclusioni in merito all'applicazione di calcolo che è stata progettata sullo spreadsheet software MS Excel® ai fini della stima del costo pieno dei motori a turbina appartenenti alla serie GE9X. All'interno della presente sezione verranno discusse le possibilità di replicazione del modello di calcolo progettato in contesti Manufacturing diversi da quello in cui è stato originato. L'attenzione verrà posta sull'applicabilità del modello, sulla diffusione dei sistemi End-User per lo sviluppo delle soluzioni di dominio tramite software ampiamente diffusi, sulla natura degli input e delle relazioni tra le diverse variabili, sull'impatto che hanno i rischi in precedenza individuati nei confronti della concretezza dell'output della stima. L'analisi si accompagnerà della trattazione delle principali limitazioni intrinseche del modello di calcolo e della piattaforma software che lo ospita. Verranno, infine, evidenziate le implicazioni teoriche e pratiche che ha avuto il presente lavoro sulle attività future del soggetto aziendale, nonché le lessons-learned che da esso si possono trarre.

In merito al primo aspetto soggetto ad analisi, l'applicabilità del modello di calcolo progettato ai fini del product-costing, riferendosi alle riflessioni poste nel precedente capitolo 2 si discutono le criticità cui far fronte nel caso specifico illustrato dalla ricerca. Bisogna, innanzitutto, tenere a mente che il sistema di calcolo qui presentato si configura come un approccio quantitativo, analitico e bottom-up alla stima del costo pieno del prodotto. Per tale ragione, esso necessita di un notevole numero di informazioni relative alla configurazione e alle voci di costo caratteristiche dell'oggetto da valutare, e può di conseguenza essere applicato soltanto nelle fasi avanzate del suo ciclo di sviluppo, non prima della progettazione di dettaglio (o Tollgate 4-8 nel contesto aerospaziale). Ad oggi, il GE9X si colloca infatti all'interno del Tollgate 8 in attesa delle certificazioni finali. Questa prima riflessione sembra già suggerire una prima limitazione intrinseca del modello di calcolo relativa alla sua inapplicabilità per le fasi anteriori del ciclo vitale del prodotto. Una tale situazione lo rende esclusivo soltanto ai periodi più avanzati, quando una struttura dell'oggetto risulta già definita. Contrariamente ai modelli per il product-costing quotati in letteratura, quello progettato possiede alcune caratteristiche specifiche al dominio cui si rivolge senza le quali risulterebbe inefficace (il dettaglio in proposito viene discusso più avanti). Quest'ultima condizione conferma una limitazione che ci si aspettava dal sistema di calcolo, in quanto concorde con le perplessità espresse da Hueber et al. [20] nel precedente paragrafo 2.3. La situazione appena citata restringe inevitabilmente il campo di applicabilità della soluzione progettata in favore di quei contesti che sfruttano un insieme di informazioni simile.

A proposito delle piattaforme utilizzate per l'applicazione progettata, l'ERP SAP® per l'ottenimento dei dati input e lo spreadsheet software MS Excel® per il modello di calcolo, quanto discusso nel precedente paragrafo 2.4 in merito alla crescente diffusione degli approcci End-User per lo sviluppo delle soluzioni di dominio convince sulla possibilità che il sistema ideato possa trovare diffusione in situazioni simili a quella che ha visto la sua stessa concezione. La complementarità tra le due piattaforme, nonché la loro ampia diffusione tra i soggetti aziendali, ha nel corso degli anni favorito le economie

di rete dovute al loro impiego riducendone progressivamente l'apprendimento specifico richiesto. Questo è vero soprattutto nel caso dello spreadsheet software MS Excel® il quale, grazie all'enorme diffusione del sistema operativo ospitante, si è imposto come lo standard de facto per la progettazione di soluzioni di calcolo ad-hoc all'interno dei soggetti aziendali, rafforzandosi nel tempo grazie al fenomeno del lock-in delle competenze. Nonostante i pregi elencati, l'applicazione di calcolo progettata soffre delle stesse limitazioni intrinseche dei sistemi EUD discussi in precedenza. La duplice struttura caratterizzante la piattaforma Excel® fa sì che gli eventuali errori, siano essi di natura quantitativa che qualitativa, contenuti all'interno dell'applicativo risultino nascosti allo stesso utente. La principale causa in proposito è data dalla presenza dei riferimenti impliciti tra le variabili di calcolo. In tale situazione, l'individuazione delle incoerenze all'interno del processo calcolo richiede un approfondimento delle singole relazioni risultando un'attività a elevato assorbimento temporale. Una soluzione che possa arginare tale problematica è senz'altro l'introduzione delle misure di sicurezza atte a bloccare alcune sezioni dell'applicativo.

Per quanto riguarda la natura dei dati usati come input per il processo calcolo, le conclusioni in merito alla possibilità di replicare quanto definito all'interno del presente elaborato nel contesto di altri progetti in ambito Manufacturing risultano relativamente scontate. Quanto presentato all'interno del paragrafo 4.2, nel caso della costruzione del database generale, mostra un carattere piuttosto generico delle informazioni propedeutiche al calcolo. Difatti, i dati necessari alle tre Anagrafiche fanno diretto riferimento alla distinta base del prodotto (Anagrafica di Configurazione), ai lotti di produzione per le componenti lavorate (Anagrafica delle Lavorazioni), nonché ai costi registrati sulle singole commesse relative al programma di sviluppo GE9X (Anagrafica delle Commesse). Per tale motivo, al netto di trascurabili specificità, come ad esempio la presenza di aggregazioni di componenti di prodotto in strutture modulari, si ritiene che il pool informativo usato possa essere esteso a una molteplicità di contesti richiedenti una simile implementazione del product-costing per prodotti in via di sviluppo in ambito Manufacturing. Partendo, infatti, dal presupposto che risultino necessarie le informazioni di configurazione e di costo dei singoli componenti, si ritiene che l'aggregazione svolta non sia da questo punto di vista affetta da limitazioni.

Le relazioni tra le variabili costituenti il modello di calcolo presentato all'interno dell'elaborato necessitano di riflessioni più approfondite. Come noto, il processo di calcolo si ripartisce in quattro precisi contributi: costo diretto delle lavorazioni, costo diretto dei materiali acquistati, costi indiretti, costo pieno dei motori. In merito alle lavorazioni, un aspetto specificatamente adattato al caso di studio, per via della natura degli input utilizzati, è rappresentato dalle equazioni (4.5-4.15) nelle quali viene valutato il contributo netto delle quantità e dei costi dei singoli lotti di produzione. Nel caso in cui tali valori fossero già preventivamente forniti dall'ERP, la componente di costo diretto dei motori derivata dalle lavorazioni si otterrebbe semplicemente come sommatoria dei costi dei relativi assemblati presenti in configurazione. Poiché viene esclusa dallo stesso ambito progettuale qualsiasi modifica delle modalità con le quali vengono svolte le registrazioni all'interno del software gestionale, gli aggiustamenti citati costituiscono una fonte di distinzione e di possibile errore del modello di calcolo con conseguente limitazione nei confronti della sua replicabilità.

Per quanto riguarda, invece, la quota di costo diretto attribuita alle componenti acquistate da fornitori esterni, due sono gli assunti condizionanti il modello di calcolo: la gestione delle scorte secondo il criterio FIFO e la registrazione delle movimentazioni di magazzino su base trimestrale. Sul secondo si spendono poche parole, poiché l'intervallo temporale gioca un ruolo del tutto secondario all'interno del funzionamento modello (viene difatti definito un t generico). La gestione FIFO dei pezzi in ingresso risulta invece caratterizzante per il processo di calcolo, in quanto impone una precisa direzionalità per la valutazione delle scorte di magazzino. Tuttavia, in contesti di sviluppo prodotto ci si attende l'utilizzo del medesimo modello per tre semplici ragioni correlate le une alle altre. Bisogna, anzitutto, tenere a mente che il settore industriale delle turbomacchine, e in generale dei grossi componenti meccanici, prevede una produzione non seriale di tipo Make-to-Order (MTO) soprattutto in una fase di sviluppo pre-produttivo. In tale situazione, iterazioni di prodotto successive possono subire anche notevoli variazioni nella loro architettura. Una prima ragione di natura tecnica all'uso del FIFO consiste dunque nella necessità di acquistare i materiali attribuibili alla precisa configurazione, di modo che il relativo valore venga assorbito dal seriale e incluso poi, ad esempio, all'interno del costo del venduto. In questo modo si perviene a una minimizzazione dei materiali non attribuiti, come l'eccesso delle scorte di sicurezza, con conseguente riduzione del valore delle obsolescenze (secondo elemento in favore dell'impiego del FIFO). La terza ragione di natura economico-finanziaria rafforza quanto appena espresso. Secondo le più note teorie sul Bilancio aziendale, l'acquisto di materie prime e di semilavorati registra un costo all'interno del Conto Economico, così come una variazione positiva delle scorte in magazzino. Se parte di esse subisce l'obsolescenza, si generano ulteriori costi per svalutazioni da contrastare con i dovuti accantonamenti preventivi agli specifici fondi. Nonostante le motivazioni in favore dell'impiego del FIFO sopracitate, l'utilizzo di un diverso criterio per la gestione delle scorte si scontra con lo stesso funzionamento del modello di calcolo, alimentandone perciò un'ulteriore limitazione.

In merito al calcolo dei costi indiretti da allocare sui seriali, gli elementi caratterizzanti il modello sono la loro aggregazione secondo i moduli componenti i motori e la loro disposizione su base trimestrale. Entrambi derivano da assunzioni non vincolanti, per cui possono essere disposti criteri differenti non dannosi per la concretezza dell'applicazione e del sistema di calcolo progettati.

Come risulta noto, il costo pieno dell'intero motore viene ottenuto tramite la sommatoria del full-cost delle componenti appartenenti alla sua stessa configurazione. Quest'ultimo deriva dalla maggiorazione del costo diretto della singola parte tramite una quota fissa degli indiretti pesata sul valore complessivo della categoria di voce di costo che si sta considerando (equazioni 4.30-4.32). Tali relazioni necessitano, però, della preventiva conoscenza del periodo di competenza del motore soggetto a stima. Risulta immediato comprendere che l'eventuale mancanza di tale informazione preclude il corretto calcolo del costo pieno delle singole parti, configurando in questo modo un'ulteriore limitazione del modello costruito.

Un'ultima riflessione coinvolge la natura dei rischi emersi tramite l'analisi di risk assessment e l'impatto che gli stessi hanno sul corretto funzionamento dell'applicazione e sulla replicabilità del processo di calcolo progettato. Dallo studio contenuto all'interno del paragrafo 4.4 è emersa una netta prevalenza degli accadimenti legati ai vizi procedurali durante l'implementazione del modello, facilmente risolvibili attraverso la

corretta applicazione della sequenzialità delle attività oppure trasferendo parte della responsabilità a un soggetto terzo. Per tale ragione, si ritiene che i rischi connessi alla procedura di calcolo non ne costituiscano una fonte di limitazione.

In conclusione, si intendono fornire le ultime riflessioni in merito alle implicazioni teoriche e pratiche scaturite dal lavoro presentato. Come affermato nelle precedenti sezioni dell'elaborato, il processo di sviluppo di una soluzione software di dominio per il calcolo del costo pieno dei motori a turbina nasce dalla necessità di un miglioramento delle attività operative da parte dello stesso soggetto aziendale. Nello specifico, al fine di offrire un preventivo rapido e dettagliato da fornire al cliente, l'azienda ha deciso di passare da un approccio puntuale e destrutturato per la stima del full-cost dei motori in fase di sviluppo a uno organizzato basato su un preciso modello di calcolo. A tal proposito, sfruttando le teorie del product-costing e dell'End-User development, si è generata la soluzione in precedenza esposta.

Sotto l'aspetto teorico, si possono trarre diverse considerazioni rispetto al lavoro svolto. Innanzitutto, la ricerca ha nuovamente dimostrato l'inapplicabilità delle tecniche generiche per il product-costing all'interno del preciso contesto aziendale. Difatti, come previsto da Hueber et al. [20], nel modello progettato sono state inserite diverse condizioni specifiche calcate sul prodotto da valutare. Dal capitolo 4 si è difatti notato come ognuno dei contributi al calcolo del costo pieno dei motori sia stato appositamente cucito sulla natura dei dati impiegati. Una seconda evidenza si lega direttamente ai processi EUD largamente diffusi presso le imprese. Lo studio ha confermato i benefici offerti dall'introduzione di una metodologia strutturata per lo sviluppo di soluzioni di dominio a opera di soggetti non esperti di software engineering, come auspicato da Taylor et al. e McBride et al. (entrambi citati in [22]). L'approccio ha altresì dimostrato che la suddivisione per releases delle diverse versioni dell'applicativo ha permesso un inserimento consapevole delle funzionalità richieste. Inoltre, la preventiva definizione del layout assunto dalle singole sezioni dell'applicazione di calcolo ha garantito una più facile individuazione degli eventuali errori presenti, confermando quanto proposto da Kruck et al. (citato in [28]). A tal proposito, un ulteriore elemento a favore è senz'altro stata la volontà di non sovrascrivere le singole releases in modo da mantenere viva l'informazione storica delle funzionalità introdotte (a conferma di quanto espresso da Sakal [22]).

Considerando l'aspetto pratico del presente lavoro, una diretta implicazione del risultato raggiunto con la progettazione dell'applicativo di calcolo e della relativa manualistica di supporto è la creazione dei presupposti per il futuro impiego del sistema ideato in successivi progetti di sviluppo intraziendali.

Infine, si intendono fornire due raccomandazioni nel caso il soggetto aziendale volesse implementare una soluzione software proprietaria che poggia sugli stessi principi del sistema di calcolo presentato. Innanzitutto, si raccomanda di impiegare l'applicativo esistente per un nuovo ciclo di stime. Dovrà essere scelto un prodotto che condivide simili caratteristiche strutturali rispetto al GE9X. In questo modo, aumenterebbe la possibilità di superare le limitazioni intrinseche ancora presenti. La seconda raccomandazione coinvolge lo sviluppo dell'eventuale software proprietario per la valutazione dei costi dei prodotti in sviluppo. Si consiglia fortemente di adottare un approccio strutturato basato su requisiti stringenti, in quanto risulta vincente per l'ottenimento di una soluzione di qualità. Partendo dalle relazioni teoriche tra le variabili descritte, si raccomandano le

preventive definizioni del layout assunto dall'eventuale software proprietario e del flusso delle informazioni al suo interno attraverso le tecniche più accreditate presenti nella letteratura di dominio.

Allegati

Allegati A: formule di calcolo impiegate all'interno dell'applicazione

A1: istruzioni di calcolo per l'ottenimento del costo diretto delle componenti lavorate

<i>Formula di calcolo</i>	<i>Definizione</i>	<i>Riferimento al modello</i>
ETICHETTA MOTORE: <i>ESN00X</i>	Inserendo manualmente un'etichetta indicativa della sigla del motore a cui si vuole fare riferimento, vi si attribuiscono le quantità ed i costi netti dell'intero ordine di lavoro.	Equazioni (4.2-4.4) con le quali si perviene al costo diretto delle componenti di configurazione lavorate.
LUNGHEZZA STRINGA: <i>LEN(WO)</i>	Calcola la lunghezza della stringa di caratteri costituenti l'ordine di lavoro, in modo da distinguere tra primitivi (5 caratteri) e derivati (6 caratteri).	Una tale suddivisione risulta propedeutica al successivo calcolo dei parziali netti di cui nelle equazioni (4.5-4.15)
LOTTO DI LAVORO RADICE: <i>MID(WO;1;5)</i>	Per ogni riga estrae l'ordine di lavoro primitivo (root).	Una tale suddivisione risulta propedeutica al successivo calcolo dei parziali netti di cui nelle equazioni (4.5-4.15)
DELIVER COST: <i>IF(LEN=5;(QD/QL)*COST;</i> <i>IF(LEN=6;(QD/QL)*COST+QD*SUM</i> <i>IFS(COST;ROOT;LEN=5)/SUMIFS(Q</i> <i>L;ROOT;LEN=5);0))</i>	Se l'ordine di lavoro è primitivo, calcola il costo diretto dei pezzi consegnati tramite il complemento a uno del tasso di scarto. Altrimenti, allo stesso somma la componente di costo unitario del lotto radice, pesata sulla quantità consegnato.	Equazioni (4.5-4.8) relative al calcolo del costo diretto associato alle componenti non scartate.
SCRAP COST: <i>IF(AND(LEN=5;SUMIFS(QL</i> <i>DERIVATI)<QL ROOT);</i> <i>COST*(1-(QD+SUMIF(QL</i> <i>DERIVATI)/</i> <i>SUMIFS(QL ROOT));</i> <i>IF(AND(LEN=6;QD DERIVATI<QL</i> <i>DERIVATI);SCRAP*(COST+</i> <i>SUMIFS(ROOT</i> <i>COST)/SUMIFS(ROOT QL));0))</i>	Calcola il costo dei pezzi scartati. Se l'OL è radice e la quantità lanciata sui derivati è inferiore alla quantità su di esso lanciata, al costo dell'OL sottrae la quota di quantità consegnata e quella lanciata sugli split, entrambe pesate sulle sue quantità lanciate. Se l'OL è derivato ed esiste uno scarto, associa il costo diretto dello scarto a cui somma una quota dell'OL radice pesata sulla quantità scartata.	Equazioni (4.9-4.12) relative al calcolo del costo diretto associato alle componenti scartate.
NET COST: <i>DELIVER COST + SCRAP COST</i>	Calcolo il costo netto associato all'ordine di lavoro sommando la quota di contributo dovuta ai pezzi consegnati all'interno del lotto di produzione e quelli andati di scarto.	Equazioni (4.13, 4.14) per gli ordini di lavoro primitivi e derivati rispettivamente.

A1-bis: istruzioni di calcolo per l'ottenimento del costo diretto delle componenti lavorate

NET QL: <i>IF(LEN=5;QL*NET COST/COST; QL)</i>	Calcolo la quantità lanciata netta sul lotto di lavorazione. Se il lotto è radice, tenendo conto della situazione descritta nel paragrafo 4.3.1, ricalcola le quantità nette riferendosi al costo netto in precedenza ottenuto. Altrimenti, riporta l'informazione contenuta all'interno del database.	Equazione (4.15) relativa al calcolo della quantità netta associata all'ordine di lavoro radice.
QUANTITÀ ASSORBITE DAL MOTORE: <i>IF(ESNI="ESN00X"; NET QL; 0)</i>	Attribuisce al motore cui è stato associato l'ordine di lavoro le quantità che lo compongono.	Equazione (4.3).
REQUISITI MINIMI DI CONFIGURAZIONE: <i>IF(ESNI="ESN00X"; QD; 0)</i>	Attribuisce al motore cui è stato associato l'ordine di lavoro le quantità consegnate che coincidono con i requisiti minimi di configurazione del motore.	Equazione (4.4).
COSTO DIRETTO ATTRIBUITO AL MOTORE: <i>IF(ESNI="ESN00X"; NET COST; 0)</i>	Attribuisce al motore cui è stato associato l'ordine di lavoro il costo netto in precedenza calcolato.	Equazione (4.2).

A2: istruzioni di calcolo per l'ottenimento del costo diretto delle componenti acquistate

<i>Formula</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Riferimento al modello</i>
ASSORBIMENTO DI MATERIALE: <i>SUMIF('ENG COST'!P/N;P/N;INDEX(QUANTITA' ASSORBITE))</i>	Rispetto alle relazioni (4.17-4.18) in cui si enuncia il principio fondamentale per il passaggio, la formula inserita all'interno dell'applicazione segue un andamento sensibilmente diverso. Facendo riferimento alle quantità calcolate nella sezione dedicata al costo pieno dei motori nella quale sono inserite le informazioni relative alle rispettive BOM, essa individua la reale quantità che deve essere attribuita al motore oggetto di studio.	Equazioni (4.17-4.18).
PURE COST PN: <i>SUMPRODUCT(VETTORE COSTI UNITARI; VETTORE INGRESSI ASSORBITI DAL MOTORE)</i>	Calcola il costo delle quantità in ingresso che vengono assorbite dal motore oggetto di studio. Valorizza le singole quantità associate ai trimestri secondo la logica del modello FIFO.	Equazione (4.22).
COSTO DIRETTO PN: <i>PURE COST*(1+VLOOKUP(DIVISION; FEE%; FALSE))</i>	Maggiora il costo in precedenza calcolato individuando la fee percentuale associata all'impianto di riferimento della stessa parte.	Equazione (4.24).
COSTO UNITARIO PER TRIMESTRE: <i>IFERROR(IF(COST=0;0; COST/QTY);0)</i>	Calcola semplicemente il costo unitario per ogni periodo oggetto di studio. Isola le rettifiche minori di magazzino caratterizzate da quantità in ingresso nulle e costi registrati non nulli. Utile al successivo calcolo del costo delle quantità assorbite in (4.24).	Equazione (4.23).
INGRESSI CUMULATI TRIMESTRE: <i>QTY t+ CUMULATIVE QTY (t-1)</i>	Calcola gli ingressi cumulati delle singole componenti per ogni periodo di osservazione. Utile al modello per il calcolo delle quantità assorbite per trimestre dai motori.	Propedeutico al modello descritto dalle relazioni (4.19-4.21).
ASSORBIMENTO DI MATERIALE PER TRIMESTRE PER MOTORE (FIFO): <i>IF(OR(Q>CUMQTYt; Q=CUMQTYt); QTYt; IF(OR(Q<CUMQTY(t-1); Q<CUMQTY(t-1));0; Q-CUMQTY(t-1)))</i>	Calcola l'assorbimento sul motore oggetto di studio delle quantità in ingresso per ogni singolo trimestre. Segue l'andamento definito dal più generale modello FIFO.	Modello presentato dalle relazioni (4.19-4.21).

A3: istruzioni di calcolo per l'ottenimento dei costi indiretti da allocare sugli item di configurazione

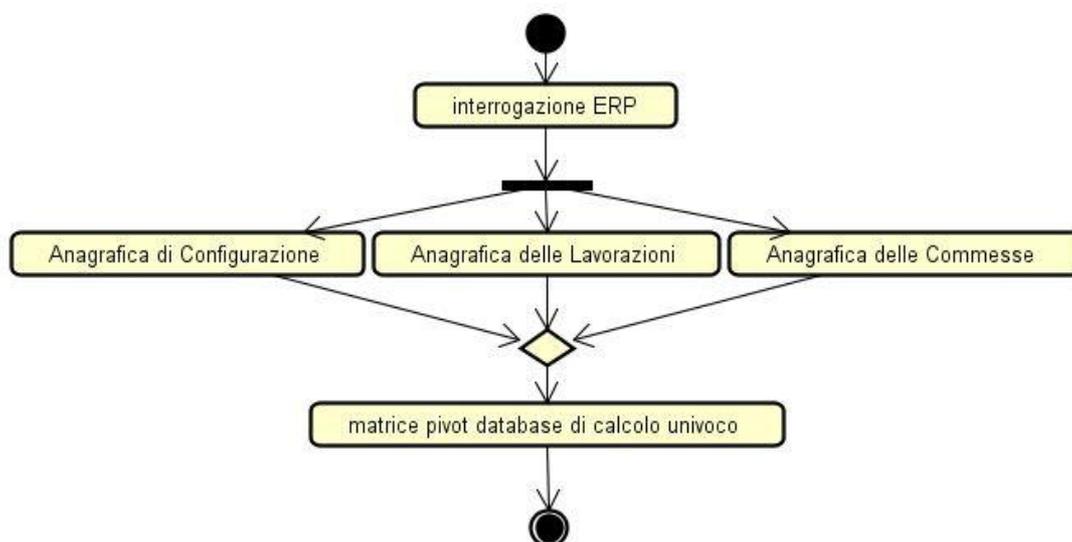
<i>Formula</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Riferimento nel modello</i>
SHIPMENT COST DI TRIMESTRE: <i>IF(VDC="SHIPMENT"; COST/ENGINE; 0)</i>	Alloca sull'item costituente il motore oggetto di studio una quota di costi indiretti legati ai trasporti, sulla base di un principio di distribuzione temporale.	Riferimento equazione (4.26).
OTHER COST DI TRIMESTRE: <i>IF(VDC="OTHER"; COST/ENGINE; 0)</i>	Alloca sull'item costituente il motore oggetto di studio una quota di costi indiretti legati agli overheads produttivi, sulla base di un principio di distribuzione temporale.	Riferimento equazione (4.27).

A4: istruzioni di calcolo per l'ottenimento del costo pieno per ogni item di configurazione

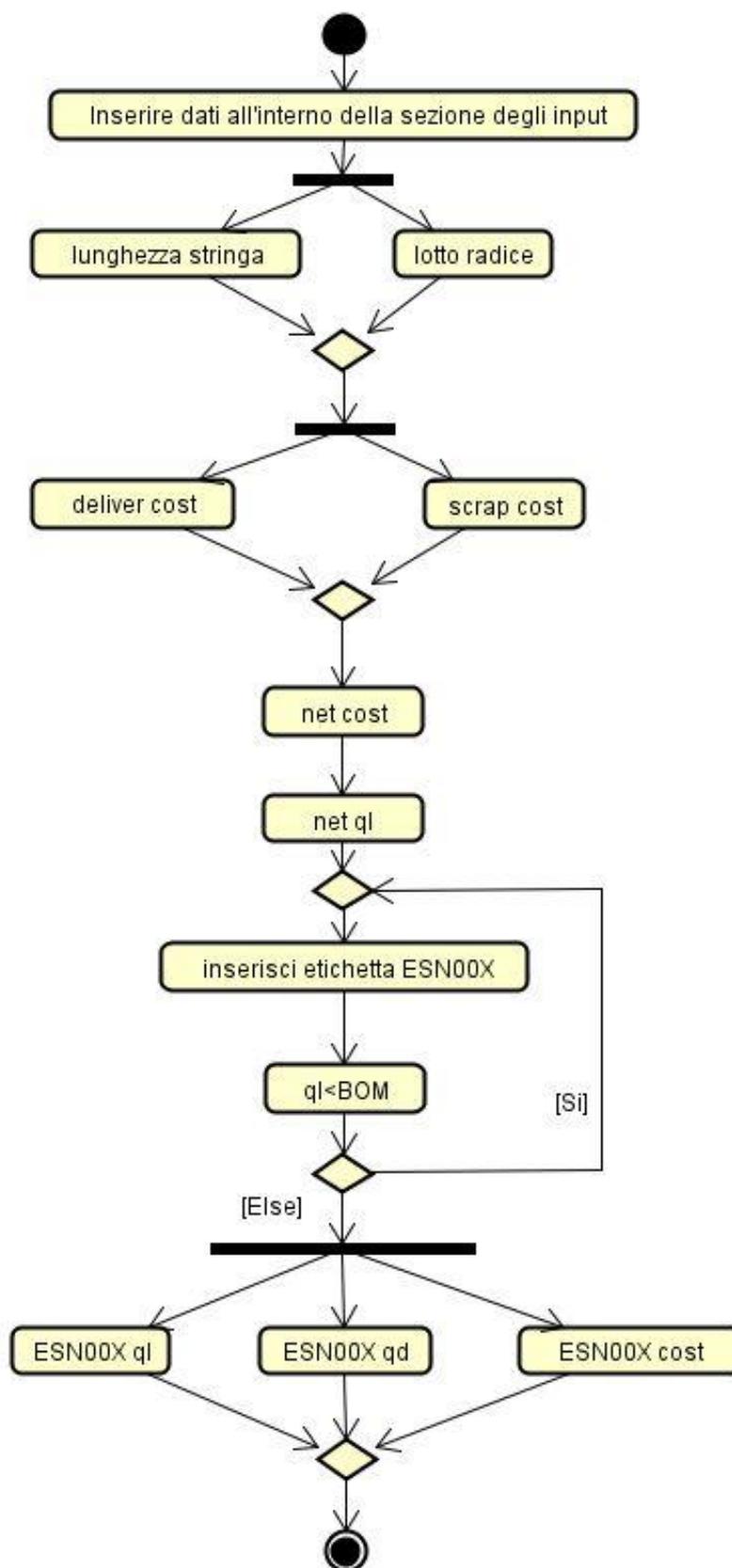
<i>Formula</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Riferimento al modello</i>
<p>QUANTITA' ASSORBITE DAL PN: <i>IFERROR(IF(QTY BOM=0;0;IF(VDC="MACHINIING ";VLOOKUP(PN;'MACHININIG SECTION'!QL;FALSE);IF(SUP PN="";QTY BOM;QTY BOM*VLOOKUP(SUP PN;QTY IN;FALSE)/VLOOKUP(SUP PN;QTY BOM;FALSE)));QTY BOM)</i></p>	<p>Lo scopo è quello di individuare la quantità effettivamente attribuita al PN appartenente alla configurazione, includendo anche eventuali scarti. Se il PN è stato classificato come prodotto di lavorazione, individua le quantità di lancio sul PN dipendenti dalle operazioni di etichettatura manuale. Altrimenti, se non esistono PN di livello superiore, individua la quantità di BOM. Altrimenti moltiplica la quantità in BOM del PN per la quantità lanciata sul componente e divide il tutto per la quantità in BOM del padre.</p>	<p>L'espressione riporta le quantità nette delle lavorazioni, riportate nel paragrafo 4.3.2, se il pezzo è un'assembly lavorata. Altrimenti, riporta l'assorbimento netto mostrato in (4.17).</p>
<p>COSTO DIRETTO PER PN: <i>IF(QTY BOM=0;0;IF(VDC="MACHINING" ;VLOOKUP(PN;'MACHINING SECTION'!COST;FALSE);VLOOKU P(PN;'MATERIAL SECTION'!COST;FALSE))</i></p>	<p>Riporta all'interno della sezione d'interesse, tramite una ricerca verticale sul PN condizionata alla categoria di voce di costo, i valori diretti delle componenti lavorate e acquistate in precedenza calcolate.</p>	<p>Equazioni (4.2, 4.13, 4.14) per i pezzi lavorati; equazione (4.24) per le componenti acquistate e immagazzinate.</p>
<p>COSTO DIRETTO ITEM: - TOTALE - DELLE LAVORAZIONI - DEI MATERIALI</p>	<p>Somma i costi complessivi e i diversi subtotali delle due categorie di voci di costo in uso. In merito a queste ultime, il sistema definisce una somma condizionata (SUMIF) alla categoria di voce di costo di interesse.</p>	<p>Denominatori equazioni (4.30, 4.31).</p>
<p>COSTI INDIRETTI ALLOCATI SULL'ITEM: - SHIPMENT - OTHER</p>	<p>Si riporta sulla stessa sezione le componenti indiretti allocate in precedenza sul motore. Operativamente si può adoperare un vlookup.</p>	<p>Richiamo alle equazioni (4.26-4.28)</p>
<p>COSTO PIENO DEL PN: <i>IF(VDC="MACHINING";DIRECT COST*(1+OTHER/MACHINING TOTAL);DIRECT COST *(1+SHIPMENT/MATERIAL TOTAL))</i></p>	<p>Calcola il costo pieno di ognuna delle componenti presenti all'interno della configurazione del motore, maggiorando il costo diretto in precedenza calcolato con una quota di indiretti ad esso proporzionale.</p>	<p>Equazioni (4.30-4.33) per il calcolo del costo pieno dei PN di configurazione.</p>

Allegati B: digrammi di flusso UML® relativi al processo di calcolo contenuto nell'applicazione

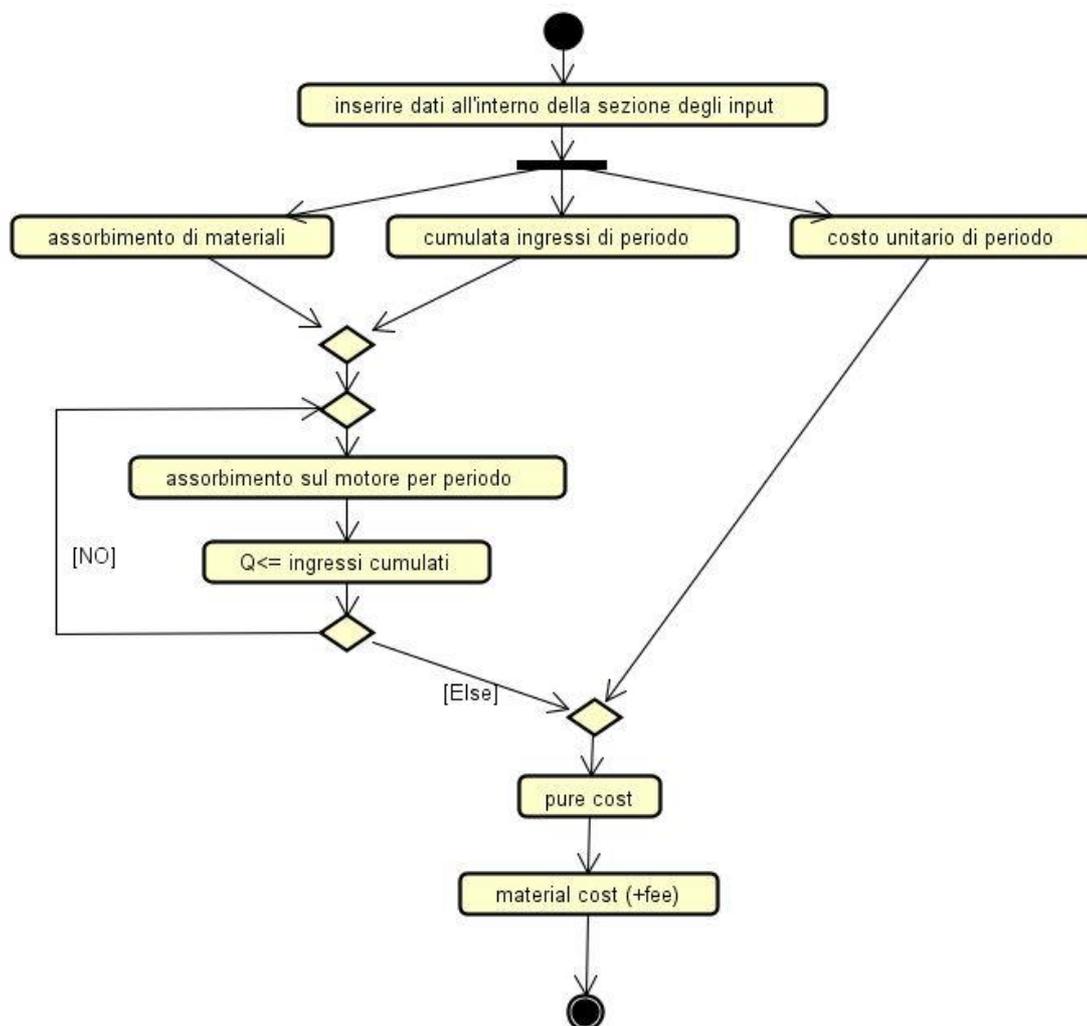
B1: flowchart relativo alla gestione delle Anagrafiche



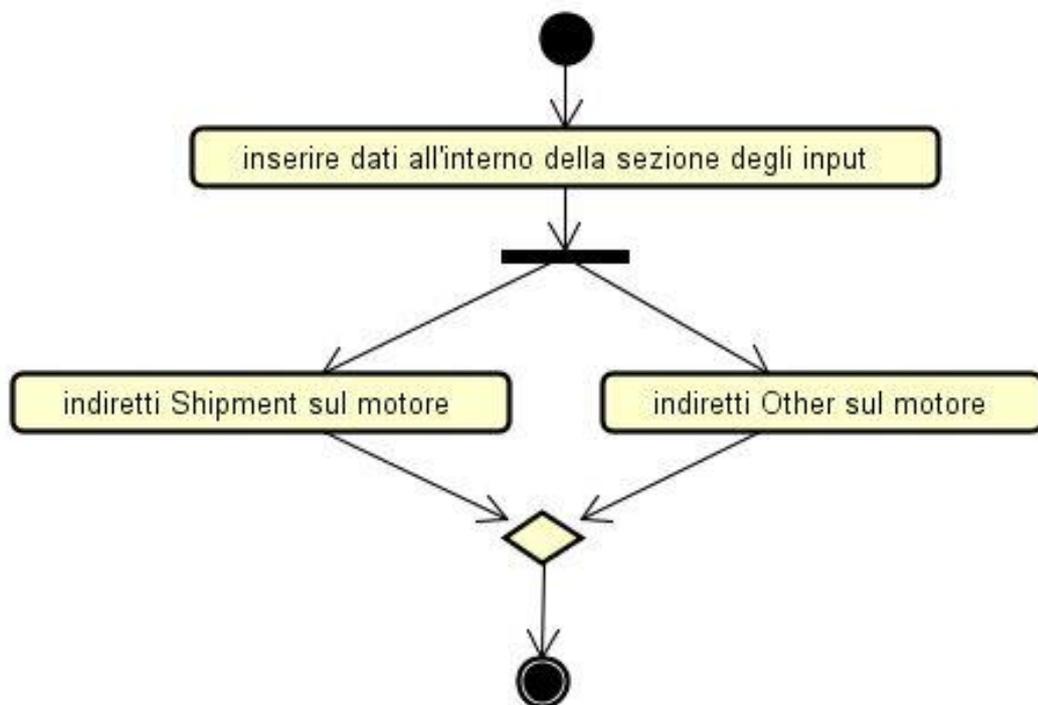
B2: flowchart relativo al calcolo del costo diretto delle componenti lavorate



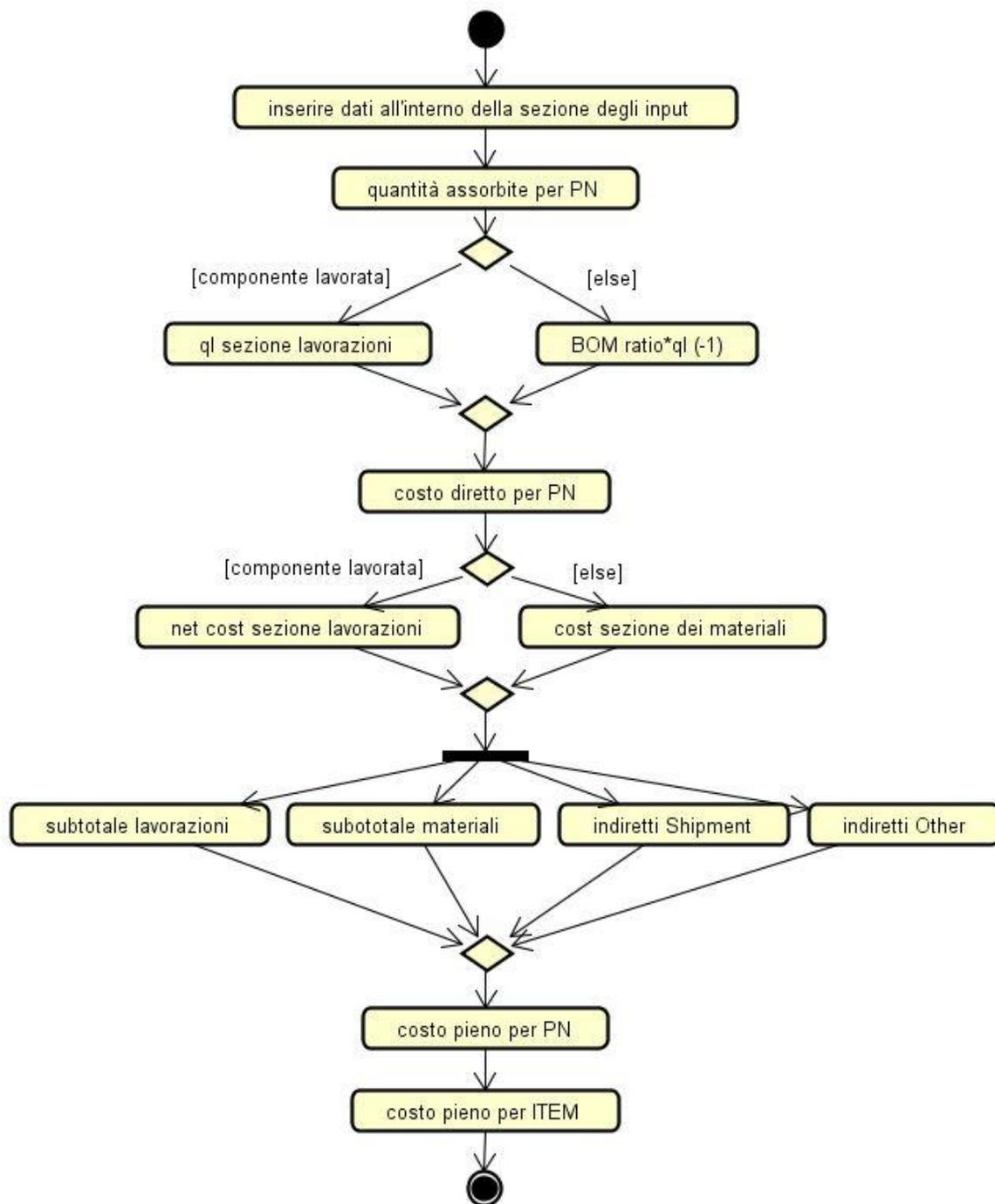
B3: flowchart relativo al calcolo del costo diretto delle componenti acquistate



B4: flowchart relativo al calcolo dei costi indiretti dal allocare



B5: flowchart relativo al calcolo del costo pieno dei motori



Allegati C: layout delle principali sezioni dell'applicazione di calcolo
 C1: layout della sezione relativa al database propedeutico al calcolo

Layout Database .xls

File

filtro 1 (tutti)
 filtro 2 (tutti)
 filtro 3 (tutti)
 filtro 4 (tutti)

Filtri di selezione delle voci di interesse all'interno del database. Utili a isolare gli input necessari ai contributi di cui in 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3.

Informazioni sui lotti di lavorazione derivate dai dati contenuti in Anagrafica delle Lavorazioni (paragrafo 4.2). Destinate al calcolo contenuto in paragrafo 4.3.1.

ITEM	MOD	PN	VdC	WO	Ql	Qd	Completion date	Year 2018											
								Quarter 1		Quarter 2		Quarter 3		Quarter 4		Total Year 2018			
								QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST		
ITEM 1	MOD 1.1	PN 1.1.1	Machining	88000	3	2	21/03/2018	0,00	897,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	897,00 €		
		PN 1.1.2	Material	-	0	0	-	16,00	4.501,00 €	5,00	0,00 €	8,00	653,00 €	17,00	4.992,00 €	46,00	10.146,00 €		
	MOD 1.2	PN 1.2.1	Machining	88001	5	0	17/04/2018	0,00	2.177,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	2.177,00 €		
ITEM 2		PN 1.2.2	Material	-	0	0	-	0,00	4.525,00 €	18,00	4.594,00 €	18,00	0,00 €	0,00	3.709,00 €	36,00	12.828,00 €		
	MOD 2.1	PN 2.1.1	Machining	89000	2	0	02/06/2018	0,00	0,00 €	0,00	4.787,00 €	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	4.787,00 €		
	MOD 2.2	PN 2.2.1	Machining	89010	4	4	27/09/2018	0,00	0,00 €	0,00	0,00 €	0,00	1.951,00 €	0,00	0,00 €	0,00	1.951,00 €		
ITEM 3	MOD 2.3	PN 3.1	Material	-	0	0	-	11,00	0,00 €	14,00	59,00 €	4,00	3.025,00 €	10,00	0,00 €	39,00	3.584,00 €		
		
		
ITEM 4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM 5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM 6	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM 7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM 8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Informazioni sulla valorizzazione delle componenti e delle lavorazioni facenti parte dei work packages progettuali. I dati derivano dall'Anagrafica delle Commesse (paragrafo 4.2). Destinate a paragrafi 4.3.1-4.3.3.

Informazioni sulle diverse componenti e voci di costo derivate dai dati contenuti in Anagrafica delle Configurazioni (paragrafo 4.2). Destinate a paragrafi 4.3.1-4.3.3.

Tab1
Tab2
Tab3
DB

C2: layout della sezione dedicata al calcolo del costo diretto delle lavorazioni

Layout lavorazioni .xls

Colonne A-I comprensive del database informativo delle lavorazioni (paragrafi 4.2, 4.3.1)

ITEM	MOC	PN	VdC	WO	ql	qd	cost	completion	ESN_i	deliver cost	scrap cost	net cost	net ql	ql	ESN_01	cost			
LPT	LPT_01	PN_01	Machining	WO_11	5,00	4,00	5.000,00	12/01/2018	ESN_01	4.000,00	1.000,00	5.000,00	5,00	5,00	4,00	5.000,00			
			Machining	WO_12	10,00	5,00	17.000,00	13/01/2018	ESN_01	8.500,00	0,00	8.500,00	5,00	5,00	5,00	8.500,00			
		PN_02	Machining	SPLIT_112	3,00	2,00	750,00	14/01/2018	ESN_02	3.900,00	1.950,00	5.850,00	3,00	0,00	0,00	0,00			
			Machining	SPLIT_212	1,00	1,00	250,00	15/01/2018	ESN_01	1.950,00	0,00	1.950,00	1,00	1,00	1,00	1.950,00			
		PN_03	LPT_01	Machining	WO_13	1,00	0,00	250,00	16/01/2018	ESN_01	0,00	1.950,00	1.950,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1.950,00	
					ESN_01	1.950,00	1.950,00	1,00	1,00	0,00	1.950,00								
	ESN_02				1.950,00	1.950,00	1,00	1,00	0,00	1.950,00									
	ESN_01				1.950,00	1.950,00	1,00	1,00	0,00	1.950,00									
	LPT	LPT_02	PN_04	Machining						ESN_01									
				Machining						ESN_01									
				Machining						ESN_01									
				Machining						ESN_01									
Machining									ESN_01										
Machining									ESN_01										
Machining									ESN_01										
Machining									ESN_01										
Machining									ESN_01										
Machining									ESN_01										
Machining									ESN_01										

Attribuzione dei componenti di configurazione al seriale (paragrafo 4.3.1)

Colonne K-N: calcolo dei contributi netti (paragrafo 4.3.1, equazioni 4.5-4.15)

Colonne O-Q: quantità e costo dei pezzi di configurazione attribuiti al singolo seriale (vedi paragrafo 4.3.1, equazioni 4.2-4.4)

Tab1 Tab2 Tab3 Lavorazioni

C3: layout della sezione dedicata alla gestione FIFO e al calcolo dei materiali acquistati

Layout gestione FIFO .xls

Colonne A-M comprensive delle informazioni (anno 2018) contenute in database per la gestione FIFO dei materiali acquistati (paragrafi 4.2, 4.3.2)

ITEM	MOD	PN	VdC	DIV	Year 2018				ESN _j									
					QTY	COST	QTY	COST	QTY	COST	Q _{ji}	Cost _{ji}						
					Quarter 1	Quarter 2	Quarter 3	Quarter 4										
LPT	LPT_01	PN_01	Material	Div01	15,00	10.070,00	4,00	3.134,00	0,00	7.639,00	15,00	1.203,00	3,00	1.766,00	...	...	...	...
		PN_02	Material	Div02	8,00	3.675,00	2,00	11.953,00	5,00	14.015,00	11,00	2.235,00	5,00	3.667,00	...	...	...	...
		PN_03	Material	Div01	8,00	3.886,00	5,00	5.321,00	7,00	13.351,00	13,00	4,00	2,00	3.288,00	...	...	...	...
		PN_04	Material	Div01	0,00	11.676,00	12,00	12.156,00	9,00	2.303,00	...	8.823,00	4,00	2.020,00	...	...	...	...
		PN_05	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_06	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_07	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_08	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_09	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_10	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_11	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_12	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_13	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_14	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_15	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_16	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_17	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_18	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_19	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_20	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_21	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_22	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_23	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_24	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_25	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_26	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_27	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_28	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_29	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_30	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
		PN_31	Material	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tab1
Tab2
Tab3
FIFO

Quantità in ingresso per periodo attribuita al motore (paragrafo 4.3.2, equazioni 4.19-4.21)

Assorbimento richiesto sul motore per il componente acquistato (paragrafo 4.3.2, equazione 4.17)

Costo diretto delle componenti acquistate attribuite al motore (paragrafo 4.3.2, equazioni 4.24-4.25)

C4: layout della sezione dedicata al calcolo dei contributi indiretti

Layout indiretti .xls

Colonne A-L comprensive delle informazioni (anno 2018) contenute in database relative ai costi indiretti (paragrafi 4.2, 4.3.3)

ITEM	MOD	PN	VdC	Year 2018																				
				Quarter 1			Quarter 2			Quarter 3			Quarter 4			ESN_j Shipment			ESN_j Other					
				QTY	COST		QTY	COST		QTY	COST		QTY	COST	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4		
ITEM 1	none	none	Shipment	0,00	5.005,00 €		0,00	6.925,00 €		0,00	11.641,00 €		0,00	5.675,00 €	2.502,50 €	3.462,50 €			7.478,50 €	7.811,50 €				
ITEM 1	none	none	Other	0,00	14.957,00 €		0,00	15.623,00 €		0,00	8.871,00 €		0,00	4.236,00 €										
ITEM 2	none	none	Shipment	0,00	4.952,00 €		0,00	8.089,00 €		0,00	9.625,00 €		0,00	12.077,00 €	2.476,00 €	4.044,50 €								
ITEM 2	none	none	Other	0,00	8.009,00 €		0,00	13.988,00 €		0,00	10.177,00 €		0,00	13.121,00 €										
ITEM 3	none	none	Shipment	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM 3	none	none	Other	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM ...	none	none	Shipment	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM ...	none	none	Other	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM ...	none	none	Shipment	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM ...	none	none	Other	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM ...	none	none	Shipment	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM ...	none	none	Other	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM ...	none	none	Shipment	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM ...	none	none	Other	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM ...	none	none	Shipment	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
ITEM ...	none	none	Other	...	...		...	...		...	...		...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Calcolo per periodo di competenza degli overheads di produzione (paragrafo 4.3.3, equazione 4.27)

Calcolo per periodo di competenza del seriale dei costi dei trasporti e interessi doganali (paragrafo 4.3.3, equazione 4.26)

Tab1
Tab2
Tab3
Indiretti

C5: layout della sezione dedicata al calcolo del costo pieno dei motori

Layout Engine Full Cost .xls

File

Colonne A-G comprensive delle informazioni contenute in database per ognuno degli item di configurazione (paragrafi 4.2, 4.3.4)

Costo diretto per il singolo componente di configurazione estratto con funzione vlookup (paragrafi 4.3.1-4.3.2, equazioni 4.2 e 4.25)

Requisito di configurazione del seriale usato per definire le quantità di cui nelle equazioni 4.3 e 4.17

Costo pieno per il singolo componente di configurazione (paragrafo 4.3.4, equazioni 4.30 e 4.32)

Subtotali diretti di lavorazioni e materiali usati per il calcolo del costo pieno dei componenti di configurazione.

Costo pieno per item di configurazione (paragrafo 4.3.4, equazione 4.34)

Costi indiretti estratti con vlookup relativi all'item di configurazione allocati sul seriale (paragrafo 4.3.3, equazioni 4.26 e 4.27)

Costo diretto dell'item di configurazione (equazioni 4.2+4.25)

ITEM	MODULE	PN	LVL	SUP PN	Division	Vdc	ESN i		ESN i+1		
							BOM	Direct Cost	Full Cost	BOM	Direct Cost	Full Cost
LPT	LPT_1	PN_11	1	-	Div01	Machining	1	5.000,00 €	6.000,00 €	...	
		PN_21	2	PN_11	Div01	Material	2	1.500,00 €	1.800,00 €	...	
		PN_31	2	PN_21	Div01	Material	2	1.000,00 €	1.200,00 €	...	
		PN_41	2	PN_31	Div01	Material	6	550,00 €	660,00 €	...	
		PN_12	1	-	Div02	Machining	1	2.450,00 €	2.940,00 €	...	
		PN_22	2	PN_12	Div02	Material	1	1.270,00 €	1.524,00 €	...	
	LPT_2	PN_32	2	PN_12	Div02	Machining	1	3.600,00 €	4.320,00 €	...	
		PN_42	3	PN_32	Div02	Material	2	780,00 €	936,00 €	...	
		PN_52	3	PN_42	Div02	Material	2	457,00 €	548,40 €	...	
	LPT_3	PN_13	1	-	Div01	Machining	1	7.000,00 €	8.400,00 €	...	
		Totale						23.607,00 €	28.328,40 €	...	
	di cui materiali								5.557,00 €	...	
	di cui lavorazioni								18.050,00 €	...	
Indiretti sui Materiali								5.000,00 €	...		
Indiretti sulle Lavorazioni								18.000,00 €	...		
Blades	Blades_1	PN_11	1	-	Div01	Machining	1	...	...	...
		PN_21	2	PN_11	Div01	Material	2	...	...	...
		PN_31	2	PN_21	Div01	Material	2	...	...	...
		PN_41	2	PN_31	Div01	Material	2	...	...	...
		PN_12	1	-	Div02	Machining	1	...	...	...
		PN_22	2	PN_12	Div02	Material	2	...	...	...
	Blades_2	PN_32	2	PN_12	Div02	Machining	1	...	...	...
		PN_42	3	PN_32	Div02	Material	2	...	...	...
		PN_52	3	PN_42	Div02	Material	2	...	...	...
	Blades_3	PN_13	1	-	Div01	Machining	1	...	...	...
		Totale						...	...	...

Tab1 Tab2 Tab3 Full Cost

Riferimenti bibliografici e sitografici

- [1]. AeroDynamic Advisory, The Global Aerospace Industry – Size & Country Rankings, 2018 [online]. Disponibile:
https://aerodynamicadvisory.com/wp-content/uploads/2018/07/AeroDynamic-Teal_Global-Aerospace-Industry_16July2018.pdf
- [2]. Luna, J., Addepalli, S., Salonitis, K., & Makatsoris, H. (2018). Assessment of an emerging aerospace manufacturing cluster and its dependence on the mature global clusters. *Procedia Manufacturing*, 19, 26-33
- [3]. Rose-Anderssen, C., Baldwin, J., Ridgway, K., Allen, P., Varga, L., & Strathern, M. (2009). A cladistic classification of commercial aerospace supply chain evolution. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(2), 235-257.
- [4]. Ito, H., & Lee, D. (2005). Assessing the impact of the September 11 terrorist attacks on US airline demand. *Journal of Economics and Business*, 57(1), 75-95.
- [5]. Koster, J. N., Uhmeyer, K. L., & Soin, G. S. (2013, June). Designing a Blended Wing Body Aircraft Globally. In *Proceedings of the 9th CDIO Conference*, MIT and Harvard University School of Engineering and Applied Sciences, Cambridge, USA.
- [6]. TresVista Financial Services, Aerospace - Supply Chain Overview [online]. Disponibile:
https://www.tresvista.com/wp-content/samples/landscaping/Research%20Report_Aerospace%20-%20Supply%20Chain%20Overview.pdf
- [7]. Glenn Research Center, Turbofan Engine [online].
Disponibile: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/aturbf.html>
- [8]. Farokhi, S. (2014). *Aircraft propulsion*. John Wiley & Sons.
- [9]. Walsh, P. P., & Fletcher, P. (2004). *Gas turbine performance*. John Wiley & Sons.
- [10]. Dankanich, A., & Peters, D. (2017). Turbofan Engine Bypass Ratio as a Function of Thrust and Fuel Flow.
- [11]. Kroeger, J. (2016). Large and Small Turbofans. *Mechanical Engineering Magazine Select Articles*, 138(09), 80-82.
- [12]. AHMAD, A., AL-AHMARI, A. M., ASLAM, M. U., ABIDI, M. H., & DARMOUL, S. (2015). Virtual assembly of an airplane turbine engine. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 48(3), 1726-1731.
- [13]. McCusker, J. R., & Danai, K. (2010, January). Selection of Outputs for Gas-Turbine Engines by Parameter Signatures. In *ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference* (pp. 239-246). American Society of Mechanical Engineers.
- [14]. Xu, Y., Malisetty, M. K., & Round, M. (2013). Configuration management in aerospace industry. *Procedia CIRP*, 11, 183-186.
- [15]. Mattingly, J. D., Heiser, W. H., & Pratt, D. T. (2002). *Aircraft engine design*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [16]. Walsh, P. P., & Fletcher, P. (2004). *Gas turbine performance*. John Wiley & Sons.

- [17]. Johansson, C., Parida, V., & Larsson, A. (2009). How are knowledge and information evaluated?: decision making in stage-gate processes. In International Conference on Engineering Design (Vol. 17, pp. 195-206).
- [18]. Niazi, A., Dai, J. S., Balabani, S., & Seneviratne, L. (2006). Product cost estimation: Technique classification and methodology review. *Journal of manufacturing science and engineering*, 128(2), 563-575.
- [19]. Zhao, X., Verhagen, W. J., & Curran, R. (2015). Estimation of aircraft component production cost using knowledge based engineering techniques. *Advanced Engineering Informatics*, 29(3), 616-632.
- [20]. Hueber, C., Horejsi, K., & Schledjewski, R. (2016). Review of cost estimation: methods and models for aerospace composite manufacturing. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2(1), 1-13.
- [21]. Cantamessa, M., & Montagna, F. (2016). *Management of innovation and product development*. London: Springer
- [22]. Sakal, M., Rakovic, L., & Vukovic, V (2016). END USER SOFTWARE ENGINEERING.
- [23]. Burnett, M. (2009, March). What is end-user software engineering and why does it matter?. In International Symposium on End User Development (pp. 15-28). Springer, Berlin, Heidelberg
- [24]. Obrenović, Ž., & Gašević, D. (2008). End-user service computing: Spreadsheets as a service composition tool. *IEEE Transactions on Services Computing*, 1(4), 229-242.
- [25]. Jansen, B., & Hermans, F. (2014). Using a visual language to create better spreadsheets. *Software Engineering Methods in Spreadsheets*.
- [26]. Roy, S., & Hermans, F. (2014). Dependence tracing techniques for spreadsheets: an investigation. *Software Engineering Methods in Spreadsheets*, 1-4.
- [27]. Panko, R. R. (2014). Are We Overconfident in Our Understanding of Overconfidence?. *Software Engineering Methods in Spreadsheets*.
- [28]. Powell, S. G., Baker, K. R., & Lawson, B. (2008). A critical review of the literature on spreadsheet errors. *Decision Support Systems*, 46(1), 128-138
- [29]. Jannach, D., & Schmitz, T. (2014). Toward interactive spreadsheet debugging. *Software Engineering Methods in Spreadsheets*.
- [30]. Cantamessa, M., Cobos, E., & Rafele, C. (2007). *Il project management*. Isedi Editore, Torino.
- [31]. Griffiths, M. (2007). Developments in agile project management. In *PMI Global Congress Proceedings*.
- [32]. Corbucci, D. (2015). *Agile Project Management. Overview delle principali metodologie Agile quali Scrum, XP, DSDM, Lean Software Development e guida all'esame di certificazione PMI-ACP®: Overview delle principali metodologie Agile quali Scrum, XP, DSDM, Lean Software Development e guida all'esame di certificazione PMI-ACP®*. FrancoAngeli
- [33]. Muiño, A., & Akselrad, F. (2009). Gates to success, ensuring the quality of the planning. Project Management Institute.