



Unione Europea



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*



Università degli Studi di Salerno

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica
IX Ciclo N.S. (2007-2010)

***“Sviluppo e analisi di una metodologia di miglioramento
della qualità nella progettazione”***

Ing. Renzo Cau

Tutor:
Prof. Roberto Palmieri

Coordinatore:
Prof. Vincenzo Sergi

Alla mia famiglia

RINGRAZIAMENTI

Voglio esprimere la mia sincera gratitudine al Prof. Roberto Palmieri per avermi dato l'opportunità di unirmi al Suo gruppo di lavoro e per essere stato una guida e presenza nella mia esperienza di Dottorato.

Si ringraziano tutte le aziende locali conosciute durante il periodo di questo Dottorato, che hanno consentito di avere a disposizione dati ed esperienze utilizzate per l'elaborazione di questa tesi.

Non posso dimenticare Prof. Vincenzo Sergi, Rosario e Luca per i loro utili consigli ed Elena Caracciolo, Luigi Celentano e Stefania per la loro gentilezza.

Infine, voglio ringraziare la mia famiglia per il loro supporto e la loro pazienza.

INDICE

RINGRAZIAMENTI	I
INDICE	II
ELENCO DELLE FIGURE	V
ELENCO DELLE TABELLE	VIII
NOMENCLATURA	X
INTRODUZIONE	1
1. QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT	6
1.1. DESCRIZIONE	6
1.1.1. ORIGINI DEL QFD	6
1.1.2. IL MIGLIORAMENTO NELLO SVILUPPO DEI PRODOTTI	8
1.1.3. IL MECCANISMO DI TRASFERIMENTO DELLE INFORMAZIONI TRA AZIENDA E CLIENTE	10
1.1.4. IL PROCESSO COMPLETO DEL QFD	25
1.1.5. LA MATRICE DELLE MATRICI	46
1.1.6. IL PROCESSO SEMPLIFICATO DEL QFD	50
1.1.7. LE APPLICAZIONI DEL QFD	54
1.2. IL CASO DEI CUSCINETTI VOLVENTI	57
1.2.1. LAVORARE CON I CLIENTI	57
1.2.2. IL PRODOTTO E LE SUE CARATTERISTICHE	59
1.2.3. PASSI DELLA METODOLOGIA	60
1.2.4. UN METODO DI SUPPORTO ALLA GENERAZIONE DELLA TABELLA DI CORRELAZIONE	64
2. METODOLOGIA DI TAGUCHI	81
2.1. DESCRIZIONE	81
2.1.1. INTRODUZIONE	81
2.1.2. METODI DI TAGUCHI E LORO DIFFUSIONE	83
2.2. IL MODELLO TRADIZIONALE ED IL MODELLO DI TAGUCHI	83
2.3. STRUMENTI	97
2.4. BILANCIO TRA COSTO E QUALITÀ	103
2.5. LA SPERIMENTAZIONE E LA PROGETTAZIONE	105
2.6. OBIETTIVI DELLA SPERIMENTAZIONE	107

2.7.	EXPERIMENTAL DESIGN	112
2.7.1.	EFFETTI ED INTERAZIONI.....	112
2.8.	ESPANSIONE MEDIANTE POLINOMI ORTOGONALI	115
2.9.	PROGETTAZIONE DEGLI ESPERIMENTI (<i>DESIGN OF</i> <i>EXPERIMENTS</i>).....	117
2.9.1.	PROGRAMMA DI DESIGN OF EXPERIMENTS	117
2.9.2.	PIANI PARAMETRICI	124
2.9.3.	PIANO FATTORIALE COMPLETO.....	126
2.9.4.	FATTORIALE FRAZIONARIO (FRACTIONAL FACTORIAL)	129
2.9.5.	SUPERFICIE DI RISPOSTA (RESPONSE SURFACE).....	131
2.9.6.	GROUP SCREENING DESIGN	132
2.9.7.	CENTRAL COMPOSITE DESIGN	133
2.10.	IL ROBUST DESIGN	134
2.10.1.	PROGRAMMA DI ROBUST DESIGN	139
2.11.	L'ANALISI STATISTICA DEI DATI	139
2.11.1.	ANOVA (ANALYSIS OF VARIANCE)	140
2.11.2.	L'ANALISI DEI RESIDUI.....	145
2.12.	CASO DI APPLICAZIONE.....	146
2.12.1.	DESCRIZIONE DEL PRODOTTO.....	146
2.12.2.	PROCESSO DI LAVORAZIONE.....	147
2.12.3.	DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI RETTIFICA	150
2.12.4.	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA TAGUCHI APPLICATA	151
2.12.5.	DEDUZIONI SULL'APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DI TAGUCHI.....	180
3.	SICUREZZA E AFFIDABILITA' INDUSTRIALI	181
3.1.	DESCRIZIONE.....	181
3.2.	METODOLOGIE E TECNICHE DI ANALISI.....	193
3.2.1	LA F.M.E.A.	195
3.2.2	LA FMECA.....	205
3.2.3	LA F.T.A.....	206
3.2.4	ALCUNI METODI PER LA RISOLUZIONE DEL FAULT TREE ..	213
3.2.5	LA WORST CASE ANALYSIS (W.C.A.).....	216
3.2.6	LA TECNICA DELPHI.....	224
3.2.7	LA CHANGE ANALYSIS	227
3.2.8	IL M.O.R.T.	232
3.3.	ANALISI DEI MODI E DEGLI EFFETTI DI GUASTO.....	237
3.3.1.	CENNI STORICI.....	237
3.3.2.	GENERALITÀ	237
3.3.3.	UTILIZZAZIONE DEI SCOPI DELLA FMEA.....	239
3.3.4.	LIMITI DI INCONVENIENTI DELLA FMEA	241
3.3.5.	PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA FMEA.....	242

3.4.	IL PROCESSO PRODUTTIVO E I PRODOTTI DELLA SINTERIZZAZIONE	242
3.4.1	METALLURGIA DELLE POLVERI.....	242
3.4.2	DESCRIZIONE DEL PROCESSO PRODUTTIVO	243
3.4.3	APPLICAZIONE DELLA FMEA AL CASO DEI PRODOTTI SINTERIZZATI.....	247
3.5.	RISULTATI DELLA FMEA	260
3.5.1.	OBIETTIVI.....	260
3.5.2.	MODIFICHE PROGETTUALI	260
3.5.3.	PROVVEDIMENTI MANUTENTIVI	263
4.	IL TOTAL QUALITY PROJECT.....	275
4.1.	MOTIVAZIONI	275
4.2.	DESCRIZIONE.....	276
5.2.1	IL RUOLO DEL TQP.....	277
4.3.	LE FASI DELLA PROGETTAZIONE.....	281
4.4.	LA STRUTTURA DI SUPPORTO DEL TQP	282
4.5.	L'ORGANIZZAZIONE	285
4.5.1.	LA STRUTTURA ORGANIZZATIVA	285
4.5.2.	SVILUPPO DEI NUOVI PRODOTTI.....	290
4.5.3.	RUOLI NEL GRUPPO INTERFUNZIONALE	292
4.5.4.	IL COINVOLGIMENTO DEL MANAGEMENT	294
4.5.5.	LA FORMAZIONE	296
4.5.6.	IL SISTEMA DEI RICONOSCIMENTI	296
4.6.	LA GESTIONE	297
4.6.1.	LA SOVRAPPOSIZIONE DELLE FASI.....	297
4.6.2.	LA REVISIONE DEL PROGETTO	303
4.7.	L'AMBIENTE DI LAVORO E GLI STRUMENTI.....	310
4.7.1.	LA PATRIMONIALIZZAZIONE DELLE CONOSCENZE	310
4.7.2.	L'UBICAZIONE FISICA DEL TEAM DI PROGETTO	311
4.7.3.	IL RUOLO DEGLI STRUMENTI INFORMATICI.....	314
4.8.	ALCUNE TRAPPOLE DA EVITARE	317
5.	CONCLUSIONI	321
	BIBLIOGRAFIA	329

ELENCO DELLE FIGURE

- Figura 1** Fasi del ciclo di vita del prodotto
- Figura 2** Flusso tipico delle attività associate al ciclo di vita di un prodotto
- Figura 3** Esigenze del cliente interno ed esterno
- Figura 4** Diagramma dei costi progettazione, pre-produzione e produzione
- Figura 5** Esigenze del cliente riportate in ognuno dei settori funzionali aziendali
- Figura 6** Responsabilità aziendali e livello di competitività dell'azienda
- Figura 7** GAP aziendali a vari livelli
- Figura 8** Processo di sviluppo per la definizione delle specifiche iniziali
- Figura 9** Andamento lineare della qualità unidimensionale
- Figura 10** Andamento della qualità attesa
- Figura 11** Andamento della qualità eccitante
- Figura 12** Tabella della voce cliente
- Figura 13** Processo di sviluppo per la definizione delle esigenze del cliente
- Figura 14** Processo di sviluppo per la definizione delle caratteristiche di qualità
- Figura 15** Diagramma causa-effetto per definire la voce del cliente
- Figura 16** Costruzione della matrice A1
- Figura 17** Processo di sviluppo per la definizione delle caratteristiche di qualità
- Figura 18** Confronto tra caratteristiche di qualità-funzioni del prodotto
- Figura 19** Processo di sviluppo per la definizione delle funzioni del prodotto
- Figura 20** Costruzione matrice A2
- Figura 21** Relazioni tra le caratteristiche di qualità
- Figura 22** Relazioni tra le caratteristiche di qualità della matrice A1
- Figura 23** Relazione esigenze del cliente-funzioni del prodotto
- Figura 24** Matrice B1
- Figura 25** Relazione esigenze cliente-idee innovative
- Figura 26** Processo di sviluppo per la definizione delle idee innovative
- Figura 27** Matrice E1
- Figura 28** Relazione funzioni del prodotto-idee innovative
- Figura 29** Matrice E2
- Figura 30** Relazione caratteristiche qualità-idee innovative
- Figura 31** Matrice E3
- Figura 32** Matrici D1, D2, D3
- Figura 33** Processo di sviluppo per la definizione dei possibili problemi del prodotto
- Figura 34** Relazione esigenze del cliente-possibili problemi del prodotto
- Figura 35** Ulteriori relazioni caratteristiche qualità-possibili problemi del prodotto

- Figura 36** Confronto parti critiche del prodotto e caratteristiche di qualità
Figura 37 Relazione parti critiche del prodotto-azioni preventive
Figura 38 Matrice delle Matrici
Figura 39 Matrice detta casa della qualità
Figura 40 Costruzione in cascata della matrice della casa della qualità
Figura 41 Relazioni attività industriali-voci del cliente
Figura 42 Diagramma della voce del cliente
Figura 43 Elenco e valutazione dei fabbisogni del cliente
Figura 44 Diagramma della voce del cliente
Figura 45 Correlazioni ulteriori tra caratteristiche di qualità
Figura 46 Casa della qualità
Figura 47 Matrice N
Figura 48 Diagramma dei costi della non-qualità
Figura 49 Distribuzione dei valori reali delle grandezze prestazionali e campo di tolleranza
Figura 50 Funzione perdita
Figura 51 Valore target
Figura 52 Caratteristica obiettivo
Figura 53 Schema per il prodotto tra le matrici CFA e NFA
Figura 54 Processo di determinazione e di analisi dei risultati sperimentali
Figura 55 Punti sperimentali
Figura 56 Interazione tra due fattori
Figura 57 La doppia ottimizzazione del “robust design”
Figura 58 Punti sperimentali
Figura 59 Confronto tra le condizioni di progetto (full factorial k=4)
Figura 60 Confronto tra le condizioni di progetto (one half fractional k=4)
Figura 61 Modello del risk management
Figura 62 La correlazione tra fattore umano e la progettazione
Figura 63 Schema della FMEA
Figura 64 La Matrice di rischio
Figura 65 Scala di valutazione della probabilità e della gravità nella F.M.E.C.A.
Figura 66 Semplice sistema elettrico
Figura 67 Albero di guasto per il sistema di figura 66
Figura 68 I sei passaggi della Change Analysis
Figura 69 I fattori S
Figura 70 I fattori M
Figura 71 1° Schema a blocco funzionale
Figura 72 2° Schema a blocco funzionale
Figura 73 3° Schema a blocco funzionale
Figura 74 Strumenti di analisi del TQP
Figura 75 Schema tradizionale
Figura 76 Schema d’approccio secondo la TQP
Figura 77 Strumenti del TQP
Figura 78 Schema d’approccio tradizionale

- Figura 79 Schema d'approccio innovativo con team leader gerarchico**
- Figura 80 Schema d'approccio TQP con il Tiger Team**
- Figura 81 Ottimizzazione globale a livello di specializzazione**
- Figura 82 Sviluppo di un prodotto**
- Figura 83 Schema d'approccio sequenziale per sviluppo nuovi prodotti**
- Figura 84 Sviluppo del prodotto con approccio TQP**
- Figura 85 Processo per fasi sequenziali**
- Figura 86 Altro processo per fasi sequenziali**
- Figura 87 Livello di controllo**
- Figura 88 Lista generale dei punti da verificare**
- Figura 89 Fasi dello sviluppo di un prodotto**
- Figura 90 Fasi dello sviluppo di un prodotto e documenti ad essa relativi**
- Figura 91 Altro schema per le fasi di sviluppo del prodotto**
- Figura 92 Lay-out e struttura organizzativa**
- Figura 93 Lay-out e struttura organizzativa di provenienza giapponese**
- Figura 94 Schema funzionale del TQP**
- Figura 95 Fasi di progettazione e strumenti correlati (riesame del progetto)**
- Figura 96 Fasi di progettazione e strumenti correlati (tecniche FMEA e FMECA)**
- Figura 97 Fasi di progettazione e strumenti correlati (FTA)**

ELENCO DELLE TABELLE

- Tabella 1 Matrice ortogonale del tipo $L_8(2^7)$
Tabella 2 Schema per i livelli dei fattori di errore
Tabella 3 Tabella per il calcolo degli effetti tra due fattori a due livelli
Tabella 4 Errore nello sviluppo di Taylor
Tabella 5 Polinomi ortogonali
Tabella 6 Piano sperimentale di un piano parametrico
Tabella 7 Piano sperimentale di quattro fattori a due livelli cambiando un fattore alla volta
Tabella 8 Piano sperimentale con variazione di tutti i fattori
Tabella 9 Matrice sperimentale di un piano fattoriale completo per 4 fattori a due livelli
Tabella 10 Porzione 2^{4-1} del fattoriale completo 2^4
Tabella 11 Fattoriale frazionario per 4 fattori e risoluzione 4
Tabella 12 Effetti generati da due fattori a tre livelli
Tabella 13 Fattori e definizione dei loro livelli
Tabella 14 Piano sperimentale $L_{32}(2^4)$
Tabella 15 Definizione dei fattori e dei loro livelli
Tabella 16-Estimated Effects for Risposta
Tabella 17 ANOVA
Tabella 18 Regression coefficients for Risposta
Tabella 19 Fitted and observed value
Tabella 20 Estimated effects for Risposta
Tabella 21 ANOVA
Tabella 22 Confronto tra le soluzioni
Tabella 23-Piano sperimentale $L_{16}(2^4-1)$
Tabella 24 Definizione dei fattori e dei loro livelli
Tabella 25 Estimated effects for Risposta
Tabella 26 ANOVA
Tabella 27 Regression coefficients for Risposta
Tabella 28 Fitted and observed value
Tabella 29 Confronto tra le soluzioni
Tabella 30 Piano sperimentale $L_{32}(2^5)$

- Tabella 31** Definizione dei fattori e dei loro livelli
- Tabella 32** Estimated effects for Risposta
- Tabella 33** ANOVA
- Tabella 34** Regression coefficients for Risposta
- Tabella 35** Fitted and observed value
- Tabella 36** Caratteristiche potenziali dell'utente
- Tabella 37** Rischi ed errori dovuti all'uomo
- Tabella 38** Esempio di task analysis - carenze progettuali correlate all'errore umano
- Tabella 39** Metodologie, tecniche e situazioni
- Tabella 40** Valutazione dell'impegno
- Tabella 41** Valutazione della frequenza di accadimento
- Tabella 42** Valutazione della gravità delle conseguenze di un guasto
- Tabella 43** Valutazione della rilevabilità del guasto
- Tabella 44** Corrispondenza livello di gravità e livello IPR
- Tabella 45** Scale di probabilità e gravità a sei valori
- Tabella 46** I simboli della F.T.A.
- Tabella 47** Regole dell'algebra booleana
- Tabella 48** Matrice FUNZIONI-FATTORI
- Tabella 49** Tabella delle dispersioni industriali
- Tabella 50** Valori di soglia assoluti di worst case a partire dai valori nominali
- Tabella 51** I simboli del Worst Case e Analysis
- Tabella 52** Foglio di lavoro per l'analisi degli incidenti con la *Change Analysis*
- Tabella 53** I simboli del M.O.R.T.

NOMENCLATURA

Quality Function Deployment (Q.F.D.)
Metodi di Taguchi (o *Robust design*)
Robust Design (RD)
Design Of Experiment (D.O.E.)
Analisi della Varianza (ANOVA)
Failures Modes and Effects Analysis (F.M.E.A.)
Failures Modes and Effects Criticality Analysis (F.M.E.C.A.)
Analisi del valore (VA)
Process Decision Program Chart (PDPC)
Quality Assurance (QA)
Quality Control (QC)
Worst Case Analysis (W.C.A.)
Management Oversight and Risk tree (M.O.R.T.)
Total Quality Management (TQM)
Total Quality Project (TQP)
Fault Tree Analysis (F.T.A.)

INTRODUZIONE

Coerentemente con i contenuti relativi alle fasi della vita di un prodotto, le più diffuse definizioni della qualità fanno riferimento sia alle caratteristiche di quest'ultimo, sia alle attività industriali e umane sviluppate per produrlo e utilizzarlo. Da queste definizioni è possibile intuire l'esistenza di una qualità "intrinseca" del prodotto che dipende da come è stato concepito e di una qualità "conseguita" o "realizzata" che dipende da come sono state svolte le attività successive alla progettazione. Il livello massimo di qualità del prodotto è quindi determinato nelle prime due fasi del suo ciclo di vita, quando si identificano le caratteristiche che deve possedere e le si progettano. Nelle rimanenti fasi tutti gli sforzi possono unicamente essere rivolti al mantenimento del livello di qualità intrinseca, non certo a migliorarlo. Chi progetta, inoltre, può rendere più o meno difficile la vita di chi deve successivamente realizzare od utilizzare l'oggetto a seconda delle scelte che fa.

La domanda che ci si pone è "come fare a tener conto, in fase di progetto, di tutte le esigenze collegate al ciclo di vita del prodotto?"

Una risposta a questo interrogativo viene dalle metodologie di "progettazione orientata" (*Design for...*) sviluppate negli ultimi decenni.

Queste metodologie contengono regole di progettazione che altro non sono che i requisiti espressi dal cliente-produzione, dal cliente-assistenza tecnica, dal cliente approvvigionamenti e dal cliente-utente finale.

Di particolare interesse risultano le applicazioni e le metodologie sviluppate al fine di migliorare la qualità nella progettazione. Ci si riferisce, in particolare a:

- Quality Function Deployment (Q.F.D.)
- Metodi di Taguchi (o *Robust design*)
- Design Of Experiment (D.O.E.)
- Failures Mode and Effect Analysis (F.M.E.A.)

Il ciclo di vita di un prodotto è caratterizzato da diverse fasi, sintetizzate nella figura 1:

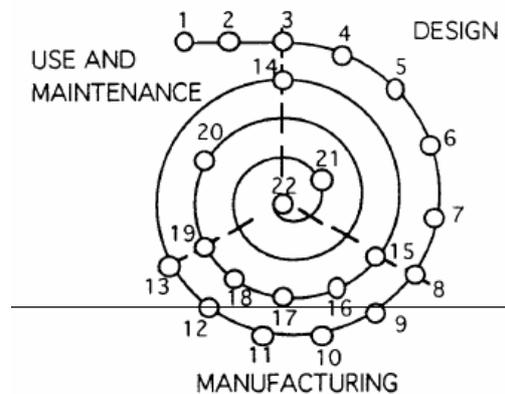


Figura 1 Fasi del ciclo di vita del prodotto

1-2 Analisi dei fabbisogni; 2-3 Studio di fattibilità; 3-4- Specifiche del prodotto; 4-5- Design concettuale; 5-6 Design preliminare; 6-7 Design dettagliato; 7-8 Sviluppo statico della produzione; 8-9 Test statici; 10-11 Pianificazione della produzione; 11-12 Progettazione della produzione pre-serie; 12-13 Produzione pre-serie; 13-14 Test dinamici; 14-15 Riprogettazione del prodotto; 15-16 Organizzazione della produzione in serie; 16-17 Sviluppo della produzione in serie; 17-18 Sviluppo delle attrezzature per la produzione in serie; 18-19 Produzione in serie; 19-20 Distribuzione del prodotto; 20-21 Manutenzione del prodotto; 21-22 Eliminazione del prodotto.

Il livello massimo di qualità del prodotto è determinato nelle prime due fasi del suo ciclo di vita, quando si identificano le caratteristiche che deve possedere e le si progettano [1].

Nelle rimanenti fasi tutti gli sforzi possono unicamente essere rivolti al mantenimento del livello di qualità intrinseca, non certo a migliorarlo.

Chi progetta, inoltre, può rendere più o meno difficile la vita di chi deve successivamente realizzare od utilizzare l'oggetto a seconda delle scelte che fa. Quanto affermato può essere verificato osservando il flusso tipico delle attività associate al ciclo di vita di un prodotto (figura 2) [2].

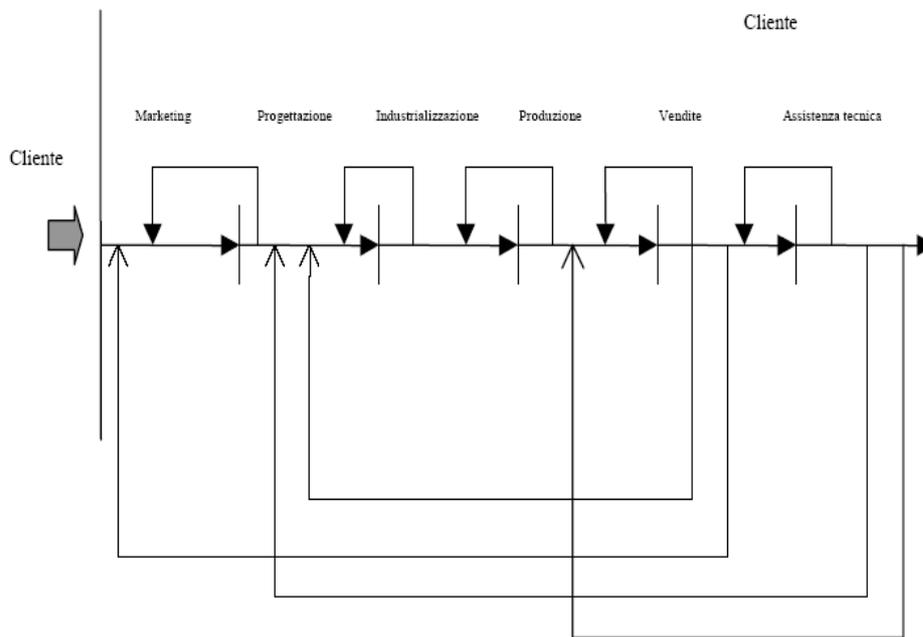


Figura 2 Flusso tipico delle attività associate al ciclo di vita di un prodotto

In linea del tutto teorica il prodotto dovrebbe passare da una fase alla successiva senza ritorni a fasi precedenti. In realtà, ad ogni fase scaturiscono richieste di modifiche, poiché il prodotto non si adatta completamente alle esigenze della funzione che lo prende in carico (cliente interno). Ciò normalmente avviene perché durante la sua progettazione non si è tenuto sufficientemente conto di queste esigenze. In altre parole il progettista normalmente non tiene conto delle esigenze del cliente interno ed esterno (Figura 3).

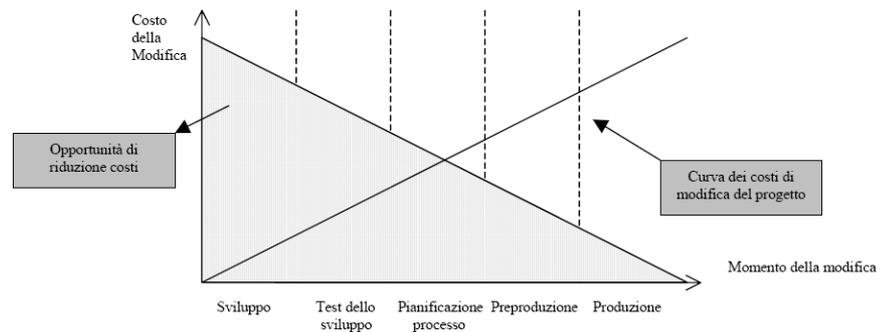


Figura 3 Esigenze del cliente interno ed esterno

A questi problemi si aggiungono quelli relativi ai costi delle modifiche apportati al progetto nelle varie fasi del ciclo di vita del prodotto [3]. Infatti come è possibile evincere dalle figura seguente, le modifiche apportate al prodotto in fase di progettazione nell'approccio tradizionale sono quelle più economiche dal momento che non comportano grandi cambiamenti organizzativi nella produzione o nei macchinari. Più costosi sono invece gli interventi operati in fase di pre-produzione e produzione (figura 4). A questo si aggiunge il fatto

che nell'approccio tradizionale il maggior numero di modifiche al prodotto vengono apportate proprio in queste ultime due fasi, per cui i costi lievitano in maniera esponenziale [4].

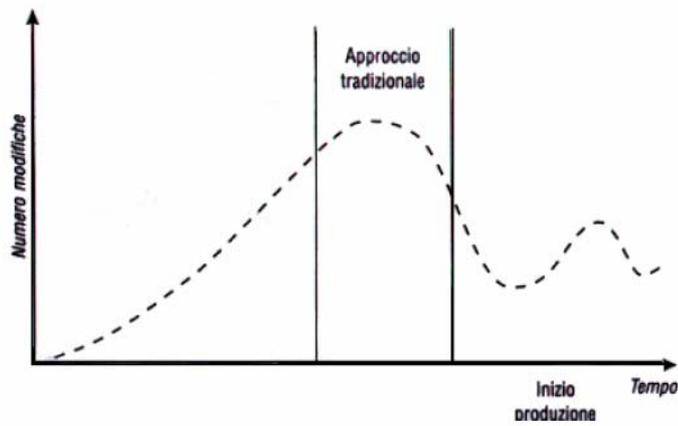


Figura 4 Diagramma dei costi progettazione, pre-produzione e produzione

1. QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT

1.1. DESCRIZIONE

Il Quality Function Deployment (QFD) è la tecnica del Total Quality Management impiegata per assicurare che la qualità del prodotto venga garantita fin dalla fase di progettazione e sviluppo di nuovi prodotti. Tale tecnica stravolge completamente il processo di sviluppo dei nuovi prodotti ponendo alla base di tale processo la soddisfazione del cliente, trasferendo le esigenze di quest'ultimo al prodotto già dalla fase di progettazione [4].

1.1.1. ORIGINI DEL QFD

La nascita del QFD si può collocare intorno al 1972, anno in cui gli ingegneri Nishimura e Takayanagi presentarono una *quality chart* per un cantiere navale a Kobe in Giappone. Nell'esperimento s'utilizzò una matrice in cui le esigenze del cliente erano riportate nelle righe e i metodi per soddisfarle nelle colonne. L'idea era che la matrice fosse gradualmente compilata sulla base di discussioni approfondite tra Marketing, Progettazione e Produzione. Proprio per questa cooperazione tra gli addetti dell'azienda il metodo rappresentò un passo in avanti rispetto agli strumenti di supporto alla progettazione d'allora. Due anni più tardi, il prof. Yoji Akao fondò e diresse un comitato di ricerca sul QFD. Egli curò la diffusione del QFD come tecnica per migliorare il passaggio dalla fase di progettazione a quella di produzione. Ed è lo stesso Akao, in un articolo del 1989, a dichiararsi padre della metodologia. Nonostante tale dichiarazione, Schubert attribuisce a Mizuno la paternità della metodologia. Secondo Clausing e Pugh, invece, le idee di base sviluppate nel QFD non sono del tutto nuove, infatti assomigliano per molti aspetti al Value Analysis (Analisi

del Valore), un processo elaborato in USA, combinato con tecniche di marketing [5]. La diffusione del QFD negli Stati Uniti è avvenuta solamente dopo quasi 15 anni l'esperimento nei cantieri navali di Kobe per merito di Clausing, professore presso il MIT (Massachusetts Institute of Technology). Clausing infatti è stato introdotto al QFD nel marzo del 1984 durante una visita alla Fuji-Xerox di Tokyo in Giappone. Le sue ricerche nell'ambito del processo di sviluppo dei prodotti dell'azienda lo hanno avvicinato ad uno dei principali consulenti del settore, il dr. Hajime Makabe; questi l'informò che in quel periodo, pur svolgendo ancora qualche lezione e qualche consulenza su argomenti tradizionali, l'argomento realmente importante era il Quality Function Deployment (QFD): uno strumento per lo sviluppo di prodotti che partendo dalle esigenze dei clienti, deriva in modo sistematico le specifiche tecniche che costituiscono la guida alle attività di fabbricazione. La descrizione del QFD e del successo che esso aveva nell'industria giapponese, risvegliò l'interesse di Clausing: sembrava proprio che il QFD avrebbe potuto risolvere complessi problemi nel campo dello sviluppo dei prodotti e della loro produzione negli Stati Uniti. Ritornato dal Giappone, Clausing tenne delle conferenze e delle conversazioni private per indurre l'industria degli Stati Uniti ad avvalersi dei benefici del nuovo processo. Questo determinò un'esplosione d'interessi e d'attività connesse al QFD. Quindi fu l'ASI (American Supplier Institute) a focalizzare la sua attenzione sulle potenzialità e sulle modalità d'impiego del QFD organizzando missioni di studio in Giappone. Da questo momento il QFD fa il suo esordio nelle aziende occidentali. Il QFD è un sistema per tradurre le esigenze del cliente in adeguate specifiche interne all'azienda in ognuno dei suoi settori funzionali, dalla ricerca e sviluppo all'ingegnerizzazione, produzione, distribuzione, vendita e assistenza tecnica (Figura 5).

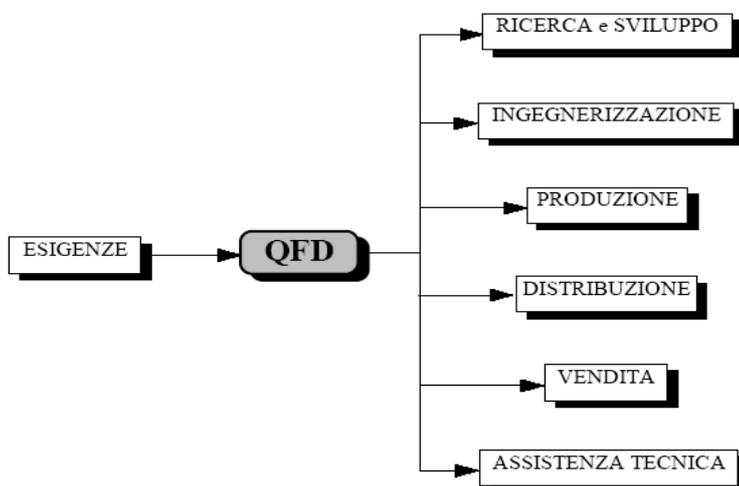


Figura 5 Esigenze del cliente riportate in ognuno dei settori funzionali aziendali

Il QFD è pertanto uno strumento in grado d'orientare il mondo di chi progetta verso il mondo di chi utilizza i prodotti; in questo senso rappresenta un mezzo per l'impostazione dei processi di sviluppo dei nuovi prodotti, più precisamente dei processi snelli in grado di realizzare un contatto reale tra l'azienda e il suo potenziale mercato fin dalla fase di sviluppo dell'idea di un nuovo prodotto [6].

1.1.2. IL MIGLIORAMENTO NELLO SVILUPPO DEI PRODOTTI

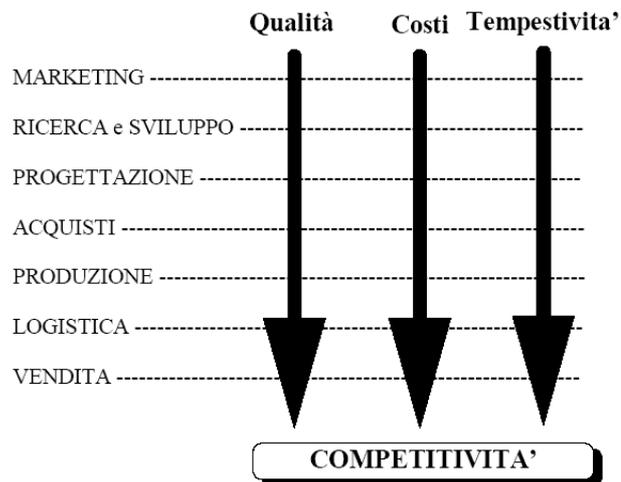
Il QFD è costituito da un insieme di strumenti ingegneristici che, quando sono opportunamente utilizzati, consentono di realizzare prodotti di qualità. Esso avvalendosi di matrici che diffondono le esigenze del cliente e le specifiche tecniche che ne derivano in tutti i loro aspetti fino al livello della fabbrica, determina a breve termine:

- una riduzione dei problemi d'avviamento;

- minori modifiche di progetto;
- cicli di sviluppo più brevi e a lungo termine;
- la soddisfazione del cliente;
- minori costi di garanzia;
- l'incremento della quota di mercato.

Quando il QFD è usato correttamente si hanno miglioramenti nei costi, nella qualità, nella tempestività, le quali cose determinano produttività e redditività e, in definitiva, maggiori quote di mercato. L'innalzamento del livello dei tre fattori: qualità, costi e tempi, inteso sia come livello di servizio sia come rapidità di risposta, porta al conseguimento della massima soddisfazione del cliente e quindi al rafforzamento della capacità competitiva dell'azienda [7]. Quando si parla di capacità competitiva, e quindi si fa riferimento alle prestazioni del prodotto, s'intende l'entità del gap che esiste rispetto alle aziende concorrenti sotto i tre punti di vista principali: qualità, costi e tempestività. Valutando globalmente i tre fattori: qualità, costi e tempestività, si può comprendere esattamente la forza competitiva dell'azienda; valutandoli invece separatamente, si può capire quali sono i punti di forza e quelli di debolezza aziendale. Allo stesso modo si può comprendere il grado di soddisfazione del cliente. Come illustrato nella figura 6, si può affermare che è responsabilità di tutti gli enti aziendali elevare il livello della competitività. In altri termini la competitività di un'azienda può essere espressa come la sommatoria della forza competitiva di ciascun ente aziendale.

$$\text{Competitività aziendale} = \sum \text{forza competitiva di ciascun ente}$$



1.1.3. IL MECCANISMO DI TRASFERIMENTO DELLE INFORMAZIONI TRA AZIENDA E CLIENTE

Il processo di determinazione delle specifiche s'inserisce nel processo più ampio di rapporto tra il cliente e l'azienda come è evidenziato nella figura 7 in cui si cerca di mettere in luce i passi successivi attraverso cui si arriva dalla qualità attesa al prodotto e quindi alla qualità che il cliente percepisce nel momento in cui compra ed utilizza il prodotto. Il punto di partenza è rappresentato dalla qualità attesa; infatti il cliente s'attende il soddisfacimento dei suoi bisogni attraverso il prodotto che decide di comprare, cioè s'attende una qualità che sarà in funzione dei mezzi di comunicazione che gli hanno creato certe aspettative, dei suoi bisogni personali e delle esperienze precedenti su prodotti analoghi. A questo punto occorre spostarsi nel mondo dell'azienda: l'azienda infatti deve cogliere la qualità attesa percependo le esigenze del mercato [8].

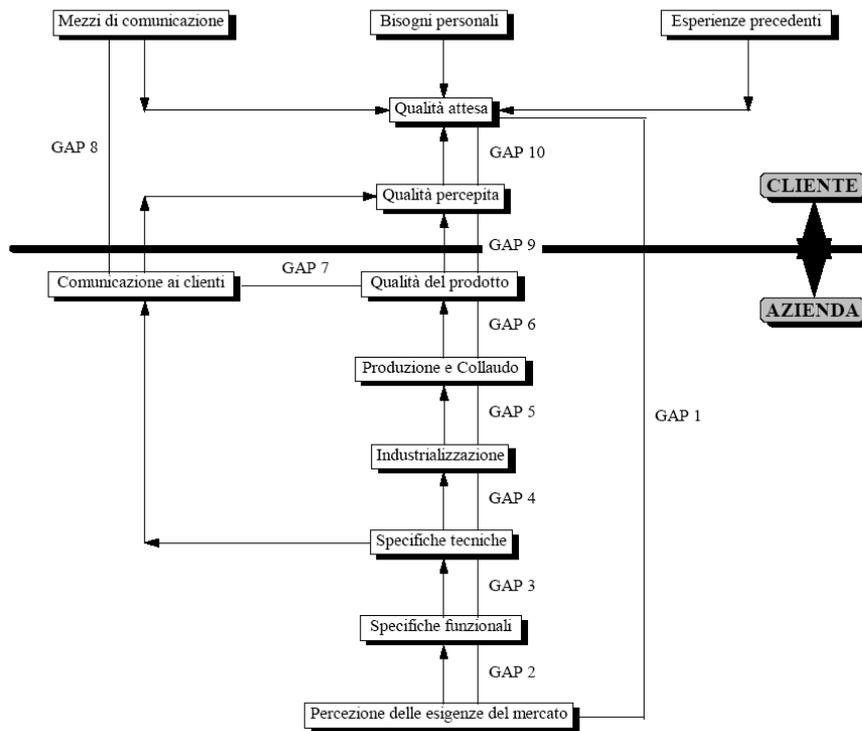


Figura 7 GAP aziendali a vari livelli

Nella figura 7 sono indicati dei GAP, la qualcosa lascia intendere che nel processo in esame si possono verificare degli scollamenti. Il primo (GAP 1) si può verificare perchè l'azienda attraverso le sue funzioni commerciali può sbagliare nel percepire le esigenze del mercato; se ciò accade le aspettative del mercato così come vengono colte dall'azienda risultano diverse da quelle reali. Dalle percezioni delle esigenze del mercato si passa poi alla definizione delle specifiche funzionali, cioè alla definizione del profilo del prodotto in termini di funzioni che esso deve realizzare. E' chiaro che in questa seconda fase si può introdurre un ulteriore gap (GAP 2). Poi si passa dalle specifiche funzionali alle specifiche tecniche [9]. Questa fase viene sviluppata nell'ambito della progettazione del prodotto, l'ufficio tecnico infatti traduce l'insieme delle

specifiche funzionali in dimensioni, in materiali, in scelte di componenti, ecc. In questa fase certamente può introdursi un ulteriore gap (GAP 3). Dalle specifiche tecniche a prototipo definito si passa poi alla industrializzazione che, come è noto, è un processo lungo e costoso che consente di passare da un prototipo a tutto quanto necessario per produrre un prodotto industrializzato su larga scala, quindi occorrerà definire le attrezzature, i cicli, le attrezzature di collaudo, le modalità di controllo, la scelta dei fornitori, ecc. E' ovvio che anche in questa fase si può introdurre un gap (GAP 4) per cui il prodotto industrializzato sarà in qualche misura un po' diverso da quello che in sede di prototipo era stato definito e poi in sede di produzione e collaudo si introdurrà un ulteriore gap (GAP 5) in quanto il singolo esemplare sarà diverso dal prototipo posto che nulla è ripetibile al 100 %. In definitiva man mano che il processo si sviluppa s'introduce un numero crescente di gap che rende il prodotto finale diverso anche in maniera significativa dal prodotto così come il cliente se l'aspetta. Fra l'altro una volta che sono state definite le specifiche tecniche, cioè una volta che il prodotto è stato progettato, può partire anche il processo di comunicazione ai clienti attraverso la stesura di cataloghi, la definizione di una campagna pubblicitaria, ecc... La comunicazione ai clienti poi ritorna, attraverso i mezzi di comunicazione, alla qualità attesa da parte del cliente e crea una aspettativa per quanto riguarda la qualità percepita; ecco che poiché la comunicazione ai clienti è sul prodotto progettato, mentre la qualità del prodotto ha avuto di mezzo anche un'altra serie di steps, può introdursi un ulteriore gap (GAP 7). Dopodichè tra qualità del prodotto e qualità percepita si ritorna nel mondo del cliente. La qualità del prodotto e la qualità percepita possono essere diverse, per cui s'introduce il GAP 9 che purtroppo non è totalmente controllabile dall'azienda, infatti la qualità del prodotto è la qualità che l'esemplare ricevuto dal cliente ha in quel momento, la qualità percepita invece non è solo funzione della qualità del prodotto che in quel momento è in fase d'utilizzazione ma tiene conto anche della "memoria" del cliente; per cui sulla qualità è difficile e pericoloso fare compromessi: un prodotto mal riuscito ha influenza non solo sulla performance del momento, ma ha influenza per lungo tempo. Alla fine comunque quello che conta è il GAP 10 perché è funzione di tutti gli altri e quindi è quello che determina il successo o l'insuccesso del prodotto. Occorre allora minimizzare il

più possibile questo gap per rendere l'azienda più competitiva e quindi consentirgli di avere successo attraverso i propri prodotti. Lo scopo viene raggiunto minimizzando i primi due gap poiché se si sbaglia nei primi passi del processo è difficile si possa recuperare nei passi successivi, occorre quindi definire in maniera chiara le specifiche iniziali. Il processo di sviluppo per la definizione delle specifiche iniziali (capitolato tecnico - commerciale) è riportato nella figura 8. Lo schema inizia con l'analisi del mercato che deve essere eseguita dall'azienda, dopodiché attraverso la nascita d'idee, il processo QFD, il confronto con la concorrenza stabiliscono in prima approssimazione le specifiche funzionali del prodotto che comunque non lo definiscono completamente; si possono infatti definire specifiche funzionali elevate ma il successo del prodotto può essere modestissimo; questo accade perché a fronte delle specifiche funzionali il prezzo possibile a cui può essere venduto il prodotto può risultare molto alto. Allora una prima stima del prezzo possibile deve emergere dall'insieme delle specifiche; dividendo poi questo prezzo per un coefficiente K che in genere è pari a 2, si determina il costo del prodotto. Occorre poi valutare se il costo del prodotto sia accettabile o no. Se questo costo non è accettabile è ovvio che occorrerà tornare indietro, iterare e al limite abbandonare il progetto, se invece è accettabile l'ufficio tecnico per quanto riguarda la progettazione, la direzione acquisti per quanto riguarda la componentistica, la funzione produzione, la funzione commerciale e quella qualità devono impegnarsi su tempi di sviluppo e sul costo del prodotto; inoltre la funzione commerciale, la funzione acquisti e quella produzione devono dare degli impegni anche sui quantitativi annui. Attraverso il collegamento di queste due fasi si può arrivare a determinare il valore massimo del costo del progetto inteso come costo industriale cioè costo del materiale, della manodopera e delle attrezzature utilizzate. Se questo costo non è accettabile si fa un'altra iterazione e al limite s'abbandona il progetto, anche se ciò è improbabile; se invece l'uscita è sì, l'ufficio tecnico e la direzione acquisti s'impegheranno sul costo di progettazione [10].

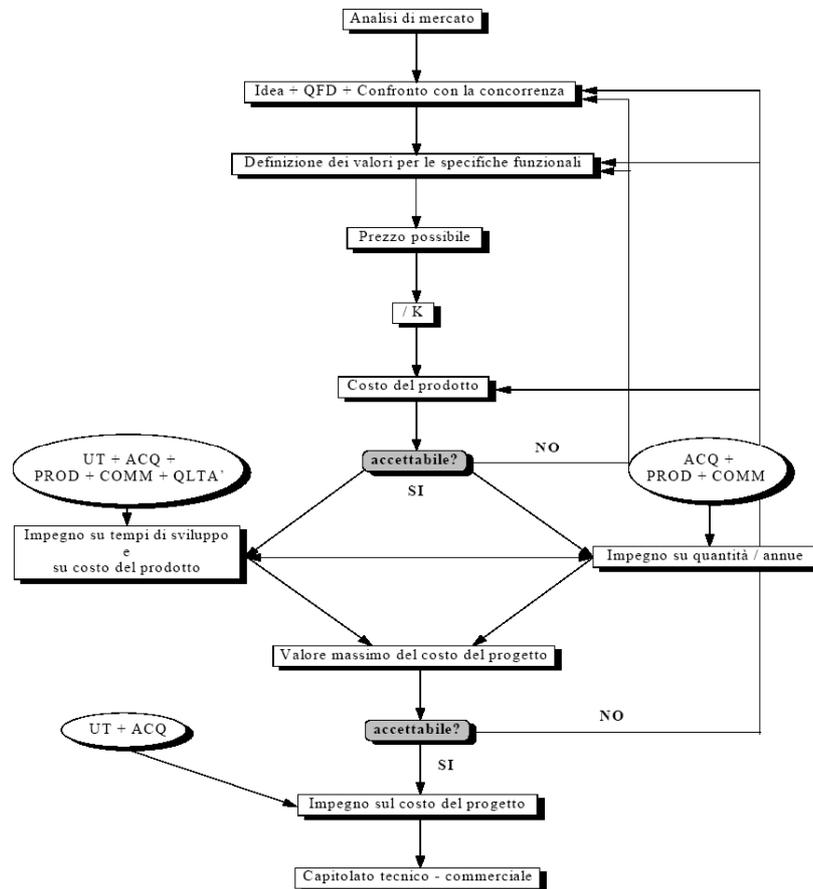


Figura 8 Processo di sviluppo per la definizione delle specifiche iniziali

Tutto ciò rappresenta il capitolato tecnico-commerciale, cioè una serie di documenti la cui stesura è effettuata prima della progettazione di dettaglio vera e propria che oltre alla definizione del prodotto in termini funzionali comprende anche un'analisi delle quantità e un'analisi delle modalità produttive cioè quanto viene realizzato all'interno dell'azienda e quanto all'esterno [11]. Per poter procedere all'interno di questo processo occorre avvalersi del QFD che ha inizio

individuando le esigenze del cliente. Così il primo obiettivo del QFD è quello di permettere all'azienda di definire chi è il proprio cliente, ovvero identificare:

- il proprio segmento di clientela;
- i livelli di qualità percepiti dal cliente;
- le esigenze del cliente.

Le attività volte all'identificazione del proprio segmento di clientela possono essere condotte seguendo una metodologia che prevede tre fasi:

1. Individuare gli obiettivi prioritari dell'azienda.

Quest'attività dovrebbe essere già stata svolta dal Top Management. Se ciò non è avvenuto, chi lavora sul QFD può presentare una proposta che dovrà essere revisionata e approvata dal Top Management.

2. Individuare i punti di forza dell'azienda.

Quest'attività ha come fine l'individuazione di quei punti di forza dell'azienda che meglio consentono il raggiungimento degli obiettivi definiti nella fase precedente.

3. Individuare il "segmento chiave" di clientela.

Quest'attività, sulla base degli elementi definiti nelle due fasi precedenti, individua il segmento di clientela su cui l'azienda deve puntare, principalmente, per avere successo. La selezione del "segmento chiave" si può realizzare attraverso un percorso a matrici che può essere così illustrato:

	Obiettivi
Obiettivi	

	Punti di forza
Obiettivi	

	Segmenti di mercato
Obiettivi	

Le attività volte all'identificazione dei livelli di qualità percepiti dal segmento di clientela prescelto si basano sull'elaborazione del Prof. Kano in Giappone e hanno come fine l'individuazione del livello di qualità per il cliente sul quale l'azienda deve focalizzarsi per assicurarsi il successo. Esistono tre livelli di qualità:

- la qualità unidimensionale;
- la qualità attesa;
- la qualità eccitante.

La qualità unidimensionale soddisfa le esigenze espresse dalla clientela. L'aggettivo unidimensionale indica che un incremento nel livello di soddisfazione del cliente produce un incremento lineare delle prestazioni dell'azienda. La qualità unidimensionale, pertanto, può essere rappresentata graficamente in un sistema d'assi cartesiani riportando sull'asse delle ordinate il grado di soddisfazione del cliente e sull'asse delle ascisse la prestazione dell'azienda (Figura 9) [12].

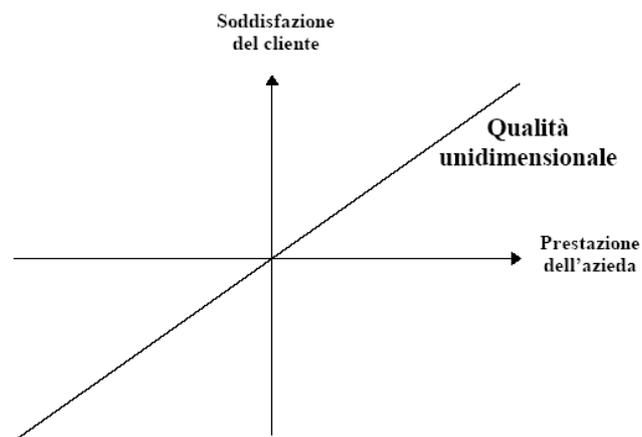


Figura 9 Andamento lineare della qualità unidimensionale

La qualità attesa soddisfa le esigenze non espresse dalla clientela perché implicite nel prodotto. Se l'azienda soddisfa tali esigenze il grado di soddisfazione del cliente è molto basso, mentre se non le soddisfa il grado d'insoddisfazione è molto alto. Analogamente alla qualità unidimensionale anche la qualità attesa può essere rappresentata graficamente (Figura 10).

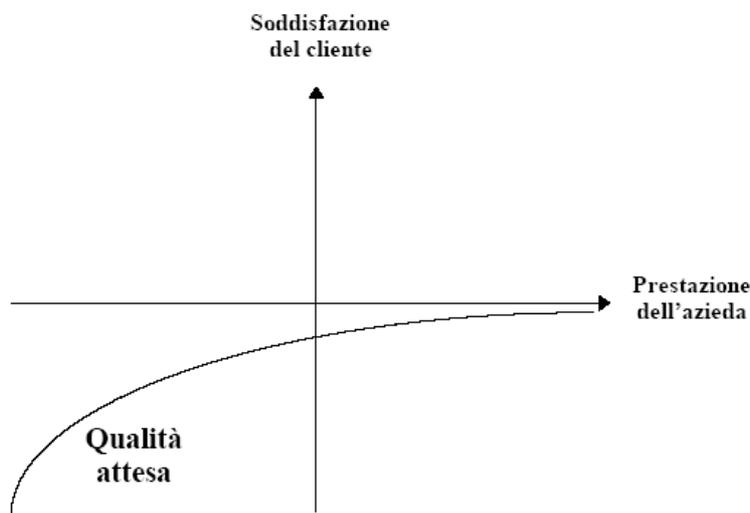


Figura 10 Andamento della qualità attesa

La qualità eccitante soddisfa le esigenze non espresse dalla clientela perché da questa non ancora desiderate. L'azienda quindi si trova ad anticipare i desideri della clientela. La soddisfazione di queste esigenze determina sempre un grado di soddisfazione del cliente positivo e mai negativo, infatti se l'azienda non svolge alcuna azione volta a rispondere a tali esigenze il grado di soddisfazione risulterebbe prossimo allo zero. Analogamente ai casi precedenti la qualità eccitante può essere rappresentata graficamente (Figura 11) [13].

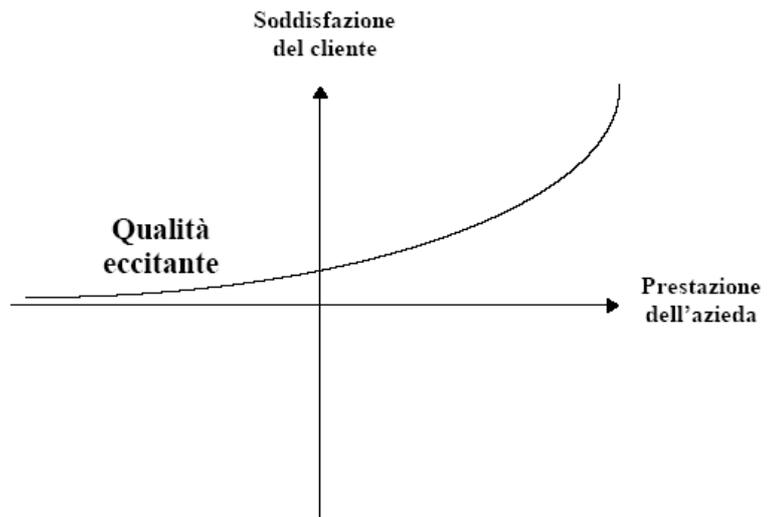


Figura 11 Andamento della qualità eccitante

Per quanto detto appare ovvio che l'obiettivo a cui l'azienda deve tendere è la crescita della qualità eccitante. L'attività volta all'identificazione delle esigenze del cliente viene svolta attraverso uno strumento chiamato "tabella della voce del cliente" costituito di due parti (Figura 12).

I.D.	Caratteristiche del cliente		Voce del cliente	USO																		
	D/E	Dati		COSA		QUANDO		DOVE		PERCHE'		COME										
				D/E	Dati	D/E	Dati	D/E	Dati	D/E	Dati	D/E	Dati									

I.D.	INFORMAZIONI FILTRATE	ESIGENZE DEI CLIENTI	CARATTERISTICHE DI QUALITA'	FUNZIONI	AFFIDABILITA'	COMMENTI

Figura 12 Tabella della voce cliente

La prima parte della tabella (VOCT 1) serve ad identificare l'uso che il cliente fa del prodotto che si sta progettando; infatti mostra:

- o una colonna per l'identificazione del cliente che avviene attraverso il nome o un numero;
- o una colonna con i dati demografici del cliente, per esempio il sesso, l'età, ecc;
- o una colonna che riporta la voce del cliente, cioè le sue esigenze;
- o una serie di colonne che identificano l'uso del prodotto, definendo CHI l'usa e COSA, QUANDO, DOVE, PERCHE', COME viene usato. Ognuna di queste colonne è affiancata da una sotto-colonna che specifica se l'informazione risulta dedotta, cioè "ricostruita", dopo il contatto con il cliente o esplicita cioè direttamente espressa dal cliente.

Per compilare quindi la VOCT 1 è necessario comprendere i gusti, le tendenze, le inclinazioni commerciali dei potenziali acquirenti. Per individuare queste esigenze sono state messe a punto numerose tecniche, quali:

- ✓ Intervista personale, una delle tecniche più usate e più efficaci per capire direttamente dal cliente quali siano le sue esigenze. Ai clienti, individualmente, viene chiesto di descrivere prodotti esistenti, come loro li usano, indicando eventuali esigenze non soddisfatte da questi prodotti. Le interviste fatte vengono ascoltate da gruppi di lavoro che cercano d'individuare tutti i bisogni espressi dal cliente, anche quelli più impliciti e meno evidenti. In genere si è verificato empiricamente che 20 o 30 interviste sono sufficienti per raccogliere la maggior parte delle esigenze del cliente.
- ✓ Gruppi d'intervista, a gruppi di sei-otto clienti è chiesto di parlare dei loro bisogni. Questo ha il vantaggio che l'affermazione di uno del gruppo provoca reazioni e commenti tra gli altri componenti del gruppo e ciò permette di chiarificare i loro bisogni.
- ✓ Tecniche qualitative strutturate, ai clienti è chiesto di fare considerazioni sui prodotti prendendone tre alla volta. Viene chiesto di scegliere quali sono i due più simili e i due più differenti descrivendone il perché; in questo modo si possono stabilire delle relazioni d'ordine tra i prodotti esaminati.
- ✓ Tecniche d'analisi di prodotto, consistono nel chiedere al cliente come compra, usa, descrive, valuta, un determinato prodotto.

Quando l'azienda non ha le risorse o il tempo per portare avanti queste tecniche, s'affida ad altri metodi. Ad esempio, il prodotto viene situato in luoghi pubblici in modo che il cliente possa esaminarlo e provarlo. I tecnici che hanno sviluppato il prodotto stanno nel luogo d'esposizione, registrando i commenti che vengono fatti. Per capire quali siano le voci più importanti per il cliente si sono sviluppati diversi metodi di misura. Un primo metodo consiste nel far valutare direttamente l'importanza di una lista di voci, chiedendo al cliente di riportare il peso che ritiene d'attribuire a ciascuna voce, mediante la compilazione d'appositi questionari. Talvolta si procede in maniera più mirata: si

chiede al cliente d'assegnare il valore dieci all'attributo che considera più importante e poi, riferiti a questo, il valore delle altre voci oppure s'utilizza il metodo di misura denominato a "somma costante". Al cliente viene dato un punteggio massimo da dividere tra tutti i requisiti. Questo metodo ha il vantaggio che il cliente deve giungere a dei compromessi tra le diverse voci. Per concludere è importante tenere presente che le richieste del cliente non sono tutte ugualmente importanti; si tratta allora d'individuare le priorità. Questo processo, chiamato "Pianificazione della Qualità" (*Quality Planning*), si basa sulla classificazione e gerarchizzazione delle attese del cliente. Le richieste del cliente appartengono a categorie di tipo diverso secondo la loro incidenza sul grado di soddisfazione del prodotto, vanno quindi ordinate in base al sistema di preferenze a cui fanno parte. La gerarchizzazione è fatta basandosi sull'esperienza dei membri del team che lavora sul QFD o conducendo indagini su campioni rappresentativi di clienti. In alcune aziende s'utilizzano altre tecniche che giudicano i gusti del cliente non solo in base a ciò che essi esprimono, ma anche in base alle loro azioni. Si tratta di tecniche più costose ma che portano a risposte più accurate. La metodologia "tradizionale" invece risolve il problema d'assegnare un grado di priorità alle richieste del cliente ordinandole secondo una scala da 1 (requisito d'importanza trascurabile) a 5 (requisito indispensabile) o da 1 a 10. A fronte d'ognuna delle esigenze espresse dal cliente risulta utile, quando possibile, far fare al cliente un confronto tra il prodotto della propria azienda e altri prodotti della concorrenza che siano posizionati nella stessa fascia di mercato. Per fare ciò nello stesso questionario inviato ad un gruppo di clienti per indagare il livello d'importanza delle esigenze, si richiede di valutare, per ogni richiesta, il grado di soddisfazione fornito dall'utilizzo del prodotto della propria azienda e quello fornito dall'utilizzo del prodotto dei suoi concorrenti più forti utilizzando la stessa scala da 1 (molto cattivo) a 5 (molto buono) usata per valutare l'importanza dei bisogni del cliente. Quest'attività è detta Analisi della competitività in ottica cliente o *Benchmarking* sulla qualità percepita [14]. Nella seconda parte (VOCT 2) della "tabella della voce del cliente" (Figura 12), invece, le esigenze del cliente vengono tradotte in linguaggio aziendale e si raggruppano le informazioni sulle caratteristiche di

qualità, sulle funzioni, e sull'affidabilità, ecc. Come evidenziato dalla figura 12 la VOCT 2 è costituita da sei colonne:

- A) informazioni filtrate;
- B) esigenze del cliente;
- C) caratteristiche di qualità;
- D) funzioni;
- E) affidabilità;
- F) commenti.

A) Informazioni filtrate

Prima d'analizzare se il cliente si è espresso definendo una caratteristica di qualità del prodotto, una sua esigenza, una funzione occorre filtrare la voce del cliente attraverso l'utilizzo che lo stesso fa del prodotto. Quest'attività di filtraggio è importante in quanto da una sola affermazione espressa dal cliente si possono individuare più esigenze di qualità.

B) Esigenze del cliente

Elencate le informazioni filtrate, occorre trasformarle in linguaggio aziendale. Per esprimere correttamente un'esigenza del cliente la frase deve essere:

- chiara per ogni persona coinvolta nel processo produttivo;
- formulata in modo positivo.

Inoltre si devono evitare parole che facciano riferimento a:

- funzioni;
- mezzi;
- caratteristiche di qualità;
- costi;

- affidabilità;
- prezzo;
- sicurezza.

Le esigenze del cliente, una volta identificate, possono essere raggruppate utilizzando un Diagramma di Affinità e riportate in un Diagramma ad Albero (Figura 13) al fine di selezionare le esigenze allo stesso livello di dettaglio.

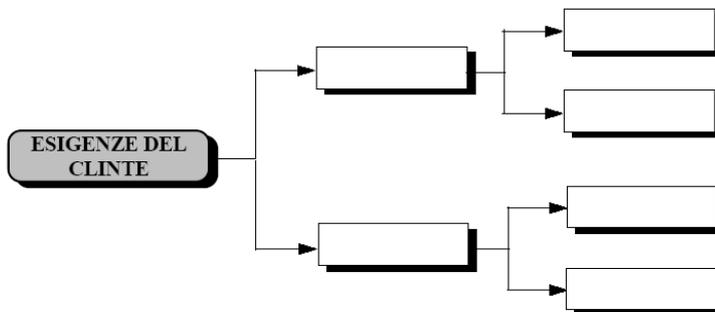


Figura 13 Processo di sviluppo per la definizione delle esigenze del cliente

C) Caratteristiche di qualità

Per caratteristiche di qualità s'intendono le caratteristiche del prodotto che si propongono di soddisfare le esigenze del cliente. In genere vengono individuate sulla base delle esigenze del cliente, ma in altri casi possono provenire dalle informazioni filtrate o direttamente dalla voce del cliente. Le caratteristiche di qualità devono essere sempre misurabili in modo da sapere quanto soddisfano le esigenze del cliente. Per esprimerle correttamente si devono evitare parole che facciano riferimento a:

- mezzi;
- costi;

- prezzo;
- affidabilità;
- esigenza del cliente;
- prove.

Risulta utile infine riportare le caratteristiche di qualità identificate in un Diagramma ad Albero (Figura 14) al fine di selezionare la caratteristiche allo stesso livello di dettaglio.

Se per una determinata esigenza non si riesce ad individuare velocemente la caratteristica di qualità, è consigliabile saltarla per non impantanarsi nel processo.

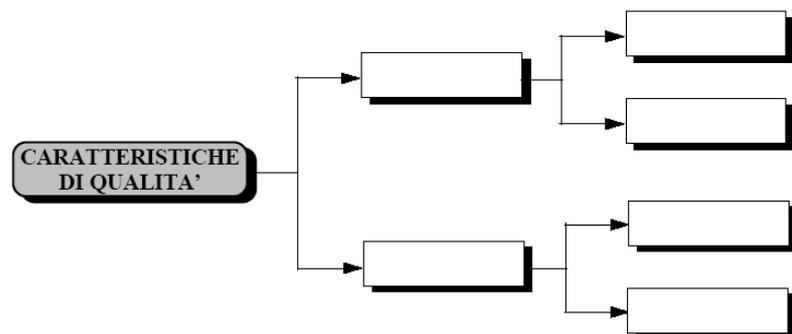


Figura 14 Processo di sviluppo per la definizione delle caratteristiche di qualità

D) Funzioni

Per funzioni s'intendono i compiti che il prodotto deve svolgere per risultare valido al cliente.

E) Affidabilità

Per affidabilità s'intende la probabilità che il prodotto funzioni correttamente per un determinato periodo di tempo.

F) Commenti

In questa colonna s'inseriscono tutte quelle definizioni che non possono collocarsi nelle altre colonne (es. costi, sicurezza, ecc.). Per quanto riportato appare evidente che la raccolta e l'analisi della "voce del cliente" è una fase assai complessa; potrebbe allora risultare utile un Diagramma causa-effetto (Figura 15) per esplorare i problemi nella comprensione della voce del cliente.

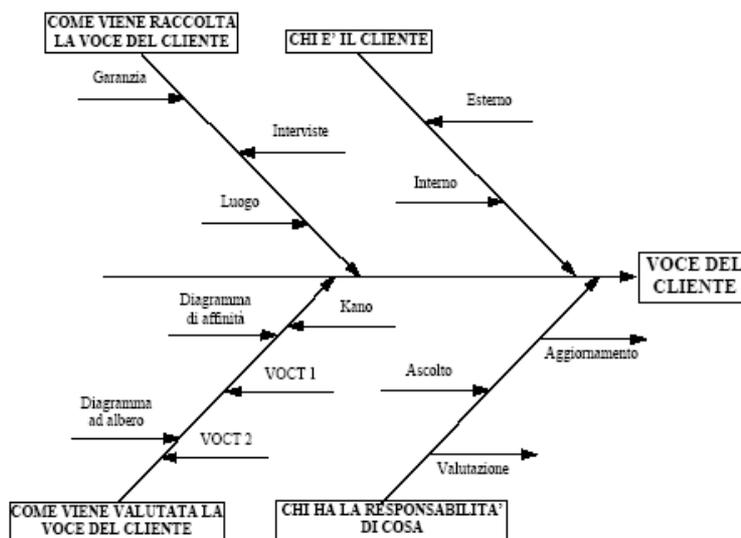


Figura 15 Diagramma causa-effetto per definire la voce del cliente

1.1.4. IL PROCESSO COMPLETO DEL QFD

Una volta determinate le esigenze del cliente, è possibile compilare le matrici che formano lo strumento del QFD [15]. La prima che si sviluppa

denominata matrice A1 mette a confronto le esigenze del cliente con le caratteristiche di qualità individuandone le relazioni (forti, medie, basse) ed il relativo peso in base al grado d'importanza attribuito dal cliente a ciascuna esigenza (Figura 16).

		Caratteristiche di qualità				
Esigenze del Cliente						

Figura 16 Costruzione della matrice A1

Attraverso l'analisi di questa matrice è possibile individuare una gerarchia delle caratteristiche di qualità ed eventualmente eliminare quelle che non risultano correlate ad alcuna esigenza del cliente. Più in particolare, partendo da ogni singola esigenza del cliente, si riporta (Figura 17):

- nella colonna A il grado d'importanza attribuito dal cliente a ciascuna esigenza;
- nella colonna N quanto la nostra azienda riesce a soddisfare le esigenze del cliente;
- nella colonna X quanto il concorrente X riesce a soddisfare le esigenze del cliente;
- nella colonna Y quanto un altro concorrente Y riesce a soddisfare le esigenze del cliente;
- nella colonna P il grado di soddisfazione del cliente che l'azienda si propone di raggiungere.

La valutazione del “grado” nelle colonne A,P e del “quanto” nelle colonne N,X,Y è ottenuta su scala graduata da 1 a 5. Nella matrice, inoltre, si riporta:

- nella colonna B il grado di miglioramento che l'azienda dovrà implementare affinché la soddisfazione del cliente raggiunga quella pianificata. Il calcolo del "grado di miglioramento" si esegue facendo il rapporto tra il grado di soddisfazione pianificata (P) e quello che l'azienda attualmente riesce a raggiungere (N), ovvero: $B = P / N$

- nella colonna C gli elementi di forza per la vendita ovvero le esigenze che l'azienda intende privilegiare in sede di commercializzazione del prodotto. Il valore 1.5 indica che l'esigenza ha una forte importanza in sede di commercializzazione; il valore 1.2 indica che l'esigenza ha una media importanza; il valore 1 indica che l'esigenza ha una scarsa importanza. Infine nella colonna D ogni singolo valore viene ottenuto dal prodotto dei dati espressi nelle colonne A,B,C ovvero:

$$D = A * B * C$$

- e la colonna E riporta in percentuale i dati della colonna "Peso assoluto".

Caratteristiche di qualità	A	N	X	Y	P	B	C	D	E
	grado di importanza	azienda oggi	concorrente X	concorrente Y	pianificazione	grado di miglioramento	elementi di forza per le vendite	peso assoluto	peso percentuale

Figura 17 Processo di sviluppo per la definizione delle caratteristiche di qualità

Ottenuti i pesi delle singole esigenze si passa a definire le relazioni tra le esigenze del cliente e le caratteristiche di qualità [16]. Tali relazioni sono rappresentate con dei simboli specifici posti agli incroci della matrice che indicano rispettivamente relazioni “deboli”, ”medie” e ”forti”. I simboli comunemente usati sono un triangolo per relazioni deboli, un cerchio per relazioni medie e due cerchi concentrici per relazioni forti. Se non ci sono relazioni, i corrispondenti incroci nella matrice vengono lasciati vuoti. Una relazione forte implica che una piccola variazione (positiva o negativa) della caratteristica *jesima* (*quality characteristic, qc_j*) produce una considerevole variazione (indifferentemente in positivo o in negativo) nel grado di soddisfazione (*gds*) del bisogno *i-esimo* (*customer attribute, ca_i*). Considerando che il grado di soddisfazione del bisogno *i-esimo* del cliente dipende dai valori assunti dall’insieme delle *qc_j* si può scrivere:

$$gds(ca_i) = f(qc_1, qc_2, \dots, qc_j, \dots, qc_m)$$

con *f* funzione implicita delle *m* variabili *qc_j*.

Con questo sistema si possono definire in modo analitico ed in prima approssimazione i fattori d'intensità delle relazioni (nell’ipotesi che *f* sia derivabile) come:

$$r_{ij} = \frac{\partial [gds(ca_i)]}{\partial (qc_j)} \geq 0$$

Partendo dalla scala di priorità delle esigenze del cliente si può determinare un’analoga scala d’importanza o di priorità per le caratteristiche di qualità. L’importanza di ciascuna caratteristica è valutata in base all’importanza delle richieste del cliente alle quali è correlata e al livello di tale correlazione [17]. Il metodo classico (*Independent Scoring Method*) usato per ordinare le caratteristiche di qualità prevede due passi:

1. Il primo consiste nella conversione delle relazioni espresse simbolicamente tra i bisogni del cliente e le caratteristiche di qualità in valori equivalenti. Tale conversione fa uso della scala 1-3-9 anche se possono essere utilizzati sistemi di pesatura alternativi.
2. Il secondo passo consiste nella determinazione del livello d'importanza w_j d'ognuna delle caratteristiche di qualità: esso è calcolato eseguendo la somma dei prodotti tra il grado d'importanza relativa d'ogni esigenza del cliente per il valore quantificato del legame esistente tra quella caratteristica j -esima con ognuna delle esigenze che sono in relazione con essa.

Si ha:

$$w_j = \sum_{i=1}^n d_i \cdot r_{ij}$$

dove:

d_i grado d'importanza relativa del requisito i -esimo, $i=1,2,\dots,n$;

r_{ij} relazione cardinale tra il requisito i -esimo e la caratteristica j -esima, $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$;

w_j livello d'importanza della caratteristica j -esima, $j=1,2,\dots,m$;

n numero dei requisiti del cliente;

m numero delle caratteristiche di qualità.

La misura del livello assoluto d'importanza w_j può essere trasformata in una misura d'importanza relativa w_j^* , espressa in percentuale, nel modo seguente:

$$w_j^* = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^m w_j}, j = 1, 2, \dots, m$$

Quest'ultima rappresenta l'importanza che, indirettamente, il cliente attribuisce a ciascuna caratteristica di qualità e può utilizzarsi per tracciare una graduatoria del livello di "attenzione" che il progettista deve riservare alle caratteristiche di qualità in sede di progetto. Parallelamente all'asse delle "Caratteristiche di qualità", sulla riga inferiore della matrice, è considerata quindi un'ultima zona (Figura 17) in cui:

- nella riga "Totale" si sommano i valori riportati in ciascuna colonna. Tali valori vengono, poi, espressi in percentuale nella riga successiva "%";
- nella riga "Azienda oggi" si riportano le performance d'ogni caratteristica qualitativa e nelle righe successive quelle dei concorrenti X e Y;
- nella riga "Pianificazione" s'indicano le performance che l'azienda intende raggiungere.

Partendo dalla matrice A1 si passa poi ad elaborare le matrici A2, A3 e B1.

La matrice A2 confronta le funzioni del prodotto, cioè "quello che il prodotto fa" con le caratteristiche di qualità (Figura 18) in modo da verificare se le funzioni siano correlate alle caratteristiche richieste dal cliente, quindi permette d'identificare le funzioni "inutili" ai fini della soddisfazione del cliente.

Funzioni del prodotto

Caratteristiche di qualità					

Figura 18 Confronto tra caratteristiche di qualità-funzioni del prodotto

Per elaborare la matrice A2 pertanto s'identificano le funzioni del prodotto utilizzando gli strumenti della qualità, si completa l'elenco con quelle che sono già state individuate nella VOCT 2 e si riportano su un Diagramma ad Albero (Figura 19).

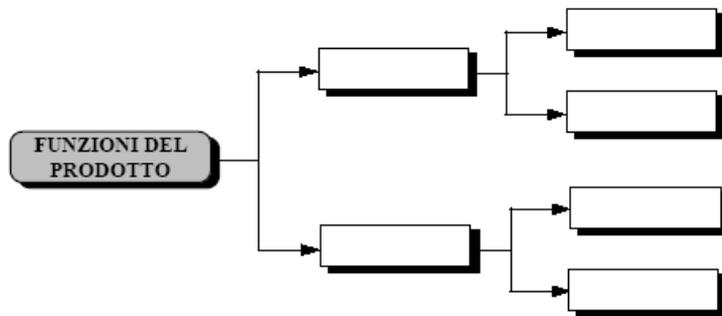


Figura 19 Processo di sviluppo per la definizione delle funzioni del prodotto

Si può procedere così alla costruzione della matrice A2 riportando (Figura 20):

- in alto le funzioni che identificano le azioni d'uso del prodotto;
- a sinistra le caratteristiche di qualità già presentate nella matrice A1;

- in basso le priorità delle funzioni sulla base delle caratteristiche di qualità;
- a destra le priorità delle caratteristiche di qualità individuate nella matrice A1.

		Funzioni del prodotto						
Caratteristiche di qualità								
Totale								
Peso delle Funzioni								
		Peso delle Caratteristiche di qualità						

Figura 20 Costruzione matrice A2

Le relazioni tra le funzioni e le caratteristiche della qualità sono rappresentate in modo simbolico. I simboli comunemente usati sono un triangolo per le relazioni deboli; un cerchio per le medie e due cerchi concentrici per quelle forti [18]. La matrice A3 consente d'analizzare le relazioni che esistono tra le caratteristiche di qualità (Figura 21) in modo da individuare quelle in contrasto tra di loro.

Caratteristiche di qualità

Figura 21 Relazioni tra le caratteristiche di qualità

Essa si presenta così strutturata (Figura 22):

- ✓ sia in alto che a sinistra vengono collocate le caratteristiche di qualità già individuate nella matrice A1;
- ✓ le relazioni fra le due variabili vengono evidenziate con la seguente simbologia: due cerchi concentrici per la forte relazione positiva, un cerchio per la media relazione positiva, cancelletto per la forte relazione negativa e crocetta per la media relazione negativa.

Caratteristiche di qualità

Figura 22 Relazioni tra le caratteristiche di qualità della matrice A1

La matrice B1 confronta le funzioni del prodotto con le esigenze del cliente (Figura 23) al fine d'individuare quelle che hanno un maggiore impatto sulla soddisfazione del cliente stesso.

Funzioni del prodotto

Esigenze del Cliente

Figura 23 Relazione esigenze del cliente-funzioni del prodotto

Più in particolare nella matrice B1 si riportano (Figura 24):

in alto le funzioni del prodotto individuate nella matrice A2;

- a sinistra le esigenze del cliente già presentate nella matrice A1;
- in basso le priorità delle funzioni svolte dal prodotto sulla base delle esigenze del cliente;
- a destra le priorità delle esigenze del cliente individuate nella matrice A1.

		Funzioni del prodotto						
Esigenze del cliente								
Totale								
Peso delle Funzioni								
		Peso delle Esigenze del cliente						

Figura 24 Matrice B1

Le relazioni fra le due variabili sono evidenziate con la seguente simbologia: un triangolo per le relazioni deboli, un cerchio per le medie e due cerchi concentrici per quelle forti. Una volta assegnato un ordine di priorità alle caratteristiche di qualità, alle funzioni e alle esigenze del cliente, si può evidenziare come ciascuna di queste variabili interagisce con le idee innovative ovvero “le diverse alternative perchè il prodotto svolga le sue funzioni” [19]. La suddetta analisi viene effettuata attraverso le matrici E1, E2 e E3 e ha come finalità l’identificazione di quelle idee innovative che meglio soddisfano il cliente. La matrice E1 mette in correlazione le idee innovative con le esigenze del cliente (Figura 25).

		Idee innovative				
Esigenze del Cliente						

Figura 25 Relazione esigenze cliente-idee innovative

Per costruirla pertanto s'individuano le idee innovative attraverso un *brainstorming* e si raccolgono con un diagramma ad albero (Figura 26).

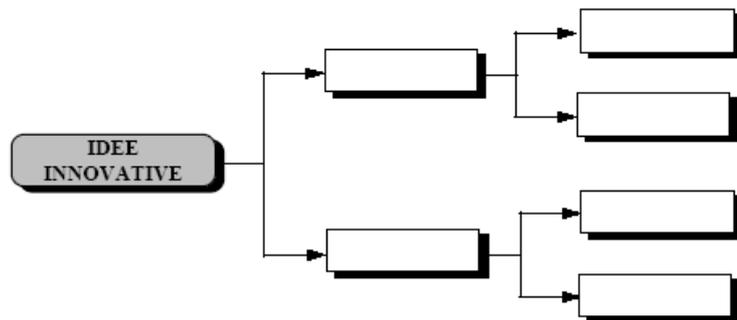


Figura 26 Processo di sviluppo per la definizione delle idee innovative

Si può procedere così alla costruzione della matrice E1 riportando (Figura 27):

- in alto le idee innovative;
- a sinistra le esigenze del cliente provenienti dalla matrice A1;

• le relazioni tra le due variabili vengono evidenziate con la seguente simbologia: più (+), meno (-) e simile (S) per indicare la capacità dell'idea innovativa di soddisfare rispettivamente meglio, meno o allo stesso modo, del prodotto di riferimento, l'esigenze del cliente.

Inseriti i simboli nella matrice, si riporta in basso il numero totale per colonna dei simboli più (+) e meno (-).

		Idee innovative							
Esigenze del cliente									
		Totale +							
		Totale -							

Figura 27 Matrice E1

La matrice E2 mette in correlazione le idee innovative con le funzioni del prodotto (Figura 28).

Le relazioni tra le due variabili vengono evidenziate con la seguente simbologia: più (+), meno (-) e simile (S) per indicare la capacità dell'idea innovativa di soddisfare rispettivamente meglio, meno o allo stesso modo, del prodotto di riferimento, le funzioni svolte dallo stesso. Inseriti i simboli nella matrice, si riporta in basso il numero totale per colonna dei simboli più (+) e meno (-). La matrice E3 mette in correlazione le idee innovative con le caratteristiche di qualità (Figura 30).

	Idee innovative				
Caratteristiche di qualità					

Figura 30 Relazione caratteristiche qualità-idee innovative

Per costruirla si trascrive (Figura 31):

- in alto la lista delle idee innovative identificate nella matrice E1;
- a sinistra le caratteristiche di qualità individuate nella matrice A1;

• le relazioni tra le due variabili vengono evidenziate con la seguente simbologia: più (+), meno (-) e simile (S) per indicare la capacità dell'idea innovativa di soddisfare rispettivamente meglio, meno o allo stesso modo, del prodotto di riferimento, le caratteristiche di qualità dello stesso.

Inseriti i simboli nella matrice, si riporta in basso il numero totale per colonna dei simboli più (+) e meno (-).

		Idee innovative					
Caratteristiche di qualità							
	Totale +						
	Totale -						

Figura 31 Matrice E3

Al fine d'ottenere una stima dei possibili problemi che il prodotto può presentare è utile inserire nel percorso le matrici D1, D2 e D3 (Figura 32):

- la matrice D1 mette in correlazione le possibili cause di fallimento con le esigenze del cliente;
- la matrice D2 confronta i problemi con le funzioni;
- la matrice D3 confronta i problemi con le caratteristiche di qualità.

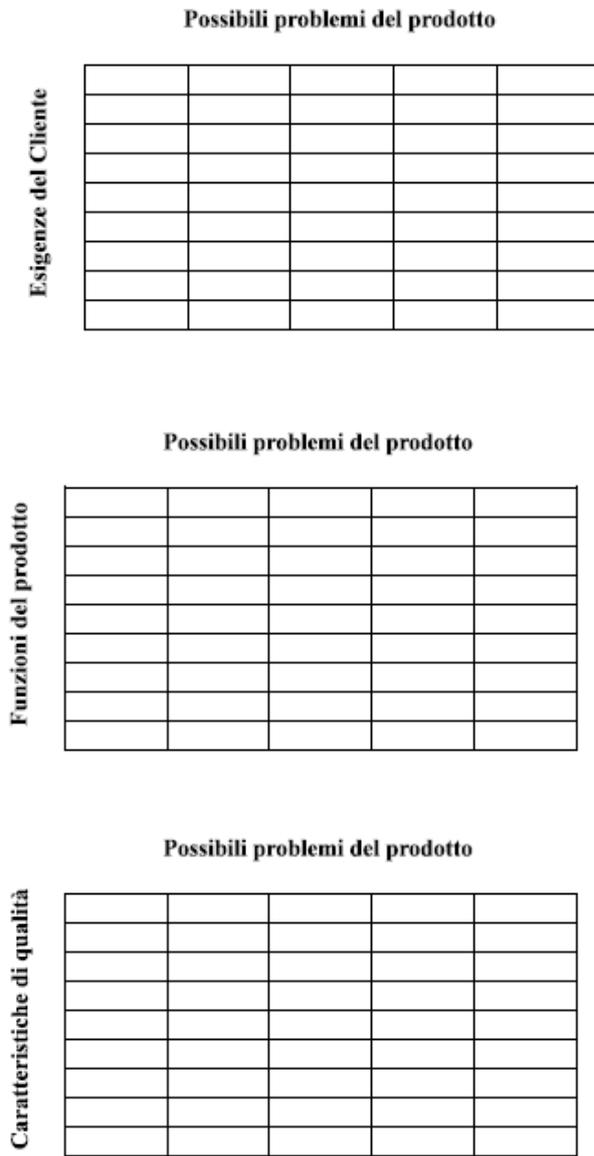


Figura 32 Matrici D1, D2, D3

Per elaborarle pertanto si definiscono le cause di fallimento e si selezionano quelle di pari livello effettuando un brainstorming e utilizzando un diagramma ad albero (Figura 33).

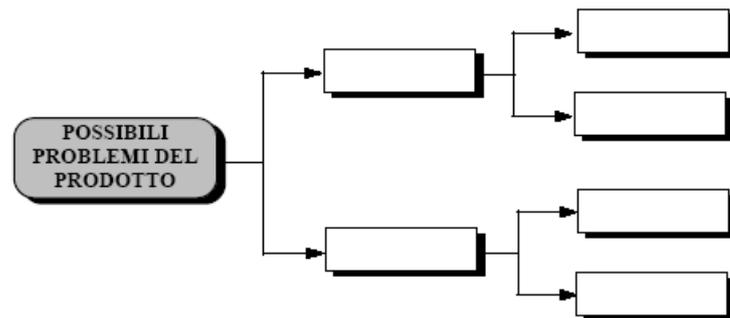


Figura 33 Processo di sviluppo per la definizione dei possibili problemi del prodotto

Si può procedere così alla costruzione delle matrici trascrivendo (Figura 34):

- in alto, per tutte e tre le matrici, i possibili problemi che possono verificarsi nell'utilizzo del prodotto;
- a sinistra, rispettivamente, per la matrice D1 le esigenze del cliente provenienti dalla matrice A1, per la matrice D2 le funzioni del prodotto provenienti dalla matrice A2 e per la matrice D3 le caratteristiche di qualità provenienti dalla matrice A1;
- in basso, per tutte e tre le matrici, le priorità dei possibili problemi;
- a destra, rispettivamente, per la matrice D1 le priorità delle esigenze del cliente individuate nella matrice A1, per la matrice D2 le priorità delle funzioni del prodotto individuate nella matrice A2 e per la matrice D3 le priorità delle caratteristiche di qualità individuate nella matrice A1;

		Possibili problemi del prodotto							
Esigenze del cliente									
Totale									
Peso dei possibili problemi del prodotto									Peso delle Esigenze del cliente

Figura 34 Relazione esigenze del cliente-possibili problemi del prodotto

Le relazioni fra le due variabili di ciascuna matrice vengono evidenziate con la seguente simbologia: un triangolo per le relazioni deboli, un cerchio per le medie e due cerchi concentrici per quelle forti [20].

		Possibili problemi del prodotto												
												Peso delle Funzioni del prodotto		
Funzioni del prodotto														
	Totale													
	Peso dei possibili problemi del prodotto													

		Possibili problemi del prodotto												
												Peso delle Caratteristiche di qualità		
Caratteristiche di qualità														
	Totale													
	Peso dei possibili problemi del prodotto													

Figura 35 Ulteriori relazioni caratteristiche qualità-possibili problemi del prodotto

La seconda invece identifica le relazioni esistenti tra le parti critiche e le azioni svolte a prevenire i possibili problemi che possono verificarsi sulle stesse (Figura 37).

		Azioni preventive					
Parti critiche del prodotto							
Totale							
Peso delle azioni preventive							
		Peso delle parti critiche del prodotto					

Figura 37 Relazione parti critiche del prodotto-azioni preventive

1.1.5. LA MATRICE DELLE MATRICI

Il percorso illustrato nelle pagine precedenti è stato individuato all'interno di un sistema di trenta matrici (Figura 38) [21]. E' importante comprendere che tale percorso non è obbligato, infatti le matrici da usare dipendono dagli obiettivi che l'azienda si pone; pertanto ogni applicazione del QFD è caratterizzata da un proprio percorso di matrici. Nella Matrice delle Matrici le colonne A,B,C,D,E e le righe 1,2,3,4 sono matrici vere e proprie, mentre la colonna F e l'ultima riga

G, anche se sono rappresentate come matrici, sono in realtà altri strumenti di qualità come:

- l'Analisi del valore (Value Analysis). La VA è un approccio sistematico che, avvalendosi di tecniche diverse, ha lo scopo d'identificare ed eliminare costi relativi a un prodotto/servizio che non migliorano la prestazione o la qualità nell'ottica del cliente. Il "valore" di un prodotto/servizio aumenta tanto quanto il costo viene ridotto senza ridurre le prestazioni e la qualità;

- la FTA (Fault Tree Analysis). La FTA è una tecnica che (come vedremo in seguito) analizza i possibili guasti di un sistema, identificandone gli effetti risultanti. E' una tecnica che seleziona una situazione indesiderabile e ricerca le cause secondo un approccio dall'alto al basso, come i rami di un albero, finché non raggiunge l'elemento principale causa del guasto;

- la FMEA (Failure Mode and Effect Analysis). La FMEA è una tecnica analitica di prevenzione che (come vedremo in seguito) si prefigge d'identificare, catalogare, pesare e introdurre azioni correttive per ogni possibile errore o guasto;

- il PDPC (Process Decision Program Chart). Il PDPC è uno strumento utile a rappresentare gli eventi e ostacoli che possono verificarsi durante lo svolgimento di un progetto unitamente alle necessarie azioni di prevenzione e/o di rimedio. Consente quindi sia di prevenire i possibili scostamenti sia di intervenire tempestivamente a fronte di scostamenti non previsti;

- il RD (Robust Design). Il RD è una tecnica con la quale (come sarà meglio comprensibile in seguito) si conferiscono doti di "robustezza" al prodotto in via di sviluppo. Per "robustezza" s'intende la capacità di un prodotto a resistere a disturbi esterni, senza modificare le proprie caratteristiche. Il RD individua innanzitutto quali possono essere gli eventi esterni realmente possibili. Sulla base degli eventi verosimili interviene, durante l'attività di progettazione e quindi senza incremento dei costi, rendendo il prodotto in via di progettazione

immune dall'occorrenza di tali eventi; sicché aumenta sensibilmente il valore del prodotto senza incidere sui costi;

- l'Analisi Fattoriale. Tecnica nota in letteratura già utilizzata in diverse applicazioni di gestione aziendale

- il Piano di Miglioramento della Progettazione. Il miglioramento della progettazione avviene tramite una serie di attività che segue una sequenza logica. Si catalogano tutti gli aspetti carenti, si stabiliscono dei criteri per assegnare delle priorità e, sulla base di tali criteri, s'identificano le "aree" che debbono essere migliorate. All'interno di queste aree è opportuno fare delle ulteriori suddivisioni in modo che s'identifichino dei problemi precisi e gestibili affinché, uno alla volta, vengano affrontati e risolti;

- la QA (Quality Assurance). La QA raccoglie tutte le azioni necessarie a rendere "affidabile" la qualità globale del sistema produttivo;

- il Deployment Attrezzature. Fase di dettaglio della pianificazione delle attrezzature da utilizzare in linea in fase di produzione

- la Carta di Pianificazione del Processo. Pianificare significa identificare ed elencare in sequenza logica le diverse fasi di sviluppo, le loro interconnessioni e i momenti di "controllo"; intendendo per fasi di sviluppo le attività di progettazione finalizzate al raggiungimento di obiettivi predefiniti (concettuali, costruttivi, ecc.) e caratterizzate dalla predisposizione di specifiche tipologie di documenti tecnici e, per momenti di controllo, le attività di riesame, di verifica e di validazione.

- La QC (Quality Control). La QC riunisce tutti gli strumenti matematici e statistici e tutti gli strumenti di supporto (hardware e software) finalizzati al miglioramento della qualità globale.

Le matrici, come si è visto, consentono di descrivere le correlazioni fra le varie variabili mediante simboli univoci qualitativi che rappresentano

l'andamento positivo o negativo e l'intensità di ciascuna correlazione evidenziando le relazioni conflittuali (negative o fortemente negative) in modo da favorire le soluzioni tempestive e i giusti compromessi. Le correlazioni positive aiutano a identificare le variabili che sono in stretta relazione, in modo da poter valutare se la modifica contemporanea di più di una variabile possa essere ottenuta con una stessa azione di progetto, evitando così duplicazioni di sforzi alle strutture organizzative dell'azienda. Le correlazioni negative rappresentano invece situazioni che probabilmente richiedono giusti compromessi: tali situazioni non devono mai essere ignorate perchè i compromessi non identificati e quelli non risolti conducono a non soddisfare le esigenze del cliente [22].

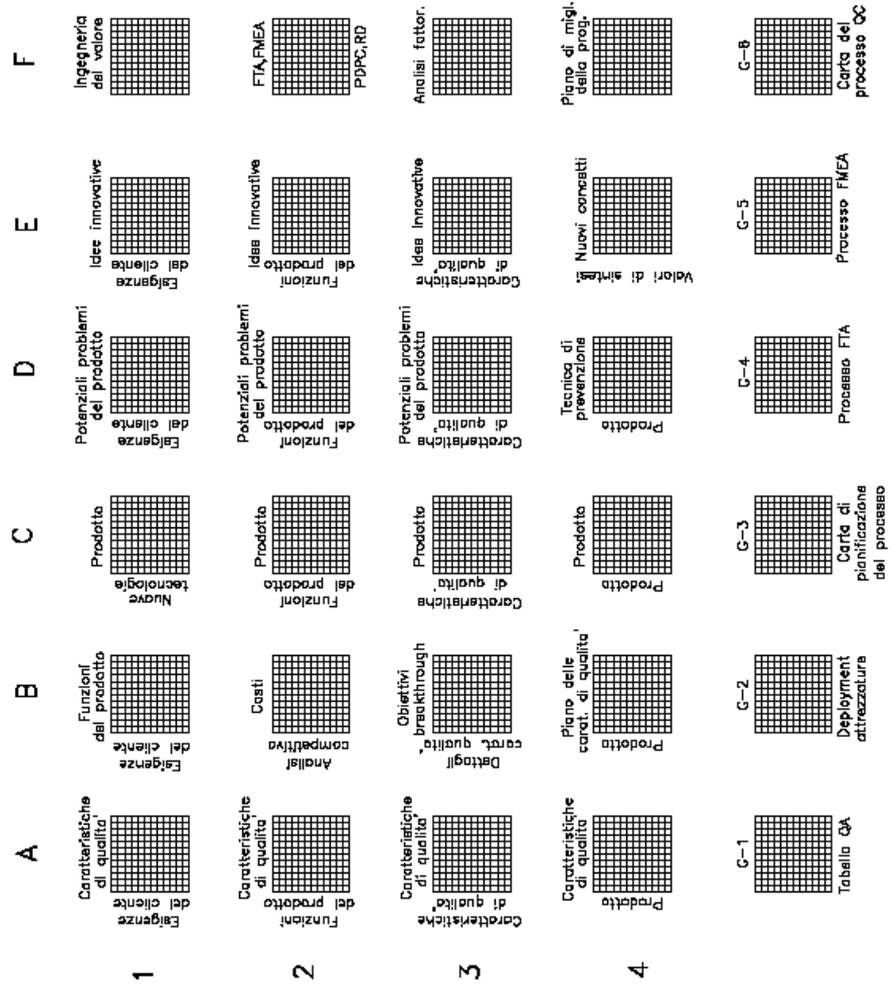


Figura 38 Matrice delle Matrici

1.1.6. IL PROCESSO SEMPLIFICATO DEL QFD

Il processo logico che sta alla base dello sviluppo di nuovi prodotti con il QFD può essere racchiuso in una matrice; per descriverlo sinteticamente infatti ci si può riferire alla matrice della qualità (una delle matrici fondamentali del QFD) denominata “casa della qualità” (questa matrice ha l’aspetto di un tetto

con tegole, di qui il nome “casa della qualità”). La struttura della casa della qualità è schematizzata nella figura 39:

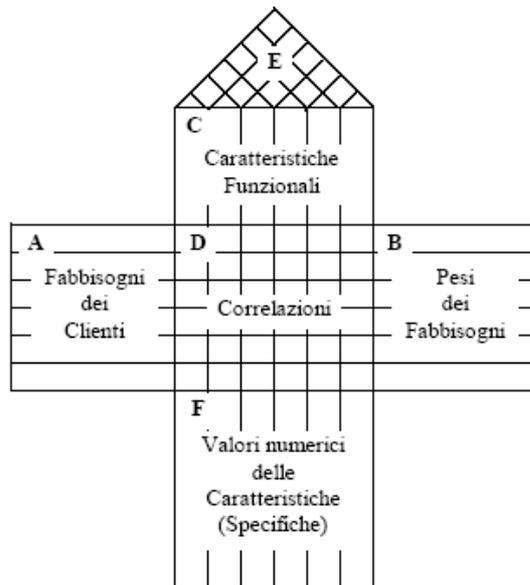


Figura 39 Matrice detta casa della qualità

Zona A: Deployment dei bisogni di qualità. In questa zona si riportano le esigenze di base del cliente relative al prodotto/servizio in esame. Esse saranno probabilmente vaghe e richiederanno ulteriori definizioni di dettaglio. In questa zona occorre riportare non solo i bisogni espressi ma anche quelli latenti e impliciti.

Zona B: Importanza dei bisogni. In questa zona vengono valutati i bisogni in base ai seguenti criteri:

- ◇ importanza di ciascun bisogno per il cliente;
- ◇ valutazione di elementi di qualità negativa (dati storici di difetti/guasti/lamentele sui prodotti attuali);

confronto “soggettivo” con la concorrenza.

Zona C: Deployment delle caratteristiche di qualità. In questa zona vengono rappresentati i requisiti tecnici necessari a rendere il prodotto finale corrispondente ai bisogni e ai desideri originari: in pratica si tratta di tradurre la qualità richiesta ed espressa nella zona A in caratteristiche di qualità misurabili cioè in caratteristiche funzionali.

Zona D: Matrice di correlazione bisogni-caratteristiche. Dopo aver completato le zone A, B e C occorre definire le relazioni tra la qualità richiesta e le caratteristiche di qualità. In pratica, occorre stabilire se esiste una relazione tra ciascun bisogno elementare e ciascuna caratteristica di qualità individuata, stabilendo inoltre l'intensità di questa relazione (forte, normale, debole); ciò viene fatto compilando la matrice nella zona D risultante dall'incrocio dei bisogni (zona A) con le caratteristiche (zona C), utilizzando una scala da 0 a 3.

Zona E: Matrice di correlazione caratteristiche-caratteristiche. In questa zona le varie caratteristiche ottenute vengono confrontate per stabilire quali e come (positivamente o negativamente) interagiscono fra loro. Il livello di correlazione sarà indicato da simboli che ogni utilizzatore del metodo può creare a suo piacimento.

Zona F: Importanza delle caratteristiche. In questa zona vengono individuati i valori numerici d'attribuire a ciascuna caratteristica di qualità. Tali valori devono essere tali da soddisfare tutti i bisogni per i quali si è visto che esiste una relazione con la caratteristica in esame; inoltre il valore d'attribuire a ciascuna caratteristica deriva anche dal confronto con i prodotti precedentemente realizzati e con quelli della concorrenza.

Con la definizione degli obiettivi termina la fase di pianificazione del prodotto e si può quindi passare alle fasi successive, nelle quali si procederà alla progettazione del prodotto ed alla definizione del processo produttivo in modo da rispondere adeguatamente alle esigenze del cliente. Più dettagliatamente, la fase successiva alla costruzione della casa della qualità è quella relativa allo

sviluppo delle parti nella quale le specifiche di progetto sono “tradotte” in specifiche di dettaglio per i sottosistemi e/o componenti critici (cioè di quelli che consentono di realizzare le funzioni essenziali per cui il prodotto è stato progettato). La determinazione delle operazioni per il processo di fabbricazione è la fase successiva, una fase che è spesso vincolata da precedenti investimenti di capitale in impianti e macchinari. All’interno di questi vincoli vengono quindi determinate le operazioni produttive più idonee per la definizione delle caratteristiche desiderate dei componenti. Le operazioni di fabbricazione così identificate sono quindi tradotte in specifiche di produzione che il personale dovrà utilizzare per ottenere in concreto le caratteristiche qualitative richieste. Tali specifiche includono, tra l’altro, i piani d’ispezione sui materiali approvvigionati, gli elementi per la definizione delle attività da monitorare mediante Controllo Statistico di Processo (SPC), i programmi di manutenzione preventiva (Total Productivity Maintenance-TPM) dei macchinari, l’istruzione per il personale operativo, e quindi l’intero insieme delle procedure utilizzate per la fabbricazione dei prodotti. La metodologia da utilizzare nelle fasi soprascritte è simile a quella vista per la matrice della casa della qualità, secondo lo schema di deployment in cascata riportato nella figura 40.

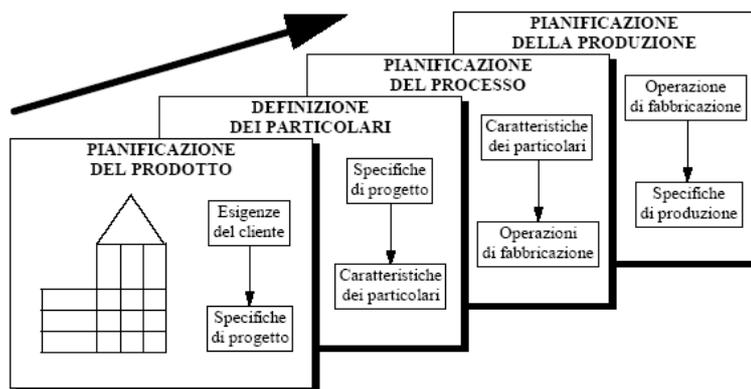


Figura 40 Costruzione in cascata della matrice della casa della qualità

1.1.7. LE APPLICAZIONI DEL QFD

Il QFD consiste di due componenti:

1. Una documentazione redatta secondo schemi predefiniti e chiari che guida il lavoro e che può essere utilizzata in tutte le fasi dello sviluppo del prodotto e della successiva produzione [23].

2. Uno stile di comportamento organizzativo che facilita una risposta in sintonia con le esigenze del cliente; non si tratta più infatti di dialogare solamente con chi s'occupa della fase successiva, ma tutti portano il loro contributo fin dall'inizio e in ogni momento dello sviluppo del prodotto tenendo conto delle esigenze del cliente cioè il lavoro di tutti si basa sulla filosofia del miglioramento continuo. Per sviluppare un prodotto con il QFD vengono quindi costituiti dei gruppi di lavoro multidisciplinari formati da 5-7 persone, i cui leader oltre ad avere una buona conoscenza della metodologia dovrebbero essere dei coordinatori esperti senza però risultare dominatori (la metodologia infatti è orientata al consenso). Il fatto che il QFD richieda un lavoro di gruppo stimola tutte le funzioni aziendali quali:

- Marketing
- Progettazione
- Qualità
- Assistenza tecnica
- Produzione
- Fornitori

ad intervenire nel processo di progettazione. I progetti più importanti richiederanno molte ore di riunioni per coordinare le attività ed aggiornare le matrici. I membri del gruppo di lavoro spenderanno pure molto tempo fuori dalle riunioni per assolvere i rispettivi incarichi. La maggior parte di quello che faranno comunque rientrerà nelle loro attività normali, guidate del lavoro di pianificazione del QFD.

Ci sono molti punti chiave che i membri del gruppo di lavoro del QFD dovrebbero tener presente. Il processo può sembrare facile ma richiede tempo. Molti dei dati possono sembrare ovvi dopo che sono stati scritti. La documentazione può sembrare l'obiettivo; invece essa è un mezzo per raggiungere l'obiettivo. L'obiettivo infatti è identificare e diffondere la voce del cliente. Selezionare infine un progetto, che sia governabile e supportato dalla direzione e dai colleghi, aiuterà ad ottenere un buon avviamento del QFD. E' meglio incominciare con un progetto che sia abbastanza contenuto in modo che possa essere portato sicuramente a termine: è meglio un successo su piccola scala che un fallimento su grande scala. Date le caratteristiche specifiche del QFD risulta evidente che utilizzare questa metodologia presuppone un cambiamento della cultura dell'azienda; questo cambiamento però simultaneamente deve garantire la continuità allo scopo d'utilizzare i risultati conseguiti in passato.

Cosa cambiare e come ottenere il migliore equilibrio tra continuità e cambiamento? I seguenti cambiamenti devono verificarsi nelle aziende affinché s'abbia una maggiore competitività dei prodotti.

- Si devono focalizzare tutte le attività sulla "voce del cliente" piuttosto che su quella dell'esperto, del tecnico o del direttore. Quest'idea è venuta alla luce per la prima volta nel maggio 1983 quando il dr. Ischikawa è stato alla Ford Motor Co. Il dr. Ischikawa manifestò il proprio timore che la Ford e le altre aziende statunitensi si concentrassero eccessivamente sul QFD in senso organizzativo verticale anziché orizzontale. Suggerì, addirittura, che la componente orizzontale avrebbe dovuto essere più forte di quella verticale per facilitare la diffusione della voce del cliente. Questo concetto è illustrato in figura 41.

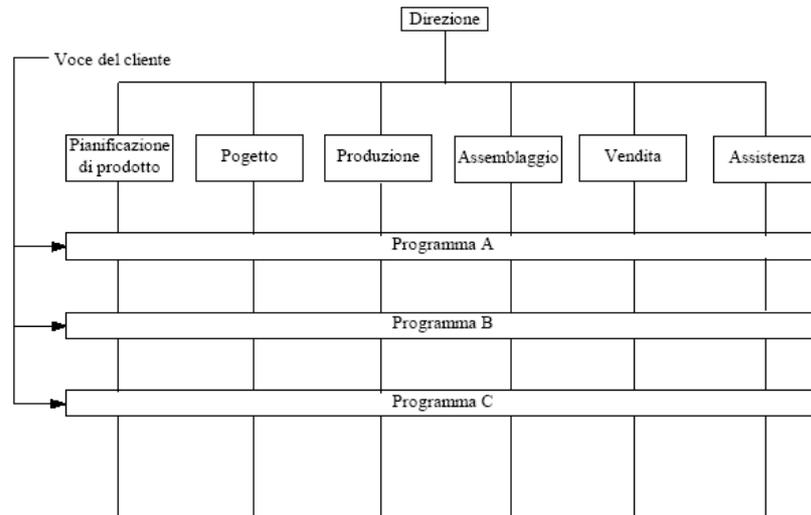


Figura 41 Relazioni attività industriali-voci del cliente

Le aziende quindi devono cambiare dalla qualità orientata all'interno (specifiche ed esperti) alla qualità orientata all'esterno (la voce del cliente) [24].

- Si deve pensare alla qualità in modo diverso. La qualità tradizionalmente è intesa come rispetto delle specifiche e il suo miglioramento è associato alle attività di soluzione dei problemi (*problem solving*). Ogni prodotto tuttavia ha un "valore ottimale" per funzionamento, adeguatezza all'uso ed aspetto. Questo "valore ottimale" od obiettivo rappresenta la "voce del cliente" che spesso è diversa da quella del tecnico (Figura 42). Si deve promuovere quindi una qualità orientata all'obiettivo in tutte le funzioni.



Figura 42 Diagramma della voce del cliente

- Si devono adottare “strumenti orizzontali” come il QFD allo scopo di favorire l’integrazione e rendere prioritaria l’applicazione della tecnologia della qualità in tutte le funzioni.
- Si deve addestrare il personale per comprendere e applicare il QFD. Questo è probabilmente il cambiamento più difficile e inizialmente più costoso che si deve intraprendere. L’educazione e l’addestramento più efficaci sono ottenuti per il 80% con le applicazioni e per il 20% con le lezioni.

1.2. IL CASO DEI CUSCINETTI VOLVENTI

1.2.1. LAVORARE CON I CLIENTI

La metodologia precedentemente descritta è stata implementata presso un’azienda manifatturiera che opera nel settore della produzione di cuscinetti volventi in materiale ceramico. La proprietà, in cerca di un mercato ampio e solido, in virtù del fatto che l’azienda non ha ancora iniziato il proprio ciclo produttivo, si è posta l’esigenza della corretta definizione delle esigenze dei propri futuri clienti. In quest’ottica l’applicazione del QFD è sembrata un ottimo approccio per migliorare la definizione delle esigenze dei clienti in fase di progettazione. Infatti il rischio, di norma associato ai programmi industriali, è

indotto non tanto dalla possibilità d'insuccesso tecnico, bensì dall'eventualità d'ottenere un risultato che, sebbene scientificamente valido, risulti di limitato valore per il cliente. La metodologia del QFD, come precedentemente descritto, consente di pilotare efficacemente tutte le variabili che concorrono nel processo di generazione del "valore" del prodotto in modo da ottenere sia il gradimento del cliente che il contenimento dei costi. Per ottenere effetti positivi dall'applicazione del QFD, è opportuno che questi sia complementare con la struttura organizzativa e funzionale dell'azienda. Le modalità operative dell'azienda richiedono che, prima d'impostare una qualsiasi progettazione, ne siano stati identificati, concordati con il cliente e formalizzati gli output. Una volta definiti gli output percepiti positivamente dal cliente e verificato che a tali output sia associato un rischio tecnico riconosciuto come sostenibile, la progettazione ha inizio [25]. Il grado di successo di ciascun progetto e l'idoneità dei risultati ottenuti sono valutati in base sia alla conformità con gli output inizialmente definiti, che all'efficacia del trasferimento dei medesimi presso il cliente. La metodologia del QFD è molto flessibile e consente d'analizzare con oggettività ed efficacia qualsiasi tipo d'esigenza del cliente. In particolare essa permette d'individuare i reali "che cosa" del cliente stesso e finalizzare l'attività tecnica sugli output da lui più richiesti. Diventa così possibile stabilire su base oggettiva le priorità delle caratteristiche degli output; di conseguenza le unità operative che concorrono al progetto possono dapprima identificare le scelte tecniche per il conseguimento di ciascun output e quindi valutare i fabbisogni e programmare le attività. Questa procedura d'impostazione di un progetto permette di raggiungere il livello programmato di "valore" in ciascun output, minimizzando il rischio. Per realizzare però il vantaggio competitivo derivante l'attuazione di tale procedura è indispensabile il concorso di determinati fattori organizzativi e strutturali. Primo fra questi è la disponibilità di una struttura preparata ad operare in modo interfunzionale sin dal momento in cui vengono concepiti gli output: in tale fase, così come in tutte le successive fasi del progetto, il Top Management lavora in stretta collaborazione e in modo interattivo con le unità operative coinvolte. Gli specialisti di tali unità operative devono garantire, da parte di ciascuno di loro, la massima disponibilità propositiva al fine d'annullare le potenziali cause di conflittualità e stimolare, per

contro, la creatività e la sinergia del team. Mediante l'impiego del QFD l'azienda, al termine del presente studio, ha messo a punto uno strumento che le consente di partecipare, con i propri clienti (interni ed esterni), allo sviluppo flessibile dei prodotti con conseguente riduzione di tempi e costi [26].

1.2.2. IL PRODOTTO E LE SUE CARATTERISTICHE

Il mercato dei cuscinetti volventi è estremamente articolato in segmenti definiti dalle diverse funzioni d'uso del prodotto e dalle diverse tipologie d'utilizzatori. All'interno di un contesto così variegato l'azienda ha posto il focus sui cuscinetti volventi in materiale ceramico, perchè rispetto a quelli tradizionali consentono di avere i seguenti vantaggi:

- Maggiore sicurezza di funzionamento grazie ad una protezione ottimale contro l'elettro-corrosione
- Maggiore economicità rispetto ad es. all'isolamento degli alloggiamenti o degli alberi
- Intercambiabilità: misure principali e caratteristiche tecniche come nei cuscinetti convenzionali
- Nessun pericolo di danneggiamento del rivestimento in caso di utilizzo corretto.

Il cuscinetto proposto dall'azienda impiega come elemento costitutivo un materiale ossido-ceramico. Si tratta di una struttura che presenta le seguenti caratteristiche:

- resistenza alle alte temperature;
- basso peso specifico;
- resistenza agli attacchi chimici e al passaggio di corrente elettrica;
- alta porosità.

1.2.3. PASSI DELLA METODOLOGIA

Per individuare i fabbisogni (Figura 43) occorre operare in team: si generano dei gruppi di 4-5 persone rappresentanti le funzioni principali dell'azienda (la funzione commerciale, tecnica, produzione, qualità, acquisti). Ogni gruppo deve effettuare una descrizione verbale di quali sono i bisogni che il cliente s'aspetta di soddisfare attraverso l'acquisto del prodotto dell'azienda. Si concede del tempo e si fanno lavorare i gruppi separatamente, dopodichè si mettono assieme i loro lavori cercando di convergere ad una lista consolidata e definita di fabbisogni. Una volta che l'elenco è condiviso si ricreano i gruppi e si dà ad ognuno d'essi 1000 punti da ripartire su ciascun fabbisogno. Può accadere che risulti difficile giungere ad una convergenza, in genere questo è dovuto ad un'insufficiente segmentazione del mercato, su segmenti diversi infatti i fabbisogni sono percepiti in maniera diversa.

N.	FABBISOGNI CLIENTE	ordine	peso
A	POTERE VOLVENTE	1	217
B	CAPACITA' DI ROTAZIONE	2	174
C	TEMPO DI VITA	1	217
D	SPECIFICA DIMENSIONALE DI ACCOPPIAMENTO	4	88
E	PRODOTTO CERTIFICATO	2	174
F	PREZZO COMPETITIVO	3	130
	TOTALE PESI		1000

Figura 43 Elenco e valutazione dei fabbisogni del cliente

Successivamente il metodo del QFD si preoccupa della traduzione completa ed adeguata dei bisogni prima rilevati in caratteristiche funzionali (misurabili) in modo da realizzare una tabella (Figura 44) nella quale vengono messe in relazione le caratteristiche funzionali con le esigenze elementari del cliente; per questo si stabiliscono convenzionalmente quattro gradi di correlazione mediante opportuni coefficienti: 3=forte, 2=media, 1=debole. Se non ci sono relazioni, i corrispondenti incroci nella matrice vengono lasciati vuoti. I coefficienti di correlazione e l'attribuzione delle priorità ai requisiti ha permesso di stabilire

una graduatoria dell'importanza associata ad ogni caratteristica. Il peso di ciascuna caratteristica è stato determinato avvalendosi della seguente relazione:

$$w_1 = \frac{d_1}{r_{11} + r_{12} + \dots} r_{11} + \frac{d_2}{r_{21} + r_{22} + \dots} r_{21} + \dots$$
$$w_2 = \frac{d_1}{r_{11} + r_{12} + \dots} r_{12} + \frac{d_2}{r_{21} + r_{22} + \dots} r_{22} + \dots$$

essendo:

- w_j peso assoluto della j-esima caratteristica;
- d_i il grado d'importanza del requisito i-esimo;
- r_{ij} la relazione quantificata tra i-esimo requisito e j-esimo caratteristica.

	peso	117	168	186	170	320	39
	ordine	5	4	2	3	1	6
grado di correlazione fra fabbisogni e caratteristiche: 3 FORTE 2 MEDIO 1 DEBOLE	CARATTERISTICHE FUNZIONALI	GRADO DI ACCOPPIAMENTO	RESISTENZA TERMICA	RESISTENZA MECCANICA	DIMENSIONI	CERTIFICAZIONE	COSTO MATERIE PRIME
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	FABBISOGNI CLIENTE	peso					
	POTERE VOLVENTE	217	3	2	2	1	2
	CAPACITA' DI ROTAZIONE	174	3	1	2	2	2
	TEMPO DI VITA	217	3	3		2	
SPECIFICA DIMENSIONALE DI ACCOPPIAMENTO	88				3		
PRODOTTO CERTIFICATO	174					3	
PREZZO COMPETITIVO	130		2	2	2	1	3
	1000						
SPECIFICHE FUNZIONALI		0.01<p<0.1	1600 °C	Vita Media=1 ogni 2 colate	50-200mmx50-200mmx2-23mm	on	prezzo competitivo

Figura 44 Diagramma della voce del cliente

In talune circostanze è importante, più che stabilire la priorità delle caratteristiche funzionali di un prodotto, definire quale sia l'insieme minimo di caratteristiche in grado di "interagire" con tutti i requisiti del cliente. La definizione delle priorità così come viene effettuata presenta delle controindicazioni in quanto non tiene in conto eventuali "dipendenze" tra le caratteristiche funzionali. Si possono verificare così delle situazioni in cui nelle prime posizioni della graduatoria compaiono caratteristiche tra loro significativamente correlate, ma tali da influenzare solo una parte dei requisiti espressi dal cliente. Può invece risultare importante per il progettista individuare il più piccolo insieme di caratteristiche su cui focalizzare l'attenzione per dare una prima risposta globale a tutti i fabbisogni del cliente, senza essere influenzato dalla dipendenza tra caratteristiche. L'informazione sul minimo

numero di caratteristiche da tenere sotto controllo può rivelarsi d'estrema utilità quando si desidera “gerarchizzare” l’attenzione posta alle singole fasi di sviluppo di un progetto. Ciò ovviamente non vuol dire che alcune caratteristiche possano essere trascurate nell’intero sviluppo del progetto, ma semplicemente che da un punto di vista organizzativo il progetto può essere strutturato in modo da dare la precedenza alle caratteristiche la cui soddisfazione ha un’influenza immediata sui bisogni del cliente. Nel caso specifico (Figura 44) l’insieme minimo di colonne in grado di coprire tutti i requisiti del cliente è:

C_5, C_4

Come si può osservare la lista delle caratteristiche non coincide con quella individuata con il metodo di gerarchizzazione:

C_5, C_3

La non perfetta coincidenza nell’ordinamento delle caratteristiche più “importanti” è da attribuire proprio agli effetti di correlazione. Sulla riga inferiore poi della matrice (Figura 44) è considerata una terza zona, l’asse delle specifiche funzionali. Queste ultime rappresentano la “misura” delle caratteristiche e sono tenute separate da esse, perchè quando vengono determinate le caratteristiche, i valori delle specifiche non sono noti. Questi valori vengono determinati attraverso successive analisi. Le specifiche forniscono sia un mezzo per garantire che le esigenze siano soddisfatte, sia una dichiarazione degli obiettivi (target) che s'intendono raggiungere durante lo sviluppo. Così essi costituiscono dei valori di riferimento specifici per guidare il progetto successivo e per disporre di un mezzo d'accertamento dei progressi conseguiti.

1.2.4. UN METODO DI SUPPORTO ALLA GENERAZIONE DELLA TABELLA DI CORRELAZIONE

Le caratteristiche funzionali sono ancora materia per la realizzazione di un'ulteriore tabella (Figura 45) nella quale s'evidenziano le correlazioni tra le stesse utilizzando opportuni coefficienti.

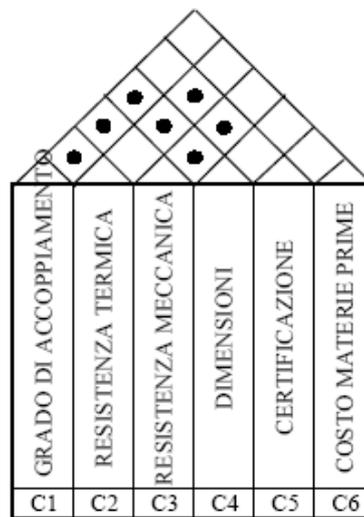


Figura 45 Correlazioni ulteriori tra caratteristiche di qualità

L'attività di compilazione può essere automatizzata in modo che sia più agevole, delegando l'intervento del progettista alla sola fase in cui si deve stabilire il "senso" delle correlazioni. Prima di procedere è necessario definire cosa s'intenda per correlazione e per "senso" delle correlazioni. Nell'ambito del QFD due caratteristiche funzionali si definiscono correlate se variazioni dei valori dell'una determinano variazioni nei valori dell'altra e viceversa; il "senso" definisce, invece, il segno di tali correlazioni (positivo, se a variazioni "positive" dell'una corrispondono variazioni "positive" dell'altra, "negativo" se altrimenti). Osservando il contenuto di una generica matrice delle relazioni, si nota che, in molti casi, caratteristiche tra loro correlate influenzano gli stessi requisiti del

cliente. Si può dunque prendere spunto da questo fatto per costruire uno strumento parzialmente automatico (da affiancare all'analisi qualitativa del progettista) per la definizione indiretta delle correlazioni tra caratteristiche funzionali. Infatti, se la caratteristica i-esima influenza i requisiti u-esimo, v-esimo, ecc.. è probabile che anche la caratteristica j-esima, ad essa correlata, influenzi gli stessi requisiti. Però, se la dipendenza tra caratteristiche, indotta dall'azione sugli stessi requisiti, può implicare l'esistenza di una correlazione, non è vero il viceversa. Può infatti esistere una correlazione tra caratteristiche senza che questa si manifesti in forma indotta sui requisiti nella matrice delle relazioni. Ne segue che il metodo qui proposto, indagando sulla dipendenza indotta dai requisiti, è solo parzialmente risolutorio in quanto può evidenziare solo una parte delle correlazioni presenti. Essendo la presenza di una dipendenza tra caratteristiche indotta dai requisiti condizione necessaria, ma non sufficiente, per affermare che due caratteristiche sono correlate, è necessario che sia il progettista a stabilirne la sufficienza. Il progettista è così chiamato a validare le "proposte" di correlazione fornite dal metodo. Per determinare le dipendenze (indotte dai requisiti) tra caratteristiche funzionali si consideri la matrice delle relazioni R:

$$R = \begin{vmatrix} 3 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 3 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ & 3 & 3 & & 2 \\ & & & 3 & \\ & & & & 3 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 3 \end{vmatrix}$$

e l'insieme dei vettori colonna b_i (ciascuno associato ad una ben definita caratteristica funzionale espressa nella matrice delle relazioni R).

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Gli elementi dei vettori b_i ($\forall i=1,\dots,n$) sono stati individuati a partire dalla matrice R nel modo seguente:

$$\forall i,j \text{ se } r_{ij} = \text{“3” o “2” o “1”}, \text{ allora } b_{ij} = 1$$

Dalla matrice R si passa dunque ad una matrice binaria B, le cui colonne b_i sono successivamente normalizzate (con norma unitaria), per facilitarne l'interpretazione, così da ottenere un nuovo insieme di vettori v_i ($\forall i=1,\dots,n$) che definiscono una nuova matrice N.

$$N = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{5}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{5}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{\sqrt{5}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{5}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{5}} & 1 \end{pmatrix}$$

Per rappresentare gli effetti della dipendenza tra la caratteristica i-esima e la caratteristica j-esima si introduce la notazione q_{ij} :

$$q_{ij} = v_i \cdot v_j = \cos(v_i, v_j) \quad \forall i, j=1,\dots,n$$

Effettuando il calcolo di q_{ij} per tutte le coppie di vettori della matrice N si può determinare la matrice delle dipendenze delle caratteristiche Q:

$$Q = N * N^T$$

Q è una matrice simmetrica con $q_{ij} = 1 \quad \forall i=1, \dots, n$

La matrice Q esprime il grado di dipendenza indotta tra caratteristiche funzionali con riferimento al modo con cui queste “influenzano” i requisiti del cliente. E’ interessante osservare che, qualora fosse sfuggito, la determinazione della matrice Q consente anche di evidenziare la presenza di colonne e/o righe prive di relazioni rispettivamente con altre righe e/o colonne della matrice stessa, segnalata dalla comparsa di alcuni “zeri” lungo la diagonale principale della matrice. Per il “riempimento” del tetto della casa della qualità le informazioni contenute in Q vengono confrontate con una soglia predefinita k (con $0 \leq k \leq 1$); $\forall i, j$ se $q_{ij} > k$ si ammette l’esistenza di una potenziale correlazione tra le caratteristiche i-esima e j-esima, in caso contrario questa viene supposta inesistente. La matrice Q ottenuta è la seguente:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	0,71	0,71	0,71	0,63	0
C2	0,71	1	1	0,75	0,89	0,5
C3	0,71	1	1	0,75	0,89	0,5
C4	0,71	0,75	0,75	1	0,67	0,5
C5	0,63	0,89	0,89	0,67	1	0,45
C6	0	0,5	0,5	0,5	0,45	1

Come rimane confermato dalla tabella si osserva che la matrice Q è effettivamente di tipo simmetrico. Sempre nella tabella sono evidenziati i valori di $q_{ij} > k$ avendo fissato, nel caso specifico, un valore di soglia $k=0.7$.

Le dipendenze individuate per $k=0.7$ sono:

$$\{C_1, C_2\}; \{C_1, C_3\}; \{C_1, C_4\}; \{C_2, C_4\}; \{C_2, C_5\}; \{C_3, C_4\}; \{C_3, C_5\}$$

essendo C_j con $j=1, \dots, 6$ le caratteristiche funzionali.

Una volta individuate e segnalate le coppie di caratteristiche il cui grado di dipendenza indotta è superiore alla soglia k , occorre valutare la reale consistenza della dipendenza e tradurla in una correlazione stabilendone il “senso” positivo o negativo. Così nel caso specifico, tutte le dipendenze vengono tradotte in correlazioni ad eccezione della coppia $\{C_1, C_3\}$, che viene scartata in quanto priva dei necessari requisiti. All’insieme delle dipendenze indotte infine vanno aggiunte le correlazioni semantiche, definite sulla base di ragionamenti di tipo qualitativo. L’insieme complessivo delle correlazioni individuate definisce il tetto della casa della qualità (Figura 46). Il metodo proposto consente di semplificare le attività di analisi delle informazioni contenute nelle tabelle QFD; tuttavia non entra nel merito dell’opportunità di inserire altre caratteristiche funzionali; se queste sono esaustive del problema in oggetto oppure se alcune di queste sono ridondanti. A tali questioni può fornire una risposta adeguata solo il progettista. Il metodo proposto nasce pertanto per essere utilizzato in maniera interattiva.

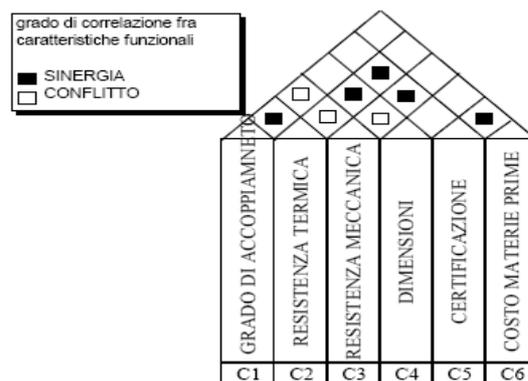


Figura 46 Casa della qualità

Infine è interessante osservare come lo schema di valutazione della dipendenza tra caratteristiche funzionali può essere riproposto per la valutazione di eventuali correlazioni tra i requisiti espressi dal cliente. Applicando il metodo proposto, la matrice delle relazioni R viene trasformata prima nella matrice binaria B e successivamente nella matrice con vettori righe normalizzati N (Figura 47).

$$R = \begin{vmatrix} 3 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 3 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ & 3 & 3 & & 2 \\ & & & 3 & \\ & & & & 3 \\ & 2 & 2 & 2 & 1 & 3 \end{vmatrix}$$

$$B = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$N = \begin{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} & \frac{1}{\sqrt{5}} \end{vmatrix}$$

Figura 47 Matrice N

A questo punto si procede alla determinazione della matrice delle dipendenze Q:

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	1	1	0,77	0,45	0,45	0,8
F2	1	1	0,77	0,45	0,45	0,8
Q= F3	0,77	0,77	1	0	0,58	0,77
F4	0,45	0,45	0	1	0	0,45
F5	0,45	0,45	0,58	0	1	0,45
F6	0,8	0,8	0,77	0,45	0,45	1

Nella matrice Q il generico elemento q_{ij} fornisce l'indicazione del grado di dipendenza tra i fabbisogni i -esimo e j -esimo rilevato a partire dalla matrice R. Nella tabella sono evidenziati i valori $q_{ij} > k$ avendo fissato, nel caso specifico, un valore di soglia $k=0.7$.

Le dipendenze individuate per $k=0.7$ sono:

$$\{F_1, F_3\}; \{F_1, F_6\}; \{F_2, F_3\}; \{F_2, F_6\}; \{F_3, F_6\}$$

essendo F_i con $i=1, \dots, 6$ i fabbisogni cliente.

Una volta completata la casa della Qualità, s'avvia un'analisi relativa al posizionamento competitivo del prodotto allo studio a confronto con il leader del proprio settore cioè s'effettua un *benchmarking* (il *benchmarking* è infatti una tecnica molto utilizzata anche dalle aziende statunitensi per verificare le proprie prestazioni confrontandole con quelle dei concorrenti). Di sicura utilità è analizzare le problematiche di sviluppo di un prodotto di *benchmarking*. Cercando di schematizzare e sottolineando che esistono eccezioni ai comportamenti che verranno descritti, i principali ostacoli al successo del *benchmarking* sono:

- diffidenza iniziale: è sempre difficile superare la diffidenza iniziale del management che guarda con sospetto uno strumento innovativo che gli chiede d'analizzare e confrontare le proprie prestazioni. Questo primo ostacolo può

essere superato fornendo una garanzia in termini di riservatezza e non divulgazione dei dati;

- mancanza di dati: spesso un ostacolo rilevante all'attività di *benchmarking* è la mancanza di dati. Per superarlo bisogna effettuare un'analisi preventiva degli indicatori che meglio possono rappresentare un compromesso tra le esigenze di significatività dei dati raccolti e di disponibilità dei medesimi in ambito aziendale. Proseguendo l'analisi nei confronti del *benchmarking* è necessario evidenziare non solo gli ostacoli che si possono presentare ma anche i principali limiti e vantaggi di tale strumento. I limiti possono essere sintetizzati nei seguenti punti:

- il tempo certamente non favorisce questa tecnica, la fretta infatti rischia di vanificare sforzi e risorse;

- il benchmarking deve essere tenuto lontano dai problemi di tutti i giorni che possono pregiudicare la riuscita;

- è fondamentale divulgare correttamente quanto è stato evidenziato dall'analisi di benchmarking in modo da ottenere accettazione e supporto dalla propria organizzazione.

I principali vantaggi invece sono:

- si realizzerà una maggiore conoscenza della concorrenza, favorendo comportamenti attivi anziché reattivi;

- saranno individuati gli indicatori più appropriati per valutare le prestazioni aziendali;

- l'opportunità di confrontarsi con la concorrenza si genererà una maggiore comprensione di quali siano le aree di miglioramento rispetto alle quali è necessario operare un cambiamento.

Il posizionamento competitivo ha avuto inizio valutando i ranges delle specifiche funzionali.

CARATTERISTICHE FUNZIONALI	GRADO DI ACCOPPIAMENTO	RESISTENZA TERMICA	RESISTENZA MECCANICA	DIMENSIONI		
UNITA'	II	°C	n° utilizzi	mm		
RANGE SPECIFICHE FUNZIONALI	1	730-750	1	larghezza	lunghezza	altezza
	2	750-760	2	10-33	10-25	2-3
	5	760-780		33-50	25-33	3-12
	10	780-800		50-66	33-50	12-15
	15	800-1000		66-70	50-66	15-20
	18	1000-1050		70-75	66-7	20-22
		1050-1100		75-80	70-75	22-23
		1100-1150		80-81	75-80	
		1150-1200		81-90	80-81	
		1200-1250		90-99	81-90	
		1250-1300		99-100	90-99	
		1300-1320			99-100	
		1320-1360			100-114	
		1360-1380			114-200	
		1380-1400				
		1400-1440				
		1440-1460				
	1460-1500					

Si passa poi allo schema che permette d'assegnare il valore ad ogni progetto in esame.

TABELLA VALUTAZIONE PROGETTI									
apporre il valore 1 ove approp.					% COSTRUTT. MOTORI SODDISFATTI				
Peso	C.F.	R.S.F.	A	B	B				
					A	B	A	B	
117	C1	1	1	1	83	33	100	70	
		2	1	1					
		5	1						
		10	1						
		15	1						
		18							
168	C2	730-750	1	1	100	100	100	100	
		750-760	1	1					
		760-780	1	1					
		780-800	1	1					
		800-1000	1	1					
		1000-1050	1	1					
		1050-1100	1	1					
		1100-1150	1	1					
		1150-1200	1	1					
		1200-1250	1	1					
		1250-1300	1	1					
		1300-1320	1	1					
		1320-1360	1	1					
		1360-1380	1	1					
		1380-1400	1	1					
1400-1440	1	1							
1440-1460	1	1							
1460-1500	1	1							
186	C3	1			100	100	100	100	
		2	1	1					

apportare il valore 1 ove appropriato					% COSTRUTT. MOTORI SODDISFATTI			
Peso	C.F.	R.S.F.	A	B	Benzina		Diesel	
					A	B	A	B
170	C4	larghezza			83	83	80	70
		10-33						
		33-50						
		50-66	1	1				
		66-70	1	1				
		70-75	1	1				
		75-80	1	1				
		80-81	1	1				
		81-90	1	1				
		90-99	1	1				
		99-100	1	1				
		lunghezza						
		10-25						
		25-33						
		33-50						
		50-66	1	1				
		66-70	1	1				
		70-75	1	1				
		75-80	1	1				
		80-81	1	1				
		81-90	1	1				
		90-99	1	1				
		99-100	1	1				
		100-114	1	1				
		114-200	1					
		altezza						
		2-3	1	1				
3-12	1	1						
12-15	1	1						
15-20	1	1						
20-22	1	1						
22-23	1	1						
320	C5	on off	1 1	1 1	67	100	90	100

Costruttori motori benzina

CODICE AZIENDALE	grado di accoppiamento	temperatura di utilizzo	vita media	dimensioni			certificazione	prezzo unitario
				larghezza	lunghezza	altezza		
unità	IT	°C	n° utilizzi	mm				euro
1	1	1320-1460	1	33-99	33-99	2-23	on	600
2	2	1380-1400	1	66-80	66-80	2-23	on	1000
3	5	1300	1	50-75	50-75	2-23	on	1150-1700
4	10	1360-1440	2	50-81	50-114	12-22	off	200-2000
5	15	1500	1	81	81	15	off	1270
6	18	1500	1	50	50-75	22	on	750

Costruttori motori diesel

CODICE AZIENDALE	grado di accoppiamento	temperatura di utilizzo	vita media	dimensioni			certificazione	prezzo unitario
				larghezza	lunghezza	altezza		
unità	IT	°C	n° utilizzi	mm				euro
1	1	1000	1	50	200	2-23	on	1400
2	2	1250	1	50	50	23	on	700-1250
3	5	800-1300	1	50	75-100	15-20	on	600
4	10	750-1000	1	10	10	2-23	off	1200-1400
5	15	1000	1	70-90	70-90	2-3	on	1500
6	18	1050-1150	1	50	25-75	2-23	on	1000-1400
7	18	1200-1300	1	80	70	15	on	3000
8	18	1100-1300	1	50-100	50-100	2-23	on	800-1200
9	18	730-780	1	75-100	75-100	20	on	1800
10	18	760	1	50	50	20	on	1000

Moltiplicando infatti il peso di ciascuna caratteristica funzionale con la corrispondente percentuale dei clienti soddisfatti per settore rispettivamente dal progetto A dell'azienda in oggetto e dal progetto B del competitor (MAGNETI) e, sommando, si ottiene il valore complessivo di ciascun progetto in termini di funzioni svolte. E' importante osservare che i ranges delle specifiche funzionali e le percentuali dei clienti soddisfatti per settore sono stati forniti da un campione di riferimento esterno comprendente aziende che risultano leader nel settore oggetto del lavoro e che consentono di rappresentare il complesso della situazione del settore Costruttori motori industriali a benzina e del settore Costruttori motori industriali a diesel.

Alle aziende del campione, individualmente, è stato chiesto di fornire dati su una serie d'indicatori ritenuti caratteristici del settore in esame:

- grado di accoppiamento;
- temperatura d'utilizzo;
- vita media;
- dimensioni;
- certificazione;
- prezzo unitario.

Nelle tabelle il nominativo delle aziende, per motivi di riservatezza, rimane anonimo. Determinato il valore a cliente per entrambi i progetti e conoscendo i rispettivi prezzi di vendita, si può infine valutare il loro costo al punto per il cliente.

RISULTATI COMPARATIVI COMPLESSIVI		
	A	B
prezzo di vendita	1400	1300
VALORE A CLIENTE (espresso in punti)		
Ind. automobilistiche	806,61	853,71
Ind. ferroviarie	895	874,9
COSTO AL PUNTO PER IL CLIENTE (euro)		
Ind. automobilistiche	1,74	1,52
Ind. ferroviarie	1,56	1,49

Dal confronto dei costi emerge che il progetto B del competitor è da giudicarsi preferibile al progetto A dell'azienda in oggetto sia nel settore Costruttori motori a benzina sia in quello Costruttori motori a diesel. In seguito a questi risultati si è avviata un'attività di miglioramento del progetto A, a parità di prezzo, nel settore Costruttori motori a benzina, cui il prodotto si rivolge principalmente.

TABELLA VALUTAZIONE PROGETTI								
apporte il valore 1 ove appropri					% COSTRUT. MOTORISODDISF.			
Peso	C.F.	R.S.F.	A	A*	Benzina		Diesel	
					A	A*	A	A*
117	C1	1	1	1	83	83	100	100
		2	1	1				
		5	1	1				
		10	1	1				
		15	1	1				
		18						
168	C2	730-750	1	1	100	100	100	100
		750-760	1	1				
		760-780	1	1				
		780-800	1	1				
		800-1000	1	1				
		1000-1050	1	1				
		1050-1100	1	1				
		1100-1150	1	1				
		1150-1200	1	1				
		1200-1250	1	1				
		1250-1300	1	1				
		1300-1320	1	1				
		1320-1360	1	1				
		1360-1380	1	1				
		1380-1400	1	1				
		1400-1440	1	1				
1440-1460	1	1						
1460-1500	1	1						
186	C3	1			100	100	100	100
		2	1	1				

apportare il valore 1 ove appropri.					% COSTRUTT. MOTORI SODDISFAT			
Peso	C.F.	R.S.F.	A	A*	Benzina		Diesel	
					A	A*	A	A*
170	C4	larghezza			83	100	80	80
		10-33						
		33-50	1	1				
		50-66	1	1				
		66-70	1	1				
		70-75	1	1				
		75-80	1	1				
		80-81	1	1				
		81-90	1	1				
		90-99	1	1				
		99-100	1	1				
		lunghezza						
		10-25						
		25-33						
		33-50	1	1				
		50-66	1	1				
		66-70	1	1				
		70-75	1	1				
		75-80	1	1				
		80-81	1	1				
		81-90	1	1				
		90-99	1	1				
		99-100	1	1				
		100-114	1	1				
		114-200	1	1				
		altezza						
		2-3	1	1				
3-12	1	1						
12-15	1	1						
15-20	1	1						
20-22	1	1						
22-23	1	1						
320	C5	on off	1 1	1 1	67	100	90	100

Il miglioramento è stato possibile variando i ranges delle specifiche associate alle caratteristiche *C5* e *C4* poste al vertice nella relativa scala gerarchica.

RISULTATI COMPARATIVI COMPLESSIVI			
	A	B	A*
prezzo di vendita	1400	1300	1400
VALORE A CLIENTE (espresso in punti)			
Ind. automobilistiche	806,61	853,71	941,11
Ind. ferroviarie	895	874,9	927
COSTO AL PUNTO PER IL CLIENTE (euro)			
Ind. automobilistiche	1,74	1,52	1,49
Ind. ferroviarie	1,56	1,49	1,51

Le azioni intraprese hanno consentito un aumento del valore a cliente del progetto A e di conseguenza una riduzione del costo al punto per il cliente. Più in particolare, le entità dei miglioramenti apportati sono state tali da colmare il divario negativo con il competitor nel settore Costruttori motori a benzina e di ridurlo nel settore Costruttori motori a diesel.

2. METODOLOGIA DI TAGUCHI

2.1. DESCRIZIONE

2.1.1. INTRODUZIONE

Il controllo di qualità nei processi di produzione industriale si è largamente avvalso fin dall'inizio di metodi statistici per la valutazione degli effetti delle diverse fonti di variabilità. Dall'impiego dei metodi classici della statistica descrittiva, basati ampiamente sull'uso di grafici, a quello dell'inferenza statistica, si è passati alla pianificazione e all'analisi degli esperimenti quando gli obiettivi del sistema qualità si sono ampliati fino a comprendere l'intero ciclo produttivo. Gli strumenti base per la pianificazione statistica degli esperimenti, eseguita in funzione dei metodi previsti per l'analisi dei risultati e degli scopi perseguiti, sono stati sviluppati essenzialmente dalla scuola anglosassone nel primo terzo di secolo [27]. In pochi decenni furono stabilite su solide basi matematiche l'analisi dei dati sperimentali in presenza di incertezze e le strutture delle principali famiglie di piani sperimentali. A quest'imponente corpo di conoscenze sulle metodologie statistiche applicate alla sperimentazione, cominciò negli anni '40 ad appoggiarsi anche l'industria per risolvere problemi relativi alla qualità. Infatti a causa delle necessità legate alle applicazioni industriali, in cui sovente è necessario analizzare rapidamente gli effetti di numerosi fattori, sono stati sviluppati e tabulati in maniera estensiva piani frazionali di diversi tipi, assieme alle relative metodologie di analisi dei dati. Ma, mentre sull'onda della prosperità economica del secondo dopoguerra, il tema qualità non riceveva molta attenzione negli USA, nel Giappone, che lotta per la ricostruzione, le tecniche americane esposte e diffuse da Deming prima, da Juran e da altri poi, vengono studiate ed assimilate e la imperativa necessità di

migliorare decisamente la qualità del prodotto viene riconosciuta a livello direzionale. L'impegno di persone come Ohno, Shingo e Ishikawa portano a stabilire su solide basi il movimento giapponese della qualità al quale dà un contributo innovativo di innegabile validità Taguchi che era stato esposto nel proprio ambiente di lavoro iniziale, ai più interessanti sviluppi tecnici e metodologici statunitensi. Al Taguchi va ascritto il merito di aver posto le basi metodologiche del "*Robust Design*", evidenziando in modo decisamente innovativo i costi della non qualità, ancorché all'interno degli intervalli di tolleranza, e di aver stimolato fortemente l'uso sistematico della sperimentazione programmata in campo industriale. Per mettere in pratica la filosofia del "*Robust Design*", egli ha proposto delle procedure applicative semplificate, allo scopo di favorirne una più vasta diffusione in campo industriale, anche in ambienti ove non erano ancora disponibili calcolatori elettronici (siamo negli anni '70). Dall'inizio degli anni '80 in poi le metodologie di "*Design Of Experiment*" e di "*Robust Design*" sono oggetto di crescente interesse da parte del mondo dell'industria ove le loro applicazioni forniscono risultati di rilevanza sempre maggiore, con il crescere della loro diffusione e con l'affinarsi delle strategie applicative. Il suo massimo contributo è stato quello di raccordare le attività di tipo ingegneristico con i metodi statistici, allo scopo di ottenere miglioramenti rapidi nei costi, nella qualità e nella puntualità delle consegne attraverso l'ottimizzazione del progetto dei prodotti e dei processi di produzione. I metodi del Taguchi si basano sulla riduzione della sensibilità alle variazioni dei fattori esterni e dei parametri interni al fine di ottimizzare i costi della qualità, le prestazioni e le tolleranze rendendoli applicabili in tutti i settori industriali. Il dr. Taguchi ha sviluppato in particolare la "funzione perdita per qualità" ed il "rapporto segnale/disturbo" che sono in grado di darci informazioni sul "dove siamo" con molto anticipo durante la fase di sviluppo dei prodotti, quando è ancora possibile ottenere miglioramenti a basso costo. Oltre al rapido miglioramento del progetto di prodotti e processi, tali metodi forniscono un linguaggio ed un approccio comune in grado di migliorare l'integrazione tra il progetto del prodotto ed il processo produttivo [28].

Le metodologie Taguchi si aggiungono agli ormai classici strumenti di:

- Pianificazione del progetto
- Pianificazione della Qualità (Quality Deployment)
- Analisi del valore e *Design To Cost*
- Tecniche di affidabilità
- Tecniche di qualificazione di prodotti e processi

2.1.2. METODI DI TAGUCHI E LORO DIFFUSIONE

Sviluppatasi intorno agli anni '70 in Giappone trovarono larga diffusione anche negli U.S.A. dove i primi ad adottarlo furono, nel 1980, i Laboratori Bell della AT&T la Ford Motor Company e la Xerox Corporation che ne furono i pionieri. Il dr. Taguchi ha collaborato alla fondazione dell'American Supplier Institute che ha lo scopo di diffondere i suoi metodi e le sue idee, ora adottate e messe in opera da centinaia di aziende industriali negli Stati Uniti. Già nel 1983 la I.T.T. aveva istruito 1200 tecnici ed elaborato 2000 applicazioni dei metodi Taguchi, con un risparmio stimato di 35.000.000 \$. Le norme interne della I.T.T. vietano nuovi investimenti in mezzi di produzione finché non sia stato dimostrato che i mezzi attuali sono stati ormai ottimizzati con i metodi Taguchi [29]. Esistono molti altri metodi di progettazione statistica degli esperimenti e analisi della varianza, ma quelli semplici non hanno campi di applicazione così vasti, quelli complessi sono in genere impraticabili da parte dei progettisti ed ingegnerizzatori. Inoltre queste metodologie non costituiscono un approccio globale alla Quality by design, a differenza delle metodologie Taguchi, che proprio per questa loro globalità stanno sempre più diffondendosi anche in Italia. Attualmente i suoi metodi, sono adottati da numerose aziende in tutto il mondo [30], [31].

2.2. IL MODELLO TRADIZIONALE ED IL MODELLO DI TAGUCHI

Lo sviluppo industriale - e specificatamente la produzione in serie - si basa sul concetto di "tolleranza di lavorazione". Non ci saranno mai in una

produzione di serie due oggetti esattamente identici, e questo per una molteplicità di cause quali l'imprecisione del macchinario e quella dell'uomo. Ma se le dimensioni di tali oggetti staranno entro un campo di variazione opportunamente definito sin dalla fase di progettazione (il campo di tolleranza) allora qualunque coppia di oggetti presi e destinati ad accoppiarsi arbitrariamente, sarà accoppiabile e non ci sarà bisogno di aggiustamenti specifici. Il concetto di tolleranza vale non solo per le dimensioni, ma anche per tutte le altre grandezze fisiche (durezza, colore, fattore di amplificazione di un transistor, ecc.). Poiché il prodotto finito è un aggregato di oggetti in "tolleranza", anche esso non potrà mai essere identico a se stesso, ma avrà le sue tolleranze. Si radica quindi il principio della "Impossibilità della perfezione" [32]. Saranno queste "tolleranze risultanti" del prodotto, i punti di partenza per definire valori e tolleranze dei singoli componenti, poiché le tolleranze del prodotto esprimono le fasi di variazione prestazionali che il cliente può legittimamente attendersi quando acquista il bene. Tale spostamento dal valore "target" non si riteneva producesse dei costi aggiuntivi, dal momento che il pezzo era considerato "accettabile" [33]. Questo significa che, sia se si sta producendo cilindri di 10 cm oppure di 10.05 cm, se la tolleranza è di ± 0.1 cm, non si sta sostenendo alcun costo. Quanto ora descritto e che rappresenta il modello tradizionale di valutazione dei costi della non-qualità, può essere raffigurato come in figura:

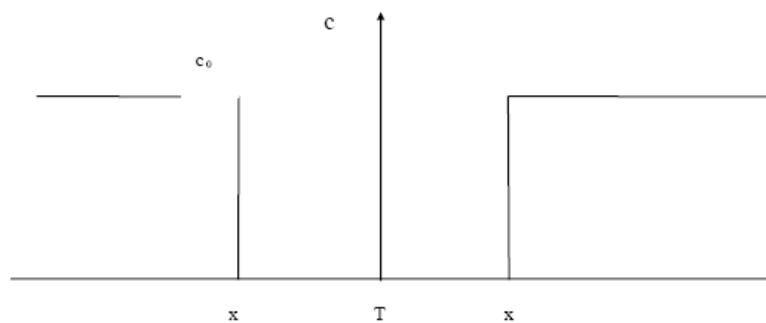


Figura 48 Diagramma dei costi della non-qualità

Dalla figura 48 è evidente che alcun costo verrà sostenuto finché si produce nei limiti di specifica fissati dalla progettazione. Mentre, se ci si sposta oltre il punto $T \pm x$, si sosterrà un costo c_0 . Dal punto di vista del produttore si è diffusa di fatto la mentalità che porta a ritenere che “tutto ciò che è in tolleranza va bene”, ha identico valore, può essere venduto allo stesso prezzo ai clienti. Fra costoro ci sarà il cliente a cui il caso regala un prodotto che ha tutti i parametri prossimi ai valori ideali, ed il cliente a cui capita il prodotto che ha diversi parametri prestazioni in tolleranza, ma così vicini al limite che, una volta l'uno, una volta l'altro escono, richiedendo interventi correttivi; ed in mezzo, distribuiti casualmente, tutti gli altri clienti [34].

Dal punto di vista dell'utente, questi vorrebbe la perfezione, anche se, di necessità, accetta le imperfezioni, purché ragionevoli, ma che certamente è tanto più scontento quanto il prodotto da lui acquistato si discosta dall'obiettivo ideale, anche se in tolleranza al momento dell'acquisto.

Nessuno potrà mai inventare un sistema che eviti la distribuzione probabilistica delle caratteristiche del prodotto. Ma il giapponese Taguchi ricorda che le distribuzioni di probabilità possono essere governate; che per fare ciò occorre fissare bene nella mente del progettista e del produttore che per ogni grandezza non esiste semplicemente un “campo di tolleranza” ma esiste un valore ideale, un valore target, che deve essere individuato; ed attorno al quale devono addensarsi i valori reali, con distribuzione probabilistica nota [35]. Normalmente le tolleranze sui componenti e sui processi faranno sì che i valori reali delle grandezze prestazionali si distribuiranno attorno al valore ideale secondo una curva probabilistica:

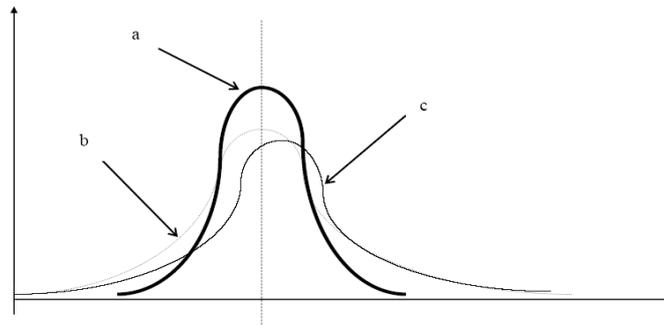


Figura 49 Distribuzione dei valori reali delle grandezze prestazionali e campo di tolleranza

Tale curva si allargherà quando il prodotto si troverà a funzionare in condizioni reali, per effetto delle variazioni delle variabili ambientali, come la temperatura, l'umidità, la tensione di alimentazione nel caso di prodotti alimentati dalla rete, ecc. (Figura 49- curva b -) e solitamente in modo asimmetrico, per effetto dell'invecchiamento (Figura 49 - curva c -). Dovere del costruttore è proporzionare e posizionare adeguatamente rispetto al campo di tolleranza, in modo non solo da non uscirne, ma anche da stare il più lontano possibile dai limiti. Ciò significa tendere a curve molto strette attorno al valore ideale!

Sul piano pratico ciò si concretizza in prodotti più affidabili, che richiedono sempre meno manutenzioni preventive e correttive. Per dare concretezza al ragionamento, Taguchi affronta il problema dal punto di vista del consumatore. Il cliente infatti non ha chiesto un prodotto che si avvicini "abbastanza" alle specifiche di progettazione, ma vuole un prodotto che sia corrispondente al target della progettazione. Il modello si trasforma radicalmente assumendo di sostenere dei costi anche all'interno del campo di tolleranza, non appena ci si discosta dal valore obiettivo [36].

Ma perché Taguchi chiama *perdita* il costo associato alla variazione, cioè allo scostamento rispetto al valore ideale?

Il motivo è che il costo associato a tale scostamento non va a beneficio di nessuno: né del produttore, né del cliente, né di altri; il motivo è che la qualità di un prodotto è la (minima) perdita impartita alla società dal momento che il prodotto stesso lascia la fabbrica, fatta eccezione per le perdite dovute alle sue specifiche funzioni [37].

Le perdite sono ristrette a due categorie:

- Perdite causate da variabilità del funzionamento.
- Perdite causate da effetti nocivi.

Un oggetto di buona qualità adempie alle sue funzioni senza variabilità e causa piccole perdite per effetti collaterali nocivi, incluso il costo per funzionamento. Attraverso il controllo dei costi si attua la riduzione delle varie perdite che si possono verificare prima che il prodotto lasci la fabbrica, ma è il controllo qualità che riduce i due tipi di perdite che il prodotto può produrre alla società dopo che ha lasciato la fabbrica. Ad ogni prodotto che raggiunge il consumatore, vista la “impossibilità della perfezione”, viene sempre associata una perdita. Questa perdita include, tra le altre cose, l’insoddisfazione del cliente, i costi aggiuntivi di garanzia per il produttore, e il danno subito dalla compagnia per la cattiva reputazione, che porta ad una possibile perdita di quote di mercato. L’idea di minimizzare le perdite per la società è piuttosto astratta e quindi difficile da trattare come obiettivo aziendale. Ma quando pensiamo che la perdita per la società è, a lungo termine, una perdita per la nostra azienda la definizione può apparire più significativa. Normalmente i costi della qualità vengono quantificati in termini di scarti e rilavorazioni, costi di garanzia, o altri fattori tangibili. Questi, tuttavia, non sono altro che la punta dell’iceberg. Che dire dei costi nascosti e delle perdite sul lungo periodo dovuti ai tempi di ingegnerizzazione e gestione, giacenze di magazzino, insoddisfazione del cliente (società) e, a lungo termine, perdita di quote di mercato?

Si ha quindi bisogno di un mezzo per valutare queste perdite nascoste di lungo periodo, perché esse sono quelle che danno il maggior contributo alla

perdita totale per cattiva qualità. Per lo scopo, il dr. Taguchi usa la la “*funzione perdita per (cattiva) qualità*” (*Quality Loss Function o QLF*), o più semplicemente “*funzione perdita*”. Il modo con il quale la funzione perdita è determinata dipende dal tipo di caratteristica di qualità in esame. Una caratteristica di qualità è qualsiasi entità possa essere misurata per giudicare la prestazione (qualità) [38].

Ci sono cinque caratteristiche di qualità:

1. Nominale è il migliore (Ottenere un certo valore desiderato con minima variabilità - dimensione).

2. Piccolo è meglio (Minimizzare una risposta. E' la caratteristica che non assume valore negativi ed ha come target lo zero - emissione di CO da una marmitta, usura, ecc.,. -.)

3. Più grande è meglio (Massimizzare una risposta. Per questa caratteristica di qualità, che non assume mai valori negativi, il valore maggiormente desiderabile è l'infinito - resistenza a trazione, potenza, ecc.,. -.).

4. Qualità definita per attributi (Classificare e/o contare dei dati - classificazione di caratteristiche di aspetto -.).

5. Dinamica (Una risposta che varia in funzione di un input - la velocità di una ventola che varia al variare della temperatura del motore -.). In molti casi, una semplice funzione quadratica costituisce una buona approssimazione dell'andamento della funzione perdita (Figura 50). Questo perché ,considerando una caratteristica di qualità, ad esempio “nominale è il migliore”, posto x il valore misurato, T il valore target desiderato e $L(x)$ la perdita dovuta alla differenza fra x ed T , $L(x)$ può essere sviluppata in serie di Taylor attorno a T , come:

$$L(x) = L(T + x - T) = L(T) + \frac{L'(T)}{1!}(x - T) + \frac{L''(T)}{2!}(x - T)^2 + \dots \quad (1)$$

Per ipotesi è $L(T)=0$, e dato che $L(x)$ è minima per $x=T$, anche $L'(T)$ è zero. In conseguenza di ciò, il terzo termine del precedente sviluppo in serie di Taylor della funzione perdita è il termine principale e la perdita può essere approssimata come:

$$L = \hat{K}(x-T)^2 \quad (2)$$

dove K è una costante determinabile, una volta note le perdite $C1$ e $C2$ causate dall'aver oltrepassato le tolleranze Δ_1 e Δ_2 , e $(x-T)$ è lo scarto dal valore target T [39].

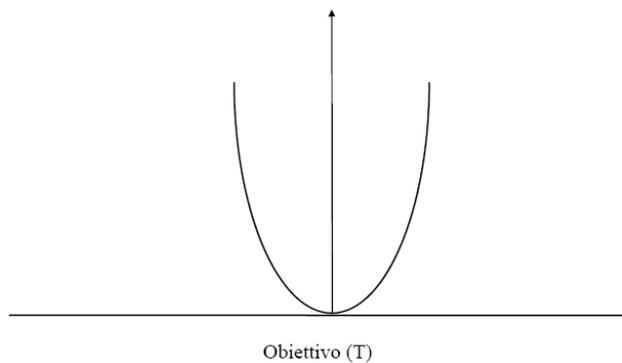


Figura 50 Funzione perdita

Quando si considera un processo produttivo, l'errore $(x-T)$ che troviamo (come già osservato), non è una quantità fissa, invariante nel tempo, bensì presenta un andamento puramente casuale. Si ha bisogno, quindi, di un modello che contempli tale variabilità. Per calcolare la perdita dovuta alla variabilità, occorre riferirsi ad una distribuzione di probabilità normale con media uguale a zero e con scarto quadratico medio σ^2 rispetto al valore target, per cui la funzione perdita assume la forma:

$$L = K \sigma^2 \quad (3)$$

Questo implica che il processo mediamente sia perfettamente centrato sui valori target la qual cosa non avviene quasi mai. Più verosimilmente è possibile sostituire all'assunta media uguale a zero un valore per tale parametro pari a "b", dove b rappresenta un errore sistematico denominato "Bias".

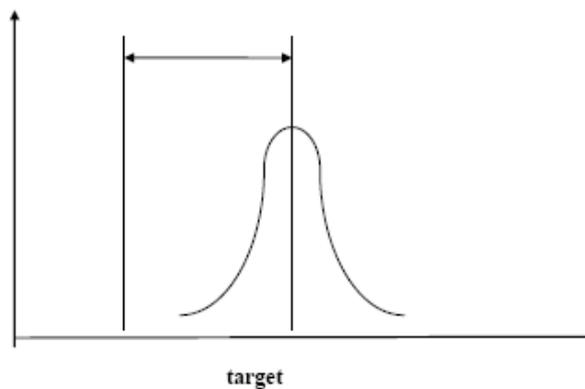


Figura 51 Valore target

Si può scrivere:

$$x = T + b + e$$

dove e è un errore puramente casuale con media uguale a zero e varianza uguale a σ^2 . Si ha ora un modello per la variabile x ed un modello per la stima dei costi dovuti ad errori di fabbricazione. Sostituendo nella (2) l'espressione della x si ha:

$$L = Kb^2 + 2Kbe + Ke^2 \quad (4)$$

Per avere il costo medio di errore per l'intero processo si deve mediare sull'intera popolazione. Facendo questo per entrambi i membri dell'espressione (4): L saranno i costi attesi -(expected cost) EC; Kb^2 è una costante, per cui la

sua media sarà Kb^2 ; $2Kbe$: la media di questo termine sarà zero dal momento che la media di e è 0 per definizione; Ke^2 è la variabilità espressa dalla σ^2 .

In definitiva i costi medi dovuti agli errori di produzione sono attribuibili a due effetti distinti: la Bias e la variabilità. Il grado quadratico della espressione (2) fa riflettere sull'importanza del contenimento della variabilità. La perdita ad essa associata potrà non essere riconducibile a zero, ma certamente deve essere ricondotta al punto di minimo per l'insieme produttore più utente. Pensare in termini di perdita favorisce la continuità nella tendenza a ridurre la variabilità nelle caratteristiche di qualità di un prodotto. La metodologia di ingegneria della qualità del dr. Taguchi è il mezzo per ottenere questi miglioramenti, che si avvale del "criterio della prevenzione" il quale porta ad anticipare gli sforzi rivolti ad assicurare la qualità dei prodotti verso le fasi iniziali della cosiddetta spirale della qualità, cioè la progettazione del prodotto e la sua industrializzazione. Questa metodologia mira a fornire delle "regole per progettare la Qualità" cioè per ridurre la varianza e le perdite ad esse associate; e non tanto agendo sulle cause prime della varianza (provvedimento spesso costoso) ma cercando le condizioni in cui tali cause producono effetti minimi [40]. Le cause responsabili della deviazione delle caratteristiche di qualità del prodotto dal valore obiettivo sono, fondamentalmente, di due tipi:

1. Fattori di controllo noti anche come fattori di progetto (controllabili con facilità).
2. Fattori di disturbo (non controllabili perché difficili, impossibili o troppo costosi da controllare).

I fattori di disturbo si suddividono a loro volta in:

- Disturbo esterno - variabili ambientali o condizioni d'uso che alterano le funzioni di un prodotto - (temperatura, umidità, polvere, ecc.).
- Disturbo interno - cambiamenti che si verificano quando il prodotto si deteriora durante l'immagazzinamento o si usura durante l'uso, fino al punto in

cui non può esplicitare le funzioni target richieste - (variazione delle costanti interne del prodotto stesso che causa alterazione della sua funzione obiettivo).

- Disturbo tra i prodotti o rumore tra unità e unità - differenze tra i prodotti costruiti con le medesime specifiche (imperfezioni costruttive, ecc.).

Buona qualità funzionale significa piccole variazioni funzionali a seguito di uno qualsiasi dei precedenti disturbi, cioè un prodotto che sia in grado di funzionare come richiesto sotto un ampio spettro di condizioni e per tutta la durata della sua vita utile. Occorre identificare non i peggiori fattori di disturbo e, quindi, tentare di tenerli sotto controllo, in quanto costoso se non impossibile, ma scegliere, attraverso una opportuna stima della significatività, i fattori di controllo significativi in modo tale che il prodotto o il processo risulti avere sensibilità minima alle variazioni dei fattori di disturbo. L'ideale è che le funzioni del prodotto rimangano normali nonostante le fluttuazioni della temperatura, dell'umidità, della tensione di alimentazione e degli altri fattori esterni (ambientali), anche quando i componenti e i materiali si degradano o si deteriorano durante l'uso, e indipendentemente dalla variabilità fra unità e unità. In pratica, piuttosto che cercare e rimuovere le cause, che sono spesso fattori di disturbo, dobbiamo rimuovere o ridurre l'impatto delle cause. E' facile infatti ottenere prestazioni più controllate su un video ricorrendo a componenti più precisi o imponendo tolleranze più strette ai pezzi meccanici più critici. Ma ciò costa, e spesso significa trasferire i problemi ai propri fornitori, che possono o non possono essere in grado di risolverli. E' più difficile, ma più corretto e più economico, identificare le aree di massima insensibilità delle prestazioni che interessano rispetto alle variazioni dei componenti. Addirittura, seguendo questo approccio si può andare nella direzione dell'allargamento ulteriore delle tolleranze dei componenti, invece del restringimento, con ulteriore riduzione dei costi. Nel fare ciò, rendiamo i nostri prodotti robusti rispetto al disturbo (*Robust Design*). L'ingegneria della qualità del dr. Taguchi è il mezzo che ci permette di ottenere prodotti e processi robusti. Essa coinvolge sia attività di controllo della qualità fuori linea –off line- (progetto del prodotto o del processo), sia attività sulla linea –on line- (monitoraggio e controllo del processo) [41]. “La qualità del prodotto deve essere progettata insieme al prodotto stesso!”. Questo è il credo

delle attività fuori linea del dr. Taguchi, le quali coinvolgono tanto il progetto dei prodotti quanto quello dei processi [42].

I tre passi che sono richiesti per l'ottimizzazione qualitativa del prodotto o del processo sono:

1. Progetto del sistema: progetto focalizzato sulla tecnologia idonea.
2. Progetto dei parametri: è un mezzo sia per ridurre i costi sia per migliorare la qualità, facendo uso dei metodi di progettazione sperimentale.
3. Progetto delle tolleranze.

Progettare un sistema richiede creatività e conoscenze scientifiche ed ingegneristiche. Queste ultime comprendono la scelta dei materiali, delle parti e la definizione di massima dei valori dei parametri del prodotto (nel caso di progetto di un prodotto), oppure la scelta delle attrezzature di produzione e la definizione di massima dei valori dei fattori del processo (nel caso di progettazione di un processo). Quando lo scopo è quello di progettare un prodotto (o un processo) con elevata stabilità e affidabilità, il progetto dei parametri è il passo più importante. Lo scopo del progetto dei parametri è quello di aggiustare i livelli dei parametri (valori nominali e specifiche) in modo che la caratteristica obiettivo non vari molto se cambiano il sistema e le condizioni ambientali. Si tratta di una ricerca dei livelli dei parametri per i quali la caratteristica y risulti stabile nonostante l'utilizzo di materiali e componenti economici. Partire da componenti poco costosi e ridurre la variabilità attorno alla media della caratteristica obiettivo, senza incrementare i costi, costituisce una tecnica avanzata di progetto nota anche come uso delle non linearità. Questa tecnica mantiene stabile la caratteristica di uscita, lasciando inalterati, oppure, che varino più di prima, i fattori di errore che influenzano la stessa. Infatti, l'effetto dei fattori di errore viene meglio rilevato se essi variano ampiamente, e quindi risulterebbe controproducente condurre l'analisi su componenti e materiali costosi e di elevato pregio. Di conseguenza, questa tecnica fa uso delle interazioni fra tutti i fattori di errore. Quando un parametro ha un'influenza non

lineare sulla caratteristica obiettivo (figura 52), l'effetto della sua variabilità può essere ridotto scegliendo il valore di picco della curva x_1 .

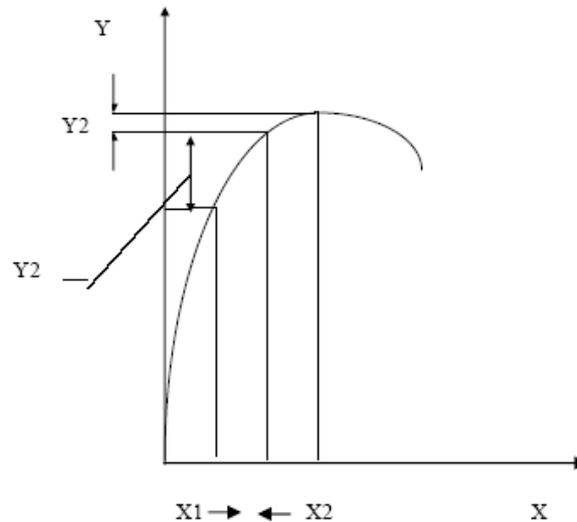


Figura 52 Caratteristica obiettivo

In tal modo, anche se varia il valore della variabile indipendente sull'asse x , la variabile dipendente y varierà in un campo molto più ristretto (figura 52). Questa è una tecnica avanzata di progetto che riduce i costi e migliora la qualità; questa costituisce la fase centrale del progetto, la risposta alla richiesta di progettare un prodotto o un processo che presenti alta affidabilità sotto un'ampia varietà di condizioni, nonostante l'uso di materiali e parti poco costosi, fortemente variabili e facilmente deteriorabili; queste sono le finalità del progetto sperimentale; questo è il modo ideale di trattare con tutte e tre le sorgenti di disturbo. Infine si utilizza il progetto delle tolleranze, se la riduzione di variabilità ottenuta mediante il progetto dei parametri non è sufficiente. Il progetto delle tolleranze comporta il restringimento di queste sui parametri del prodotto o sui fattori del processo le cui fluttuazioni hanno una forte influenza sulle variazioni delle caratteristiche in uscita. Inoltre presenta un incremento di costo in denaro in quanto si dovranno comperare materiali e componenti, oppure

macchinari, di qualità più elevata. Le informazioni necessarie sono la funzione perdita ed il tasso di variabilità per ogni componente costituente il prodotto. Inoltre non si affrontano le variazioni ambientali. I risultati del progetto del sistema, dei parametri e delle tolleranze, ottenuti dagli uffici di progetto, vengono trasmessi ai reparti produttivi in forma di specifiche. Questi progettano un processo di costruzione che possa soddisfare adeguatamente tali specifiche [43]. Anche il progetto del processo si sviluppa attraverso tre stadi:

Progetto di sistema: nel quale viene scelto il processo produttivo in base alla conoscenza della tecnologia idonea.

1. Progetto dei parametri: in cui vengono stabilite le condizioni ottime di lavoro per ciascuna delle parti del processo, inclusi parti e materiali. Lo scopo di questa fase è quello di migliorare la capacità di processo riducendo l'influenza dei fattori nocivi.

2. Progetto delle tolleranze: in cui vengono scelte le tolleranze delle condizioni del processo e delle sorgenti di variabilità. Questo è un mezzo per sopprimere le variazioni di qualità eliminando direttamente le cause.

Scelto un processo produttivo e determinate le condizioni operative, rimangono ancora le seguenti fonti di variazione per i prodotti:

- Variabilità dei materiali e dei componenti acquistati.
- Derive del processo, usura degli strumenti, errori delle macchine, ecc.,.
- Variabilità nell'esecuzione.
- Errori umani.

Queste sorgenti di variabilità riguardano il controllo di qualità durante la normale produzione, cioè il controllo di qualità on-line.

Dal momento in cui viene raggiunto lo stadio di produzione, né i provvedimenti *off line* né quelli *on line* risultano efficaci per combattere i disturbi interni ed esterni. E' per questo che i problemi di qualità che comprendono i disturbi interni ed esterni sono detti problemi di qualità di progetto, ed è in questa fase cruciale della metodologia del dr. Taguchi che si può guadagnare di più in termini di qualità senza aumentare contemporaneamente i costi.

L'obiettivo è trovare i valori nominali per i fattori di controllo tali da raggiungere la massima prestazione del prodotto con la minima sensibilità al disturbo, e fare questo al minimo costo.

La strategia del progetto dei parametri è riconoscere quali sono i fattori di controllo e quali quelli di disturbo e, quindi, trattarli separatamente. Durante l'analisi dei dati si fa uso del rapporto segnale-disturbo (*Signal to noise Ratio* o *S/N Ratio*) per misurare le prestazioni [44].

Esso risulta inversamente proporzionale alla perdita valutata con la funzione perdita ($L=K \sigma^2$), come si può anche evincere dalla relazione:

$$\eta = -10 \log \sigma^2 \quad \text{con} \quad \sigma^2 = \frac{1}{2} \cdot [\sum R_i^2]$$

Massimizzare il rapporto segnale-disturbo equivale a minimizzare la perdita, cioè a migliorare la qualità.

Quindi, i metodi Taguchi, con una quantità minima di esperimenti o simulazioni, permettono di individuare i valori dei parametri che:

- Minimizzano l'influenza dei fattori di disturbo sulle prestazioni.
- Consentono di minimizzare i costi senza pregiudizi per la qualità.
- Permettono inoltre di individuare i parametri che:

- Influiscono maggiormente sulle prestazioni e non sulla variabilità.
- Non hanno sensibile influenza sulle prestazioni, permettendo quindi l'allargamento delle tolleranze.

2.3. STRUMENTI

Taguchi ha messo a punto particolari tecniche basate sull'uso delle matrici ortogonali che consentono la gestione razionale e bilanciata dei fattori variabili analizzati negli esperimenti e delle loro reciproche interazioni [45].

Grazie ad esse si ottengono una serie di vantaggi:

1. sono sufficienti pochi esperimenti (o simulazioni) per trattare un numero elevato di fattori (variabili) con differenti numeri di livelli;
2. è assicurata la ripetitività delle conclusioni anche se le condizioni sperimentali non sono uguali a quelle di esercizio;
3. se si è trascurato un fattore importante, il metodo lo segnala ed il progettista può riconsiderare e modificare la lista dei fattori.

Una matrice ortogonale viene convenzionalmente indicata con il simbolo $L_x(y^k)$, dove:

- x è il numero di righe (esperimenti);
- y è il numero di livelli;
- k è il numero dei fattori.

Nella tabella 1 viene riportata una matrice ortogonale del tipo $L_8(2^7)$:

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabella 1 Matrice ortogonale del tipo $L_8(2^7)$

In questo caso, per ciascun esperimento, scelta comunque una coppia di colonne, si hanno quattro possibili combinazioni: (1, 1), (1, 2), (2, 1) e (2, 2). Se ciascuna di queste quattro combinazioni compare un eguale numero di volte in una coppia di colonne, diremo che le colonne sono bilanciate o ortogonali. In generale, la matrice L può essere letta come un insieme di istruzioni per x esperimenti in grado di fornire un corretto confronto fra i k fattori ciascuno ai suoi y livelli. L'obiettivo principale dello studio è la individuazione di un set di fattori di controllo che minimizzino la variabilità di una caratteristica prestazionale. Facendo ricorso alle conoscenze tecniche del prodotto e del processo si scelgono quei fattori, e le eventuali interazioni tra i fattori, che si ritengono influenti sulle prestazioni. Per ogni fattore si sceglie il numero ed il valore dei livelli da testare. L'uso di queste matrici ortogonali consente di far variare, in modo bilanciato, più fattori contemporaneamente, anziché un fattore per volta. Ciò riduce l'onere delle prove e fornisce risultati più sicuri. La disposizione del piano sperimentale si compone di due matrici:

1. CFA (*Control Factor Array*), alla quale vengono assegnati i fattori controllabili;
2. la seconda, NFA (*Noise Factor Array*), relativa ai fattori di rumore, qualora il sistema risulti sottoposto all'azione di disturbi interni ed esterni.

La matrice NFA viene creata partendo dalla CFA e dalla conoscenza dei possibili fattori di errore e dei livelli assunti da questi ultimi.

Nella tabella 3.2 viene riportato un possibile schema per i livelli dei fattori di errore:

Fattore	Livello	Livello	Livello
	1	2	3
1 (%)	$-Z_1$	0	$+Z_1$
2 (%)	$-Z_2$	0	$+Z_2$
.	.	.	.
.	.	.	.
X (%)	$-Z_x$	0	$+Z_x$

Tabella 2 Schema per i livelli dei fattori di errore

Supponiamo ora che il sistema sia sottoposto all'azione di disturbi interni ed esterni. Scopo del progetto dei parametri è quella di valutare la variazione complessiva dovuta ai disturbi interni ed esterni per i diversi livelli dei fattori controllabili e di realizzare un progetto che sia quanto più immune possibile dagli effetti dei disturbi. Di conseguenza, il progettista deve conoscere i tipi di disturbi interni ed esterni presenti e, almeno per i principali fattori di disturbo, deve scegliere dei livelli ed indagare sull'entità degli effetti. Le colonne della CFA e della NFA rappresentano i fattori e le righe una specifica combinazione dei livelli dei fattori. L'intera matrice NFA viene applicata a ciascuno degli x esperimenti della matrice CFA, quindi ci sono $x_{CFA} \cdot x_{NFA}$ combinazioni in tutto. Nella figura 53 viene riportato lo schema per il prodotto diretto fra le matrici ortogonali CFA e NFA.

		NFA																		
		1	2	3	4	5	6	7	8											
1		1	1	1	1	2	2	2	2											
2		1	1	2	2	1	1	2	2											
3		1	1	2	2	2	2	1	1											
4		1	2	1	2	1	2	1	2											
5		1	2	1	2	2	1	2	1											
6		1	2	2	1	1	2	2	1											
7		1	2	2	1	2	1	1	2											
CFA	1	2	3	4	5	6	7									Rapporto S/N				
1	1	1	1	1	1	1	1									R ₁	R ₂	...	R _i	
2	1	1	1	2	2	2	2									y ₁ y ₂ y ₃ y ₄ y ₅ y ₆ y ₇ y ₈				
3	1	2	2	2	1	1	2									y ₁ y ₂ y ₃				
4	1	2	2	2	2	2	1									y ₁ y ₂				
5	2	1	2	2	1	2	1													
6	2	1	2	2	2	1	2													
7	2	2	1	1	1	2	2													
8	2	2	1	1	2	1	1									y ₁				

Figura 53 Schema per il prodotto tra le matrici CFA e NFA

La combinazione delle due matrici costituisce il piano sperimentale. Per ciascuna combinazione viene calcolato il valore y_i e determinata la differenza di questo rispetto al valore vero. I risultati delle prove, ovvero le osservazioni sulla risposta del sistema, saranno usati per elaborare misure statistiche (Performance Measures), la cui analisi provvederà alla stima delle medie e a minimizzare gli effetti dei fattori di rumore sulla risposta. Una misura della variabilità (*Noise Performance Measures*) servirà a identificare quei fattori di controllo che agiscono sulla variabilità. Un'analisi delle medie (*Target Performance Measures*) servirà a identificare e impostare quei fattori che agiscono sulla media. Per la misura del rumore Taguchi utilizza un indice denominato "Signal to Noise ratios" (rapporti segnale/rumore) poiché esso è il reciproco della varianza dell'errore di misura; quindi esso risulta massimo per la combinazione dei livelli dei parametri che presentano la minima varianza dell'errore. Questo è il progetto ottimo.. Ciò si può evincere anche dal confronto delle espressioni della funzione perdita (5) e del rapporto segnale disturbo (6):

$$L(t) = (\mu - T)^2 + \sigma^2 \tag{5}$$

$$\eta = -10 \log \sigma^2 \quad (6)$$

$$\text{con } \sigma^2 = \frac{1}{2} \cdot [\sum R_i^2] \quad (7)$$

Nella (5) μ e σ^2 rappresentano rispettivamente la media e la varianza di t . Il “quality loss” risulta pertanto composto da due termini:

- il primo indica quanto, in media, le prestazioni del prodotto si scostano dal “target” di progetto ed è quindi espressione del rispetto degli obiettivi funzionali;
- il secondo indica quanto è dispersa la prestazione da esemplare ad esemplare e, per uno stesso esemplare, in differenti istanti del suo arco di vita utile. Esso è, quindi, espressione degli obiettivi di ripetibilità e stabilità, ovvero di affidabilità. Per ottenere prodotti di elevata qualità il “quality loss” va minimizzato, minimizzando entrambe le sue componenti.

Questo è un problema di doppia ottimizzazione che prevede due passi:

- ridurre la varianza σ^2 della distribuzione t ;
- avvicinare la media μ al “target” T .

Ridurre la varianza equivale a minimizzare la perdita, cioè a migliorare la qualità e ciò può essere effettuato massimizzando il rapporto segnale-disturbo che viene scelto quale caratteristica-obiettivo. Per lo scopo si valuta il rapporto S/N per tutti gli esperimenti (x), dopo di che si effettua l’analisi della varianza (ANOVA) al fine di poter stimare l’influenza dei fattori di progetto sulla caratteristica obiettivo e determinare quindi, quelli significativi. Valutati questi e stimati i loro effetti si è in grado di determinare la combinazione ottimale dei parametri di progetto. Individuate le condizioni ottime e stimata la media $\bar{\mu}$

di processo:

$$\bar{\mu} = \bar{T} + \sum_i (F_i - \bar{T}) \quad (8)$$

con
$$\begin{cases} F_i = \text{fattori significativi} \\ \bar{T} = \text{media complessiva dei fattori significativi} \end{cases}$$

si può valutare lo scarto quadratico medio nelle condizioni ottimali tramite le:

$$\text{Rapporto S/N} \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 \end{cases} \Rightarrow \sigma^2 = 10^{-\frac{\bar{\mu}}{10}}$$

e confrontare questo con lo scarto quadratico medio relativo alle condizioni iniziali. Tale confronto può risultare più significativo sostituendo i due scarti nella funzione perdita in maniera tale da poter stimare il guadagno economico conseguito adottando le condizioni ottimali. Il miglioramento ottenuto utilizzando tale metodologia è diverse volte superiore a quelli ottenuti tramite la riduzione delle tolleranze, e senza ricorrere a componenti di alto pregio. Si nota, alla luce dei fatti esposti, che il progettista può così soltanto intervenire su alcuni fattori di controllo chiamati “parametri di progetto” che nella terminologia di Taguchi vengono definiti:

- *noise control factors*, che servono per controllare lo scarto della risposta;
- *signal factors*, che servono per controllare il valore medio della risposta;
- *neutral factors*, che non influenzano né la media né lo scarto, così che possono essere tenuti ai livelli per cui il costo è minimo.

Questa costituisce la fase centrale del progetto, ovvero la risposta alla richiesta di progettare un prodotto/processo che presenti alta affidabilità sotto

un'ampia varietà di condizioni, nonostante l'uso di materiali e parti poco costosi, fortemente variabili e deteriorabili. Lo studio di un gran numero di fattori e la scelta della combinazione ottimale dei livelli dei fattori sono sostanzialmente applicazioni della non linearità. Se il prodotto può essere progettato in modo tale che le sue caratteristiche di uscita siano resistenti sia ai disturbi interni che a quelli esterni, allora esso funzionerà in modo soddisfacente, nonostante la variabilità dei suoi componenti, ed il suo costo sarà basso. Progettato il sistema e determinati i valori nominali dei parametri, il passo successivo è quello di scegliere le tolleranze dei parametri stessi. La riduzione delle tolleranze dovrebbe essere l'ultima arma, l'estrema risorsa da adoperare soltanto quando il progetto dei parametri non consente risultati sufficienti. La caratteristica del metodo è nella selezione dei livelli dei fattori di rumore invece della sperimentazione lasciando al caso la scelta dei livelli. Quando la distribuzione dei fattori di rumore è nota Taguchi indica anche i livelli da utilizzare. Quando sia impossibile selezionare un opportuno livello di un fattore di rumore è conveniente ripetere la prova più volte. La combinazione fra CFA e la NFA si realizza eseguendo, in ordine casuale, ogni riga della CFA abbinata a ogni riga della NFA. Indubbiamente i piani di prova Taguchi sono estremamente ridotti e comportano perciò informazioni minori rispetto ai piani fattoriali completi. Ma questi sono quasi sempre improponibili in pratica, perché troppo onerosi. Come nel metodo classico, può essere utilizzata l'analisi della varianza per valutare l'attendibilità statistica dell'effetto dei fattori sui risultati, ma l'analisi viene completata con il calcolo del peso dei fattori sulla variabilità totale.

2.4. BILANCIO TRA COSTO E QUALITÀ

Viene prima il costo, non la qualità!

Lo scopo del progetto dei parametri è quello di migliorare la qualità mantenendo il minimo costo. Ma il progetto dei parametri non riduce la varianza dell'errore a zero, quindi, quando dopo il progetto dei parametri viene calcolata la perdita dovuta all'errore, il risultato non è zero. Lo studio del progetto delle tolleranze potrebbe essere consigliabile, ma ciò non vuol dire che poi debbano essere usati

componenti o materiali pregiati. Ciò significa che dovrebbe essere calcolato il bilancio fra costo e qualità. Se la riduzione delle perdite, ottenuta riducendo la varianza dell'errore mediante l'uso di componenti di prima scelta, leggermente più costosi, invece di elementi di seconda scelta, superasse l'incremento di costo, dovrebbero essere adoperati i componenti di prima scelta. Il progetto delle tolleranze usa elementi con bassa variabilità e deterioramento, quindi fa aumentare i costi ogni volta che viene eseguito. Costruire prototipi e fare prove con componenti di alto pregio ed elementi e materiali a basso grado di deterioramento nei punti chiave è un errore. Un progettista che cerca di realizzare un buon prototipo userà elementi costosi fin dall'inizio, dove egli ritiene sia importante. Ciò può essere corretto per il prototipo iniziale, ma, dato che il progetto dei parametri dovrebbe venire prima, immediatamente dopo la realizzazione del prototipo dovrebbe essere effettuato uno studio per scegliere la combinazione ottimale dei livelli dei parametri che fornisca stabilità e affidabilità anche se i parametri caratteristici variano, quindi dovrebbero essere studiati stabilità e affidabilità ed infine eseguito il progetto delle tolleranze. Il metodo classico era quello di basare il progetto funzionale su un prototipo iniziale e quindi studiare affidabilità, stabilità e correggere eventuali problemi richiedendo componenti ed elementi migliori, ma questo è il metodo utilizzato dalla NASA!

Questo è un metodo per progettare un prodotto molto affidabile, ma troppo costoso per competere su un libero mercato. La strada preferibile è quella di partire realizzando un prodotto economico, e poi migliorarne la qualità. Se i costi sono troppo alti, non si può competere. Si potrebbe avere una qualità perfetta, con difettosità zero in produzione e nessun problema sulle macchine installate, ma, se il prezzo fosse troppo alto, la concorrenza ci batterebbe comunque. La concorrenza sui prezzi è fondamentale. Il basso costo dovrebbe essere la condizione preliminare per aumentare il livello qualitativo [46].

2.5. LA SPERIMENTAZIONE E LA PROGETTAZIONE

I metodi statistici applicati alla sperimentazione costituiscono un settore sviluppatosi in tempi relativamente recenti. Ogni qualvolta si ha a che fare con l'analisi di un sistema produttivo si è invariabilmente alle prese con il fenomeno della variabilità, insito nel modo stesso di produrre. Il problema di come trattare i risultati, allo scopo di contenere entro limiti accettabili la variabilità e/o di aumentare la qualità della produzione, ha messo in evidenza l'influenza preponderante delle condizioni di prova rispetto ai metodi di analisi dei risultati per quanto riguarda la validità di questi ultimi ai fini dell'uso in vista del quale è stato deciso l'esperimento. La stesura di un piano sperimentale implica pertanto una conoscenza approfondita del problema specifico che si intende risolvere, sia per la scelta realistica delle condizioni di prova, sia per la capacità di sfruttare le informazioni già note nel settore per restringere la fase sperimentale del lavoro, di regola la più costosa, ai soliti aspetti per i quali manchi effettivamente il genere di informazioni richiesto. Uno schema particolarmente significativo che illustra il processo di determinazione e di analisi dei risultati sperimentali è quello riportato nella figura 54. Il processo di apprendimento prosegue per iterazioni successive. Si inizia da una ipotesi iniziale, la quale conduce, attraverso il meccanismo della deduzione, a determinate conseguenze che possono essere confrontate con i dati a disposizione.

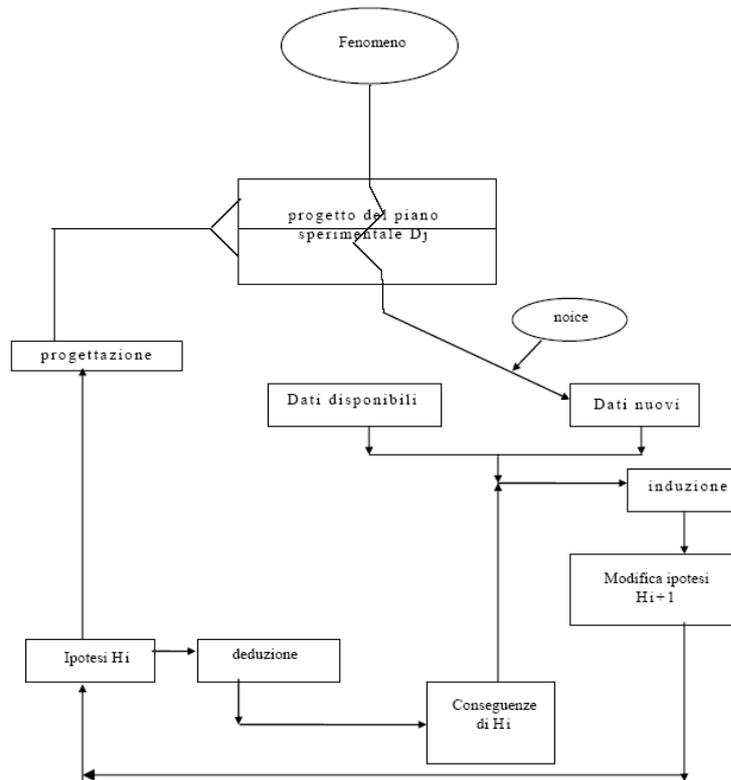


Figura 54 Processo di determinazione e di analisi dei risultati sperimentali

Quando le conseguenze dedotte e i dati sperimentali non concordano, le eventuali discrepanze possono condurre, attraverso un altro meccanismo di induzione, alla modifica delle ipotesi di partenza. Inizia così un secondo ciclo di iterazione. Le conseguenze relative alle ipotesi modificate sono nuovamente confrontate con i dati (vecchi e nuovi acquisiti) che possono indurre a ulteriori modifiche e ad un guadagno di conoscenza aggiuntiva sul fenomeno in esame. I dati nuovi generati nelle successive prove sperimentali, come mostra lo schema, dipendono dalle ipotesi correnti in corso di verifica. La progettazione delle prove dovrebbe esplorare le zone d'ombra della attuale conoscenza del fenomeno, la cui "messa in chiaro" è al momento ritenuta importante ai fini dell'acquisizione di nuova conoscenza. Il progetto del piano sperimentale è rappresentato da una finestra mobile, attraverso la quale alcuni aspetti dello stato reale del fenomeno,

più o meno distorto dal rumore, possono essere osservati. Il diagramma enfatizza inoltre che, sebbene lo stato del fenomeno possa essere falso o quantomeno inesatto, i dati sono stati generati dal vero stato del fenomeno. Questa è la ragione per cui il processo di continuo aggiornamento delle ipotesi e di confronto degli stati del fenomeno con i dati reali può condurre alla convergenza verso la reale conoscenza del fenomeno stesso [47].

2.6. OBIETTIVI DELLA SPERIMENTAZIONE

In ambito industriale, l'attività sperimentale è rivolta essenzialmente a conoscere/verificare/migliorare:

1. le caratteristiche funzionali in termini di prestazioni di un sistema;
2. la stabilità nel tempo delle caratteristiche funzionali;
3. l'uniformità nel tempo delle caratteristiche funzionali;
4. l'uniformità delle caratteristiche fra vari esemplari prodotti;
5. il mantenimento delle caratteristiche funzionali in varie condizioni operative.

Dalla applicazione sistematica dei precedenti punti alla progettazione si ottiene:

- la ricerca della migliore architettura del sistema (punto 1) per rispondere alle esigenze di prestazione;
- la scelta dei materiali e delle tecnologie per garantire determinati valori di affidabilità (punti 2, 3);

- la garanzia dell'uniformità di risposta fra vari esemplari lungo la produzione e l'esercizio (punto 4);

- la garanzia del funzionamento in condizioni di sicurezza, anche se il sistema è sottoposto a condizioni di funzionamento diverse dalle nominali o fuori dai valori di tolleranza (punto 5).

Qualunque prodotto, bene materiale, servizio, processo può essere descritto come un sistema (figura 3.9) che elabora i vari segnali di comando e i condizionamenti dell'ambiente, secondo uno schema individuato da opportuni parametri di progetto, fornendo come uscita (output) una ben definita caratteristica funzionale.

Le grandezze di ingresso al sistema, chiamate fattori, si possono classificare in:

- grandezze quantitative;
- grandezze qualitative.

I fattori quantitativi sono grandezze misurabili (ad esempio la velocità, la temperatura, la pressione, ..) e il loro valore può variare, nella maggior parte dei casi, con continuità. Un modo per lo studio sperimentale del sistema è quello di assegnare ai fattori dei valori precisi definiti "livelli" dei fattori. La scelta del numero dei livelli per ogni fattore, e l'ordine in cui tali livelli vengono configurati e combinati tra loro in ogni prova, trova posto nell'ambito della disciplina del Design of Experiments. I fattori qualitativi non possono essere misurati, ma i loro livelli possono essere identificati e classificati (ad esempio per la grandezza "operatore" si possono identificare gli operatori 1 e 2). Ogni prova che faccia parte di un piano sperimentale avrà i livelli dei fattori impostati secondo il piano prescelto, come si vedrà in seguito. Si considerino ad esempio due fattori (non importa se quantitativi o qualitativi) A e B. Si ammetta che ciascun fattore possa essere impostato su tre valori diversi, definiti e identificati.

Si avranno allora i livelli A1, A2, A3, B1, B2, B3. Rappresentando in un piano questi livelli, si otterrà la figura 55:

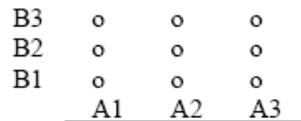
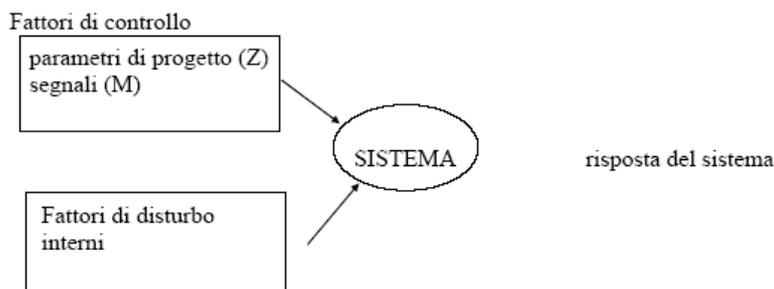


Figura 55 Punti sperimentali

in cui i vari punti sperimentali rappresentano le possibili combinazioni fra i due fattori che possano avere un effetto sulla risposta del sistema. Il problema, ai fini della scelta del migliore piano sperimentale, è riuscire a determinare un insieme minimo e “ottimale” di punti per massimizzare (o minimizzare) la risposta del sistema.

Per identificare il componente, il complessivo, il prodotto, il processo oggetto dello studio useremo in seguito il termine “sistema”. Il sistema interagisce con l’ambiente esterno attraverso dati in ingresso (input) e dati in uscita (output).



Gli input si dividono in fattori di controllo (M, Z) e fattori di disturbo (X), gli output sono le risposte del sistema (Y) valutabili come prestazioni, requisiti, indici. Le definizioni sono le seguenti:

- segnali (M): le grandezze normalmente gestite dall'utilizzatore o dal controllore del sistema (uomo o macchina) durante l'uso;
- parametri di progetto (Z): le caratteristiche, le grandezze o le scelte di progetto del sistema i cui valori possono essere modificati senza alterare la funzionalità del sistema e le cui modifiche non comportano aumenti di costo;
- fattori di disturbo (all'interno o all'esterno del prodotto e del processo): interni ed esterni al sistema e relativi a quelle grandezze i cui valori non possono essere economicamente controllati e modificati, cioè i cui valori non possono essere impostati a piacere in condizioni di funzionamento/produzione regolare. In caso di risposta dinamica si ha:

$$Y = f [M(t), X(t), Z(t)] \quad (9)$$

Obiettivo dello sperimentatore e del progettista è ottenere una risposta che dipenda, nel modo desiderato, solo dai fattori di controllo.

La risposta del sistema Y è una funzione conosciuta o sconosciuta, a seconda dei casi, dei fattori di ingresso. La sperimentazione "classica" è indirizzata ad individuare le variabili del modello confrontando il modello sperimentale con una ipotesi di modello costruito a priori. La costruzione a priori può essere fatta sulla base di teorie fisiche nel qual caso il modello viene detto teorico. Può essere fatta, anche, sulla base di intuizioni plausibili derivanti dalle conoscenze del fenomeno da parte dello sperimentatore: in questo caso, il modello matematico viene detto empirico. Il modello è un legame matematico funzionale fra l'uscita e le variabili di ingresso. La scelta del piano sperimentale da utilizzare durante la sperimentazione è condizionata dalle variabili considerate e dalle loro interazioni. Si pensi, ad esempio, al modello seguente:

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_1X_2 \quad (10)$$

in cui X_1 e X_2 sono due fattori diversi fra loro. Lo sperimentatore non conosce i valori dei coefficienti a, b, c ed è proprio con la sperimentazione che

tenta di conoscerli. Il coefficiente “a” rappresenta il peso della variabile X_1 sulla risposta Y , “b” quello di X_2 , “c” quello dell’interazione fra X_1 e X_2 . Se il modello è teorico l’obiettivo della sperimentazione è conoscere, con la precisione desiderata, il valore dei coefficienti e se la modalità di costruzione del modello è corretta. Se il modello è empirico l’obiettivo è di verificare se le variabili scelte sono idonee a spiegare il fenomeno osservato. Spesso si ricorre a modelli empirici per esaminare sistemi troppo complessi o non ben conosciuti. I modelli di tentativo (modello empirico postulato) saranno normalmente a coefficienti lineari e applicabili a un dominio limitato della risposta (intervalli limitati di fattori) [48]. I passi da seguire per la sperimentazione in presenza di modelli empirici sono:

1. costruzione di un modello plausibile;
2. determinazione del piano sperimentale (DoE) e sua effettuazione;
3. analisi dei dati sperimentali (determinazione dei coefficienti del modello e stima della loro significatività);
4. accettazione o rifiuto del modello postulato.

In caso di rifiuto del modello postulato si ricomincia la sperimentazione sfruttando risultati già rilevati (grazie all’uso di piani sperimentali opportuni): questo consente di non dover partire già dall’inizio con l’analisi di un modello troppo complesso e che richiederebbe una sperimentazione lunga e costosa. Si deve inoltre considerare che normalmente si ha a che fare con sistemi caratterizzati da diverse risposte (variabili dipendenti). Per ciascuna risposta l’analisi può fornire la significatività dei fattori in gioco, ma se si confrontano i risultati di diverse risposte si può avere disaccordo sui valori da far assumere ai fattori. In questo caso è opportuno stabilire una scala di priorità degli obiettivi da ottimizzare.

2.7. EXPERIMENTAL DESIGN

2.7.1. EFFETTI ED INTERAZIONI

Il piano degli esperimenti o *Experimental Design* comprende tutte le informazioni importanti circa le fasi di esecuzione delle prove, la scelta e la suddivisione del materiale sperimentale, il rilievo dei dati sperimentali, la loro analisi e interpretazione. Questa informazione consente di individuare in modo univoco il metodo di esecuzione dei vari procedimenti necessari per fornire una risposta quantitativa alle questioni che hanno motivato l'esperimento. Una delle difficoltà principali che si incontrano in campo sperimentale è la dipendenza dei risultati delle prove da fattori di influenza non controllati dallo sperimentatore. E' pertanto importante concepire il piano degli esperimenti in modo tale da sottrarre, per quanto possibile, i risultati all'azione delle grandezze di influenza, eliminandone gli effetti all'atto dell'elaborazione dei dati, utilizzando la loro parte residua nella stima dell'errore sperimentale, per valutare realisticamente la precisione dei risultati conseguiti. Risulta fondamentale, in questo senso, evitare che i fattori incontrollati esercitino un'azione sistematica non compensata. La possibilità di effettuare delle inferenze corrette su un certo fenomeno dipende, in maniera molto chiara, dalla corretta impostazione dell'esperimento; molte volte, al contrario, troppo poco tempo viene dedicato alla sua pianificazione. E' allora buona norma fare una traccia, preferibilmente scritta, delle motivazioni e degli scopi che determinano l'esecuzione dell'esperimento. Se un esperimento è stato correttamente pianificato o programmato, i dati si presenteranno raggruppati nella forma più adatta per trarre delle valide inferenze sul problema analizzato. Il DoE (*Design of Experiment*) è appunto una sequenza di passi da compiere all'inizio del lavoro tale da assicurarci che i dati sperimentali saranno ottenuti in modo che la loro analisi statistica fornisca subito delle inferenze di questo genere. E' bene sottolineare che non esiste per un dato problema "il piano sperimentale ottimo", superiore a tutti gli altri per la "bontà" delle informazioni ottenute [49].

Nell'Experimental Design vengono studiati molti fattori (variabili) e i loro effetti sulla risposta dell'esperimento. Il DoE permette di progettare e di

registrare una misura della risposta del sistema per ciascuna delle possibili combinazioni dei livelli dei fattori. In passato si sarebbe condotto l'esperimento con il metodo "1 fattore per volta". Ma in molti casi gli effetti di un fattore condizionano la scelta del livello per l'altro fattore. Se ad esempio si considera come esperimento l'effetto dei fattori "amperaggio" e "forza elettromagnetica fra due morsetti" sulla "risposta ohmica", la resistenza a diversi livelli di corrente può essere diversa quando si scelgono livelli differenti di forza elettromotrice e viceversa: cioè si potrebbe verificare un effetto d'interazione fra due fattori e il metodo "1 fattore per volta" non permette di verificarlo. Nell'analisi di un esperimento si parla di effetti principali o d'interazioni. Gli effetti principali corrispondono agli effetti dei singoli fattori e sono calcolati considerando le risposte medie ai vari livelli del singolo fattore. Se, ad esempio, un fattore ha due livelli l'effetto principale è la differenza delle risposte medie corrispondenti ad ogni livello del fattore. Nel caso si considerino più di due livelli si parla di componenti dell'effetto principale: per due livelli si avrà solo la componente lineare, per tre livelli la lineare e la quadratica, per quattro livelli si aggiunge anche la componente cubica, ecc.. Il numero delle componenti dell'effetto principale è uguale al numero dei livelli meno 1. L'interazione è l'influenza reciproca di due o più fattori sulla propria azione, tanto che non è possibile ragionare su una o l'altra indipendentemente. Facendolo si corrono seri rischi di fare previsioni errate. Accade spesso che sono proprio le interazioni fra i fattori le principali cause della variabilità. E' quindi necessario che il "team" si sforzi di intuire quali possano essere le più probabili. Anche qui bisogna però tenere presente che più sono le interazioni sospettate, più saranno le prove da eseguire per verificarne la reale importanza. Le interazioni possono avvenire fra tre o più fattori [50]. L'esperienza insegna però che più aumenta il numero dei fattori e più scarsa è la loro importanza. Di solito ci si limita perciò ad esplorare solo quella fra due fattori e, di quelle possibili, solo quelle veramente sospette. Si considerino due fattori A e B ciascuno a due livelli. L'interazione fra A e B è un "effetto del secondo ordine". L'interazione di primo grado fra tre fattori a due livelli è un effetto del terzo ordine. Se ci sono "a" livelli per A e "b" livelli per B allora l'interazione avrà $(a-1)*(b-1)$ componenti indipendenti. Per stimare un'interazione, si prepara una tabella a doppia entrata con i dati osservati,

derivanti da due prove per ogni livello dei fattori. Con riferimento alla tabella 3, y_i è la risposta della prova i -esima, le prove 1 e 2 sono state condotte ai livelli A_1 e B_1 , le prove 7 e 8 ai livelli A_1 e B_2 e così per le altre celle delle tabelle. I precedenti dati possono essere disegnati per illustrare l'interazione fra AB (figura 56).

	B_1	B_2
A_1	$(y_1+y_2)/2$	$(y_7+y_8)/2$
A_2	$(y_3+y_5)/2$	$(y_4+y_6)/2$

Tabella 3 Tabella per il calcolo degli effetti tra due fattori a due livelli

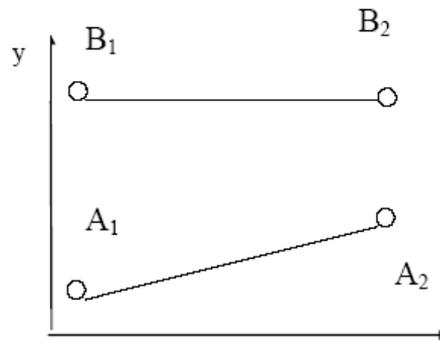


Figura 56 Interazione tra due fattori

Se la differenza nella risposta fra due livelli di A rimane costante per ogni livello di B (a meno dell'errore sperimentale) si dice che non c'è interazione fra A e B. Da un punto di vista geometrico stimare un'interazione significa determinare il non parallelismo degli effetti dei fattori. Se con i fattori A e B con due livelli ciascuno si ottiene:

$$f(A_1, B_1) - f(A_1, B_2) \neq f(A_2, B_1) - f(A_2, B_2),$$

c'è interazione.

Se si hanno i tre fattori A, B, C l'interazione ABC può essere stimata fra il fattore A e l'interazione BC, oppure fra B e AC, o fra C e AB indifferentemente. Le cose si complicano quando si considerano le interazioni lineari fra due fattori AB a tre livelli. In questo caso la risposta mantiene la differenza dovuta alla variazione di B sui tre livelli di A e quindi non c'è interazione lineare fra A e B.

2.8. ESPANSIONE MEDIANTE POLINOMI ORTOGONALI

Una espansione ortogonale fornisce un mezzo efficace per valutare l'influenza che una variabile contributiva esercita sulla caratteristica obiettivo. In passato, spesso i progettisti usavano lo sviluppo in serie di Taylor per calcolare gli effetti funzionali della variazione di un fattore. Per una funzione esponenziale nella variabile A si ha il ben noto sviluppo di Taylor:

$$e^A = 1 + \frac{A}{1!} + \frac{A^2}{2!} + \dots + \frac{A^5}{5!} + \dots \quad (11)$$

La tabella 4 mostra l'errore al variare di A nell'intervallo (-2, 2) a passi di 0.5, quando la funzione viene approssimata mediante lo stesso sviluppo, dal primo fino al quinto termine. La variazione dell'errore è la somma dei quadrati degli errori, ci sono nove gradi di libertà e la varianza è la variazione dell'errore divisa per il numero dei gradi di libertà. Ogni colonna fornisce le differenze fra il valore vero della funzione ed il valore della approssimazione.

A	e ^A	1°	2°	3°	4°	5°
-2.0	0.135	-1.135	0.865	-0.468	0.190	-0.068
-1.5	0.223	-0.723	0.402	-0.161	0.050	-0.013
-1.0	0.368	-0.368	0.132	-0.036	0.008	-0.001
-0.5	0.607	-0.107	0.018	-0.003	0.000	0.000
0.0	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.5	1.649	-0.149	-0.024	-0.003	-0.001	0.000
1.0	2.718	-0.718	-0.218	-0.051	-0.010	-0.001
1.5	4.482	-1.982	-0.857	-0.294	-0.084	-0.020
2.0	7.389	-4.389	-2.389	-1.056	-0.389	-0.122
Varianza del'errore		25.687	7.4174	1.4504	0.1971	0.0200

Tabella 4 Errore nello sviluppo di Taylor

Per una espansione ortogonale, l'entità della variazione dell'errore può essere calcolata costruendo una tabella di analisi della varianza. Scrivendo b_i per i coefficienti dell' i -esimo termine avremo che la variazione sarà fornita dall'espressione:

$$S_{b_i} = \frac{(W_1 A_1 + \dots + W_k A_k)^2}{r \cdot \lambda^2 \cdot S} \quad (i= 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

in cui r è l'iterazione, cioè il numero di valori calcolati che figurano nelle somme dei termini A_i .

N. di livelli	K=2		K=3		K=4			K=5		
Coefficiente	b1	b1	b2	b1	b2	b3	b1	b2	b3	b4
W_1	-1	-1	1	-3	1	-1	-2	2	-1	1
W_2	1	0	-2	-1	-1	3	-1	-1	2	-4
W_3		1	1	1	-1	-3	0	-2	0	6
W_4				3	1	1	1	-1	-2	-4
W_5							2	2	1	1
$\lambda^2 S$	2	2	6	20	4	20	10	14	10	70
λS	1	2	2	10	4	6	10	14	12	24
S	1/2	2	2/3	5	4	9/5	10	14	72/5	288/35
λ	2	1	3	2	1	10/3	1	1	5/6	35/12

Tabella 5 Polinomi ortogonali

Adottando i polinomi ortogonali per $K=9$, considerando i valori 0.135, 0.223, ..., 7.389 della funzione esponenziale nei punti in cui il fattore A è uguale a -2.0, -1.5, ..., 2.0 come dati per nove livelli di A ed utilizzando i dati della tabella 4, per uno sviluppo arrestato al terzo grado l'errore quadratico totale per un'espansione ortogonale è 23.7 volte più precisa che non tramite uno sviluppo di Taylor. Normalmente si adottano due o tre livelli (K). Infatti nel caso di parametri misurabili in modo continuo (infiniti valori), al "team" non interessa esplorare per intero tutto l'intervallo, ma vuole scoprire la reale influenza su processo. E' quindi sufficiente far assumere al parametro due livelli, ben differenziati, così da farne manifestare con chiarezza la reale importanza. Di solito vengono scelti due livelli vicini ai limiti dell'intervallo praticabile, comunque realistici e sensati. I fattori possono anche essere di tipo discreto: in questo caso la scelta dei livelli è semplice e coincide con le configurazioni che si vogliono considerare. I livelli, in entrambi i casi possono essere anche più di due. Resta comunque il problema che anche il loro numero andrà ad influenzare la quantità di prove necessarie. La scelta dipende quindi dalle conoscenze che i tecnici hanno già. Spesso si sceglie, come un livello quello normalmente utilizzato nel processo, per assegnare al secondo livello un valore più alto o più basso in funzione de sospetti. Se si decide di lavorare su tre livelli, si adotta il centrale come quello normalmente utilizzato e gli altri due vicini agli estremi dell'intervallo.

2.9. PROGETTAZIONE DEGLI ESPERIMENTI (DESIGN OF EXPERIMENTS)

2.9.1. PROGRAMMA DI DESIGN OF EXPERIMENTS

Di fondamentale importanza per la buona riuscita di un esperimento è la programmazione dello stesso non solo dal punto di vista delle grandezze coinvolte e dei livelli dei fattori, ma per tutte le attività e gli strumenti occorrenti per il rilievo e l'analisi dei dati. L'effetto dei risultati di un esperimento è chiaramente condizionato dalle tempistiche di ottenimento dei risultati, che devono essere disponibili in tempo utile per l'eventuale decisione operativa di

modifica o innovazione di un processo [52]. La complessità della programmazione deve conformarsi al livello di complessità del sistema in studio e al tipo di vincoli economici ai quali si è soggetti. Le tecniche di “design of experiments” consentono di campionare lo spazio dei parametri in un numero minimo ed ottimale di punti al fine di poterne derivare gli elementi utili alla costruzione dei modelli matematici, che sono quindi modelli empirici e non fenomenologici. Il problema base del “design of experiments” è decidere quale insieme di punti di misura è più idoneo nella particolare situazione di interesse. La questione della localizzazione dei punti sperimentali per la stima di un modello empirico è apparentemente un circolo vizioso, in quanto se si conoscesse prima il comportamento della funzione, sarebbe possibile effettuare una buona scelta dei punti di misura. Ma la determinazione della funzione è appunto l’oggetto dell’investigazione. Fortunatamente questa circolarità non è paralizzante, specialmente quando gli esperimenti possono essere condotti sequenzialmente, cosicché l’informazione ottenuta in un gruppo di esperimenti influenza la scelta degli esperimenti del gruppo successivo. Lo schema più semplice e purtroppo più frequentemente utilizzato in passato in campo industriale, consiste nell’eseguire una o più prove per ogni valore considerato, o livello, del parametro assunto come indipendente, mantenendo costante ogni altra condizione. Per valutare poi gli effetti degli altri parametri, si ripete per ognuno il procedimento. L’estrema semplicità di questo modo di procedere monovariato, è accompagnata da due svantaggi essenziali, che ne rendono ben di rado giustificabile l’impiego. Il primo svantaggio è che l’utilizzazione dei risultati sperimentali è scarsa, in particolare quando è necessario effettuare delle replicazioni per misurare la varianza della caratteristica di qualità; il secondo svantaggio è che si ottengono indicazioni circa l’effetto di ciascun parametro valide soltanto per una ed una sola particolare combinazione di livelli di tutti gli altri. In altri termini, mancando qualsiasi stima circa l’entità delle interazioni tra i vari parametri, non si può assolutamente prevedere l’effetto di variazione di due o più parametri contemporaneamente. Il “*design of experiments*” è invece basato su un approccio multivariato, ove più di un parametro viene variato contemporaneamente da un esperimento all’altro. Fissati i livelli dei parametri del sistema, la massima informazione è ottenibile con un piano fattoriale

completo, che prevede l'esecuzione di prove per tutte le possibili combinazioni dei livelli dei vari parametri e che consente la stima di modelli contenenti tutti i termini di interazione fra i parametri in gioco. I piani fattoriali completi sono la tipologia più semplice fra i piani sperimentali multivariati contemplati dalle tecniche di "design of experiments". Quando il numero dei parametri in gioco è elevato, il problema che sorge con l'uso di piani fattoriali completi è il numero di prove da effettuare, in quanto esso cresce geometricamente all'aumentare dei parametri (y_k)⁸ (con y = numero dei livelli e k = numero dei fattori). D'altra parte non è necessario in questi casi ricorrere a modelli contenenti tutti i termini di interazione tra i parametri, in quanto generalmente le interazioni di ordine superiore sono di entità decrescente. Si ricorre allora a piani "fattoriali frazionari" che sfruttando conoscenze a priori o "ipotesi di lavoro" relative al contesto sperimentale in cui si opera, consentono di stimare i parametri "non trascurabili" del modello senza ricorrere ai dispendiosi piani completi. La costruzione di un piano fattoriale frazionario viene condotta rispettando anche un'altra importante proprietà: l'ortogonalità. Questa consente di stimare ciascun termine del modello in modo statisticamente scorrelato o "indipendente" dagli altri. Esiste poi tutta una serie di piani sperimentali, non necessariamente ortogonali, (piani composti centrati, a stella, piani ottimali, ecc.) che presentano peculiarità talora importanti per la stima efficiente di modelli non lineari [53]. Le tecniche di "*design of experiments*" consentono di raggiungere efficienze straordinarie nella estrazione di informazioni mediante sperimentazioni, favorendo la modellazione empirica di sistemi anche molto complessi sia per numero di parametri in gioco sia per non linearità presenti nel loro comportamento. I requisiti di base per il DoE sono i seguenti:

- gli esperimenti devono avere obiettivi ben definiti;
- gli effetti dei fattori non devono essere nascosti da altre variabili: l'uso di appropriati modelli e schemi aiuta a dividere gli effetti di interesse da quelli dovuti a variabili non controllate e semplifica l'analisi dei risultati;
- l'esperimento deve essere eseguito "casualizzando" (randomization) la sequenza delle prove;

- l'esperimento deve fornire una stima della varianza dell'errore sperimentale attraverso la replica di alcune prove.

L'esecuzione delle prove dell'esperimento in ordine casuale dà maggiore confidenza sul fatto che i disturbi e gli errori sperimentali siano distribuiti in modo normale fra i dati e permette l'uso di test di significatività dei fattori secondo opportuni intervalli di confidenza. La ripetizione delle prove è utile per misurare la precisione e la ripetibilità delle osservazioni con l'obiettivo di bilanciare l'effetto di variabili sconosciute o dei fattori di disturbo che possono agire in modo diverso da una replica all'altra. Si definisce "blocco" una porzione omogenea del materiale o dell'ambiente sperimentale. Ad esempio, gli elementi prelevati da un certo lotto saranno tipicamente più uniformi rispetto a quelli prelevati da lotti diversi. Anche le osservazioni sperimentali raccolte in un intervallo di tempo limitato avranno minore dispersione di quelle raccolte in più giorni. Se si effettua un bloccaggio sul giorno vuol dire che la variabilità dovuta al giorno di prova ha poca importanza, oppure che non si vuol studiare l'effetto dovuto alla sua variabilità. La necessità di suddividere l'esperimento può derivare dall'approvvigionamento a lotti del materiale sperimentale, oppure dalla durata delle prove o ancora dalla difficoltà di impostare un livello di un fattore. La presenza dei fattori di disturbo sollecita pertanto a scegliere il piano sperimentale in modo che:

1. la possibile influenza dovuta ai fattori di disturbo non influenzi i fattori di interesse primario;

2. possano essere ottenute alcune informazioni sull'entità degli effetti delle variabili di disturbo.

Alla luce di quanto detto la programmazione di un esperimento segue i passi sotto elencati:

1. ottenere una chiara definizione del problema
2. raccogliere tutte le informazioni disponibili
3. progettare l'esperimento

4. preparare un programma sistematico di esecuzione delle prove
5. revisionare il piano
6. eseguire l'esperimento
7. analizzare i dati
8. interpretare i risultati
9. preparare il rapporto

In dettaglio:

1) Ottenere una chiara definizione del problema:

- identificare il problema in termini quantitativi. Questa attività può essere svolta in gruppo se il sistema in oggetto presenta aspetti multidisciplinari;

- elaborare un elenco con tutte le possibili risposte d'interesse e identificare quelle che devono essere misurate;

- verificare l'esistenza e la disponibilità della strumentazione e del materiale necessario per la misura della risposta;

- identificare le risposte il cui contenuto può differire da quello previsto (senza che per questo si creino dei problemi) e quelle in cui ciò non deve verificarsi;

- identificare i campi di variazione delle misure e dei fattori.

2. Raccogliere le informazioni disponibili (vagliare tutte le sorgenti di informazione):

- elaborare un elenco di tutti i possibili fattori che possono influenzare le risposte scelte;

- identificare i fattori che possono essere modificati, quelli da tenere costanti e quelli che non possono essere controllati;

- identificare i campi di variazione o le limitazioni delle misure e dei fattori.

3) Progettare l'esperimento:

- verificare le condizioni del problema;
- scegliere i fattori da analizzare, determinandone i campi di variazione e i livelli;
- considerare le possibili interazioni fra i fattori;
- tracciare possibili alternative di sperimentazione descrivendo vantaggi e svantaggi di ciascuna di fronte agli obiettivi dati considerando le diverse strutture di *aliasing*;
- considerare l'effetto del campionamento sulla variabilità e dei metodi di misura.

4) Preparare un programma sistematico di esecuzione:

- eliminare l'effetto di variabili (fattori) che non sono d'interesse;
- minimizzare il numero delle prove sperimentali coerentemente con gli obiettivi: qui il metodo è ancora soggettivo e variabile da caso a caso: la scelta del giusto numero di fattori, livelli e prove è un problema di bilanciamento in base ai vincoli temporali ed economici e alla significatività delle risposte;
- selezionare il metodo di analisi statistica dei risultati;
- provvedere per una registrazione di dati ordinata.

5) Revisionare il piano,

- aggiustarlo come richiesto

- compilare i passi da seguire.

6) Eseguire l'esperimento:

- registrare i dati e le modifiche incorse durante la sperimentazione per mancanze o inefficienza al piano.

7) Analizzare i dati:

- rivedere se sono stati commessi errori, utilizzare grafici.

8) Interpretare i risultati:

- considerare tutti i dati osservati, limitare le conclusioni a strette deduzioni in termini probabilistici e dimostrabili e sulla base di livelli di significatività statistica;

- sottolineare le implicazioni dei risultati per l'applicazione e per lavori successivi.

9) Preparare il rapporto.

I rischi maggiori di insuccesso durante la preparazione di un DoE si verificano quando si scelgono i fattori e successivamente il numero dei livelli per fattore.

I valori dei livelli di ogni fattore dovrebbero permettere di evidenziare la significatività o meno del fattore rispetto agli altri. Quando si conoscono le distribuzioni di probabilità dei fattori si possono impostare valori distanti lo stesso numero di deviazioni standard dal valore medio in modo che tutti i fattori abbiano una variazione imposta con uguale probabilità di verificarsi. Il DoE da solo non permette di identificare tutti i fattori importanti per il fenomeno da studiare e da ottimizzare. Se non sono stati presi in considerazione i veri fattori importanti, questo, in ogni caso, dovrebbe risultare dal valore dell'errore

sperimentale (sempreché lo si possa stimare) sulla base dei risultati dell’F-test. Esistono varie tipologie di piani di esperimenti, ciascuno dei quali è caratterizzato da determinate caratteristiche strutturali, da certi vantaggi e svantaggi e dalle particolari modalità di applicazione [54]. I principali tipi di piani degli esperimenti sono descritti di seguito.

2.9.2. PIANI PARAMETRICI

I piani sperimentali più semplici sono i piani parametrici (chiamati anche “un fattore alla volta”), in cui si valuta l’effetto di ciascun fattore sulle risposte ai diversi livelli, mantenendo gli altri fattori fissi. Il numero di prove necessario per stimare gli effetti di K fattori con n_i livelli ciascun è $n = r(Kn)$, dove con r si è indicato il numero di ripetizioni di ciascuna prova. Nel caso si abbia il fattore A con “a” livelli e con il fattore B con “b” livelli e si effettuino 4 repliche si avranno $4(a+b)$ prove. Per condurre un piano parametrico si può procedere in uno dei seguenti modi:

1. Si può condurre un esperimento in cui, ad ogni esecuzione, si varia il livello di un fattore alla volta, tenendo costante gli altri come mostrato nella tabella 6 (per fattori a due livelli).

Il limite di questo metodo è chiaro: se ci sono interazioni tra un fattore e l’altro, queste non possono essere valutate; inoltre, l’elevato numero di combinazioni (2^k per k fattori a due livelli) rende oltremodo lungo e costoso l’esperimento.

Esecuzione	Fattore	Livello	Misura
1	A	-	xx
2	A	+	xx
3	B	-	xx
4	B	+	xx
.			
.			

Tabella 6 Piano sperimentale di un piano parametrico

2. Si possono valutare le variazioni di più fattori ma uno alla volta; con 4 fattori si ottengono le cinque combinazioni riportate in tabella 7. In realtà anche se in questo modo si riduce il numero di combinazioni da $(2k)$ a $(k+1)$, non si riescono ancora a valutare le interazioni tra i K fattori. Inoltre, se ad esempio si prendono due risposte per ogni misura, mentre al livello “+” di qualsiasi fattore corrispondono due osservazioni, al livello “-“ ne corrispondono ben 8.

Combin	A	B	C	D	Misura
1					
2					
3					
4					
5					

Tabella 7 Piano sperimentale di quattro fattori a due livelli cambiando un fattore alla volta

Se si paragonano i due dati con gli altri 8 il confronto non è equo ed il piano si dice “non bilanciato”, mentre se si usano solo due delle 8 misure ottenute al livello “-“ gli altri dati sono sprecati. Si nota che nei quattro casi in cui il fattore A è al livello “-“, il fattore si trova 3 volte “-“ e solo 1 volta al livello “+”, mentre quando A “+” B si trova solo al livello “-“. Per il bilanciamento occorrerebbe invece che in corrispondenza del livello “-“ del fattore A, B fosse tante volte al livello “+” quante volte al livello “-“. Quando poi A vale “+”, B dovrebbe di nuovo assumere i due livelli “+” e “-“ in numero paritetico.

3. Un terzo approccio al problema è quello di far variare contemporaneamente tutti i fattori, come indicato in tabella nel caso di 4 fattori.

Combin	A	B	C	D	Misura
1	-	-	-	-	xx
2	+	+	+	+	xx

Tabella 8 Piano sperimentale con variazione di tutti i fattori

In questo caso si hanno solo due combinazioni (indipendentemente da quanti siano i fattori), ma si perde la possibilità di valutare l'effetto dei singoli fattori: ad esempio, se due fattori agiscono in modo tra loro opposto, il fatto che la risultante sulla risposta sia nulla potrebbe far pensare che essi non caratterizzino l'esperimento.

2.9.3. PIANO FATTORIALE COMPLETO

I limiti dei tre precedenti metodi vengono superati da un tipo di DoE ormai affermato e diffuso: l'esperimento fattoriale completo (*Full Factorial Experiment*) [55]. Con questo metodo, indipendentemente dal numero di fattori, si riesce ad avere un piano bilanciato in cui ciascun fattore è stimabile indipendentemente da ogni altro ed è possibile anche valutare tutte le interazioni di qualsiasi ordine. Questo piano viene usato per studiare due o più fattori a vari livelli quando l'interazione fra i fattori può essere significativa. Il numero delle prove risulta di y^k . Se ad esempio si hanno due fattori con tre livelli ciascuno, si dovranno condurre 32 prove per avere il piano fattoriale completo. In generale se per il fattore i -esimo abbiamo un numero di livelli $n(i)$ allora il numero delle prove sarà il prodotto di tutti gli $n(i)$. Nell'analisi dei dati si parla di effetti principali e di interazione. Se il fattore ha oltre due livelli si parla di componenti principali: lineare, quadratica, cubica, ecc.. Il fatto è intuitivo pensando che fra due punti (due livelli) passa una retta da cui è possibile capire l'effetto lineare, fra tre punti passa una curva di secondo grado ovvero si stima l'effetto quadratico e così via (tabella 11). Nella fase di scelta del numero di livelli e della loro spaziatura si cerca di ottenere più informazioni possibili sull'effetto del fattore in studio. Se, ad esempio, si fissano solo due livelli per economia delle prove od esigenze di tempo, ma il fattore presenta un effetto come quello rappresentato dai punti della tabella 12, si otterrà un andamento lineare che segue la retta orizzontale e per cui si potrebbe decidere che il fattore non è significativo (la risposta non varia sui due livelli scelti). Se si fosse considerato un possibile effetto quadratico del fattore, si sarebbe scelto anche il punto A2, che avrebbe permesso di valutarne l'effetto [56]. Il ragionamento è facilmente estensibile al caso di più fattori. Un esempio di piano fattoriale completo per un piano a 4 fattori e due livelli è riportato nella tabella 9. Essa è caratterizzata da:

- 16 righe, che rappresentano tutte le possibili combinazioni da considerare nell'esperimento degli stati dei fattori A, B, C, D;

- 15 colonne che sono da associare ai 4 fattori e alle 11 interazioni (di vario ordine). Quando si hanno k fattori a due livelli l'esperimento fattoriale ha 2k combinazioni (una per ogni possibile combinazione dei k fattori a due livelli) e si parla di "2k Factorial Experiment"; con esso è possibile identificare (2k-1) statistiche e cioè:

1. k effetti del primo ordine (effetti principali dei fattori);
2. $k(k-1)/2!$ effetti del secondo ordine (interazioni fra due fattori);
3. $k(k-1)(k-2)/3!$ effetti del terzo ordine (interazioni fra tre fattori);
4. ecc..

Comb	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Mis
(1)	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	xxx
A	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	xxx
B	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	xxx
Ab	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	xxx
C	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	+	-	xxx
Ac	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	xxx
Bc	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	xxx
Abc	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	xxx
D	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	xxx
Ad	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	xxx
Bd	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	xxx
Abd	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	xxx
Cd	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	xxx
Acđ	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	xxx
Bcđ	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	xxx
Abcđ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	xxx

Tabella 9 Matrice sperimentale di un piano fattoriale completo per 4 fattori a due livelli

Ogni effetto lineare stimato è una statistica del tipo $(y^+ - y^-)$, cioè è la differenza tra due medie di 2(k-1) osservazioni ciascuna. Nel precedente esempio con k fattori (k=4), si individuano (24-1) statistiche, da cui è possibile risalire agli effetti dei 4 fattori e delle 11 interazioni dell'esperimento. A tale

scopo viene associato ad ogni fattore ed ad ogni interazione una colonna della matrice (tra parentesi è riportato il numero d'ordine della colonna):

- per i 4 effetti A(1), B(2), C(4), D(8);
- per i sei effetti del secondo ordine (interazioni del primo ordine) AB(3), AC(5), AD(9), BC(6),BD(10), CD(12);
- per le interazioni del secondo ordine ABC(7), ABD(11), ACD(13), BCD(14);
- per la interazione del terzo ordine ABCD(15).
- L'assegnazione delle colonne segue questo criterio:
 - le colonne sono attribuite a partire dai fattori secondo lo schema 1, 2, 4, 8, ...2n;
 - le interazioni di secondo ordine sono posizionate nella colonna "somma" delle colonne dei due fattori interagenti (ad esempio l'interazione AC è nella colonna 5 in quanto $\text{colA}+\text{colC}=5$);
 - con lo stesso principio si passa a collocare le interazioni del terzo ordine e quelle degli ordini superiori.

Il problema che si presenta con l'esperimento fattoriale completo è quello di essere molto "ingombrante" seppur estremamente preciso e dettagliato; già con un esperimento a 4 fattori e dieci repliche si ottengono 160 risposte che, senza un supporto informatico adeguato, rendono l'analisi statistica pesante. Se poi il numero di ripetizioni o di fattori aumenta ulteriormente il metodo descritto può risultare praticamente inapplicabile per il tempo ed il costo che comporta. Quando il fattoriale comporta un numero di prove elevato da condurre in condizioni non omogenee si usa il cosiddetto piano fattoriale a blocchi (*blocked factorial*). L'insieme completo delle combinazioni dei fattori e dei livelli è

suddiviso in sottoinsiemi (blocchi) sacrificando la stima di interazioni di ordine superiore (che di solito hanno un minore effetto). La partizione dell'insieme delle prove del fattoriale i blocchi è realizzata utilizzando schemi opportuni di suddivisione tali da salvaguardare la stima dei fattori e delle interazioni principali ed i livelli corrispondenti all'interazione da non stimare tra i fattori in combinazione con ciascun livello dei fattori da stimare. Quando il materiale o l'ambiente sperimentale può essere convenientemente suddiviso in blocchi omogenei si usano i piani casualizzati a blocchi (*randomized block*) in cui le prove vengono condotte in ordine casuale all'interno di ciascun blocco.

2.9.4. FATTORIALE FRAZIONARIO (FRACTIONAL FACTORIAL)

Si tratta di piani sperimentali quando si studiano molti fattori e molti livelli. Essi consentono di considerare un sottoinsieme del piano fattoriale completo riducendo il numero di prove da effettuare. Si osserva infatti che con i piani fattoriali completi il numero delle prove cresce in maniera geometrica con il numero dei fattori. Considerando inoltre che di norma i contributi delle interazioni di ordine superiore sono decrescenti (si pensi a variabili quantitative in cui gli effetti corrispondono ai termini di uno sviluppo in serie di Taylor) è ragionevole cercare di ridurre le prove rinunciando ad avere delle informazioni sugli effetti delle interazioni di ordine superiore. Un piano frazionario si dice simmetrico quando tutti i fattori hanno lo stesso numero di livelli e viene indicato normalmente con il numero di livelli elevato alla potenza di $(k-p)$ con k il numero dei fattori e p l'indice di frazionamento. In questo caso il numero delle prove sarà uguale a $[y^{(k-p)}]$, dove y è il numero dei livelli. Ad esempio per un piano a 4 fattori a due livelli con indice di frazionamento $p=1$ si ha $2^{(4-1)}$ che corrisponde a 24/21 prove. La strategia del Fractional Factorial Experiment consente di eseguire solo una porzione dell'intero Full Factorial.

Comb	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Mis.
(1)	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	xxx
Ab	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	xxx
Ac	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	xxx
Bc	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	xxx
Ad	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	xxx
Bd	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	xxx
Cd	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	xxx
Abc	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	xxx
d																

Tabella 10 - Porzione 2^{4-1} del fattoriale completo 2^4

Ad esempio, con One Half Fractional Experiment (cioè $\frac{1}{2}$ del Full Factorial) si ottiene una matrice con solo $2^{4-1} = 8$ (invece di 16) prove. Nel passare da un 2^k a un 2^{k-p} Factorial Experiment, si riduce parimenti il numero di stime indipendenti che possono essere fatte e quindi il frazionamento riduce il livello di risoluzione dell'esperimento in quanto $(2k-2k-p)$ interazioni vengono a sovrapporsi e a confondersi: si parla di "aliasing". Per costruire un Fractional Experiment non occorre necessariamente partire da un Full Fractional Experiment; ad esempio il $\frac{1}{2}$ Factorial con 4 fattori si può preparare considerando un Full Factorial Experiment a tre fattori che presenta nell'ultima colonna l'interazione di terzo grado ABC e poi sostituendo il quarto fattore (D) a tale interazione di ordine superiore.

Combin	1	2	3	4	5	6	7	Misura
1	-	-	+	-	+	+	-	xxx
2	+	-	-	-	-	+	+	xxx
3	-	+	-	-	+	-	+	xxx
4	+	+	+	-	-	-	-	xxx
5	-	-	+	+	-	-	+	xxx
6	+	-	-	+	+	-	-	xxx
7	-	+	-	+	-	+	-	xxx
8	+	+	+	+	+	+	+	xxx
	A,BCD	B,ACD	AB,CD	C,ABD	AC,BD	BC,AD	D,ABC	

Tabella 11 – Fattoriale frazionario per 4 fattori e risoluzione 4

Si viene quindi ad avere $D = ABC$, che viene detto “generatore del Factorial Experiment” riportato in tabella 11. A questo punto occorre precisare che gli effetti prodotti dalle colonne 1, 2, 4, 7 non sono da imputare solo alle interazioni BDC, ACD, ABD, ABC, bensì anche ai fattori, A, B, C, D. Solo se è noto che il contributo delle interazioni è modesto si può affermare che le colonne 1, 2, 4, 7 consentono una stima dei fattori singoli. Per ciò che riguarda le interazioni doppie, non è insolito verificare nelle applicazioni che il loro effetto può essere superiore a quello di molti fattori singoli. Un discorso analogo vale per il progetto dei piani $1/4$, $1/8$, ecc. Fractional Experiment.

2.9.5. SUPERFICIE DI RISPOSTA (RESPONSE SURFACE)

Tecnica utilizzata per costruire una mappa empirica che descrive il modo in cui i fattori influenzano la risposta. I livelli dei fattori sono visti come punti nello spazio dei fattori. La superficie di risposta è una rappresentazione matematica o grafica della connessione fra variabili importanti indipendenti (i fattori controllati) e una variabile dipendente (la caratteristica di qualità generalmente soggetta al controllo). Il diagramma della curva rispetto ai fattori di controllo prende il nome di Response Surface (termine indicato spesso come Response Surface Methodology) ed è introdotto per individuare un modello matematico, valido in un dominio definito, che descriva l'andamento previsto delle curve di superficie [57]. Ovviamente, essendo solo un modello analitico, ci potrà essere un certo scarto rispetto alla superficie reale: se tale errore è contenuto, allora il modello è attendibile per indicare la direzione da seguire per ottimizzare il processo. Per definire il modello della superficie di risposta di un certo processo, si mettono in atto questi steps sequenziali:

1. si realizza un piano fattoriale 2^k centrato: il punto centrale (A_0, B_0) rappresenta la condizione attuale del processo. Intorno ed equidistanti da tale centro sono fissati i vari punti relativi ai livelli “-“ e “+” dei vari fattori.

2. si determina un modello planare (con equazione di primo grado) per descrivere l'area individuata dai punti precedenti, di equazione:

$$y = c_1x_1 + c_2x_2 + c_0 + \varepsilon \quad (13)$$

dove y rappresenta la grandezza dipendente da A , B , c_0 , c_1 , c_2 sono coefficienti da determinare, ε è l'errore del modello (scarto) e x_1 e x_2 sono:

$$x_1 = \frac{A - A_0}{\Delta_A} \quad ; \quad x_2 = \frac{B - B_0}{\Delta_B} ;$$

3. in base a tale modello si calcola y e si ricavano (per $y = \text{costante}$) le curve di livello per la regione definita;

4. si determina la direzione di evoluzione verso le condizioni ottimali;

5. si determinano i valori di y per alcuni punti della retta di evoluzione: da tali valori si evince la zona in cui si hanno i valori preferenziali di y ;

6. nella zona ritenuta preferenziale, centrata attorno a uno dei punti esplorati (di coordinate A_0^* , B_0^* e con nuovi valori Δ_A^* , Δ_B^*), si conduce un nuovo esperimento fattoriale in modo da investigare l'area suddetta ed elaborare un nuovo e più preciso modello costituito da un'equazione di secondo grado; i nuovi coefficienti (c_{11} , c_{22} , c_{12}) individuano, insieme a quelli già determinati, l'equazione che descrive il modello delle curve di livello con scarto ε^* rispetto alle curve reali (in generale $\varepsilon^* < \varepsilon$):

$$y = (c_{11}x_1^2 + c_{22}x_2^2 + c_{12}x_1x_2 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_0 + \varepsilon^*) \quad (14)$$

In altre parole, si individua successivamente il modello di primo ordine, la retta di evoluzione e il modello di secondo ordine.

2.9.6. GROUP SCREENING DESIGN

Questo piano serve a ridurre il numero di prove richieste individuando i pochi fattori importanti. Per cercare i pochi fattori importanti a fronte di un gran numero di fattori possibili si usa il metodo screening. Vengono formati dei

gruppi, ciascuno contenente diversi fattori. Ogni gruppo è quindi trattato come un singolo fattore fino a che non si dimostra l'effetto sulla risposta. A questo punto i gruppi che provano di contenere fattori significativi vengono provati separatamente. Per l'uso di questo piano di progettazione degli esperimenti, vengono effettuate la seguenti supposizioni:

a) inizialmente tutti i fattori sono ugualmente importanti;

b) i fattori non interagiscono tra loro;

c) le direzioni degli effetti, se esistono, sono note (provando il gruppo con tutti i livelli una volta a⁺ e un'altra a⁻, non è detto si riesca a capire la direzione dell'effetto di ogni singolo fattore).

2.9.7. CENTRAL COMPOSITE DESIGN

Per un esperimento fattoriale completo con due fattori A, B a tre livelli ciascuno si può costruire un modello matematico con le variabili relative alla misura dei vari effetti sulla risposta, come mostrato in tabella 12. Questo semplice piano completo comporta 9 prove che servono per stimare l'effetto della media generale e dei vari effetti in quanto ogni parametro (coefficienti del modello) stimato conta per un grado di libertà.

Misura	Variabili	Gradi di libertà
media generale	m	1
effetti principali lineari	A, B	2
effetti principali quadratici	A ² , B ²	2
interazioni lineari	AB	1
interazioni lineari-quadratiche	AB ² , A ² B	2
interazioni quadratiche	A ² B ²	1
Totale		9

Tabella 12 – Effetti generati da due fattori a tre livelli

Normalmente i fattori d'interesse non presentano interazioni quadratiche e lineari-quadratiche significative per cui i gradi di libertà associati a questi effetti

rappresentano inefficienza e uno spreco di risorse. Se si è interessati a conoscere gli effetti quadratici dei fattori singoli ma non delle loro interazioni è possibile costruire un piano fattoriale completo (o frazionario) dei fattori (a due livelli) combinato a un piano sperimentale a un fattore alla volta, in grado di consentire una stima dei termini d'interesse con un numero di prove inferiori ($n=2^{k-p} + 2^k + 1$) a quelle richieste da un piano 3^k (con k = numero dei fattori).

2.10. IL ROBUST DESIGN

Lo scopo principale del Robust Design è trovare la migliore combinazione di parametri di progetto per cui la risposta del sistema abbia dispersione statistica minima intorno al valore richiesto per qualunque combinazione dei valori dei fattori di disturbo. Nella pratica industriale si cerca normalmente di limitare l'effetto di tali variabili di disturbo con l'uso di tecniche statistiche e di ricerca degli errori direttamente in produzione (procedimento online) o durante l'esercizio/l'uso di un prodotto. Progettare un prodotto che poi sarà difficilmente tenuto sotto controllo statistico durante la fase realizzativa vuol dire investire in cattiva qualità, precludere la possibilità di migliorare il prodotto, aumentare i costi per il controllo. Un metodo corretto per controllare (non nel senso di verificare ma di guidare) la qualità del prodotto prima che entri in produzione, è trovare la giusta combinazione di parametri di progetto, spesso numerosi, che permetta di rendere il prodotto ed il processo produttivo relativamente insensibile alle variazioni e agli influssi dei fattori di disturbo. La tecnica che più promette successo, per ottenere i risultati desiderati nel senso ora detto, è la progettazione robusta. Tale metrica si basa sul cosiddetto "quality loss": il valore atteso di perdita monetaria sofferta da un utente nell'arco di vita del prodotto a causa dello scostamento delle prestazioni del sistema da quelli ideali. Indichiamo con Y il valore della caratteristica di qualità (che rappresentano le prestazioni finali del prodotto) in esame assunto da un determinato esemplare del prodotto in un ben preciso istante della sua vita utile, e supponiamo che il suo valore target sia Y_0 . A determinare il valore di Y concorrono evidentemente i parametri di progetto, cioè i parametri che il progettista può controllare (nella terminologia del "robust design" sono i cosiddetti "control factors"), ma non solo: anche tutta

una serie di altri parametri che il progettista non può controllare, detti fattori di rumore (“noise factors”): sono tipicamente fattori ambientali, variazioni dei parametri del sistema dovuti al processo produttivo, usura, ecc. I fattori di rumore, non essendo valori deterministici ma variabili aleatorie, fanno sì che anche la prestazione Y del sistema non sia un valore deterministico coincidente con il “target” di progetto, bensì una variabile aleatoria caratterizzata da una distribuzione di probabilità il cui valore medio per lo più non coincide con il “target” e la cui ampiezza è talora intollerabilmente elevata. Gli scostamenti di Y dal “target” causano perdite economiche all’utente del prodotto. Indichiamo con $l(Y)$ la perdita monetaria sofferta dall’utente di un determinato prodotto ad un istante arbitrario della vita di questo, a causa dello scostamento di Y da Y_0 . Generalmente è difficile determinare la forma esatta della funzione $l(Y)$, ma nella maggioranza dei casi una approssimazione quadratica rappresenta adeguatamente le perdite economiche dovute alle variazioni di prestazioni. La più semplice funzione di perdita quadratica è:

$$l(Y) = K(Y - Y_0)^2 \quad (15)$$

dove K rappresenta una opportuna costante.

Questa definizione di “non qualità” considera dunque l’uniformità delle caratteristiche del prodotto attorno al valore ottimale atteso, non la conformità di queste caratteristiche con i limiti di tolleranza. Dal punto di vista pratico è importante far riferimento al valore del “quality loss” mediato sui diversi esemplari prodotti e sull’arco di vita utile di questi:

$$L = E[l(Y)] = KE[(Y - Y_0)^2] = (\mu - Y_0)^2 + \sigma^2 \quad (16)$$

dove μ e σ^2 rappresentano rispettivamente la media e la varianza di Y .

Il “quality loss” risulta pertanto composto da due termini:

- il primo indica quanto, in media, le prestazioni del prodotto si scostano dal “target” di progetto ed è quindi espressione del rispetto degli obiettivi funzionali;
- il secondo indica quanto è dispersa la prestazione da esemplare ad esemplare e, per uno stesso esemplare, in differenti istanti del suo arco di vita utile ed è quindi, espressione degli obiettivi di ripetibilità e stabilità, ovvero di affidabilità.

Per ottenere prodotti di elevata qualità il “quality loss” va minimizzato, minimizzando entrambe le sue componenti.

Questo è un problema di doppia ottimizzazione che prevede i due passi:

- ridurre la varianza σ^2 della distribuzione t ;
- avvicinare la media μ al “target” T .

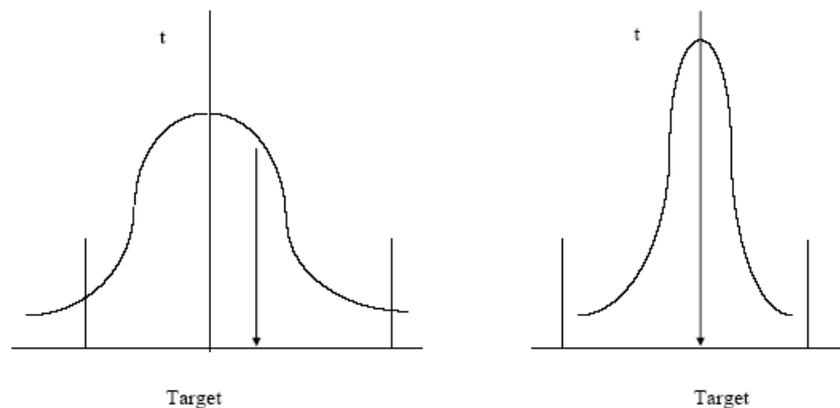


Figura 57 La doppia ottimizzazione del “robust design”

L’approccio classico conduce questa sequenza di operazioni sviluppando inizialmente il progetto come se i parametri di disturbo non fossero presenti, ed operando corrispondentemente una scelta dei parametri di progetto in modo deterministico affinché sia rispettato il “target” funzionale. In un secondo

tempo, senza più modificare i valori dei parametri di progetto, mediante una “*sensitivity analysis*” od una analisi di propagazione degli errori, vengono fissate le tolleranze (parametri di progetto costosi) per diminuire a monte il “range” di variazione dei parametri di disturbo. La seconda fase della doppia ottimizzazione consiste cioè nel cosiddetto “tolerance design”, ove il controllo delle cause di variazione rende costosi i miglioramenti di qualità introdotti sul prodotto. L’approccio perseguito dal “robust design”, concettualmente molto semplice, prevede invece di tenere conto dell’esistenza dei parametri di disturbo fin dall’inizio, cioè nella fase di scelta dei valori dei parametri di progetto non costosi. E’ intuitivo che ciò implica un approccio non deterministico ma statistico alla progettazione. Consideriamo un semplice sistema in cui v siano due soli parametri di progetto A e B e immaginiamo di riuscire a determinare la dipendenza della caratteristica di qualità Y da A e B in assenza di ogni parametro di disturbo: si otterrà una certa funzione $Y(A, B)$ che, nello spazio cartesiano delle variabili A, B, Y potrà essere rappresentata da una superficie (figura 57). Supponiamo che la caratteristica di qualità Y assuma un valore “target” Y_0 : tagliamo allora la superficie con il piano $Y = Y_0$. La proiezione dell’intersezione sul piano AB darà origine ad una linea. Qualunque punto di tale linea può essere riguardato come una valida soluzione di progetto perché corrisponde ad una coppia di valori dei parametri A e B in grado di soddisfare gli obiettivi funzionali (in assenza di fattori di disturbo). Il progettista mediante un processo iterativo giunge alla scelta di un punto di tale linea, ed il processo di scelta dei parametri A e B ha termine. Quando entrano in gioco i fattori di rumore la funzione matematica $Y(A, B)$ viene sostituita dalla distribuzione di probabilità bivariata $pY(A, B)$: è come se la superficie assumesse uno “spessore”. Dobbiamo allora far riferimento alle caratteristiche di tale distribuzione di probabilità, quali varianza e media, che saranno ovviamente funzione dei parametri A e B : $\mu(A, B)$ $\sigma^2(A, B)$. Anche la funzione $\mu(A, B)$, così come la $Y(A, B)$, può essere rappresentata da una superficie e la sua intersezione con il piano $Y = Y_0$, proiettata sul piano AB , descrive una linea simile alla precedente. E’ ancora vero che tutti i punti di tale linea sono equivalenti per quanto concerne il valore medio dei valori di Y , che vale esattamente Y_0 , ma decisamente non vero per quanto concerne la varianza. In particolare potrà

esistere un punto in corrispondenza al quale la varianza assumerà valore minimo. La scelta della corrispondente coppia di valori A e B è l'ottimo desiderato, che garantisce alla variabile aleatoria Y di avere media Y_0 e minima varianza. E' bene precisare che il Robust Design tende ad eliminare solo gli effetti indesiderati senza rimozione delle cause, non essendo orientato a validare un modello teorico che descriva il fenomeno in esame, ma solo a trovare i livelli migliori dei fattori studiati. In pratica anziché eliminare le cause riduce l'impatto delle stesse sul valore della caratteristica obiettivo. Dopo la fase di "ottimizzazione dei parametri di progetto" nella progettazione robusta si prevede un successivo affinamento e un miglioramento della qualità del prodotto, sempre in fase progettuale, con "l'ottimizzazione delle tolleranze", riducendo la variabilità sulle grandezze del prodotto e del processo che hanno maggiore influenza sulle caratteristiche qualitative del prodotto e lasciando più libertà a quelle grandezze che, invece, hanno poco peso sull'uscita desiderata, riducendo in tal modo i costi, partendo da livelli di costo maggiori. La variazione dell'uscita (una grandezza fisica o comunque un qualsiasi parametro misurabile) di un processo è condizionata da molti fattori, la cui influenza è difficilmente valutabile con la sola analisi dei dati sperimentali. Può essere opportuno allora andare a manipolare i valori assegnati ai fattori di disturbo per riuscire a determinare l'influenza sull'uscita. Si studia in questo modo il cambiamento indotto artificialmente dalle sorgenti di variazioni piuttosto che quello indotto dal caso (cioè quello relativo all'errore casuale). Nella scelta dei parametri è molto importante identificare e dividere i fattori di controllo da quelli di disturbo (o incontrollabili), perché vanno trattati in modo diverso anche se tale divisione è spesso soggettiva e legata alla conoscenza del fenomeno. Oltre all'aspetto del miglioramento delle caratteristiche prestazione è importante anche quello relativo all'affidabilità e alla sicurezza del sistema che si progetta. La ricerca dei possibili guasti in fase preventiva alla realizzazione del prototipo o della pre-serie è di grande impatto economico per il costruttore, consentendo di risparmiare sulle continue modifiche al progetto conseguenti al "ritorno" dei dati in campo [58].

2.10.1. PROGRAMMA DI ROBUST DESIGN

In sintesi occorre seguire i seguenti punti:

- 1) definire il problema e ciò che si intende raggiungere;
- 2a) identificare il sistema e la risposta obiettivo da ottimizzare;
- 2b) identificare le variabili che influiscono sulla risposta (caratteristiche) di qualità e le cause di variabilità indesiderata, effetti e modi di guasto;
- 3a) identificare i fattori di controllo e i livelli;
- 3b) identificare i fattori di disturbo e i livelli;
- 4) definire le condizioni, i criteri di prova e i metodi di misura per gli esperimenti;
- 5) definire il piano di esperimenti;
- 6) eseguire gli esperimenti e raccogliere i dati;
- 7a) analizzare i dati;
- 7b) identificare i VCF (Variability Control Factors) e i TCF (Target Control Factors);
- 7c) determinare la combinazione dei livelli ottimali dei vari fattori;
- 7d) prevedere i risultati con tecniche di stima;
- 8) verificare la previsione con un esperimento di verifica;
- 9) eventualmente reiterare i passi 3-8 se i risultati sono insoddisfacenti.

2.11. L'ANALISI STATISTICA DEI DATI

Dopo la fase di progettazione dell'esperimento, si passa alla sua esecuzione; essa consiste nel realizzare l'oggetto della sperimentazione (il prodotto/processo o una sua fase) e nel rilevare le risposte d'interesse. Tali risposte dovranno essere poi elaborate statisticamente per fare emergere i fattori e/o le interazioni veramente significativi e quindi i relativi livelli ottimali. Per l'analisi derivanti

dalla sperimentazione sono state messe a punto un certo numero di tecniche operative. Tra queste, particolarmente adatte all'uso in tale contesto, vale la pena di segnalare le tecniche ANOM (Analysis Of Means), ANOVA (Analysis Of Variance) il, test F e così via. Ciò che risulta comune a dette tecniche è la possibilità di eseguire un test su due ipotesi tra loro in contrapposizione (test of Hypothesis) in base al quale decidere un certo margine di errore (se due o più popolazioni presentano un comportamento diverso o invece pressoché identico rispetto alla risposta considerata). Da questa indagine si può risalire ai parametri vitali e caratterizzanti il processo [59].

2.11.1. ANOVA (ANALYSIS OF VARIANCE)

L'ANOVA è una tecnica di analisi statistica usata per scomporre la varianza totale di un certo processo nelle sue componenti o per fare confronti fra le varianze di diverse popolazioni. Mentre con il metodo detto "F-test" è possibile confrontare i parametri di due sole popolazioni, con l'ANOVA è possibile estendere l'analisi contemporaneamente a k diverse popolazioni. L'ANOVA viene utilizzata per analizzare dei dati sperimentali con l'obiettivo di capire se questi appartengono o meno alla stessa popolazione. Essa consente di discriminare quali fra i fattori in esame hanno maggiore effetto sulla risposta e quali cause siano all'origine della variabilità della risposta e degli effetti dei fattori. Indichiamo con n il numero dei valori di un campione, y il singolo valore, \bar{y} la media del campione, \bar{y}^{\prime} la media delle medie campionarie, s^2 lo stimatore corretto della varianza.

$$s^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{(n-1)} = \frac{\left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]}{(n-1)} \quad (17)$$

in cui:

- $\sum y^2$ è la somma dei quadrati dei singoli valori del campione;

- $\frac{(\sum y)^2}{n}$ è il fattore di correlazione dovuto alle medie;
- n sono i gradi di libertà.

Il termine $\left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]$ è chiamato la “somma dei quadrati corretta”.

La variazione totale (somma totale dei quadrati SS_t rispetto a y'') può essere divisa nelle seguenti sorgenti di variazione:

$$\sum (y - y'')^2 = \sum (y' - y'')^2 + \sum (y - y')^2 \quad (18)$$

in cui:

- $\sum (y' - y'')^2$ è la somma dei quadrati delle differenze calcolate rispetto alle medie campionarie dei singoli campioni: SS_b (sum of squares between treatments);

- $\sum (y - y')^2$ è la somma delle differenze tra ogni del campione e la rispettiva media: SS_w (sum of squares within treatments) o Sse (sum of squares of error). Si può dimostrare che (Mean Squares) sia MS_b = (SS_b / v) con v numero di gradi di libertà associati a $\sum (y' - y'')^2$, che MS_w rappresentano due stimatori corretti della varianza σ^2 della popolazione di partenza se le medie dei campioni (treatments) sono tra loro uguali. I fattori significativi che si individuano con l'ANOVA sono identici a quelli individuati mediante l'ANOM. Le differenze tra i due metodi che possono far scegliere per l'uso dell'uno o dell'altro, sono le seguenti:

- con l'ANOM si riesce ad ottenere una rappresentazione grafica dei risultati facilmente comprensibile ai non esperti in statistica, cosa non possibile con l'ANOVA, che privilegia un approccio tramite dati numerici;

- i calcoli da effettuare con ANOM sono semplici, diventano invece più complessi per l'ANOVA già con pochi fattori: d'altra parte, sono a disposizione supporti informatici (che non sono richiesti con l'ANOM) che rendono veloce e semplice l'ANOVA anche su grossi volumi di dati;

- l'ANOVA permette di rivelare le variazioni con più sensibilità rispetto all'ANOM in quanto permette di valutare le singole componenti della varianza. Con riferimento ad un esempio con più fattori a due livelli la procedura per realizzare l'ANOVA è la seguente:

a) se si hanno K fattori a 2 livelli con n repliche, si considerano i valori x_i ($i= 1, 2, \dots, n^{2k}$) delle risposte su cui fare l'analisi; si indica con $T= 2^k$ il numero delle prove senza ripetizione;

b) si calcola anzitutto la somma dei quadrati di ciascuna singola risposta, che viene indicata come:

$$\sum_i (x_i)^2 \quad (19);$$

c) si calcola il fattore di correzione (CF), rapporto tra il quadrato della somma di tutte le risposte ed il numero di risposte N:

$$CF= \sum_i (x_i)^2 / N \quad (20);$$

d) si calcola SSt (sum of square of total), come differenza dei due valori ottenuti ai punti b e c, cioè:

$$SSt= (\sum_i (x_i)^2 - CF) \quad (21);$$

e) per ciascun fattore, si calcolano le somme dei quadrati (Ssa, SSb, ecc.) tenendo presente le risposte che competono a ciascun livello e a ciascun fattore, cioè:

$$SS_A = \left\{ \left[(\sum x_{A-})^2 + (\sum x_{A+})^2 \right] / (nT / 2) \right\} - CF \quad (22);$$

f) si calcolano le possibili interazioni (di tutti gli ordini) tra i vari fattori (SSAB, SSAC, ecc.) sempre tenendo presenti le risposte che competono ai due livelli (per esempio considerando l'interazione di secondo ordine AB):

$$SS_{AB} = \left\{ \left[(\sum x_{AB-})^2 + (\sum x_{AB+})^2 \right] / (nT / 2) \right\} - CF \quad (23);$$

g) si calcola SSe come differenza tra SST e le SS di tutti i fattori e di tutte le interazioni; SSe è la varianza dovuta all'errore:

$$SS_e = (SS_T - SS_A - SS_B - \dots - SS_{AB} - SS_{AC} - \dots) \quad (24);$$

h) si attribuiscono i gradi di libertà (*gdl*) a ciascun fattore, a ciascuna interazione e all'errore: globalmente, per nT misure si avranno (nT-1) *gdl* totali, 1 *gdl* per ciascun fattore ed interazione, mentre i *gdl* dell'errore si ottengono come differenza tra i *gdl* totali e quelli attribuiti a fattori ed interazioni;

i) si calcola per ogni fattore, per ogni interazione e per l'errore il MS (Mean Square) come:

$$MS = SS / gdl \quad (25);$$

j) si esegue l'F-test, cioè il rapporto tra la MS di un fattore (o di un'interazione) e la MS dell'errore; ad esempio, per il fattore A si ha:

$$F_{calc} = MSA / MS_e \quad (26);$$

k) si calcola con le apposite tabelle che forniscono il valore della funzione di distribuzione della F di Fisher, il valore dell'F critico, che varia a seconda dei gradi di libertà del numeratore e del denominatore e del livello di significatività α del test: $F_{crit} = F_{\alpha}(gdl_{num}, gdl_{den})$;

l) si confrontano F_{calc} e F_{crit} e se: $(F_{calc}) \alpha > (F_{crit}) \alpha$ allora il parametro è ritenuto significativo con un livello di significatività pari ad α , mentre se:

$$(F_{calc}) \alpha < (F_{crit}) \alpha$$

allora il parametro non è ritenuto significativo;

m) in un esperimento replicato, in cui è calcolata la varianza, si ripete l'ANOVA sia per il valore medio che per la varianza.

Il pooling è una tecnica per effettuare una stima dell'effetto dovuto all'errore sperimentale e per una individuazione affidabile dei fattori significativi senza aumentare il numero delle prove. Quando in un esperimento non ci sono gdl associabili all'errore sperimentale, allora la tecnica è l'unica possibile per stimare l'effetto dell'errore. Se si ammette l'ipotesi che le interazioni di ordine superiore siano di entità trascurabile, allora i loro effetti possono essere ascritti all'errore sperimentale. Il concetto fondamentale è quello di considerare fattori o interazioni non significative come componenti della sorgente di errore sperimentale. Il pooling si può effettuare:

- dal basso: si comincia a mettere insieme l'effetto minore all'errore e si verifica di nuovo la significatività di tutti gli altri effetti. Se ci sono ancora effetti non significativi al livello prescelto si prende il minore e si continua nello stesso modo. Il processo si ferma quando rimangono solo effetti significativi. Poiché l'effetto dell'errore aumenta si può verificare che nessun effetto risulti significativo;

- dall'alto: si considera l'effetto con maggiore significatività contro l'insieme di tutti gli altri effetti insieme all'errore. Se il rapporto F non fornisce

una significatività dell'effetto maggiore si toglie l'effetto maggiore del pool dallo stesso e si verificano entrambi gli effetti singoli. Si continua fin quando gli effetti estratti dal pool diventano significativi.

2.11.2. L'ANALISI DEI RESIDUI

Come il diagramma degli effetti e l'ANOG, anche l'analisi dei residui è uno strumento di notevole importanza diagnostica. Per residuo si definisce la differenza tra la singola osservazione misurata y_i e un valore di riferimento (generalmente il valore espresso dal modello di riferimento):

$$e_i = (y_i - \bar{y}) \quad (27)$$

E' possibile realizzare dei diagrammi facendo uso dei residui; il principale è il cosiddetto "Plot of Residuals", con il quale si può raffigurare l'andamento di un gruppo di residui relativi all'esperimento. Da un punto di vista operativo, una volta calcolati gli n residui, essi vengono arrangiati in ordine crescente. Si determina la posizione che l' i -esimo residuo assume sul diagramma utilizzando la seguente relazione:

$$P_i = (i - 0.5)100/n \quad (28)$$

Oltre al Plot of Residuals, esistono altri diagrammi, utili per rilevare pattern anomali, in cui si riporta l'andamento dei residui:

1. nell'ordine in cui è stato condotto l'esperimento (sequenza temporale);
2. rispetto ai fattori;
3. rispetto al valore espresso dal modello di riferimento della risposta considerata.

Analogo al diagramma dei residui è il diagramma degli effetti (Plot of Effects), strumento utile per valutare graficamente, senza il calcolo dell'F-test, i

pochi fattori e/o interazioni veramente significativi tra tutti quelli dell'esperimento. Questa analisi diventa molto utile quando il numero di fattori (e quindi di interazioni) da considerare è molto elevato [60].

2.12. CASO DI APPLICAZIONE

La metodologia di Taguchi è stata applicata, integralmente con il DoE (Design of Experiments), ad un problema di ottimizzazione di qualità per un cuscinetto volvente. Lo scopo di tale applicazione è stato quello di verificare la possibilità di sfruttare le metodologie del Robust Design per migliorare le specifiche di progettazione del cuscinetto oggetto del presente studio.

2.12.1. DESCRIZIONE DEL PRODOTTO

La specializzazione produttiva dell'azienda produttrice di cuscinetti volventi in oggetto è il cuscinetto a sfera medio-piccolo utilizzato dalle industrie elettromeccaniche. La produzione giornaliera è di circa 25.000 pezzi. Lo stabilimento si caratterizza in quanto applica il concetto di "produzione snella". Non essendo suddiviso in reparti, bensì in "linee di processo" (dette "canali") che lavorano una ben determinata "linea di prodotto", si hanno una serie di vantaggi, quali:

- un basso numero di scorte di magazzino;
- una maggiore flessibilità;
- un miglior collegamento con il mercato.

Ci sono quattro gruppi di canali: A, B, C e la torneria WAM/HT; ognuno dei quali gestisce varie linee che producono lo stesso tipo di cuscinetto. Il nostro lavoro si è svolto sulla linea di prodotto 6203 del canale B. Questo gruppo di canali è formato da una "cella" di rettifica facce e diametro esterno degli anelli e sei "linee" di produzione (L10, L13, L14, L15, L17, L18); le prime quattro producono il cuscinetto tipo 6203, mentre le restanti il tipo 6201.

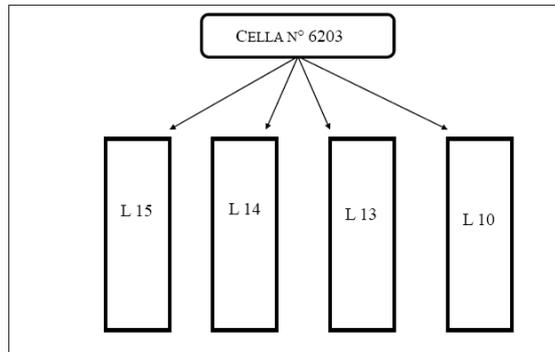


Figura 58 Punti sperimentali

2.12.2.

PROCESSO DI LAVORAZIONE

Il cuscinetto a sfera è un organo meccanico sul quale trova appoggio ed entro il quale ruota un albero; è caratterizzato dalla interposizione di sfere rotolanti tra due piste. Il cuscinetto a rotolamento si compone di un anello esterno (OR), un anello interno (IR), di un elemento volvente (sfere), di una gabbia per la guida delle sfere e degli schermi. E' prodotto in acciaio tipo 100Cr6, debolmente legato, che presenta la seguente composizione: 1% carbonio e 1.5% cromo. Le sfere possono essere sia di acciaio che di ceramica, mentre le gabbie possono essere in acciaio; in ottone o in poliammide rafforzato con fibre di vetro. Infine gli schermi sono in acciaio; in gomma, in gomma con anima in acciaio. Due sono le differenti tecnologie utilizzate per la realizzazione degli anelli interni ed esterni: tornitura oppure pressofusione. Nella tornitura gli anelli, ottenuti tagliando dei tubi in acciaio, vengono lavorati con dei torni pluri-mandrino, i quali provvedono a portare gli anelli a valori prefissati del diametro esterno e del foro. Sugli anelli interni viene praticata una gola esterna, viceversa su quelli esterni (viene praticata una gola interna). Nella pressofusione (attuata solo per gli anelli interni) la materia prima utilizzata è la vergella che viene introdotta in una macchina (SACMA) dove viene dapprima riscaldata ad una temperatura di circa 750°C (dipendente dal tipo) e quindi tagliata. I pezzi

ottenuti vengono portati ad un prefissato spessore tramite un tampone che provvede anche a creare un incavo sui due lati; quindi vengono forati tramite un punzone. Una rettificatrice effettua la sgrossatura delle facce e, successivamente, vengono lavorati sul diametro esterno per ottenere la gola ed i due bordini. Per migliorarne le caratteristiche meccaniche quali la durezza, gli anelli sono sottoposti ad un trattamento termico di tempra e rinvenimento: immessi in dei forni, di cui tre a gas ed uno elettrico, vengono temprati da una temperatura di circa 850°C con lo scopo di conferire agli anelli una durezza di 61/64 HRC e una buona resistenza a fatica. Per attenuare la fragilità e per diminuire l'esistenza di eventuale tensioni residue, acquisite durante la tempra, gli anelli vengono rinvenuti ad una temperatura di circa 200°C. Quindi gli addetti al collaudo provvedono quindi al controllo della durezza. Successivamente gli anelli vengono trasferiti in una zona a monte delle "linee" chiamata "cella", dove ci sono macchine che attuano la rettifica delle facce (IR e OR). Dopo questa operazione vengono controllati lo spessore dell'anello, il parallelismo e la planarità tra le due facce. Sempre nella cella, si provvede alla rettifica del diametro esterno (OR): per questa operazione il fattore controllato è la misura del diametro esterno. Rettificate le facce ed il diametro esterno, gli anelli vengono smistati nelle linee di rettifica dove subiscono le seguenti operazioni:

- controllo foro, spessore e diametro esterno (IR);
- controllo gola, spessore e diametro esterno (OR);
- rettifica gole (IR e OR);
- controllo diametro gola (OR);
- rettifica foro (IR): il foro viene rettificato e portato a misura nominale. In questo caso il fattore controllato è la misura del diametro del foro;
- lappatura gole (IR e OR);

- appaiatura: vengono selezionati un anello interno ed uno esterno; l'anello interno viene accoppiato con il relativo esterno e tra i due vengono inserite le sfere. In questa operazione il fattore controllato è il gioco radiale (spostamento massimo sotto un carico prefissato, tra l'asse dell'anello interno e l'asse dell'anello esterno);

- graffatura: le sfere tra i due anelli vengono equidistanziate e vengono montate le gabbie;

- controlli: tramite apparecchiature automatiche vengono effettuati controlli al 100% dei seguenti parametri: misura del foro e del diametro esterno; scorrevolezza (coppia allo spunto);

- rumorosità; gioco radiale. Prima del controllo di scorrevolezza i cuscinetti vengono lavati;

- marcatura: sul cuscinetto viene marcato il nome dell'azienda, il tipo, l'anno ed il trimestre di produzione;

- dosaggio grasso e montaggio schermi al fine di ridurre l'usura e l'attrito di rotolamento ed al fine di proteggere i cuscinetti dall'entrata di sostanze estranee e di soddisfare le richieste di vita del cuscinetto;

- spray protettivo;

- confezionatura.

Infine il cuscinetto viene disposto nei "pallet box" e spedito al cliente.

2.12.3. DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI RETTIFICA

La sorgente alimentatrice della macchina BESLY numero matr. 21503 è un “box”, contenente 22000 anelli IR-6203. Questa macchina si occupa della rettifica delle facce degli anelli stessi. Una guida motorizzata sopraelevata al trasporto degli anelli dal “box” al disco. La cadenza di arrivo è regolarizzata da un sistema di controllo, il cui scopo è quello di garantire la continuità di flusso degli anelli, evitando che alcuni alveoli del disco alimentatore risultino sprovvisti di anello. Il disco alimentatore (in acciaio) è molto simile ad una ruota dentata dove lo spazio esistente tra i “denti” costituisce la zona di allocazione degli anelli, denominata “alveolo”. E’ la velocità di rotazione del disco (regolabile attraverso un sistema manuale), che determina la cadenza del numero di anelli rettificati. Un sistema di guida adiacente il disco alimentatore nelle zone di ingresso e di uscita dalle mole, provvede a “centralizzare” l’anello prima del suo ingresso tra le mole e, quindi, ne facilita l’espulsione una volta rettificato. Le mole sono due e sono circolari con un diametro di circa un metro. Le loro posizioni relative non sono parallele: tendono ad allargarsi procedendo dal basso verso l’alto ed a restringersi procedendo dalla zona di ingresso del disco alimentatore verso l’esterno. Lo scopo è di effettuare con un unico attraversamento dell’anello sia le operazioni di sgrossatura sia la finitura delle facce. Un sistema di lubrificazione la cui portata può essere regolarizzata tramite un comando manuale, provvede a stabilizzare la temperatura delle mole (e del disco) secondo parametri prestabiliti. All’interno della macchina è presente un braccio sulla cui estremità trova alloggio una punta di diamante, la cui funzione è quella di effettuare la diamantatura delle mole ogni volta che la qualità della lavorazione decade. Una volta espulso l’anello dal disco alimentatore, questo viene trasportato in un convogliatore tramite un sistema di guida motorizzato. Il controllo del rispetto delle specifiche inerenti lo spessore, il parallelismo e la planarità avviene proprio durante questa fase del ciclo. Quindi le guide provvedono al prelievo degli anelli rettificati ed al loro trasporto alla macchina successiva che si occuperà della rettifica sul diametro esterno.

2.12.4. DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA TAGUCHI APPLICATA

Il primo passo è stato quello di ottenere una chiara definizione del problema. Per lo scopo è stato coinvolto un gruppo di lavoro (team) nel quale, oltre al metodologo, erano presenti ingegneri, responsabili della qualità, fornitori dei semilavorati, tecnici dello stabilimento che gestiscono il processo, progettisti del prodotto; tutte persone che potevano fornire informazioni e know-how utili sulla natura del fenomeno. La fase che il “team” ha inizialmente messo in atto è stata quella di determinare il problema da risolvere sia in termini qualitativi sia quantitativi relativo alla cella n°6203 nella quale sono alloggiare le macchine sfacciatrici che provvedono alla rettifica delle facce degli anelli interni (IR) ed esterni (OR) del cuscinetto tipo 6203 oltre che alla rettifica del diametro esterno. Dal momento che i fattori controllati sono lo spessore degli anelli, il parallelismo e la planarità tra le due facce, quali caratteristiche che incidono notevolmente sulla risposta qualitativa finale del cuscinetto, il “team” si è proposto di migliorare il parallelismo. Secondo il Taguchi, delle cinque caratteristiche di qualità il parallelismo può essere annoverato come la caratteristica qualitativa “più piccolo è meglio” che non assume mai valori negativi ed ha come valore target lo zero. Considerato ciò, per tale caratteristica sarebbe auspicabile una minimizzazione della risposta. Il prospetto di lavorazione impone una tolleranza di 3 μm per il parallelismo.

Definito con chiarezza il problema, cioè individuato il parametro (parallelismo), la sua unità di misura ed i valori che possono essere considerati accettabili o meno, si passa immediatamente alla ricerca delle possibili cause influenzanti il parallelismo. Con l’ausilio di un diagramma causa effetto (diagramma di Ishikawa) si sono elencati tutti i fattori che intervengono nel fenomeno e che ne possono modificare le caratteristiche. Da questa analisi sono emersi diversi fattori di interesse per il condizionamento del parallelismo:

1. mola;
2. guida d’ingresso (giochi meccanici);

3. sovrametallo dell'anello;
4. tecnica utilizzata per la realizzazione dell'anello;
5. durezza dell'anello;
6. tipologia di acciaio costituente l'anello;
7. disco alimentatore degli anelli;
8. tipo di diamante utilizzato per la diamantatura della mola;
9. velocità del disco alimentatore (pz/min);
10. numero di passate.

Da quest'elenco di fattori, in base a criteri intuitivi e per lo più dettati dall'esperienza, si sono selezionati i più significativi in termini di influenza sul fenomeno. La riduzione del numero di fattori da tenere in considerazione nella nostra analisi si è reso inoltre necessario dal momento che volendo tenere presenti tutti e 10 i fattori si sarebbe avuto un numero di esperimenti pari a $y_{10} = 1.024$ (con $y = 2$) riducibili, con un piano sperimentale frazionario, a $2^7 = 128$ (Sixteenth fractional experiments), ancora troppo elevato dal momento che un simile piano fattoriale comporterebbe lunghe fermate della macchina sfacciatrice in questione (BESLY IR 6203). Tale arresto non è assolutamente possibile per l'azienda dal momento che la macchina di cui sopra risulta l'unica sorgente di alimentazione per le linee 13-14-15, con una cadenza giornaliera di circa 60.000 anelli (IR 6203). Dato che l'operazione di cambio e messa a punto delle 2 mole avrebbe richiesto un tempo di circa tre ore e visto che detto cambio sarebbe dovuto avvenire per metà degli esperimenti (con frequenza arbitraria dettata dal piano sperimentale), si è reso necessario l'eliminazione di detto fattore. Per il disco alimentatore si sarebbero avuti gli stessi problemi, ai quali si sarebbero aggiunti lunghi tempi di attesa. Infatti per la richiesta di un disco alimentatore in lega di titanio (quello normalmente utilizzato è in acciaio) sono necessari due

mesi; per la sagomatura e l'assestamento degli alveoli porta anello, un mese. La tipologia di diamante non è sostituibile a causa di lunghi tempi di consegna, di messa a punto e di costo troppo elevati. Quindi il fattore è stato eliminato. Non si è tenuto conto anche del fattore guida d'ingresso. Non avendo a disposizione una seconda tipologia di guida, sarebbe stato necessario effettuare la progettazione con tempi di messa a punto molto lunghi. Per quanto riguarda l'acciaio costituente l'anello non vi era alcuna possibilità di modificarlo in quanto non disponibile e, qualora possibile, il materiale costituente l'anello non avrebbe rispettato le specifiche del cuscinetto. Infine, dal momento che sono le tecniche utilizzate per realizzare l'anello (tornitura e stampaggio), questo fattore non è stato eliminato ma è stato inglobato dal fattore sovrmetallico in quanto gli stampati hanno un valore del sovrmetallico diverso dai torniti, ma risulta essere per entrambi lo stesso nell'ambito della propria classe. Per questo motivo i due fattori non sono stati eliminati, ma inclusi sotto la stessa voce: anello. In seguito alle considerazioni sopra riportate il numero degli elementi da tenere in considerazione nel corso della nostra indagine si è ridotto a 4:

1. sovrmetallico dell'anello;
2. durezza dell'anello;
3. velocità del disco alimentatore;
4. numero di passate.

Il passo successivo è stato quello di stabilire i livelli di prova. I fattori presi in esame sono stati considerati di tipo discreto. I fattori di tipo continuo sono caratterizzati dal poter assumere infiniti valori, di solito compresi in un intervallo dipendente dal processo o dalla macchina. E' stato quindi sufficiente far assumere ai parametri due livelli, ben differenziati, così da farne manifestare la reale importanza. Sono stati perciò scelti due livelli vicini ai limiti dell'intervallo praticabile, comunque realistici e sensati, di cui uno rispecchiava le normali condizioni di lavoro e l'altro il livello di prova.

Livello	Anello	Velocità [pz/min]	Trattamento Termico [HRC]	n° Passate
-1	Torniti	170	61/62.5	1
+1	Stampati	140	62.5/64	2

Tabella 13 – Fattori e definizione dei loro livelli

A questo punto il metodologo ha avuto tutte le informazioni necessarie per passare alla progettazione del piano sperimentale: Attraverso l'utilizzo di software dedicato, sono state effettuate le seguenti analisi:

1) Full Factorial Experiment con $k=4$ eseguito dall'operaio A+B replicato 1 volta, in modo tale da poter valutare la combinazione ottimale dei fattori, indipendentemente dal turno di lavoro. Il numero di prove sperimentali è di $2 \times 2^4 = 32$; ogni prova ha richiesto un numero di dati pari a 200 suddivisi in 20 sottogruppi di 10 campioni ciascuno (prelevati con una cadenza temporale di 5 minuti), per un numero totale di 6400 dati.

2) One Half Fractional Experiment con $k=4$ eseguito dall'operaio A+B replicato 1 volta ($2 \times 2^{4-1} = 16$ prove sperimentali; ogni prova ha richiesto un numero di dati pari a 200 suddivisi in 20 sottogruppi di 10 campioni ciascuno (prelevati con una cadenza temporale di 5 minuti), per un numero totale di 3200 dati). Lo scopo era quello di poter attestare la ripetibilità della combinazione ottimale di fattori e quindi poter dare validità ad un piano dimezzato (il quale ci permetterebbe di ottenere lo stesso risultato, ma con un numero di prove inferiori con risparmio in termini di costo e di tempo). E' stato valutato anche il fattore umano come parametro di progetto in prova. Per tale fine è stata realizzata l'analisi:

3) Full Factorial Experiment con $k=5$. Il numero delle prove sperimentali è pari a $2^5 = 32$ per un totale di 6400 dati;

Tramite questa analisi (3) viene valutata la combinazione ottimale che include il fattore umano.

Ottenuto il piano di prove non è restato che eseguire gli esperimenti. Dopo aver preparato i semilavorati, si è provveduto ad eseguire le prove secondo lo schema di “settaggi” richiesto dal piano. Quindi sono stati raccolti i dati tramite l’ausilio di uno strumento di misura che rilevava il parallelismo con un ordine di grandezza inferiore al valore del prospetto di lavorazione. Una volta eseguite le prove e raccolti i dati, i risultati sono stati analizzati tramite il programma Statgraphic Plus di stesura dei piani sperimentali. I valori inseriti nei piani sperimentali (sotto la voce: “Risposta”) sono in decibel e rappresentano il rapporto Segnale/Disturbo (S/N). Quest’ultimo rappresenta la caratteristica da ottimizzare, in quanto più il suo valore è elevato, tanto più piccola sarà la varianza e, di conseguenza, le perdite associate alla variabilità del parallelismo intorno al valore “target”. La sequenza di operazioni eseguita per ottenere il rapporto S/N relativo a ciascuna prova sperimentale è la seguente:

I) CALCOLO DEL VALORE MEDIO DEI DIECI CAMPIONI

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^{10} d_i}{10} \quad (d_i = \text{campione}_1, \text{campione}_2, \dots, \text{campione}_{10}) \\ (j=1, \dots, 20)$$

II) CALCOLO DELLA VARIANZA CON EQUAZIONE RELATIVA ALLA CARATTERISTICA QUALITATIVA: “PIÙ PICCOLO È MEGLIO”

$$\sigma^2 = \frac{1}{20} \cdot \sum_{j=1}^{20} (\bar{x}_j^2)$$

III) CALCOLO DEL RAPPORTO SEGNALE DISTURBO

$$S/N = -10 \log_{10} \sigma^2$$

Nell'analisi (1) sono stati stimati gli effetti di tutti i fattori e di tutte le interazioni (di qualsiasi ordine). Il programma ha creato un modello che simula il comportamento della macchina in funzione dei fattori e dei livelli assunti. Detto modello è una rappresentazione matematica (*regression coefficients*) e grafica (*response plot*) della connessione fra variabili importanti indipendenti (fattori di controllo) e una variabile dipendente (caratteristica qualitativa). La letteratura in merito spiega però, che più aumenta il numero dei fattori e più è scarsa l'importanza delle interazioni fra gli stessi. Di solito l'analisi viene limitata alle interazioni del secondo ordine, ma per scrupolosità, la analisi (1) è stata condotta tenendo conto dell'ordine massimo (quarto ordine); cioè si è stimato anche l'effetto dell'interazione ABCD. Tanto è vero che troncando l'equazione del "modello atteso" al secondo ordine, vuol dire accettare un certo margine di errore tra i valori osservati ed i valori attesi dal programma. Si evince dal diagramma di Pareto e dalle analisi dei dati riguardanti l'effetto dei fattori e delle interazioni, che comunque non muta la sequenza ed il tipo dei fattori significativi.

1) FULL FACTORIAL EXPERIMENT CON K=4 ESEGUITO DALL'OPERAIO A+B

	Anello	Velocità	Trattamento Termico	n° Passate	Risposta
Esperimento n°1	-1	-1	-1	-1	-2.689
Esperimento n°2	1	-1	-1	-1	-0.028
Esperimento n°3	-1	1	-1	-1	-4.999
Esperimento n°4	1	1	-1	-1	2.787
Esperimento n°5	-1	-1	1	-1	-3.257
Esperimento n°6	1	-1	1	-1	0.828
Esperimento n°7	-1	1	1	-1	-4.980
Esperimento n°8	1	1	1	-1	-5.011
Esperimento n°9	-1	-1	-1	1	-1.336
Esperimento n°10	1	-1	-1	1	1.859
Esperimento n°11	-1	1	-1	1	2.861
Esperimento n°12	1	1	-1	1	-1.413
Esperimento n°13	-1	-1	1	1	1.808
Esperimento n°14	1	-1	1	1	3.520
Esperimento n°15	-1	1	1	1	0.164
Esperimento n°16	1	1	1	1	1.490
Esperimento n°17	-1	-1	-1	-1	-3.256
Esperimento n°18	1	-1	-1	-1	0.837
Esperimento n°19	-1	1	-1	-1	-1.330
Esperimento n°20	1	1	-1	-1	1.016
Esperimento n°21	-1	-1	1	-1	-4.294
Esperimento n°22	1	-1	1	-1	1.893
Esperimento n°23	-1	1	1	-1	-4.847
Esperimento n°24	1	1	1	-1	3.101
Esperimento n°25	-1	-1	-1	1	3.418
Esperimento n°26	1	-1	-1	1	1.944
Esperimento n°27	-1	1	-1	1	-2.718
Esperimento n°28	1	1	-1	1	-1.303
Esperimento n°29	-1	-1	1	1	1.917
Esperimento n°30	1	-1	1	1	3.332
Esperimento n°31	-1	1	1	1	0.183
Esperimento n°32	1	1	1	1	1.594

Tabella 14 – Piano sperimentale L₃₂ (2⁴)

DESIGN SUMMARY

Design class: Screening

Design name: Factorial 2⁴

Comment: Parallelismo

Base Design

Number of experimental factors: 4 Number of blocks: 2

Number of response: 1 Number of centerpoints per block: 0

Number of runs: 32 Error degrees of freedom: 20

Randomized: yes

Factors	Low	High	Units	Continuous
Anello	-1	1		No
Velocità	-1	1	pz/min	No
Tratt. Term.	-1	1	HRC	No
Passate	-1	1		No

Tabella 15 – Definizione dei fattori e dei loro livelli

Responses Units
 Risposta decibel

ANALYSIS SUMMARY

Comment: Parallelismo

Maximum order effect: 4

Tab. 16 - Estimated effects for Risposta

Average	= -0.215938	± 0.372768
A: Anello	= 2.48763	± 0.745535
B: Velocità	= -1.24388	± 0.745535
C: Tratt.Term.	= 0.111875	± 0.745535
D: Passate	= 2.59688	± 0.745535
AB	= -0.246625	± 0.745535
AC	= 0.519125	± 0.745535
AD	= -1.89688	± 0.745535
BC	= -0.512875	± 0.745535
BD	= -0.706625	± 0.745535
CD	= 1.22513	± 0.745535
ABC	= -0.096375	± 0.745535
ABD	= -0.374625	± 0.745535
ACD	= 0.676875	± 0.745535
BCD	= 0.620125	± 0.745535
ABCD	= 0.61775	± 0.745535
Block	= 0.61775	± 0.745535

Standard errors are based on total error with 15 d.f.

ANALYSIS OF VARIANCE FOR RISPOSTA - PARALLELISMO

Tab. 17 - AN.O.VA.

Source	Sum of Square	Df	Mean Square	F- Ratio	p- Value
A: Anello	49.5062	1	49.5062	11.13	0.0045
B: Velocità	12.3778	1	12.3778	2.78	0.1160
C: Tratt.Term.	0.100128	1	0.100128	0.02	0.8827
D: Passate	53.9501	1	53.9501	12.13	0.0033
AB	0.486591	1	0.486591	0.11	0.7454
AC	2.15593	1	2.15593	0.48	0.4969
AD	28.7851	1	28.7851	6.47	0.0224
BC	2.10433	1	2.10433	0.47	0.5020
BD	3.99455	1	3.99455	0.90	0.3582
CD	12.0075	1	12.0075	2.70	0.1211
ABC	0.0743151	1	0.0743151	0.02	0.8989
ABD	1.12275	1	1.12275	0.25	0.6226
ACD	1.0146	1	1.0146	0.23	0.6398
BCD	3.66528	1	3.66528	0.82	0.3783
ABCD	3.07644	1	3.07644	0.69	0.4186
Blocks	3.05292	1	3.05292	0.69	0.4203
Total error	66.6987	15	4.44658		
Total (corr.)	244.173	31			

REGRESSION COEFFS. FOR RISPOSTA-PARALLELISMO

Tab. 18 - Regression coeffs. For risposta.

Constant	= -0.215938
A: Anello	= 1.24381
B: Velocità	= -0.621937
C: Tratt.Term.	= 0.0559375
D: Passate	= 1.29844
AB	= -0.123313
AC	= 0.259563
AD	= -0.948438
BC	= -0.256438
BD	= -0.353313
CD	= 0.612562
ABC	= -0.0481875
ABD	= -0.187312
ACD	= 0.178062
BCD	= 0.338438
ABCD	= 0.310062

EQUAZIONE DEL MODELLO ATTESO

$$\begin{aligned}
 \text{Risposta} = & -0.215938 + 1.24381 * \text{Anello} - 0.621937 * \text{Velocità} + \\
 & + 0.0559375 * \text{TrattTerm} + 0.259563 * \text{Passate} - 0.123313 * \text{Anello} * \text{Velocità} + \\
 & + 0.259563 * \text{Anello} * \text{TrattTerm} - 0.948438 * \text{Anello} * \text{Passate} - 0.256438 * \text{Velocità} * \text{TrattTerm} - \\
 & - 0.353313 * \text{Velocità} * \text{Passate} + 0.612562 * \text{TrattTerm} * \text{Passate} - 0.135375 * \text{Anello} * \text{Velocità} * \text{TrattTerm} - \\
 & - 0.187312 * \text{Anello} * \text{Velocità} * \text{Passate} + 0.178062 * \text{Anello} * \text{TrattTerm} * \text{Passate} + \\
 & + 0.338438 * \text{Velocità} * \text{TrattTerm} * \text{Passate} + 0.310062 * \text{Anello} * \text{Velocità} * \text{TrattTerm} * \text{Passate}.
 \end{aligned}$$

I valori delle variabili nell'equazione sono: (-1) per il livello basso ed (1) per il livello alto.

Una rappresentazione grafica dell'equazione è visibile nel "response plot". Queste rappresentazioni sono ottenute in funzione di due fattori mantenendo costanti (-1 oppure 1) i restanti due. In questi grafici la variabile dipendente è il rapporto S/N (Risposta) espresso in decibel. Nelle due successive pagine sono riportati i grafici di questa variabile, in funzione dell'anello e del numero di passate, quali fattori più incidenti sulla variabilità della risposta (come è possibile vedere dal diagramma di Pareto). Le diverse colorazioni delle superfici diagrammate riflettono i diversi valori assunti per i fattori considerati costanti e precisamente:

	V = -1 TT = -1	
	V = -1 TT = 1	

La proiezione di questi grafici dà luogo alla rappresentazione "contour plot", nella quale sono visibili le fasce di valori assunte dal modello all'interno dei limiti -1,1. In teoria questi forniscono l'input per l'individuazione della fascia di valori dei fattori anello e passate che forniscono il massimo della variabile dipendente Risposta.

ESTIMATION RESULTS FOR RISPOSTA

Tab. 19 - Fitted and observed value.

Row	Observed Value	Fitted Value order effect= 4	Fitted Value order effect= 2	Residual: F.V. 4 vs F.V. 2
1	-2.689	-3.18138	-3.21044	-0.02906
2	-0.028	0.095625	0.80156	0.70594
3	-4.999	-3.47339	-3.08819	0.3852
4	2.787	1.59263	0.53056	-1.06207
5	-3.257	-3.08437	-4.42994	-0.34557
6	0.828	1.05163	0.72031	-0.33132
7	-4.981	-5.22288	-5.23344	-0.01056
8	-5.011	-1.26388	-0.57644	0.68744
9	-1.336	0.732125	0.66481	-0.06731
10	1.859	1.59263	0.98306	-0.60957
11	2.861	-0.23738	-0.52619	-0.28881
12	-1.413	-1.66688	-0.70119	0.96569
13	1.808	1.55363	1.99556	0.44193
14	3.520	3.11713	3.35206	0.23493
15	0.164	-0.13538	-0.22119	-0.08581
16	1.490	1.23313	0.64206	-0.59107
17	-3.256	-2.66363	-2.69263	-0.02900
18	0.837	0.713375	1.41931	0.70594
19	-1.330	-2.85563	-2.74044	0.11519
20	1.016	2.21038	1.14831	-1.06207
21	-4.294	-3.46663	-3.81219	-0.34556
22	1.893	1.66937	1.33806	-0.33131
23	-4.847	-4.60513	-4.61569	-0.01056
24	3.101	-0.64613	0.04131	0.68744
25	3.418	1.34987	1.28256	-0.06731
26	1.944	2.21037	1.60081	-0.060956
27	-2.718	0.380375	0.09156	-0.28881
28	-1.303	-1.04913	-0.08344	0.96569
29	1.917	2.17138	2.61331	0.44193
30	3.332	3.73488	3.96981	0.23493
31	0.183	0.482375	0.39656	-0.08581
32	1.594	1.85088	1.25981	-0.59107

ANALYSIS SUMMARY

Comment: Parallelismo

Maximum order effect: 2

Tab. 20 - Estimated effects for Risposta

Average	= -0.215938	± 0.343812
A: Anello	= 2.48763	± 0.687623
B: Velocità	= -1.24388	± 0.687623
C: Tratt. Term.	= 0.111875	± 0.687623
D: Passate	= 2.59688	± 0.687623
AB	= -0.246625	± 0.687623
AC	= 0.519125	± 0.687623
AD	= -1.89688	± 0.687623
BC	= -0.512875	± 0.687623
BD	= -0.706625	± 0.687623
CD	= 1.22513	± 0.687623
Block	= 0.61775	± 0.687623

Standard errors are based on total error with 20 d. f.

ANALYSIS OF VARIANCE FOR RISPOSTA - PARALLELISMO

Tab. 21 -AN.O.V.A.

Source	Sum of Square	Df	Mean Square	F- Ratio	p- Value
A: Anello	49.5062	1	49.5062	13.09	0.0017
B: Velocità	12.3778	1	12.3778	3.27	0.0855
C: Tratt.Term.	0.100128	1	0.100128	0.03	0.8724
D: Passate	53.9501	1	53.9501	14.26	0.0012
AB	0.486591	1	0.486591	0.13	0.7236
AC	2.15593	1	2.15593	0.57	0.4591
AD	28.7851	1	28.7851	7.61	0.0121
BC	2.10433	1	2.10433	0.56	0.4644
BD	3.99455	1	3.99455	1.06	0.3164
CD	12.0075	1	12.0075	3.17	0.0900
Blocks	3.05292	1	3.05292	0.81	0.3797
Total error	75.6521	20	3.78261		
Total (corr.)	244.173	31			

VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI DI PROGETTO

Si è in grado di determinare la combinazione ottimale dei parametri di progetto. In base ai grafici e con l'ausilio delle tabelle, la condizione ottimale, che include i fattori non significativi, è A1 - B₁ - C1 - D1 (Stampati- 170 pz/min.- 62.5/64 HRC- n° passate= 2). Individuate le condizioni ottime, può essere stimata la media di processo (i fattori non significativi non sono stati usati per la stima per evitare una sovrastima) (in decibel):

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 - \bar{T}) = 2.326$$

$$\bar{T} = -0.216$$

$$\text{Rapporto S/N} \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = 2.326 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{-0.2326} = 0.585_{\text{condizionioptimali}} \end{cases}$$

Nelle attuali condizioni di lavorazione, cioè A1 - B1 - C₁ - D₁ (Stampati- 140 pz/min.- 61/62.5 HRCn ° passate= 1), la media di processo è:

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_{1} - \bar{T}) = -0.27$$

$$\text{Rapporto S/N} \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = -0.27 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{0.027} = 1.064_{\text{condizioninormali}} \end{cases}$$

Il progetto ottimizzato ridurrà la varianza di un fattore $\frac{1.064}{0.585} = 1.820$.

Il livello 1 (Torniti) del fattore anello era in prova. Siamo in grado di trarre se esso avesse portato ad un aumento della varianza. Infatti, sostituendo gli stampati con i torniti nell'attuale condizione di lavorazione (A₁ - B1 - C₁ - D₁: Torniti- 140 pz/min.- 61/62.5 HRC- n° passate= 1), si sarebbe avuto:

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 - \bar{T}) = -2.758$$

$$\text{Rapporto S/N} \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = -2.758 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{0.2758} = 1.887 \end{cases}$$

Il progetto aumenterà la varianza di un fattore $\frac{1.887}{1.064} = 1.773$.

Qualora i torniti venissero utilizzati nella condizione ottimale in luogo degli stampati, cioè A₁ - B₁ - C1 - D1 (Torniti- 170 pz/min.- 62.5/64 HRC- n° passate= 2) avremmo:

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_2 - \bar{T}) = -0.594$$

$$\text{Rapporto S/N} \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = -0.594 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{-0.0594} = 1.146 \end{cases}$$

Si può dedurre che il progetto aumenterà la varianza di un fattore $\frac{0.585}{1.146} = 0.510$.

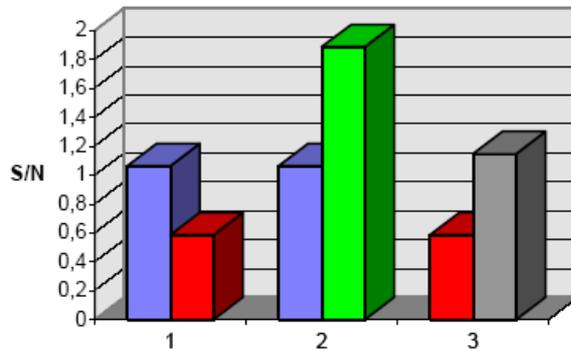


Figura 59 Confronto tra le condizioni di progetto (full factorial k=4)

- 1) NORMALE ⇒ OTTIMALE
- 2) NORMALE ⇒ NORMALE torniti
- 3) OTTIMALE ⇒ OTTIMALE torniti

Nelle peggiori condizioni di lavorazione (A₋₁ -B1 - C₋₁ - D₋₁: Torniti- 140 pz/min.- 62.5/64 HRC- n° passate= 1), la media di processo è:

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_{-1} - \bar{T}) + (\bar{D}_{-1} - \bar{T}) = -2.758$$

$$\text{Rapporto S/N} \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = -2.758 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{0.2758} = 1.887 \end{cases}$$

E' possibile stimare il guadagno economico consentito adottando le condizioni ottimali.

Visto che: $L = Kb^2 + K\sigma^2$

$$K = \frac{A}{\Delta^2} \quad \left\{ \begin{array}{l} A = \text{euro } 200 \\ \Delta = 3 \mu m \end{array} \right. \Rightarrow K = \frac{200}{9} = 22.2$$

dove:

- A è la perdita per unità difettosa dell'anello IR-6203 sostenuta dal gruppo SKF, conseguente alla mancata osservanza della specifica;
- Δ è il limite funzionale.

Per la condizione ottimale A1 - B₁ - C1 - D1 si ha:

$$L = \text{€ } 22.2 * (0.680^2 + 0.585) = \text{€ } 23.25/\text{unità}$$

Per il set iniziale di condizioni (A1 - B1 - C₁ - D₁) la perdita subita è di:

$$L = \text{€ } 22.2 * (0.920 + 1.064) = \text{€ } 42.41/\text{unità}$$

Il miglioramento economico è:

$$\text{€ } (42.41 - 23.25) = \text{€ } 19.16/\text{unità}$$

L'incremento delle perdite conseguente il discostamento dal valore obiettivo conseguente l'adozione dei torniti nelle due condizioni di progetto (normale e ottimale) è rispettivamente:

1. nel caso (A₁ - B1 - C₁ - D₁: Torniti- 140 pz/min.- 61/62.5 HRC- n° passate= 1): $L = \text{€ } 22.2 * (1.6982 + 1.887) = \text{€ } 105.90 \rightarrow$ un incremento delle perdite di $\text{€ } (105.90 - 42.41) = \text{€ } 63.49/\text{unità}$ rispetto alla condizione di progetto normale A1 - B1 - C₁ - D₁ (Stampati- 140 pz/min.- 61/62.5 HRC- n° passate=1);

2. qualora i torniti venissero utilizzati nella condizione ottimale in luogo degli stampati, cioè A₁ - B₁ - C1 - D1 (Torniti- 170 pz/min.- 62.5/64 HRC- n° passate= 2), avremmo: $L = \text{€ } 22.2 (1.1202 + 1.146) = \text{€ } 53.29 \rightarrow$ un incremento

delle perdite di € (53.29- 23.25)= € 30.40/unità rispetto al set ottimale A1 - B₁ - C1 - D1 (Stampati- 170 pz/min.- 62.5/64 HRC- n° passate= 2).

Come si può notare il risultato dell'applicazione della metodologia ha consentito di ottenere per la caratteristica "parallelismo": un valore medio inferiore del 26.09% rispetto a quello della "soluzione normale; uno scarto quadratico medio del 45% inferiore rispetto alla soluzione base; il decremento delle perdite dovute al discostamento del parallelismo dal valore target è del 45.18% rispetto al valore normale.

	ottimale	normale	Tornitnormale	Tornitottimale
"Quality loss"[euro]	23.25	42.41	105.90	53.28
\bar{x}	0.680	0.920	1.698	1.120
σ^2	0.585	1.064	1.887	1.146

Tabella 22 – Confronto tra le soluzioni

2) ONE HALF FRACTIONAL EXPERIMENT CON K= 4 ESEGUITO DALL'OPERAIO A+B

Tab. 23 - Piano sperimentale L16(24-1)

	Anello	Velocità	Trattamento Termico	N° Passate	Risposta
Esperimento n°1	-1	-1	-1	-1	-2.689
Esperimento n°2	1	-1	-1	1	1.859
Esperimento n°3	-1	1	-1	1	2.861
Esperimento n°4	1	1	-1	-1	2.787
Esperimento n°5	-1	-1	1	1	1.808
Esperimento n°6	1	-1	1	-1	0.828
Esperimento n°7	-1	1	1	-1	-4.98
Esperimento n°8	1	1	1	1	1.490
Esperimento n°9	-1	-1	-1	-1	-3.256
Esperimento n°10	1	-1	-1	1	1.944
Esperimento n°11	-1	1	-1	1	-2.718
Esperimento n°12	1	1	-1	-1	1.016
Esperimento n°13	-1	-1	1	1	1.917
Esperimento n°14	1	-1	1	-1	1.893
Esperimento n°15	-1	1	1	-1	-4.847
Esperimento n°16	1	1	1	1	1.594

DESIGN SUMMARY

Design class: Screening
 Design name: Half Fraction 2^{4-1}
 Comment: Parallelismo

Base Design

Number of experimental factors: 4 Number of blocks: 2
 Number of response: 1 Number of centerpoints per block: 0
 Number of runs: 16 Error degrees of freedom: 7
 Randomized: yes

Tab. 24 -Definizione dei fattori e dei loro livelli.

Factors	Low	High	Units	Continuos
Anello	-1	1		No
Velocità	-1	1	pz/min	No
Tratt.Term.	-1	1	HRC	No
Passate	-1	1		No

Responses Units
 Risposta decibel

ANALYSIS SUMMARY

Comment: Parallelismo
 Maximum order effect: 2

Tab. 25 -Estimated effects for Risposta.

Average	= 0.0941875	\pm 0.369673
A: Anello	= 3.16438	\pm 0.739345
B: Velocità	= -0.887625	\pm 0.739345
C: Tratt.Term.	= -0.262625	\pm 0.739345
D: Passate	= 2.50038	\pm 0.739345
AB+CD	= 0.978375	\pm 0.739345
AC+BD	= -0.187625	\pm 0.739345
AD+BC	= -2.40963	\pm 0.739345
Block	= -0.802625	\pm 0.739345

Standard errors are based on total error with 7 d.f.

ANALYSIS OF VARIANCE FOR RISPOSTA - PARALLELISMO

Tab. 26 -AN.O.VA.

Source	Sum of Square	Df	Mean Square	F- Ratio	p- Value
A: Anello	40.0531	1	40.0531	18.32	0.0037
B: Velocità	3.15151	1	3.15151	1.44	0.2690
C: Tratt.Term.	0.275888	1	0.275888	0.13	0.7329
D: Passate	25.0075	1	25.0075	11.44	0.0117
AB+CD	3.82887	1	3.82887	1.75	0.2273
AC+BD	0.140813	1	0.140813	0.06	0.8070
AD+BC	23.2252	1	23.2252	10.62	0.0139
Blocks	2.57683	1	2.57683	1.18	0.3136
Total error	15.3057	7	2.18653		
Total (corr.)	113.565	15			

VARIANZA REPLICA 1= 7.202

VARIANZA REPLICA 2= 7.012

REGRESSION COEFFS. FOR RISPOSTA-PARALLELISMO

Tab. 27 - Regression coeff. for risposta.

Constant	0.0941875
A: Anello	1.58219
B: Velocità	-0.443812
C: Tratt Term.	-0.131313
D: Passate	1.25019
AC	-0.0938125
AD	-1.20481
CD	0.489188

EQUAZIONE DEL MODELLO ATTESO

Risposta= 0.0941875+ 1.58219*Anello- 0.443812*Velocità- 0.131313*TrattTerm+ 1.25019*Passate- 0.0938125*Anello*TrattTerm- 1.20481*Anello*Passate+ 0.489188*TrattTerm*Passate.

ESTIMATION RESULTS FOR RISPOSTA

Tab. 28 - Fitted and observed value.

Row	Observed Value	Fitted Value	Residual:
1	-2.689	-2.57119	-0.117812
2	1.859	2.30281	-0.443812
3	2.861	2.472813	0.844187
4	2.787	2.30281	0.484187
5	1.808	2.26381	-0.455812
6	0.828	1.76181	-0.933812
7	-4.98	-4.51219	-0.467812
8	1.490	1.94331	-0.453313
9	-3.256	-3.37381	0.117813
10	1.944	1.50019	0.443813
11	-2.718	-1.329812	-1.38819
12	1.016	1.50019	-0.484188
13	1.917	1.46119	0.45813
14	1.893	0.959187	0.933813
15	-4.847	-5.31481	0.467813
16	1.594	1.14069	0.453312

VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI DI PROGETTO

Si è in grado di determinare la combinazione ottimale dei parametri di progetto. In base ai grafici e con l'ausilio delle tabelle, la condizione ottimale, che include i fattori non significativi, è A1 - B₁ - C1 - D1 (Stampati- 170 pz/min.- 62.5/64 HRC- n° passate= 2). Individuate le condizioni ottime, può essere stimata la media di processo. I fattori non significativi non sono stati usati per la stima per evitare una sovrastima. La sequenza degli effetti -sia dei fattori che delle interazioni- è invece importante per la determinazione della condizione ottimale) (in decibel):

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1\bar{C}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 - \bar{T}) = 4.444$$

$$\bar{T} = 0.094$$

$$\text{Rapporto S/N} \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = 4.44 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{-0.444} = 0.360_{\text{condizionioptimali}} \end{cases}$$

Nelle attuali condizioni di lavorazione -Stampati- 140 pz/min.- 61/62.5 HRC- n° passate = 1 (A1 - B1 - C.1 - D.1), la media di processo è:

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1\bar{C}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 - \bar{T}) = 1.319$$

$$\text{Rapporto S/N} \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = 1.319 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{-0.1319} = 0.738_{\text{condizioninormali}} \end{cases}$$

Il progetto ottimizzato ridurrà la varianza di un fattore $\frac{0.738}{0.360} = 2.05$.

Il livello 1 (torniti) del fattore anello era in prova. Siamo in grado di trarre se esso avesse portato ad un aumento della varianza. Infatti, sostituendo gli stampati con i torniti nell'attuale condizione di lavorazione (A.1 - B1 C.1 - D.1: Torniti- 140 pz/min.- 61/62.5 HRC- n° passate= 1), si sarebbe avuto:

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{B}_1\bar{C}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 - \bar{T}) = -1.845$$

$$\text{Rapporto S/N} \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = -1.845 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{0.1845} = 1.529 \end{cases}$$

Il progetto aumenterà la varianza di un fattore: $\frac{0.738}{1.529} = 0.483$.

Qualora i torniti venissero utilizzati nella condizione ottimale in luogo degli stampati (A.1 - B.1 - C1 - D1) avremmo:

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_{-1} - \bar{T}) + (\bar{B}_{-1}\bar{C}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 - \bar{T}) = 1.280$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = 1.280 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{-0.128} = 0.745 \end{array} \right.$$

possiamo dedurre che il progetto aumenterà la varianza di un fattore

$$\frac{0.360}{0.745} = 0.483$$

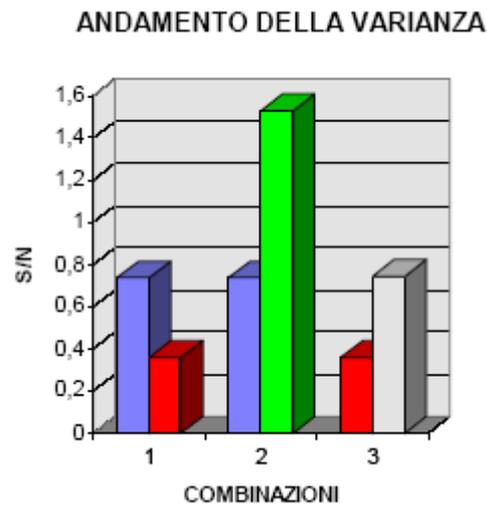


Figura 60 Confronto tra le condizioni di progetto (one half fractional k=4)

- 1) **NORMALE** \Rightarrow **OTTIMALE**
- 2) **NORMALE** \Rightarrow **NORMALE**_{torniti}
- 3) **OTTIMALE** \Rightarrow **OTTIMALE**_{torniti}

Nelle peggiori condizioni di lavorazione A₋₁ - B₁ - C₋₁ - D₋₁ (Torniti- 140 pz/min- 61/62.5 HRC- n° passate = 1), la media di processo è:

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_{-1} - \bar{T}) + (\bar{B}_1\bar{C}_{-1} - \bar{T}) + (\bar{D}_{-1} - \bar{T}) = -4.52$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = -4.520 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{0.452} = 2.830_{\text{condizionipeggiori}} \end{array} \right.$$

Rapporto S/N

$$L = K\sigma^2 \quad \text{dove} \quad K = \frac{A}{\Delta^2} \begin{cases} A = \text{€}200 \\ \Delta = 3 \mu m \end{cases}$$

$$K = \frac{200}{9} = 22.2$$

• A è la perdita per unità difettosa dell'anello IR-6203 sostenuta dal gruppo SKF, conseguente alla mancata osservanza della specifica;

• Δ è il limite funzionale.

Per la condizione ottimale A1 - B₁ - C1 - D1 (Stampati- 170 pz/min.- 62.5/64 HRC- n° passate= 2) la perdita subita è di:

$$L = \text{€} 22.2 * 0.360 = \text{€} 8.0/\text{unità}$$

Per il set iniziale di condizioni (A1 - B1 - C₁ - D₁) la perdita subita è di:

$$L = \text{€} 22.2 * 0.738 = \text{€} 16.4/\text{unità}$$

Il miglioramento economico è:

$$\text{€} (16.4-8.0) = \text{€} 8.4/\text{unità}$$

Questo valore è differente da quello ricavato con il piano completo perché in questo caso è possibile valutare la perdita associata solamente alla variabilità. Valutando le perdite associate alla sola variabilità della caratteristica “parallelismo” il miglioramento economico sarebbe stato di:

$$\Delta L = \text{€} 22.2 (1.064 - 0.585) = \text{€} 10.60$$

valore molto prossimo a quello calcolato con il piano “one half fractional”.

	Soluzione ottimale	Soluzione normale	Soluzione peggiore
"Quality loss"	8.0	16.4	63.0
σ^2	0.360	0.738	2.830

Tabella 29 – Confronto tra le soluzioni

Il risultato dell'applicazione della metodologia ha consentito di ottenere una varianza del 51.2% inferiore rispetto alla soluzione base, valore questo molto prossimo al 45% valutato con il piano completo.

3) FULL FACTORIAL EXPERIMENT CON K=5

Tab. 30 - Piano sperimentale L32(25).

	Sovrametallo	Velocità	Trattamento Termico	n° Passate	Operaio	Risposta
Esperimento n°1	-1	-1	-1	-1	-1	-2.689
Esperimento n°2	1	-1	-1	-1	-1	-0.028
Esperimento n° 3	-1	1	-1	-1	-1	-4.999
Esperimento n°4	1	1	-1	-1	-1	2.787
Esperimento n° 5	-1	-1	1	-1	-1	-3.257
Esperimento n°6	1	-1	1	-1	-1	0.828
Esperimento n° 7	-1	1	1	-1	-1	-4.98
Esperimento n°8	1	1	1	-1	-1	-5.011
Esperimento n° 9	-1	-1	-1	1	-1	-1.336
Esperimento n°10	1	-1	-1	1	-1	1.859
Esperimento n° 11	-1	1	-1	1	-1	2.861
Esperimento n°12	1	1	-1	1	-1	-1.413
Esperimento n° 13	-1	-1	1	1	-1	1.808
Esperimento n°14	1	-1	1	1	-1	3.520
Esperimento n° 15	-1	1	1	1	-1	0.164
Esperimento n°16	1	1	1	1	-1	1.490
Esperimento n° 17	-1	-1	-1	-1	1	-3.256
Esperimento n°18	1	-1	-1	-1	1	0.837
Esperimento n° 19	-1	1	-1	-1	1	-1.330
Esperimento n°20	1	1	-1	-1	1	1.016
Esperimento n° 21	-1	-1	1	-1	1	-4.294
Esperimento n°22	1	-1	1	-1	1	1.893
Esperimento n° 23	-1	1	1	-1	1	-4.847
Esperimento n°24	1	1	1	-1	1	3.101
Esperimento n° 25	-1	-1	-1	1	1	3.418
Esperimento n°26	1	-1	-1	1	1	1.944
Esperimento n° 27	-1	1	-1	1	1	-2.718
Esperimento n°28	1	1	-1	1	1	-1.303
Esperimento n° 29	-1	-1	1	1	1	1.917
Esperimento n°30	1	-1	1	1	1	3.332
Esperimento n° 31	-1	1	1	1	1	0.183
Esperimento n°32	1	1	1	1	1	1.594

DESIGN SUMMARY

Design class: Screening
 Design name: Factorial 2⁵
 Comment: Parallelismo

Base Design

Number of experimental factors: 5 Number of blocks: 1
 Number of response: 1 Number of centerpoints per block: 0
 Number of runs: 32 Error degrees of freedom: 16
 Randomized: yes

Tab. 31 - Definizione dei fattori e dei loro livelli.

Factors	Low	High	Units	Continuous
Anello	-1	1		No
Velocità	-1	1	pz/min	No
Tratt.Term.	-1	1	HRC	No
Passate	-1	1		No
Operaio	-1	1		No

Responses.....Units
 Risposta decibel

ANALYSIS SUMMARY

Comment: Parallelismo
 Maximum order effect: 2

Tab 32 -Estimated effects for Risposta.

Average	= -0.21425	± 0.366808
A: Anello	= 2.48425	± 0.733617
B: Velocità	= -1.24725	± 0.733617
C: Tratt.Term.	= 0.11525	± 0.733617
D: Passate	= 2.60025	± 0.733617
E: Operaio	= 0.621125	± 0.733617
AB	= -0.24325	± 0.733617
AC	= 0.51575	± 0.733617
AD	= -1.90025	± 0.733617
AE	= 0.426625	± 0.733617
BC	= -0.51625	± 0.733617
BD	= -0.71	± 0.733617
BE	= -0.021375	± 0.733617
CD	= 1.2285	± 0.733617
CE	= 0.425375	± 0.733617
DE	= -0.687625	± 0.733617

Standard errors are based on total error with 16 d. f.

ANALYSIS OF VARIANCE FOR RISPOSTA - PARALLELISMO

Tab 33 -AN.O.VA.

Source	Sum of Square	Df	Mean Square	F- Ratio	p- Value
A: Anello	49.372	1	49.372	11.47	0.0038
B: Velocità	12.4451	1	12.4451	2.89	0.1085
C: Tratt. Term.	0.106261	1	0.106261	0.02	0.8771
D: Passate	54.0904	1	54.0904	12.56	0.0027
E: Operaio	3.08637	1	3.08637	0.72	0.4097
AB	0.473365	1	0.473365	0.11	0.7445
AC	2.12798	1	2.12798	0.49	0.4921
AD	28.8876	1	28.8876	6.71	0.0197
AE	1.45607	1	1.45607	0.34	0.5690
BC	2.13211	1	2.13211	0.50	0.4917
BD	4.0328	1	4.0328	0.94	0.3475
BE	0.00365512	1	0.00365512	0.00	0.9771
CD	12.0737	1	12.0737	2.80	0.1134
CE	1.44755	1	1.44755	0.34	0.5701
DE	3.78263	1	3.78263	0.88	0.3625
Total error	68.8888	16	4.30555		
Total (corr.)	244.406	31			

REGRESSION COEFFS. FOR RISPOSTA-PARALLELISMO

Tab. 34 - Regression coeffs. for Risposta.

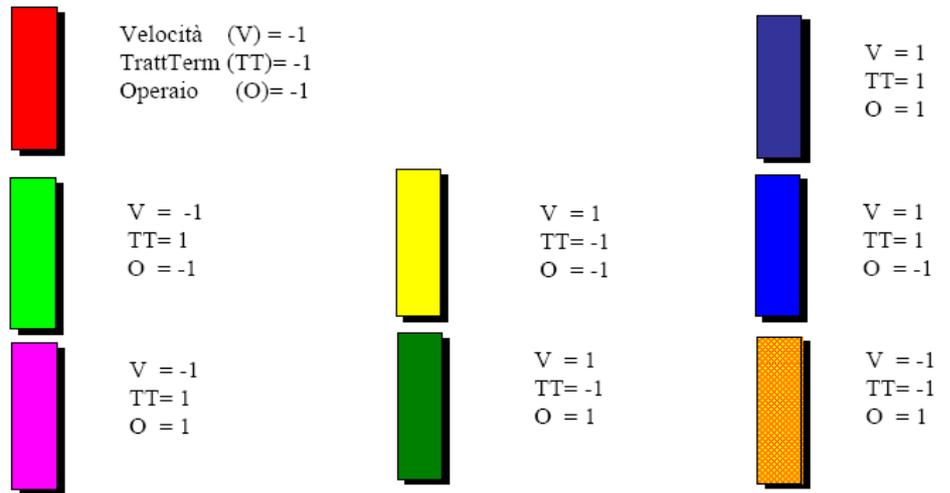
Constant	= 0.21425
A: Anello	= 1.24213
B: Velocità	= -0.623625
C: Tratt. Term.	= 0.057625
D: Passate	= 1.30013
E: Operaio	= 0.310562
AB	= -0.121625
AC	= 0.257875
AD	= -0.950125
AE	= 0.213313
BC	= -0.258125
BD	= -0.355
BE	= -0.0106875
CD	= 0.61425
CE	= 0.212687
DE	= -0.343813
ABC	= -0.0465
ABD	= -0.185625
ABE	= 0.306187
ACD	= 0.176375

ACE	= 0.400062
ADE	= -0.166187
BCD	= 0.33675
BCE	= 0.533562
BDE	= -0.624313
CDE	= -0.167187
ABCD	= 0.31175
ABCE	= 0.0883125
ABDE	= 0.368438
ACDE	= -0.480437
BCDE	= 0.119937
ABCDE	= -0.708437

EQUAZIONE DEL MODELLO ATTESO

$$\begin{aligned}
 \text{Risposta} = & -0.21425 + 1.24213 * \text{Anello} - 0.623625 * \text{Velocità} + 0.057625 * \text{TrattTerm} + 1.3001 * \text{Passate} + \\
 & 0.310562 * \text{Operaio} - 0.121625 * \text{Anello} * \text{Velocità} + 0.257875 * \text{Anello} * \text{TrattTerm} - \\
 & 0.950125 * \text{Anello} * \text{Passate} + 0.213313 * \text{Anello} * \text{Operaio} - 0.257125 * \text{Velocità} * \text{TrattTerm} - \\
 & 0.355 * \text{Velocità} * \text{Passate} - 0.0106875 * \text{Velocità} * \text{Operaio} + 0.61425 * \text{TrattTerm} * \text{Passate} \\
 & + 0.212687 * \text{TrattTerm} * \text{Operaio} - 0.343813 * \text{Passate} * \text{Operaio} - 0.0465 * \text{Anello} * \text{Velocità} \\
 & * \text{TrattTerm} - 0.185625 * \text{Anello} * \text{Velocità} * \text{Passate} + 0.306187 * \text{Anello} * \text{Velocità} * \text{Operaio} + \\
 & 0.176375 * \text{Anello} * \text{TrattTerm} * \text{Passate} + 0.400062 * \text{Anello} * \text{TrattTerm} * \text{Operaio} - 0.166787 \\
 & * \text{Anello} * \text{Passate} * \text{Operaio} + 0.33675 * \text{Velocità} * \text{TrattTerm} * \text{Passate} + 0.533562 * \text{Velocità} \\
 & * \text{TrattTerm} * \text{Operaio} - 0.624313 * \text{Velocità} * \text{Passate} * \text{Operaio} + 0.167187 * \text{TrattTerm} \\
 & * \text{Passate} * \text{Operaio} + 0.31175 * \text{Anello} * \text{Velocità} * \text{TrattTerm} * \text{Passate} + 0.0883125 * \text{Anello} \\
 & * \text{Velocità} * \text{Passate} * \text{Operaio} + 0.368438 * \text{Anello} * \text{Velocità} * \text{Passate} * \text{Operaio} - 0.480437 \\
 & * \text{Anello} * \text{TrattTerm} * \text{Passate} * \text{Operaio} + 0.119937 * \text{Velocità} * \text{TrattTerm} * \text{Passate} * \text{Operaio} - \\
 & 0.708437 * \text{Anello} * \text{Velocità} * \text{TrattTerm} * \text{Passate} * \text{Operaio}.
 \end{aligned}$$

I valori delle variabili nell'equazione sono: (-1) per il livello basso ed (1) per il livello alto.
 Una rappresentazione grafica dell'equazione è visibile nelle rappresentazioni "response plot".
 Queste rappresentazioni sono ottenute in funzione di due fattori mantenendo costanti (-1 oppure 1) i restanti due. In questi grafici la variabile dipendente è il rapporto S/N (Risposta) espresso in decibel. Nelle due successive pagine sono riportati i grafici di detta variabile, in funzione dei fattori più incidenti sulla variabilità della risposta (come è possibile vedere dal diagramma di Pareto): anello e numero di passate. Le diverse colorazioni delle superfici diagrammate riflettono i diversi valori assunti per i fattori considerati costanti e precisamente:



La proiezione di questi grafici dà luogo alla rappresentazione “contour plot”, nella quale sono visibili le fasce di valori assunte dal modello per i valori intermedi i limiti -1,1. Questi forniscono lo spunto per l’individuazione della fascia di valori dei fattori anello e passate che forniscono il massimo della variabile dipendente Risposta.

ESTIMATION RESULTS FOR RISPOSTA

Tab. 35 - Fitted and observed value.

Row	Observed Value	Fitted Value	Residual
1	-2.689	-2.689	0.0
2	-0.028	-0.028	0.0
3	-4.999	-4.999	0.0
4	2.787	2.787	0.0
5	-3.257	-3.257	0.0
6	0.828	0.828	0.0
7	-4.98	-4.98	0.0
8	-5.011	-5.011	0.0
9	-1.336	-1.336	0.0
10	1.859	1.859	0.0
11	2.861	2.861	0.0
12	-1.413	-1.413	0.0
13	1.808	1.808	0.0
14	3.520	3.520	0.0
15	0.164	0.164	0.0
16	1.490	1.490	0.0
17	-3.256	-3.256	0.0
18	0.837	0.837	0.0
19	-1.33	-1.33	0.0
20	1.016	1.016	0.0
21	-4.294	-4.294	0.0
22	1.893	1.893	0.0
23	-4.847	-4.847	0.0
24	3.101	3.101	0.0
25	3.418	3.418	0.0
26	1.944	1.944	0.0
27	-2.718	-2.718	0.0
28	-1.303	-1.303	0.0
29	1.917	1.917	0.0
30	3.332	3.332	0.0
31	0.183	0.183	0.0
32	1.594	1.594	0.0

VALUTAZIONI DELLE CONDIZIONI DI PROGETTO

Si è in grado di determinare la combinazione ottimale dei parametri di progetto. In base ai grafici e con l'ausilio delle tabelle, la condizione ottimale, che include i fattori non significativi, è A1 - B₁ - C1 - D1 - E₁ (Stampati- 170 pz/min- 62.5/64 HRC- n° Passate= 2- OperaioA). Individuate le condizioni ottime, può essere stimata la media di processo (in decibel):

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 - \bar{T}) = 2.326$$

$$\bar{T} = -0.216$$

$$\text{Rapporto S/N} \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = 2.326 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{-0.2326} = 0.585_{\text{condizionioptimali}} \end{cases}$$

Come si può notare gli unici fattori significativi sono: il numero di passate, il tipo di anello e l'interazione AD. Questo significa che il fattore umano non può essere ritenuto decisivo ai fini della variabilità del parallelismo. Effettuando un confronto tra i due turni nelle condizioni ottimali otteniamo:

OPERAIO A

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 \bar{E}_{-1} - \bar{T}) = 3.66$$

$$\bar{T} = -0.216$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = 3.66 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{-0.366} = 0.430_{\text{condizionioptimali}} \end{cases}$$

OPERAIO B

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_1 \bar{E}_1 - \bar{T}) = 3.59$$

$$\bar{T} = -0.216$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = 3.59 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{-0.359} = 0.437_{\text{condizionioptimali}} \end{cases}$$

Il confronto risulta essere di:

$$\frac{A_{\text{ottimali}}}{B_{\text{ottimali}}} = \frac{0.437}{0.430} = 1.016$$

Nelle condizioni normali invece otteniamo:

OPERAIO A

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_{-1} - \bar{T}) + (\bar{D}_{-1}\bar{E}_{-1} - \bar{T}) = -2.223$$

$$\bar{T} = -0.216$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = -2.223 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{0.2223} = 1.668 \end{cases}$$

OPERAIO B

$$\bar{\mu} = \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{D}_{-1} - \bar{T}) + (\bar{D}_{-1}\bar{E}_1 - \bar{T}) = -0.914$$

$$\bar{T} = -0.216$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \eta = -10 \log \sigma^2 \\ \bar{\mu} = -10 \log \sigma^2 = -0.914 \Rightarrow \sigma^2 = 10^{0.0914} = 1.234 \end{cases}$$

Quindi il confronto è di:

$$\frac{A}{B} = \frac{1.668}{1.234} = 1.352$$

Si può affermare che il fattore umano, se ben qualificato, non presenta un ruolo decisivo sulla variabilità del parallelismo. Entrambi forniscono il medesimo risultato. Dai diagrammi di Pareto relativi ai due operai, si può notare che per entrambi i fattori e le interazioni non presentano la stessa significatività. Infatti per l'operaio A, i fattori: anello, numero di passate e le interazioni: AD e BD presentano un ruolo significativo. Diversamente, l'operaio B è più sensibile al solo fattore anello. Questo è dovuto alla diversa esperienza lavorativa maturata negli anni, che porta i due a reagire diversamente sui parametri della macchina allorché i livelli dei fattori vengono cambiati.

2.12.5. DEDUZIONI SULL'APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DI TAGUCHI

L'applicazione della metodologia di Taguchi, e quindi delle tecniche del D.o.E., hanno permesso di valutare le condizioni ottimali per il miglioramento qualitativo dell'anello IR-6203 e, quindi, del cuscinetto SKF 6203. Utilizzando per entrambi i turni la soluzione: "Stampati- Velocità del disco alimentatore = 170 pz/min- Durezza dell'anello= 62.5/64 HRC- Numero di passate= 2", si ottiene un miglioramento qualitativo che può essere espresso nei tre punti:

- valore medio inferiore del 26.09% rispetto al valore normale. Questo è indice di un miglior rispetto degli obiettivi funzionali;
- scarto quadratico medio inferiore del 45% rispetto alla soluzione base ed è espressione di una migliore affidabilità;
- decremento delle perdite (dovute allo scostamento della caratteristica "parallelismo" dal valore target) del 45.18% rispetto alle perdite corrispondenti alle condizioni nominali (€ 42.41/unità → € 23.25/unità). Questo è un prodotto che si avvicina maggiormente alle esigenze del cliente.

L'utilizzo dei torniti in luogo degli stampati comporta un incremento delle perdite. Queste perdite sono quantificabili in € 63.49/unità nella condizione di lavorazione normale e in € 30.40/unità nella condizione ottimale.

L'analisi con 5 fattori ci ha portato alla conclusione che il fattore umano, se ben qualificato, non presenta un ruolo decisivo sulla variabilità del parallelismo. Tuttavia diversa è la significatività dei fattori e delle interazioni per i singoli operai in quanto differente è l'impatto che hanno con i vari livelli dei fattori.

3. SICUREZZA E AFFIDABILITA' INDUSTRIALI

3.1. DESCRIZIONE

La misura della qualità di un prodotto industriale necessaria per la verifica del soddisfacimento delle attese concordate, richiede che vengano date:

- una definizione del concetto di qualità che sia riconducibile ad una caratteristica misurabile;
- un intervallo di valori numerici all'interno del quale esprimere la misura.

Le caratteristiche del prodotto che possono assumere il significato di indicatori della probabilità di soddisfare le prestazioni richieste in forma implicita dal cliente e possibili di misurazione sono:

- L'AFFIDABILITA' (*Reliability*)
- La DISPONIBILITA' (*Availability*)
- La MANUTENABILITA' (*Maintainability*)
- La SICUREZZA (*Safety*).

L'affidabilità $R(t)$ è la probabilità che un oggetto svolga la funzione per cui è stato realizzato per un tempo ed in condizioni determinate. E dipende dalla sua frequenza di guasto, secondo la relazione:

$$R(t) = e^{(-\int \lambda(t) \cdot dt)}$$

nella quale, assumendo il tasso di guasto $\lambda(t) = \text{cost} = \lambda$, si ottiene la seguente espressione semplificata dell'affidabilità:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$

Per guasto di un oggetto o apparato si intende la sospensione o interruzione della sua capacità di svolgere la funzione prevista. I guasti dei componenti e dei sistemi sono determinati da differenti cause, tra cui le più importanti sono:

- Le sollecitazioni, la fatica, gli urti. Oltre all'intensità ed alla distribuzione nel tempo dei carichi, influiscono le caratteristiche strutturali dei materiali e l'eventuale presenza di difetti o altri stati particolari.
- La temperatura. Oltre al suo livello è importante la distribuzione nello spazio e nel tempo delle sorgenti di calore, l'inerzia termica e la capacità di trasmissione del materiale dei componenti.
- L'usura. L'usura è dovuta a fenomeni di attrito, ad insufficiente dissipazione del calore e ad esposizione ad elevati livelli di radiazione.
- La corrosione. E' un fenomeno che dipende dalle caratteristiche chimiche dell'ambiente e da quelle chimico-fisiche dei materiali, da fenomeni elettrici, dalla contemporanea presenza di sollecitazioni.

La vita di un qualsiasi apparato è caratterizzato da tre tipi di guasto che si verificano senza alcun intervento errato dell'operatore. Questi guasti vengono classificati come:

- guasti infantili o precoci (periodo iniziale di vita);
- guasti casuali (periodo di vita utile);

- guasti per usura o invecchiamento (periodo di fine vita).

L'andamento del tasso di guasto $\lambda(t)$, in funzione dell'età t dei componenti, è noto come "curva a vasca da bagno". Per un sistema riparabile viene sovente specificata anche la manutenibilità.

La manutenibilità è l'attitudine di un oggetto al ripristino della sua capacità di fornire le prestazioni previste. Essa viene espressa dalla probabilità che il tempo per una riparazione o per una manutenzione preventiva sia più corto di un limite t dato, quando queste operazioni vengono eseguite in condizioni di personale e supporto logistico definite. Il tempo medio di una riparazione viene indicato con MTTR (Mean Time To Repair). La combinazione dell'affidabilità e della manutenibilità permette di esprimere la disponibilità come la probabilità che l'oggetto svolga la sua funzione correttamente al momento della domanda d'uso. Un indice di disponibilità molto usato nelle applicazioni pratiche è il seguente:

$$A_0 = \frac{\text{MTFB}}{\text{MTFB} + \text{MTTR}}$$

A_0 è data dal rapporto tra il tempo medio di buon funzionamento MTFB (*Main Time Between Forced Outage*) ed il tempo di riferimento, ed esprime la probabilità che il dispositivo sia in servizio ad un istante dato. Infine per dispositivi il cui guasto può avere conseguenze gravi (disastrose) per l'uomo, l'ambiente o le cose, è necessario specificare anche la sicurezza. Le analisi di sicurezza hanno come obiettivo la determinazione quantitativa del parametro rischio [61].

Prima di entrare nel vivo della trattazione, è indispensabile definire alcuni termini e chiarire alcuni concetti fondamentali, come quelli di pericolo e di rischio. Il termine pericolo descrive o indica una situazione di danno potenziale (alle persone, alla proprietà o all'ambiente). Il termine rischio indica la probabilità che il danno accada. Si può così parlare di un pericolo reale, se associato a incidenti realmente accaduti; esso si può valutare solo con il

verificarsi dell'evento. Si parla, invece, di pericolo percepito nel caso in cui l'evento dannoso è stato preannunciato da una sensazione di insicurezza o timore. E' questo il pericolo che l'individuo sente soggettivamente. Per quanto riguarda il rischio, si può parlare di rischio statistico se è basato su rilevamenti statistici significativi e di rischio valutato quando la probabilità del verificarsi dell'evento dannoso si basa su una valutazione scientifica della realtà. Il pericolo, dunque, indica che certi eventi indesiderati possono verificarsi, mentre il rischio è la probabilità che si verifichino. Tutte le analisi di sicurezza hanno come obiettivo la determinazione del parametro rischio. La funzione rischio (R) è esplicitata nella seguente equazione, ossia come prodotto tra il valore della probabilità di accadimento (P) dell'evento indesiderato e quello della gravità (G) del danno possibile per l'evento indesiderato considerato [62].

$$R = P \times G$$

Il rischio può essere ridotto con misure:

- Preventive.
- Protettive.

Le prime sono rappresentate dai provvedimenti tecnici e procedurali che hanno come scopo la riduzione della probabilità (P) del verificarsi di eventi indesiderati. Le seconde, invece, sono rappresentate dai provvedimenti tecnici e procedurali che hanno come scopo la riduzione della gravità (G) delle conseguenze avverse.

L'identificazione e la valutazione dei danni eventuali, indispensabile per valutare i rischi connessi all'uso di un prodotto, dovrebbe essere svolta in fase di progettazione, in modo da prevenire ogni possibile difetto. Se tuttavia il difetto, inteso come comportamento rischioso, si rileva durante l'uso del prodotto, un'analisi accurata sarà comunque utile per impostare azioni correttive volte ad impedire il ripetersi dell'evento dannoso. In realtà, è molto difficile ottenere valori attendibili sulla sicurezza di un prodotto in fase progettuale, prima cioè

che sia entrato nell'uso. Infatti, è proprio l'uso il miglior banco di prova di un prodotto. Ancora più problematica, poi, è la valutazione del rischio inerente prodotti completamente nuovi, sul cui utilizzo, quindi, non esistono esperienze da valutare, né all'interno, né all'esterno dell'azienda. In questo caso, un piccolo aiuto può derivare dall'analisi, condotta attraverso collaudati test, delle caratteristiche dei componenti standard (quindi conosciuti), utilizzati nella fabbricazione del prodotto. Comunque avvenga, tuttavia, quest'analisi sarà sempre di tipo qualitativo e non quantitativo, e soggettivo sarà il giudizio che sul prodotto ne deriva. Nonostante questi limiti, l'analisi potrà ugualmente essere utile se riuscirà almeno a definire gli eventi dannosi e la catena logica che a essi conduce, al fine di predisporre misure preventive. In sintesi l'analisi del rischio richiede una pianificazione dei pericoli esistenti o individuati e lo studio delle condizioni nelle quali essi si esplicano. La pianificazione dei rischi esistenti prevede le seguenti attività:

- L'identificazione degli eventi indesiderati ai quali porta un'attività o una condizione definita.
- La valutazione della frequenza o delle probabilità di verificarsi di ognuno di questi eventi.
- L'identificazione del nesso causale che lega la suddetta attività o condizione al verificarsi dell'evento.

Esistono due differenti modi o sistemi per l'individuazione del rischio:

- Su base statistica, in relazione agli eventi verificatisi (occorre che il prodotto abbia una certa vita e che esista una raccolta di dati relativa).
- Su base teorica, per eventi ipotizzabili (utile per prodotti nuovi, in relazione ai quali si può ricorrere soltanto a valutazioni teoriche).

Conseguentemente deriva che sono molti i fattori da soppesare e valutare nel determinare quali sono per il consumatore i rischi di un prodotto e quando

questo deve essere considerato pericoloso. Il metodo pratico per valutare i rischi nel mondo del lavoro (nelle industrie e nelle compagnie di assicurazione), è chiamato *risk management*; esso è, dunque, l'attività che ha lo scopo di individuare sistematicamente i pericoli, di valutare i rischi e di gestirli. Il risk management comprende, in successione le seguenti attività (figura 61):

- L'identificazione dei pericoli.
- La valutazione dei rischi.
- Il trattamento dei rischi.
- L'attuazione delle decisioni.
- L'esecuzione e il controllo delle azione intraprese.

Il risk management, come metodo, può essere usato anche nel più ristretto ambito della sicurezza dei prodotti come “approccio sistematico per analizzare e ridurre i rischi connessi all'uso del prodotto da parte del consumatore allo scopo

di evitare pericoli per la vita, per la salute e per la salvaguardia degli individui”.

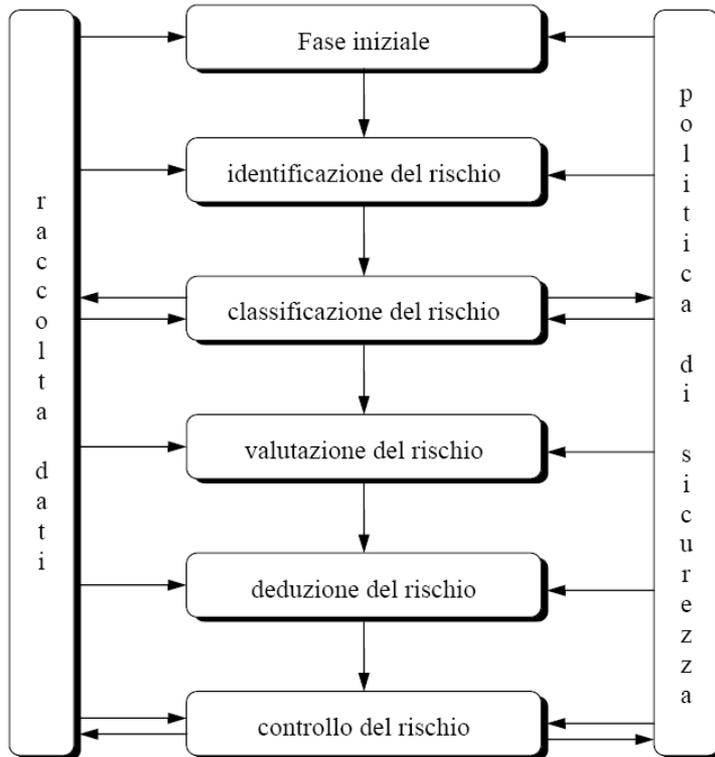


Figura 61 Modello del risk management

In particolare, per identificare i pericoli che possono caratterizzare uno specifico prodotto è necessario fare costante riferimento alle disposizioni di legge e alle normative vigenti. Una soluzione ampiamente adottata è stata la messa a punto di liste di controllo che in forma domanda/risposta ripropongono i contenuti delle leggi e delle principali norme. I problemi che si osservano sono connessi con l'ampiezza delle liste e col fatto che queste non sono coordinate con le fasi di progettazione. Il risultato è che la verifica continua delle scelte progettuali comporta tempi eccessivi per cui le liste di controllo risultano efficaci in una prima fase come strumento di autoapprendimento ed in seguito solo come strumento di verifica della completezza dell'analisi dei rischi. Per le

verifiche nel corso della progettazione il progettista dovrà ricorrere all'insieme di conoscenze che, col tempo, ha fatte proprie [63].

La scienza che studia il fattore umano è chiamata ergonomia. Essa considera le caratteristiche dell'uomo, le sue aspettative e i suoi comportamenti nei confronti dei risvolti progettuali delle cose che egli usa nel lavoro quotidiano, nella sua casa o nel tempo libero, nonché nell'ambiente in cui lavora e vive; in termini più semplici, tratta il modo in cui devono essere progettate le cose per l'uso umano. Dopo timidi e sporadici tentativi di studio fatti da psicologi inglesi dopo la Prima Guerra Mondiale, solo con la Seconda Guerra Mondiale questo campo cominciò ad assumere connotati più definiti che gli conferirono i crismi di vera e propria disciplina. Come già anticipato, molte cose che oggi apprezziamo nell'impegno civile derivano da originali studi e ricerche sviluppate nel campo militare. Lo spunto per tali studi emerse, al tempo, come esigenza per i nuovi e più complessi equipaggiamenti che non avrebbero potuti essere usati efficacemente e in sicurezza, e mantenuti adeguatamente se non da soldati ben addestrati. L'impegno iniziale profuso nella progettazione di equipaggiamenti militari, che sarebbero stati poi impiegati da uomini, si trasferì lentamente in alcune realizzazioni non militari come certi equipaggiamenti per i trasporti (imballaggi), computer, sistemi di comunicazione e di sicurezza ed altri. Negli anni '70 il flusso di ricaduta tecnologica militare nel settore civile è dilagato in tutti i settori della vita umana. Molte delle cose che l'uomo crea per il proprio uso richiedono riflessioni sul fattore umano che fino ad oggi non sono state considerate sufficientemente. Il comportamento dell'uomo, dunque, nei confronti di un'operazione può variare moltissimo a seconda del soggetto e delle circostanze, e di ciò si deve tener conto nella realizzazione di un prodotto. Secondo uno studio realizzato da un esperto di nome Swain¹, le cause di un errore umano si possono così catalogare:

- Incapacità di esecuzione.

- Insufficiente costanza di attenzione (la mente umana è incapace di mantenere un'attenzione costante. Il rapporto concentrazione/attenzione può variare da persona a persona).

- Attitudine o propensione all'errore (alcuni individui hanno un atteggiamento sempre attento di fronte all'errore, mentre altri hanno un atteggiamento negativo nei confronti dell'errore e commettono errori nel richiamare la propria attenzione).

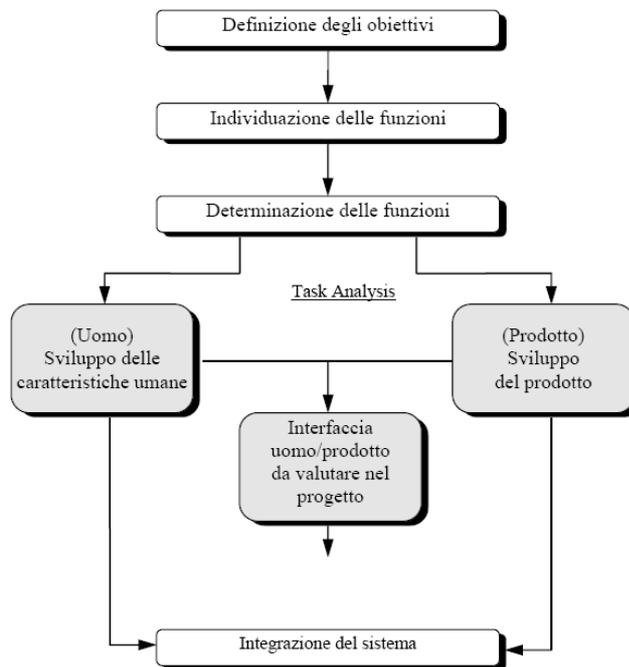


Figura 62 La correlazione tra fattore umano e la progettazione

Oltre all'errore umano che vari autori hanno valutato in contesti diversi, ci sono altre due “trappole” in cui l'analista può incorrere:

- Sovrastimare le capacità o le abilità dell'utente finale.
- Sottostimare le varietà comportamentali fisiche e intellettuali dell'utilizzatore.

Considerando il fattore umano nella progettazione di equipaggiamenti o altri oggetti fisici destinati all'uomo, si devono sviluppare determinate attività di base, come ad esempio, la rappresentazione degli elementi che correlano le funzioni umane con il prodotto o sistema in fase di realizzazione (figura 62). Il fattore umano dovrebbe essere considerato allo stadio concettuale del progetto di un prodotto e in tutte le fasi successive di sviluppo e di realizzazione. Dal momento che il comportamento dell'uomo interagisce con le manovre o genericamente con gli interventi che sono necessari sul prodotto, occorre considerare che il prodotto associato all'elemento umano costituisce un sistema interattivo [64]. A tal proposito le principali considerazioni da svolgere sono le seguenti:

- Stabilire quale ruolo l'uomo deve svolgere in relazione al funzionamento del prodotto, per esempio gestirne uso, manutenzione, montaggio, movimentazione, ecc.
- Decidere dove, quando e come all'uomo è richiesto di interagire con il prodotto, con i suoi sottosistemi, con i componenti, direttamente o indirettamente.

Di seguito sono riportate le caratteristiche potenziali dell'utente (tabella 36) e le possibili fonti di rischi ed errori dovuti all'uomo (tabella 37) da prendere in considerazione.

Caratteristiche potenziali dell'utente
Età.
Sesso.
Preparazione culturale.
Livello di addestramento.
Livello di esperienza.
Statura e caratteristiche somatiche.
Mobilità.
Destrezza.
Coordinamento.
Tempi di reazione.
Capacità di reazione
Capacità motorie.
Stato di salute.
Handicap.
Resistenza alla fatica.
Forza.
Adattabilità
Equilibrio.
Livello di intelligenza.

Tabella 36 – Caratteristiche potenziali dell'utente

Rischi ed errori dovuti all'uomo		
Individuali	Funzionali	Ambiente
ignoranza	errore di	condizioni
noia	esecuzione	atmosferiche
ozio	non corretta	rumore
negligenza	risposta	temperatura
mancanza di	carenza di	illuminazione
attenzione	controllo	struttura del
fumo	training	pavimento
alcohol e droghe	insufficiente	ventilazione
scherzi insensati	superspecializ	ed aerazione
stanchezza	zazione	complessità
malattia	carenza di	comfort
stress	valutazione	indicazioni di
limitazioni		avvertenze
fisiche		fattori sociali
disorientamento		fattori
background		psicologici
culturale		

Tabella 37 – Rischi ed errori dovuti all'uomo

Anche se nella realizzazione dei prodotti più comuni il termine può sembrare eccessivo, è bene conoscere gli obiettivi di quest'analisi che, anche se è sempre molto delicata, per certi prodotti più complessi può essere di aiuto. Come dice il termine stesso, la *task analysis* implica l'esame di che cosa un particolare progetto richieda in relazione alle caratteristiche

di colui che verrà a contatto con il prodotto, sia esso l'installatore, il manutentore, l'utilizzatore, ecc. L'analisi delle funzioni e la loro descrizione serve principalmente a due scopi:

- Scoprire se il prodotto è realizzabile nella configurazione progettuale che è stata prevista.
- Valutare se la necessità di intervenire nei sottosistemi per riparazioni e per manutenzioni varie richieda particolari programmi di training, e/o informazioni.

Un utile strumento per valutare le più comuni carenze della progettazione in relazione al fattore umano è illustrato nella tabella 38.

Comportamento	Considerazioni progettuali
Perdita di presa su un oggetto	L'attrito della superficie non è compatibile con la funzione
Sottostima o sovrastima della distanza	E' richiesta all'utilizzatore una valutazione critica
Uso di un utensile non adatto che scivola via	Prodotto non fornito di apposito utensile, che può l'uso di un altro non adatto
Prelievo di un materiale o di una parte calda	Personale non avvisato o personale non ben addestrato o che agisce al posto sbagliato
Lesioni al capo o altre parti del corpo esposte in operazioni di riparazioni	La macchina o il prodotto presentano angoli o bordi affilati non necessari
Abiti intrappolati da parti in movimento	Pericolo non segnalato in certe condizioni di funzionamento
Cattiva interpretazione delle istruzioni sulle etichette del prodotto	L'istruzione è leggibile ma il significato non è di chiara interpretazione
Accensione al posto dello spegnimento	Interruttore con sequenza non standard
Inserimento delle dita, da parte di bambini per esempio, in una ventola o in un ventilatore	Soluzione non salvaguardata, materiale (metallo) non adatto per l'impiego domestico
Danni dovuti a scarsa illuminazione di comandi, parti o aree di un prodotto o macchina	Illuminazione non adeguata e posizionamento non corretto
Appoggio della o delle mani in aree a rischio di schiacciamento o perforazione	Il dispositivo di salvaguardia non è operante per carenza costruttiva. La macchina o il prodotto non dovrebbe poter funzionare in simili condizioni
Collocazione dei piedi in aree a rischio, per familiarità con la macchina o l'ambiente	Mancanza di dispositivi di cautela idonei e necessari per la corretta collocazione dei piedi

Tabella 38- Esempio di task analysis - carenze progettuali correlate all'errore umano

3.2. METODOLOGIE E TECNICHE DI ANALISI

I principi di base e le regole fondamentali per una realizzazione più sicura dei prodotti sono da tempo, almeno da vent'anni, a disposizione dei tecnici e del management. Esse costituiscono il risultato di un impegno responsabile di

uomini che, coinvolti in grandi progetti, senza un'esperienza specifica nel settore, si sono posti il problema non solo come obiettivo tecnico ma anche come impegno sociale, per il quale hanno formulato metodologie e tecniche preventive. Tutti questi principi non solo sono sopravvissuti, ma si sono evoluti con il tempo, in quanto, entrando a far parte integrante della qualità del prodotto se applicati, sono qualificanti e remunerativi per l'industria. Si illustreranno di seguito alcune delle migliori e più diffuse metodologie e tecniche analitico investigative per prevenire eventi indesiderati in realizzazioni del campo ingegneristico. Le teorie di analisi del rischio che si possono trovare in letteratura tecnica o che possono essere proposte, sono varie ma tutte abbastanza simili tra loro. Inoltre in tema di progettazione della sicurezza di un prodotto, sistema o servizio, si è tentati di focalizzare tutti gli sforzi sul prodotto fisico, trascurando che i problemi possono sorgere anche per povertà di dati o mancanza di test o per carenze organizzative aziendali. Per tener conto di questa situazione, quindi, a seconda della particolare situazione da analizzare si preferisce una tecnica di analisi piuttosto che un'altra, come ad esempio illustrato nella tabella 39 può dire che ne esista un superiore alle altre [65].

Situazioni	Metodologie e tecniche
Analisi con o senza dati	F.M.E.A. F.T.A.
Analisi su prototipi	Worst Case Analysis
Analisi su eventi indesiderati accaduti e investigati come Feed Back	Change Analysis
Analisi sugli effetti causati da carenze dell'organizzazione aziendale	M.O.R.T.

Tabella 39-Metodologie, tecniche e situazioni

Non si farà, quindi, riferimento a una specifica teoria, ma ad alcuni criteri generali che dovrebbero essere seriamente considerati nell'analisi del rischio. In generale, si ritiene necessario procedere nell'analisi del rischio con almeno due diversi metodi, in modo da avere una conferma dell'attendibilità dei risultati a cui si perviene. Le tecniche, che saranno esaminate in dettaglio più avanti, aiutano a organizzare le informazioni sia in forma qualitativa sia in forma quantitativa, guidando il processo decisionale attraverso un esame logico delle condizioni connesse alle configurazioni. Di conseguenza la scelta del metodo da adottare dipenderà essenzialmente dal tipo di informazioni sui rischi, di cui si dispone. Lo schema che segue (si veda la tabella 40) elenca indicativamente l'impegno necessario per applicare queste tecniche.

Tecniche di valutazione dei rischi	Impegno			
	basso	limitato	medio	elevato
F.M.E.A. - qualitativa		○		
F.M.E.A. - quantitativa				○
F.T.A. - qualitativa			○	
F.T.A. - quantitativa				○
Dettagliate revisioni e verifiche			○	○

Tabella 40-Valutazione dell'impegno

3.2.1 LA F.M.E.A.

La F.M.E.A. (Failure Mode and Effect Analysis), descritta e normalizzata da alcuni standard internazionali (norma MIL-STD 1629A), consente di individuare quali elementi del sistema, in caso di guasto, possano produrre gravi conseguenze per l'incolumità delle persone o ingenti danni economici. Essa è nata e si è sviluppata nell'ambito del programma spaziale lunare NASA per valutare tutti i problemi, che avrebbero potuto manifestarsi, quali il malfunzionamento dei veicoli e degli equipaggiamenti spaziali. Il risultato fu il successo dell'allunaggio del 1969. Con il declino del programma spaziale agli inizi degli anni '70, moltissimi tecnici e scienziati della NASA trovarono lavoro nelle industrie civili ove portarono molti dei metodi già messi a punto per prevenire guasti, cattivo funzionamento, incidenti e rischi in genere [66]. I primi

seminari sull'affidabilità in America furono tenuti nel 1972 e includevano una serie di sezioni di insegnamento di F.M.E.A. Negli Stati Uniti, sempre agli inizi degli anni '70, la F.M.E.A. divenne uno degli strumenti più utilizzati dall'industria automobilistica per diminuire gli eventi di guasto. Quest'industria, a sua volta, la impose ai suoi subfornitori per migliorare l'affidabilità dei loro prodotti. Oggi la F.M.E.A. viene normalmente utilizzata per gestire i progetti ed i processi di produzione in moltissimi settori industriali. La F.M.E.A. è una metodologia di analisi sistematica orientata ad evidenziare e correggere in fase preventiva sia le potenziali debolezze di progetto di un prodotto che possono generare guasti in utenza (F.M.E.A. di progetto), sia quelle di processo e quindi le cause che possono generare difetti sul prodotto durante la realizzazione dello stesso (F.M.E.A. di processo). La F.M.E.A. è un processo induttivo che, partendo dal quesito "Che cosa accade... se...?", procede dal basso verso l'alto, cioè dal malfunzionamento di una singola fase del processo/componente ai possibili effetti sull'intero sistema. L'analisi viene ripetuta per ogni tipologia di difetto di ogni singola fase/componente e per tutte le fasi del processo produttivo/per tutti i componenti del sistema. Si esamina quindi una tipologia di guasto alla volta e si osservano, sempre una alla volta, le possibili conseguenze. Si tratta quindi di una tecnica definita bottom-up. La F.M.E.A. non richiede un grande staff di progettazione o l'utilizzo di apparecchiature speciali e, per queste ragioni, può essere utilizzata anche nella piccola industria. La F.M.E.A. studia dal punto di vista dell'hardware le tipologie di difetto per ogni singola fase/componente, i possibili effetti risultanti e la presunta probabilità di accadimento. Essa inizia con l'elencare di ogni singola fase/componente e del suo possibile mancato raggiungimento delle prestazioni stabilite. Si determinano poi gli effetti finali di ogni difetto sul sistema e si identificano le situazioni pericolose. Dato che uno specifico componente può avere lo stesso comportamento e le stesse carenze in diverse applicazioni, ma il grado di difettosità o di criticità può essere diverso, è inoltre possibile che la combinazione di piccoli difetti di due o più componenti generi una situazione critica per prodotto o più in generale del sistema, quindi la F.M.E.A. di progetto risulta essere uno strumento efficace per determinare le correzioni da apportare a un singolo componente, ma non è altrettanto efficace per determinare gli effetti

combinati dei difetti di più componenti. Per colmare questa lacuna, spesso ci si serve della F.T.A., ma è anche possibile realizzare una seconda F.M.E.A. riferita all'intero sistema, come alcune delle grandi aziende automobilistiche hanno fatto, definendo una F.M.E.A. di progetto di 2^a generazione, regolarizzata dalle proprie norme tecniche aziendali. Il fine che giustifica l'impiego della F.M.E.A., di progetto o di processo che sia, è assicurare che a seguito di quest'analisi:

- Siano state considerate tutte le modalità di difetto e le loro conseguenze e che queste siano state, dove possibile, contenute o eliminate.
- Siano state prodotte informazioni; per l'analisi della manutenibilità e per l'analisi quantitativa dell'affidabilità, della disponibilità e della sicurezza del prodotto.
- Siano disponibili i dati per redigere manuali d'uso e di servizio.
- Siano disponibili i dati per l'analisi del rischio e della sicurezza, organizzati criticamente e per argomento.

In pratica, quindi, la F.M.E.A. si usa più come una fonte analitica delle possibili tipologie di guasto di un componente (F.M.E.A. di progetto), o delle modalità per cui non si realizza la caratteristica richiesta di un prodotto (F.M.E.A. di processo); consentendo un'analisi di affidabilità (metodologie RAMS) almeno per i componenti/fasi critici, come elemento fondamentale della sicurezza. Essa consente infatti di:

- prevedere il deterioramento degli apparati.
- evitare che un guasto ai componenti critici provochi conseguenze gravi o catastrofiche.

Nella figura 63 sono illustrati alcuni dei possibili schemi di organizzazione di questo lavoro.

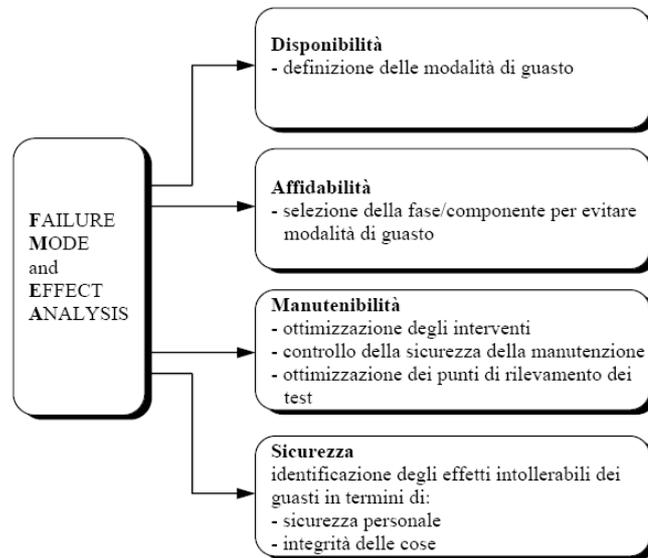


Figura 63 Schema della FMEA

La procedura da seguire per poter effettuare un esame dei modi di guasto, intesi come le modalità in cui le parti o il sistema si guastano come le fasi del processo produttivo non rispettano le caratteristiche richieste, e l'analisi dei loro effetti, cioè le situazioni che l'utilizzatore incontra come risultato di un guasto, è la seguente:

1. Identificare l'intero sistema
2. Individuare ogni fase del processo produttivo/componente del sistema.
3. Elencare ogni modo in cui ogni elemento identificato può fallire o causare effetti equivalenti.
4. Descrivere le situazioni o i modi in cui l'utilizzatore identifica le problematiche del prodotto.

5. Stabilire quali effetti possono avere i guasti sul prodotto, sulle cose circostanti (ambiente), o sulle persone in tutte le possibili applicazioni 6. Classificare ogni effetto per gravità di conseguenze.

7. Descrivere le misure di controllo previste, mirate a prevenire il difetto sul prodotto oppure mirate a rilevare il difetto se esistente.

8. Stimare (valutare) e classificare le probabilità di guasto.

9. Definire e classificare la possibilità di scoprirlo in anticipo (rilevabilità).

10. Registrare in una matrice la probabilità, la gravità e la rilevabilità.

11. Stabilire le necessità di avvertenza per quegli elementi che non sono correggibili attraverso una soluzione progettuale alternativa.

12. Registrare in una matrice: probabilità, gravità e rilevabilità dello stato migliorato dalle correzioni realizzate.

Se si attua la sequenza sopra descritta, si giunge alla necessità di presentare i risultati servendosi di una tabella definita matrice di rischio (si veda la figura 64), nella quale verranno riportati i seguenti dati:

1. Il componente o la fase elementare. Devono essere indicate ed analizzate singolarmente tutte le funzioni elementari appartenenti all'elemento o area esaminata.

2. Il tipo o modo di guasto. Deve essere indicata la potenziale anomalia.

3. La causa del guasto. Devono essere indicati, per ciascuna anomalia, tutte le possibili cause che la determinano e che provocano una riduzione o annullamento della funzione elementare esaminata.

4. L'effetto del guasto. Devono essere indicate tutte le anomalie percepite dal cliente dovute ad una riduzione o annullamento della funzione. Il cliente in questo contesto può essere l'operazione seguente, il Dealer, e/o l'utilizzatore finale. Ciascuno di essi deve essere considerato nello stabilire l'effetto potenziale di un difetto.

5. Misure di controllo previste. Devono essere indicate tutte le attività pianificate, su un piano di fabbricazione e controllo, nell'ambito della realizzazione della funzione elementare esaminata. Esempi di misure mirate alla prevenzione sono: Norme e procedure, Gestione statistica del processo, Attrezzature a prova di errore; mentre esempi di misure mirate a rilevare il difetto sono: Cicli di collaudo e Strumenti di collaudo.

6. La probabilità di accadimento (P).

7. La gravità delle conseguenze (G).

8. La possibilità di rilevare l'anomalia (rilevabilità:R).

9. L'indice o livello di priorità di rischio ($IPR = P \times G \times R$).

10. Provvedimenti migliorativi raccomandati. Per ridurre l'IPR è necessario agire su almeno uno dei tre indici P, G o R. L'indice di probabilità P si può ridurre migliorando i mezzi di prevenzione indicati nella colonna 6. L'indice di gravità G può essere ridotto solo con una modifica funzionale di progetto del prodotto. L'indice di rilevabilità R può essere ridotto migliorando le misure di controllo pianificate e mirate alla rilevabilità, anch'esse indicate nella colonna 6.

11. Responsabilità e Tempistiche di realizzazione. E' necessario indicare l'Ente ed il nome del responsabile dell'attuazione delle azioni correttive raccomandate, oltre che la tempistica dei provvedimenti migliorativi raccomandati.

12. Provvedimenti presi e tempistiche di realizzazione. Va descritta brevemente l'azione correttiva dopo la sua introduzione sulla documentazione tecnica (es. modificato disegno, automatizzato controllo dimensionale al 100%, ecc.), indicando gli opportuni riferimenti, (n. Disegno, ecc.), e l'effettiva data di introduzione.

13. Lo stato migliorato. Dopo che le azioni correttive sono state realizzate fisicamente rivalutare i difetti con nuovi (o confermati) indici di probabilità, gravità, rilevabilità, determinando così il nuovo IPR.

SISTEMA _____		COMPONENTE _____			ELEMENTO _____					AREA _____			
N°	FUNZIONE ELEMENTARE PARAMETRI DI FUNZIONE	MODO DI GUASTO	POSSIBILI CAUSE DELLA ANOMALIA	EFFETTI PERCEPITI DAL CLIENTE (riduzione/ annullamento della funzione)	G	STATO ATTUALE				AZIONI CORRETTIVE		STATO MIGLIORATO	
						CARATTERISTICHE A DISEGNO E PRESCRIZIONE DI PROGETTO IL CUI MANCATO RISPETTO CAUSA L'ANOMALIA	VERIFICHE SPERIMENTALI PREVISTE PER LA VALIDAZIONE DEL PROGETTO	P	R	IPR	INTERVENTI MIGLIORATIVI	RESPONSABILITA'	P
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12

Figura 64 La Matrice di rischio

In particolare, nello svolgere l'analisi, è importante focalizzare l'attenzione sui seguenti aspetti, che qui si approfondiscono, e valutarne l'entità.

- **Valutazione della frequenza di accadimento** (si veda la tabella 41). E' mirata all'individuazione del "livello di accadimento", cioè una stima soggettiva della probabilità che si verifichi un modo di guasto sul prodotto a fronte di ogni specifica causa che può generarlo. Tale valutazione può essere basata sulla conoscenza approfondita del sistema da parte dell'analista, usando una scala di

valutazione da 1 a 10, dove 1 indica una bassa probabilità di accadimento, mentre 10 indica pressoché la certezza dell'accadimento.

Probabilità di accadimento (P)	Possibili tassi di guasto	Cpk	Livello
<u>Molto alta</u>	$\geq 1/2$	<0.33	10
Il difetto è quasi inevitabile	$1/3$	≥ 0.33	9
<u>Alta</u> Generalmente associata a processi simili precedenti che hanno dato problemi	$1/8$	≥ 0.51	8
	$1/20$	≥ 0.67	7
<u>Moderata</u> Generalmente associata a processi simili precedenti che hanno dato problemi occasionali di non maggiori proporzioni	$1/80$	≥ 0.83	6
	$1/400$	≥ 1.00	5
	$1/2000$	≥ 1.17	4
<u>Bassa</u> Generalmente associata a processi precedenti che hanno avuto un basso numero di difetti	$1/15000$	≥ 1.33	3
	$1/150000$	≥ 1.50	2
<u>Remota</u> Non sarebbe ragionevole aspettarsi che l'evento si manifesti	$\leq 1/1500000$	≥ 1.67	1

Tabella 41-Valutazione della frequenza di accadimento

• **Valutazione della gravità delle conseguenze del guasto** (si veda la tabella 42). Per stimare quello che gli americani definiscono *severity of failure*, va determinato il “livello di gravità”, cioè una valutazione soggettiva delle conseguenze di una modalità di guasto per il cliente finale o interno. Qualora si ottengano valori diversi di gravità tra cliente finale e cliente interno è opportuno prendere il valore più grande tra i due. Anche per questa valutazione ci si può riferire a una scala da 1 a 10, dove 1 qui indica le conseguenze minori, mentre 10 indica le conseguenze più gravi.

Effetto	Gravità dell'effetto(G)	Livello
<u>Estremamente grave</u> in ottica funzionale	a: <u>sul cliente</u>) Il potenziale guasto attenta alla sicurezza dell'intero sistema (veicolo) e/o la conformità alla legislazione. b: <u>sul cliente interno</u>) Causa l'arresto del sistema produttivo o implica la sicurezza dell'operatore.	9 ÷ 10
<u>Grave</u> sia in ottica funzionale che estetica	a) Il potenziale difetto provocherà una notevole insoddisfazione del cliente e metterà la vettura o il sistema fuori uso oppure causerà il degrado delle prestazioni nel campo della regolamentazione di legge, pur non intaccando la sicurezza o la conformità alla legislazione. b) Causa seri problemi ai processi a valle, importanti rilevazioni e/o danni importanti alle macchine all'operatore	7 ÷ 8
<u>Significativo</u> in Ottica funzionale	a) Provocherà una moderata insoddisfazione del cliente. b) Causa rilavorazioni/riparazioni e/o danni poco importanti al processo produttivo	2 ÷ 6
<u>Significativo</u> in ottica estetica	a) Irragionevole aspettarsi che la natura del difetto causi qualsiasi effetto sulle prestazioni del sistema. Il cliente non sarà probabilmente in grado di notarlo. b) Non causa problemi alle operazioni a valle.	1

Tabella 42-Valutazione della gravità delle conseguenze di un guasto

• **Valutazione della rilevanza del guasto** (si veda la tabella 43). Si determina il livello di rilevazione. Esso è una stima soggettiva della probabilità che un potenziale guasto sia identificato e corretto prima che raggiunga l'utente finale, ed in particolare prima che il prodotto lasci la stazione di lavorazione o assemblaggio. Si userà ancora una scala da 1 a 10. Con 1 si indicherà che c'è una grande probabilità che il guasto possa essere individuato prima che si verificano conseguenze serie. Con 10 si indicherà una remota probabilità che il guasto possa essere individuato prima che le conseguenze si manifestino.

Rilevabilità (R)	Rilevazione attraverso le misure di controllo previste	Livello
<u>impossibile</u>	Impossibile che si possa rilevare l'anomalia; o non è prevista nessuna misura di controllo	10
<u>molto difficile</u>	I controlli probabilmente non rilevano l'anomalia	9
<u>difficile</u>	Possibilità rare che si possa rilevare l'anomalia	8
<u>molto bassa</u>	Possibilità scarse che si possa rilevare l'anomalia	7
<u>bassa</u>	Possibilità basse che si possa rilevare l'anomalia	6
<u>moderate</u>	I controlli possono rilevare l'esistenza di un'anomalia	5
<u>Piuttosto elevata</u>	Possibilità piuttosto elevate che si possa rilevare l'anomalia	4
<u>elevata</u>	Possibilità elevate che si possa rilevare l'anomalia	3
<u>molto elevata</u>	I controlli quasi certamente possono rilevare l'anomalia	2
<u>certa</u>	I controlli certamente rilevano l'anomalia	1

Tabella 43-Valutazione della rilevabilità del guasto

• **Calcolo dell'indice o numero di priorità del rischio (*Risk Priority Number*).**

Il calcolo, che è dato dal prodotto tra i livelli di accadimento, gravità e rilevabilità:

$$I.P.R. = (P) \times (G) \times (R)$$

va eseguito per ogni modalità di guasto ed esprime un indice (I.P.R) con il quale è possibile stabilire una scala di priorità in base alla quale intervenire con un programma di azioni correttive in sede progettuale, riducendo i valori più elevati. Inoltre l'abbattimento di un I.P.R. elevato è uno stimolo per il miglioramento continuo. L' I.P.R. può essere compreso tra 1 e 1000. I modi di guasto con indice di priorità del rischio più alto e con gravità elevata danno la priorità nell'intervento sulle cause che li originano. La soglia di intervento, definita dal team leader della F.M.E.A., può configurarsi, secondo quanto indicato dalla Norma FIAT TFO 00271 ed.2 del Mar-94, nella corrispondenza sotto riporta (si veda la tabella 44):

Livello Gravità	Livello IPR
9/10	≥ 40
7/8	≥ 100
4/5/6	≥ 120
1/2/3	≥ 150

Tabella 44-Corrispondenza livello di gravità e livello IPR

3.2.2 LA FMECA

E' un estensione naturale della metodologia F.M.E.A., consente di avere una stima corretta della criticità di un progetto. La metodologia F.M.E.C.A. ha però il difetto di essere piuttosto complessa e di richiedere dati affidabilistici per tutti i componenti o gruppi utilizzati nel progetto, dati che, in ambito meccanico sono raramente disponibili. Per questa ragione l'uso della F.M.E.C.A. è esteso nelle grandi aziende che producono in serie (e che quindi possono dedicare risorse consistenti alla raccolta dati) mentre risulta, ad oggi, poco diffuso nelle piccole e medie aziende [67]. La F.M.E.C.A. si avvale frequentemente di scale di probabilità e gravità entrambe a sei valori (si veda la tabella 45). Il rischio viene quindi descritto da un numero a due cifre, dove la prima cifra è il livello di probabilità di accadimento mentre la seconda cifra è quello di gravità, o viceversa (si veda la figura 65). Infatti l'ordine con cui si indicano probabilità e gravità dipende dal settore industriale.

Gravità	Probabilità di accadimento	Livello
Conseguenze nulle	estremamente raro	1
Conseguenze significative	molto raro	2
Conseguenze medie	raro	3
Conseguenze importanti	possibile	4
Conseguenze critiche	frequente	5
Conseguenze catastrofiche	molto frequente	6

Tabella 45-Scale di probabilità e gravità a sei valori

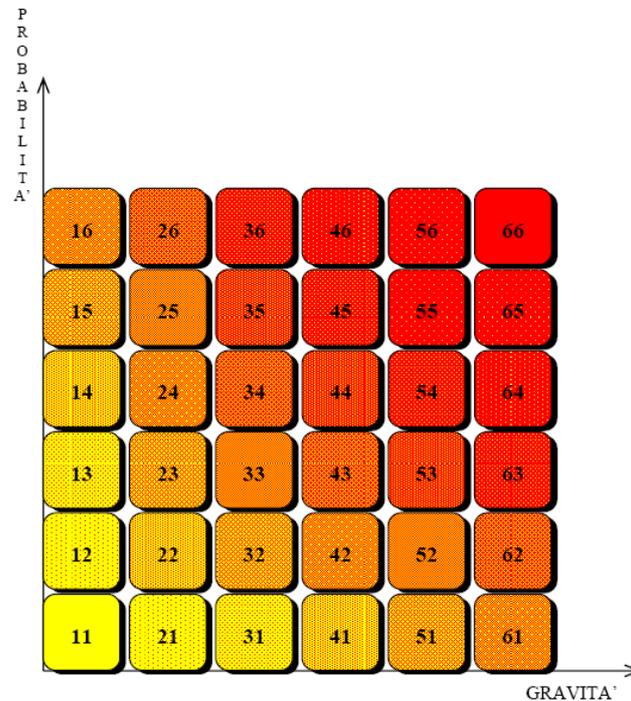


Figura 65 - Scala di valutazione della probabilità e della gravità nella F.M.E.C.A.

3.2.3 LA F.T.A.

La F.T.A. (*Fault Tree Analysis*) è un metodo di identificazione e quantificazione delle relazioni causa-effetto negli elementi del prodotto o del sistema. Essa è largamente utilizzata in tutti i settori dove gli incidenti negli innovativi e complessi sistemi di ingegneria possono recare danni alla popolazione o all'ambiente. Divenuta ormai una metodologia consolidata nell'industria aerospaziale, nucleare e chimica, la F.T.A. sta diventando di interesse anche per molte industrie convenzionali, quali l'industria manifatturiera, *remote controlling*, *distribution networks*, ed altre, sia per l'analisi dei prodotti che per quella dei loro processi di produzione. Oggi

L'interesse ad applicare questa tecnica in questi settori è incrementato dalla disponibilità di software applicativi, che facilitando la realizzazione dell'albero di guasto e la sua analisi, consentono l'utilizzo della F.T.A. non solo nella fase di post-produzione per la certificazione della qualità, ma anche come strumento di sviluppo nella fase di progettazione dei prodotti e dei loro processi di produzione. La F.T.A. è un processo deduttivo che procede dall'alto verso il basso (top-down), cioè partendo dall'esperienza ipotizzata dell'utilizzatore del prodotto, che consentono di ben definire un evento indesiderato (*top event* o evento critico), e procedendo a ritroso, attraverso il sistema, per identificare tutte le possibili cause che l'hanno generato. L'attenzione è focalizzata sul prodotto o sistema nel suo insieme. Bisogna analizzare il modo in cui possono verificarsi i difetti del sistema e quale evento, o combinazione di eventi, possa causare questi difetti, malfunzionamenti e situazioni rischiose. In questa tecnica il funzionamento o il malfunzionamento dei componenti e le relazioni con eventi esterni che possono causare difetti nel sistema vengono sistematicamente individuati e schematizzati utilizzando simboli che ne definiscono le relazioni. Dal momento che in un albero logico o sequenza logica due condizioni possono determinare un evento successivo indipendentemente o congiuntamente, si è ricorso a simboli che rappresentano perfettamente queste condizioni. Essi sono veri e propri operatori logici che vengono denominati passaggi o ingressi (*gate*). La rappresentazione grafica dell'analisi ricorre a simboli riportati in tabella 46.

Simbolo	Funzione logica
Porta AND 	L'evento in uscita accade solo quando sono presenti congiuntamente tutti gli eventi in entrata
Porta OR 	L'evento in uscita accade quando è presente uno o più degli eventi in entrata
Porta AND di priorità 	L'evento in uscita accade solo quando gli eventi in entrata si verificano in un ordine prestabilito
Porta OR esclusivo 	L'evento in uscita accade quando è presente uno e uno solo degli eventi in entrata
Porta Inhibit 	L'evento in uscita accade solo quando oltre alla presenza dell'evento in entrata, è presente anche l'evento (e) condizionante
Simboli di tipo indicativo	
	Indica un evento, solitamente un guasto, che risulta dalla combinazione di più guasti primari
	Indica una causa elementare (o prima) della quale si conosce la probabilità di accadimento basata su risultati di test o su analisi di guasti reali
	Indica un guasto le cui cause non sono state indagate. Per mancanza di tempo, di informazioni, o per scarsa importanza
	Indica il rimando ad un altro albero di guasto (o altra parte dell'albero)
	Indica la ripresa da un altro albero di guasto (o altra parte dell'albero)

Tabella 46-I simboli della F.T.A.

La F.T.A. permette un approccio oggettivo e sistematico per:

- Analizzare la progettazione del sistema.
- Effettuare studi sulle possibili situazioni.

- Analizzare le cause comuni di difettosità.
- Dimostrare la coerenza del progetto con gli standard di sicurezza.
- Giustificare alterazioni e modifiche del sistema.

Una F.T.A. si può sviluppare dopo il completamento di una F.M.E.A., in quanto la F.T.A. può essere utilizzata per indicare i miglioramenti necessari per individuare effetti combinati, a differenza della F.M.E.A., che come si è visto è uno strumento efficace per determinare le correzioni da apportare al singolo componente. Per contro uno dei limiti delle analisi per alberi logici è costituito dalla non evidenziazione degli effetti dipendenti dal tempo, che per alcuni prodotti giocano un ruolo importante. Altro inconveniente presente nella logica del sistema è dovuto al fatto che alcune situazioni possibili, quali il funzionamento a capacità ridotta di un componente o le carenze relative al comportamento umano, non vengono previste. Inoltre l'uso manuale di questa tecnica, salvo i casi di sistemi semplici, è molto dispendiosa in termini di tempo e quindi richiede necessariamente l'ausilio di software applicativi per la costruzione, la gestione, il disegno e l'analisi dell'albero di guasto. Le fasi principali della F.T.A. sono:

1. Selezione del top event o l'evento critico che si vuole prevenire.
2. Definizione delle frontiere esterne ed interne del sistema
3. Costruzione dell'albero di guasto (fault tree).
4. Analisi dell'albero di guasto.
5. Sintesi dei risultati.

L'ultima fase consiste nel confrontare la probabilità di accadimento del top event con una prestabilita soglia. Se il risultato è accettabile l'analisi è da ritenersi terminata, altrimenti si riesamina il sistema col fine di individuare i

punti deboli del sistema stesso, quindi si aggiorna l'albero di guasto livello in funzione delle modifiche apportate al sistema, per poi essere ri-analizzato. Il top event deve essere definito in maniera chiara e non ambigua, così come pure le frontiere esterne ed interne del sistema. Le prime stabiliscono i limiti del sistema nel senso che consentono di distinguere i componenti che appartengono al sistema da quelli che non vi appartengono. Mentre le seconde consentono di stabilire i limiti di scomposizione del sistema nella costruzione dell'albero di guasto. Generalmente il limite (foglie dell'albero), è rappresentato dai modi di guasto dei componenti o sottosistemi per i quali le probabilità di guasto sono disponibili. Questi eventi sono chiamati "*basic events*" o "*primary events*". La costruzione dell'albero di guasto inizia con la descrizione delle cause dirette del top event, per poi scendere ad un livello più basso, evidenziando i legami logici tra le cause e i relativi effetti attraverso gli operatori logici, fino alla suddetta soglia di scomposizione del sistema. I livelli più elevati tendono a rappresentare gli effetti funzionali, mentre i livelli più bassi si riferiscono a carenze di materiali o a malfunzionamento dei componenti che sono i costituenti standard di cui è formato il prodotto. Le parti mediane riflettono le caratteristiche del progetto e possono, se necessario, essere cambiate. Le figure 65 e 66 illustrano un esempio di albero di guasto di un semplice sistema. Realizzato l'albero di guasto si passa alla fase successiva in cui la rappresentazione grafica dell'albero dei guasti viene facilmente tradotta in un'espressione booleana, attraverso l'associazione di una variabile binaria ad ogni evento primario. I due valori della generica variabile sono "vero" o "falso" con riferimento all'evento descritto, cioè quando un evento accade la sua variabile assume valore "vero" altrimenti è "falso". Ad un certo istante t alcune variabili assumeranno valore "vero" altre "falso", di conseguenza il top event potrà essere "vero" o "falso" a seconda della struttura logica. Cioè siano E_1, E_2, \dots, E_n , gli eventi primari di un albero di guasto. Si associ ad ogni evento E_i un indicatore di variabile binaria y_i tale che:

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{"vero"} & \text{se si verifica } E_i \\ 0 & \text{"falso"} & \text{se non si verifica l}'E_i \end{cases}$$

Il vettore $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ indica quali eventi primari si verifica e quale no. Si chiama funziona struttura dell'albero di guasto la funzione $\Phi(Y)$ del vettore Y che assume i seguenti valori:

$$\Phi(Y) = \begin{cases} 1 & \text{"vero"} & \text{se si verifica E.C.} \\ 0 & \text{"falso"} & \text{se non si verifica l'E.C.} \end{cases}$$

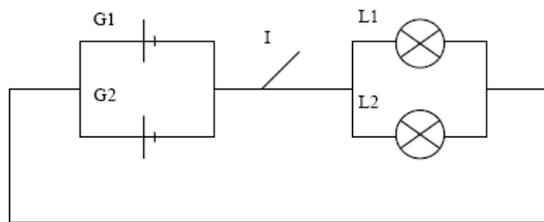


Figura 66 - Semplice sistema elettrico

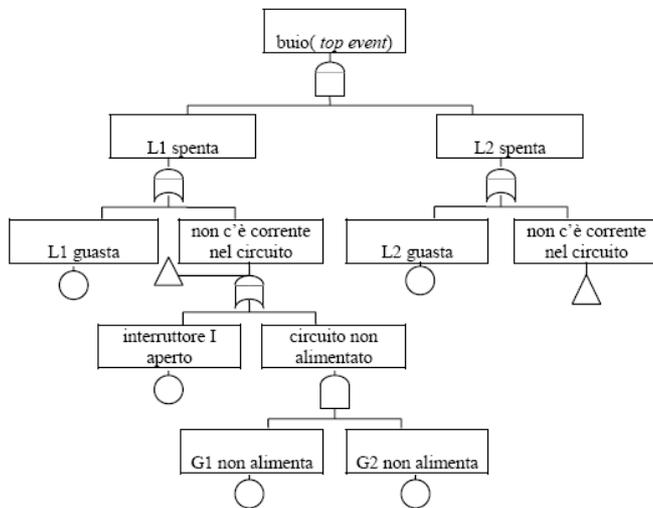


Figura 67 - Albero di guasto per il sistema di figura 66

L'analisi di un albero di guasto può essere suddivisa in due importanti fasi:

1. analisi qualitativa

2. analisi quantitativa

L'analisi qualitativa ha come obiettivo l'individuazione dei MCS (Minimal Cut Set), cioè le cause e le loro possibili combinazioni che causano l'evento critico/top event. Infatti si definisce:

- Cut Set l'insieme di componenti del sistema che guastandosi generano il guasto (top event) del sistema di appartenenza;
- Minimal Cut Set è l'insieme di componenti che se sono congiuntamente guasti generano il guasto sicuro del sistema;

quindi l'insieme di tutti i *Minimal Cut Sets* costituisce la totalità dei modi di guasto del sistema.

L'analisi quantitativa serve per determinare le quantità interessanti a livello di componenti.

I tipi di componenti che possono essere modellati sono i seguenti:

- Non riparabili durante il funzionamento.
- Riparabili, con guasto immediatamente rilevato da un allarme.
- Riparabili, con guasto rilevato solo attraverso test o ispezioni.

I parametri che interessa determinare nell'analisi dipendono dal tipo di evento (catastrofico o non catastrofico), e dal tipo di componente (riparabile o non riparabile).

Le quantità probabilistiche che possono essere stimate sono:

- Affidabilità $(R(t))$, intesa come la probabilità che il sistema svolga la prevista funzione dall'istante 0 all'istante t .

- Disponibilità ($A(t)$), intesa come la probabilità che il sistema stia svolgendo la prevista funzione (top event) all'istante t .

Numero di guasti attesi ($W(t)$), definito come il numero medio di volte che il top event si verifica all'interno di un intervallo di tempo di funzionamento [68].

3.2.4 ALCUNI METODI PER LA RISOLUZIONE DEL FAULT TREE

Di seguito si riportano tre diversi metodi per risolvere l'albero di guasto, cioè determinare la probabilità di accadimento del top event o evento critico:

Trasformare l'albero in una espressione matematica logica applicando la legge delle probabilità totali all'uscita di una porta OR:

$$P(E)_{AND} = \sum_{i=1}^n P(E_i)$$

Se gli ingressi della porta OR non sono mutuamente escludentesi, la relazione precedente deve tenere conto delle probabilità di verificarsi congiunto dei vari ingressi. Ad esempio se gli ingressi sono due, si ha:

$$P(E)_{OR} = P(E_1) + P(E_2) - P(E_1)P(E_2)$$

La legge delle probabilità composte all'uscita di una porta AND:

$$P(E)_{AND} = \prod_{i=1}^n P(E_i)$$

all'espressione così ottenuta si applicano poi le regole dell'algebra booleana (si veda la tabella 47).

b) Barlow et al. - Statistical theory of reliability and life testing N.Y. 1975 - hanno proposto il seguente algoritmo: Costruito l'albero si scrive una matrice nel modo seguente: - gli ingressi alle porte OR costituiscono gli elementi della matrice di differenti righe - gli ingressi alle porte AND costituiscono gli elementi di differenti colonne.

Ogni riga della matrice rappresenta un Cut Set, l'intera matrice quindi fornisce i MCS e si ha:

$$P(EC) = \sum_{i=1} (MCS)_i$$

c) L'albero di guasto può essere rappresentato matematicamente dalla sua funzione struttura $\Phi(Y)$.

Se l'operatore logico è una porta AND, la funzione struttura è:

$$\Phi(Y)_{AND} = \prod_{i=1} y_i$$

se l'operatore è una porta OR, la funzione struttura è:

$$\Phi(Y)_{OR} = \prod_{i=1} (1 - y_i)$$

Proprietà dell'algebra di Boole	
idempotenza	$a+a = a \cdot a = a$
commutatività	$a \cdot b = b \cdot a; \quad a+b = b+a$
associatività	$a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c; \quad a+(b+c) = (a+b)+c$
assorbimento	$a+(a \cdot b) = a; \quad a \cdot (a+b) = a$
distributività	$a \cdot (b+c) = (a \cdot b)+(a \cdot c); \quad a+(b \cdot c) = (a+b) \cdot (a+c)$
a' = negazione di a	
1 = vero	
0 = falso	
$0 + 0 = 0$	
$0 + 1 = 1 + 0 = 1$	
$1 + 1 = 1$	
$0 \cdot 0 = 0$	
$0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0$	
$1 \cdot 1 = 1$	

Tabella 47-Regole dell'algebra booleana

3.2.5 La Worst Case Analysis (W.C.A.)

Il concetto Worst Case Analysis (W.C.A.), viene richiamato da Raheja (1991) per definire quali siano le condizioni di funzionamento limite alle quali un componente di un sistema può essere utilizzato senza che ciò comporti guasti o malfunzionamenti del sistema stesso. Il concetto base è che, se risulta verificato un funzionamento accettabile per componenti con tolleranze che si collocano ai due estremi della distribuzione di dispersione produttiva, è da considerarsi dimostrato il corretto funzionamento di tutti i componenti prodotti all'interno delle condizioni estreme verificate. Viene quindi considerata la dispersione del processo produttivo al fine di valutare la distribuzione statistica dell'affidabilità con un livello di fiducia accettabile e un numero di prove compatibile con le esigenze industriali di tempo e costo. In altre parole, la W.C.A. mira ad identificare le condizioni peggiori nelle quali il processo produttivo può realizzare il prodotto. Se un prodotto testato in queste condizioni fornisce, in modo accettabile, tutte le funzioni richieste, si potrà affermare che la probabilità di non funzionamento è pari a quella (molto piccola) di produrre un componente uguale o peggiore di quello. Tale analisi permetterà di ridurre il numero di prove e di aumentare il livello di fiducia con cui viene valutata l'affidabilità del sistema. I due concetti impliciti in questo tipo di approccio sono:

- gli obiettivi di affidabilità vengono espressi dall'inaffidabilità non più valutata globalmente per esempio in termini di inconvenienti $/ (100 \text{ complessivi})$, ma analiticamente come probabilità di non soddisfacimento delle funzioni attese dal cliente;
- l'intervallo di valori ammissibili per ogni parametro di progetto è calcolato ipotizzando tutti gli altri parametri nelle condizioni più sfavorevoli ragionevolmente prevedibili sulla base della realtà produttiva: l'obiettivo è garantire il funzionamento anche in presenza di più parametri ai limiti di tolleranza (riprendendo il concetto della robustezza introdotto da Taguchi e descritto da Pradke.

Un limite applicativo di tale analisi è costituito dalla necessità di avere a disposizione un modello matematico del sistema in esame. Sono tutt'oggi in corso ulteriori applicazioni per valutare le reali possibilità di costruire dei modelli, ancorché semplificati, con prove sperimentali mirate.

L'approccio metodologico messo a punto prevede le seguenti fasi principali:

1. Individuazione delle funzioni (prestazioni) in ottica cliente che il sistema dovrà soddisfare e individuazione degli effetti di guasto, sempre in ottica cliente, che il mancato soddisfacimento di ciascuna funzione può provocare.

2. Individuazione delle correlazioni fra le predette funzioni, i parametri di progetto ed i fattori di disturbo.

3. Stima delle dispersioni industriali di ciascun parametro di progetto.

4. Valutazione, mediante il modello matematico di simulazione disponibile, dell'intervallo dei valori soglia di "worst case" (superiore e inferiore) consentito a ciascun parametro di progetto, senza che venga meno nessuna delle funzioni identificate.

5. Costruzione dell'albero di guasto, analogo a quelli della Fault Tree Analysis (F.T.A.), per ciascuno degli effetti di guasto individuati (top event).

6. Semplificazione degli alberi di guasto, in base al rapporto fra intervallo di "worst case" e dispersione del processo produttivo (separatamente a destra e a sinistra della distribuzione statistica per tenere conto di eventuali asimmetrie), tenendo anche conto, sia pure in prima approssimazione, di eventuali interazioni fra i parametri di progetto.

La prima fase consiste nel realizzare un'analisi funzionale del sistema. Questo viene scomposto in più sottosistemi per ognuno dei quali si individuano i "fattori di controllo", cioè i parametri progettuali che intervengono nelle

prestazioni del sistema, ed i “fattori di disturbo” dovuti a influenze esterne e quindi non controllabili. Inoltre è necessario stabilire il parametro di verifica delle capacità della soluzione costruttiva adottata di soddisfare le esigenze progettuali, l’andamento di tale parametro in funzione dei fattori di controllo può essere ottenuto attraverso dei codici di simulazione. L’individuazione delle correlazioni prevede in primo luogo la realizzazione di una F.M.E.A. con la costruzione della relativa matrice di correlazione e di rischio, quest’ultima evidenzia quali siano i limiti di accettabilità delle prestazioni, in ottica cliente, e quale sia l’importanza dell’impatto di ciascun fattore sulle varie funzioni. Definite queste due matrici viene costruita la matrice che mette in relazione le funzioni ed i fattori del componente in oggetto [69]. Tale matrice riporta (tabella 48):

- l’elenco delle funzioni in ottica cliente;
- i top event legati alle singole funzioni elementari individuate;
- i parametri di funzione: le grandezze tramite le quali essa viene espressa;
- i loro campi di prestazione, ossia i valori numerici entro i quali devono rimanere i parametri di funzione affinché la funzione stessa, in base all’esperienza progettuale, sia svolta in modo accettabile;
- i fattori ovvero le grandezze con influenza sulle singole funzioni elementari individuate; oltre ai fattori di controllo, la matrice comprende anche i fattori di disturbo, dovuti a influenze esterne non controllabili (perché impossibile o economicamente non conveniente);
- il legame tra i parametri di funzione , con i fattori stessi.

		COMPONENTE	SISTEMA												
		ELEMENTI	Fattori di controllo						Fattori di disturbo				Inconvenienti		
FUNZIONE ELEMENTARE	FATTORI														
	PARAMETRI DI FUNZIONE														Top event in ottica cliente
		TOTALE CORRELAZIONI													

Tabella 48-Matrice FUNZIONI-FATTORI

La stima della dispersione consiste nella compilazione della “tabella delle dispersioni industriali”(tabella 49) dei fattori, che riporta, per ogni fattore la stima del valore nominale e dello scarto quadratico medio. I valori nominali vengono stimati tramite codici di simulazione o sperimentazioni mirate. La quarta fase, è quella che prevede la compilazione della “tabella dei valori soglia assoluti di *worst case*” (tabella 50), dove vengono riportati, per ogni fattore, i valori limite oltre i quali il sistema perde una o più funzionalità. I valori soglia vengono determinati mediante codici di simulazione (eventualmente costruiti con prove sperimentali) a partire dai valori nominali previsti nella soluzione progettuale iniziale. Come accennato in precedenza, la valutazione della perdita di funzionalità viene eseguita facendo riferimento al parametro scelto come. Ogni qualvolta un fattore caratterizzante non rispetta i valori imposti dal curva obiettivo si verifica una condizione di crisi del sistema: il valore del fattore corrispondente viene assunto come valore di *worst case*. Dall’analisi dei valori di soglia assoluti di *worst case* emerge che i limiti di *worst case* inferiore e superiore possono essere non simmetrici.

FATTORI		Unità di misura	Stima del valore nominale	Valore stimato di σ	Tipologia della fonte A, B, C, D	Osservazioni
Dedotti						
A						
Calcolo						

Tabella 49-Tabella delle dispersioni industriali

A = calcolo; B = normativa; C = esperienza progettista; D = sperimentazione

FATTORI		Unità di misura	Stima del valore nominale	Valore di soglia worst case	Osservazioni

Tabella 50-Valori di soglia assoluti di worst case a partire dai valori nominali

La costruzione dell'albero di guasto si rende necessaria per poter realizzare un'analisi delle cause che possono condurre al verificarsi di un assegnato evento indesiderato. La struttura dell'albero è tale da individuare in maniera univoca tutte le interazioni tra i fattori. La simbologia utilizzata nella rappresentazione dell'albero differisce leggermente dalla rappresentazione classica della F.T.A., tali differenze sono riportate nella tabella 51.

Simboli di tipo indicativo	
	Indica un fattore, che risulta dalla combinazione logica di più fattori primari
	Indica un fattore (o causa elementare) che non dipende da nessun altro: <i>fattore di controllo</i> .
	Indica un fattore (o causa elementare) che non dipende da nessun altro: <i>fattore di disturbo</i> .
linea leggera di connessione tra fattori 	Connette un ramo di albero eliminato dalla prima semplificazione
linea pesante di connessione tra fattori 	Connette un ramo di albero non eliminato dalla semplificazione
Linea tratteggiata di connessione tra fattori 	Unisce fattori di cui si conosce l'effetto complessivo sul fattore precedente, ma non quello singolo (viene considerato pertanto un fattore unico)

Tabella 51-I simboli del Worst Case e Analysis

L'ultima fase prevede due semplificazioni successive dell'albero di guasto. Per la prima semplificazione, che non tiene conto delle interazioni tra i parametri di progetto, viene calcolato per ogni fattore "l'indice di criticità assoluto" definito nel seguente modo:

$$I_{CRass} = \frac{\Delta WC}{6\sigma}$$

dove :

- il numeratore (ΔWC) è l'ampiezza dell'intervallo definito dai valori di soglia assoluti di worst case, calcolati utilizzando il modello matematico disponibile e definiti come limiti di ciascun fattore (con gli altri posizionati sul valore nominale) oltre i quali il sistema perde una qualsiasi (o più di una) fra le sue funzionalità;

- il denominatore (6σ) è la dispersione del fattore in oggetto assunta pari proprio a 6 della sua distribuzione industriale.

Calcolato tale indice per ciascun fattore, viene assegnato in prima approssimazione un ordine di grandezza al valore limite per gli indici di criticità corrispondente ad una data probabilità di guasto (I_{CRass}^{limite}). Tale valore della probabilità di guasto è estremamente cautelativo e garantisce che il fattore corrispondente non partecipa in alcun modo al verificarsi del top event [70].

Vengono quindi eliminati dagli alberi tutti i rami corrispondenti a fattori con indice di criticità assoluto non inferiore a quello limite, cioè per essi deve essere verificata la seguente condizione:

$$I_{CRass} \geq I_{CRass}^{limite}$$

Viene quindi eseguita una seconda semplificazione che tiene conto anche delle interazioni fra i fattori di controllo del medesimo ramo che non sono stati eliminati con la prima semplificazione. Per questo viene definito, per ciascun

fattore, anche un “indice di criticità specifico” ancora come il rapporto tra l’ampiezza dell’intervallo definito dai valori di soglia di worst case e 6σ :

$$I_{CRspec} = \frac{\Delta WC}{6\sigma}$$

ma in questo caso i valori di soglia di worst case vengono calcolati per ogni albero (dopo la prima semplificazione) e per ogni fattore, posizionando gli altri fattori nelle due seguenti condizioni più sfavorevoli (anziché al valore nominale come per gli indici di criticità assoluti):

- estremo a $\pm 3\sigma$ della distribuzione delle dispersioni industriali;
- valore di soglia assoluto di worst case diminuito di un decimo della sua distanza dal centro dell’intervallo.

Il valore limite dell’indice di criticità specifico (I_{CRass}^{limite}) viene definito mediante un criterio in uso comune nella valutazione dell’obiettivo di affidabilità di un sistema meccanico. La semplificazione, dunque, viene fatta eliminando i rami degli alberi per i quali l’indice di criticità specifico risulta superiore o uguale a quello limite, cioè:

$$I_{CRspec} \geq I_{CRspec}^{limite}$$

I risultati attesi sono i seguenti:

- ottimizzazione dei valori di ciascun parametro di progetto centrandoli negli intervalli di soglia di worst case; il progetto diviene così robusto secondo il concetto di Taguchi;
- individuazione delle combinazioni indipendenti di condizioni più sfavorevoli, provate le quali, il sistema può considerarsi testato;

- Pareto della probabilità di accadimento del top event di ciascun albero di guasto che in alcuni casi può condurre ad una stima della probabilità di accadimento in clientela;
- valutazione statistica (con intervallo di fiducia) di affidabilità a calcolo o sperimentale.

Complessivamente quindi si prevedono consistenti vantaggi in termini di tempo, sia in progettazione che in sperimentazione. I tempi, e quindi i costi, sono ridotti anche per la diminuzione dei provvedimenti correttivi, ottenuta grazie alla miglior focalizzazione ed al maggior approfondimento a monte dei problemi dovuto all'impiego della W.C.A.

3.2.6 LA TECNICA DELPHI

Una via alternativa alle tecniche descritte in precedenza si basa sul principio del “giudizio collettivo”, in altri termini, dove il giudizio di un solo tecnico può fallire, meno probabilmente fallirà la sintesi dei giudizi espressi da un gruppo di specialisti. Questa procedura di analisi prende il nome dall'Oracolo di Delfi ed è la cosiddetta “Delphi technique”. Essa è una tecnica per arrivare al consenso tramite la generazione e la filtrazione di idee anonime, senza l'ausilio di un'interazione o di una discussione di gruppo (si è definita questa tecnica anche come un “brainstorming tra assenti”). Sviluppata all'inizio degli anni '50 dalla Rand Corporation (in particolare da Norman Dalkey) come mezzo per fare previsioni, inizialmente applicata dalle strutture militari degli Stati Uniti, a causa delle informazioni riservate che trattava fu tenuta segreta per tutti gli anni '60. Dopo la sua pubblicazione fu impiegata dapprima in settori commerciali e poi in tutti i settori nei quali un processo valutativo doveva essere condotto sulla base di dati e contesti non noti. La procedura di analisi si articola nelle seguenti fasi:

1. Quando un gruppo con responsabilità decisionale ha un problema da risolvere, sia di politica aziendale sia di tipo particolare, sceglie, prima di tutto, un gruppo di esperti con il compito di studiare il problema e trovare la soluzione adatta.

2. Gli esperti vengono intervistati mediante l'invio di un questionario, preparato da un apposito staff.

3. Gli esperti rispondono a tutte le domande e restituiscono i questionari allo staff che li ha preparati.

4. Lo staff fa una sintesi di tutte le risposte e sviluppa un secondo questionario da spedire agli esperti, con l'invito a rivalutare le loro idee alla luce delle nuove opinioni degli altri colleghi.

5. Si procede in questo processo iterativo finché il giudizio del gruppo converge o diverge decisamente.

6. Lo staff elabora una sintesi definitiva e prepara un rapporto che viene spedito sia agli esperti sia al gruppo decisionale.

Le condizioni che favoriscono la massima efficienza di questa tecnica sono le seguenti:

- quando i partecipanti non possono riunirsi per ragioni geografiche o per ragioni di impegni di lavoro;

- trattandosi di esperti abituati a lavorare autonomamente, il sistema funziona meglio quando i partecipanti non sono costretti a lavorare interattivamente in gruppo;

- essendo gli esperti coinvolti in un esercizio che, in effetti, è un dibattito anonimo, con uno scambio reciproco di opinioni in qualità di individui neutrali e distaccati si evitano certi problemi, come quello di sentirsi costretti a lottare per giustificare o difendere le proprie idee, o di rischiare di essere messi in minoranza da altri (più quotati professionalmente o più dotati di abilità dialettica) e, infine di trovarsi moralmente costretti a consentire con l'opinione del gruppo;

- dal momento che non vi sono spese di viaggio, soggiorno, ecc., può partecipare al lavoro un gran numero di esperti;

- i partecipanti sono fortemente motivati, altrimenti non sono molto disposti a dedicare tutto il tempo necessario per compilare i questionari.

I vantaggi della tecnica Delphi sono:

- generare idee in una condizione di isolamento produce idee di alta qualità;
- ciascun esperto è costretto a seguire dettagliatamente ogni fase di un problema complesso e a riflettere bene, passo per passo;

- il comportamento di ogni partecipante è attivo e propositivo, proprio perché non può reagire alle idee degli altri;

- siccome tutte le idee che arrivano allo staff centrale vengono riunite per formare un gruppo omogeneo, nessun partecipante riceve un trattamento preferenziale;

- al termine del processo, si rimane con la soddisfazione di avere raggiunto un certo scopo.

Esistono molte versioni di questa tecnica, formulate per adattarla in modo specifico a contesti diversi. Un metodo semplificato è impiegato per valutare i rischi connessi con le avarie di un prodotto. In questo senso il metodo è utilizzabile da un'azienda per evidenziare i rischi in cui può incorrere, per effetto di una produzione di cui non è ancora disponibile una sufficiente documentazione sui guasti. E' bene osservare che, qualora i dati fossero disponibili in modo soddisfacente, questa metodologia non sarebbe adatta e andrebbe sostituita con un metodo numerico, certamente migliore. Nello sviluppo di quest'analisi, può essere formulata una graduatoria dei rischi secondo due vie:

- Se gli esperti sono in grado di formulare, sulla base di esperienza ed intuito, frequenza di accadimento (P) e magnitudo o gravità (G) di ogni guasto, il rischio (R), calcolato come prodotto $R = P \cdot G$ rappresenta di per sé un parametro valutativo.

- Se ciò non è possibile, gli esperti sono chiamati a esprimere direttamente un parametro guida per ogni situazione considerata.

Qualora i diversi giudizi formulati dagli esperti non convergessero, non si sarebbe di fronte al fallimento della tecnica, ma a una situazione non ben identificata e pertanto potenzialmente molto grave. In questo caso occorre riformulare i questionari affrontando in modo più approfondito, o da altra angolazione, l'intera analisi. Anche se il metodo Delphi può essere soggetto ad applicazioni molto sofisticate è da prendere in esame solo quando non siano disponibili dati di guasto attendibili. Sono poi comunque necessarie molte cautele, poiché non produce un risultato scientificamente ottimizzato, essendo uno strumento di tipo sostanzialmente empirico.

3.2.7 LA CHANGE ANALYSIS

Nella ricerca delle cause, come attività investigativa, è intuitivo ricercare le differenze che hanno portato all'origine dell'evento indesiderato, quando sono disponibili quale termine di raffronto tutte le altre situazioni che non hanno dato inconvenienti. Potrà essere una relazione del subconscio, ma si intuisce che qualcosa è cambiato per rendere possibile l'evento indesiderato. Si deve allora guardare a che cosa è variato, perché una variazione deve essere sicuramente presente. Lo studio dell'influenza delle variazioni nella causa di eventi indesiderati è stato sviluppato prima della Seconda Guerra Mondiale. Il concetto di Change Based Analysis o semplicemente Change Analysis, venne messo originariamente a punto in un programma aeronautico (U.S. Air Force) per scopi investigativi, dalla Rand Corporation. Successivamente altre industrie adottarono la Change Analysis come base delle loro indagini scoprendo che essa era applicabile a problemi di management, portando ad ampliamenti della Change Analysis in un altro strumento tecnico definito M.O.R.T. (Management

Oversight and Risk tree), presentato nel paragrafo successivo. La necessità di cambiamenti è spesso un fatto di sopravvivenza. Il successo dell'azienda è spesso basato sulla precoce percezione di cambiamenti, cioè sulla previsione di problemi futuri. Sebbene il cambiamento sia inteso qui come fatto singolo, nella realtà molti cambiamenti, spesso minori e di poco conto, concorrono al verificarsi di un evento indesiderato. Essi hanno la tendenza a moltiplicarsi, ponendosi in relazione l'uno con l'altro e sfuggendo velocemente di mano quando si verificano le prime variazioni. L'impatto del cambiamento su un sistema può essere meglio apprezzato se visto sia come effetto "direzionale" sia come effetto "esponenziale". Il primo significa che il cambiamento si mantiene nel tempo, il secondo che interagendo diversi cambiamenti nella formazione degli effetti di un evento, l'evoluzione ha un andamento, appunto, esponenziale. Il fatto che un cambiamento dia luogo ad un nuovo stato di cose aumenti esponenzialmente, non significa che esso sia ovvio o quanto meno del tutto evidente; infatti i cambiamenti che causano eventi indesiderati tendono a essere occulti, sottili, oscuri, a lenta azione, difficili da determinare e talmente gradualmente da non allarmare nessuno; a un certo punto, poi, un secondo cambiamento si sovrappone al primo e si innesca una catena veloce che in breve causa l'evento. I cambiamenti prendono forme talmente diverse che l'analista può avere problemi a organizzarli logicamente. Essi possono essere classificati per origine in:

- Cambiamenti programmati e non programmati: gli uni sono causati da decisioni, gli altri vengono evidenziati solamente nell'indagine.
- Cambiamenti reali e potenziali: gli uni sono scoperti ed evidenziati nelle relazioni e nelle osservazioni, mentre gli altri richiedono un'analisi per determinare se sono realmente accaduti.
- Cambiamenti nel tempo: si identificano generalmente con il deterioramento, che può essere graduale, spesso unito ad altri cambiamenti.
- Cambiamenti tecnologici: sono considerati ogni volta che si siano iniziati progetti e processi, particolarmente vicini ai limiti tecnologici noti che potrebbero portare a cambiamenti nuovi e insospettati.

- Cambiamenti individuali: sono determinati dalle molte variabili che influenzano le prestazioni umane.

- Cambiamenti sociologici: in relazione con i primi cinque tipi, considerano il ruolo della società nell'influenzare l'individuo.

- Cambiamenti organizzativi: sono trasferimenti di responsabilità o responsabilità mal definite che lasciano spazi comportamentali non regolati.

- Cambiamenti operativi: sono quei cambiamenti che si verificano senza valutazione delle possibili conseguenze.

Il processo di analisi dei cambiamenti è costituito dai i sei seguenti passaggi (la figura 68):

1. Osservare il contesto dell'evento.
2. Considerare un contesto simile, ma senza l'evento.
3. Comparare le due situazioni.
4. Rilevare tutte le differenze in funzione degli effetti sul verificarsi dell'evento.
5. Analizzare le differenze in funzione degli effetti sul verificarsi dell'evento.
6. Correlare le differenze tra i fattori causali dell'evento.

La *Change Analysis* si completa e si visualizza attraverso l'uso della matrice riprodotta nella tabella 52. La matrice può essere usata come foglio di lavoro che permette di inserire informazioni nelle sei fasi elencate sopra; i fattori riportati sulla sinistra della matrice potrebbero non essere sufficienti a definire la

situazione ed è quindi compito dell'analista aggiungerne altri più aderenti al caso in esame.

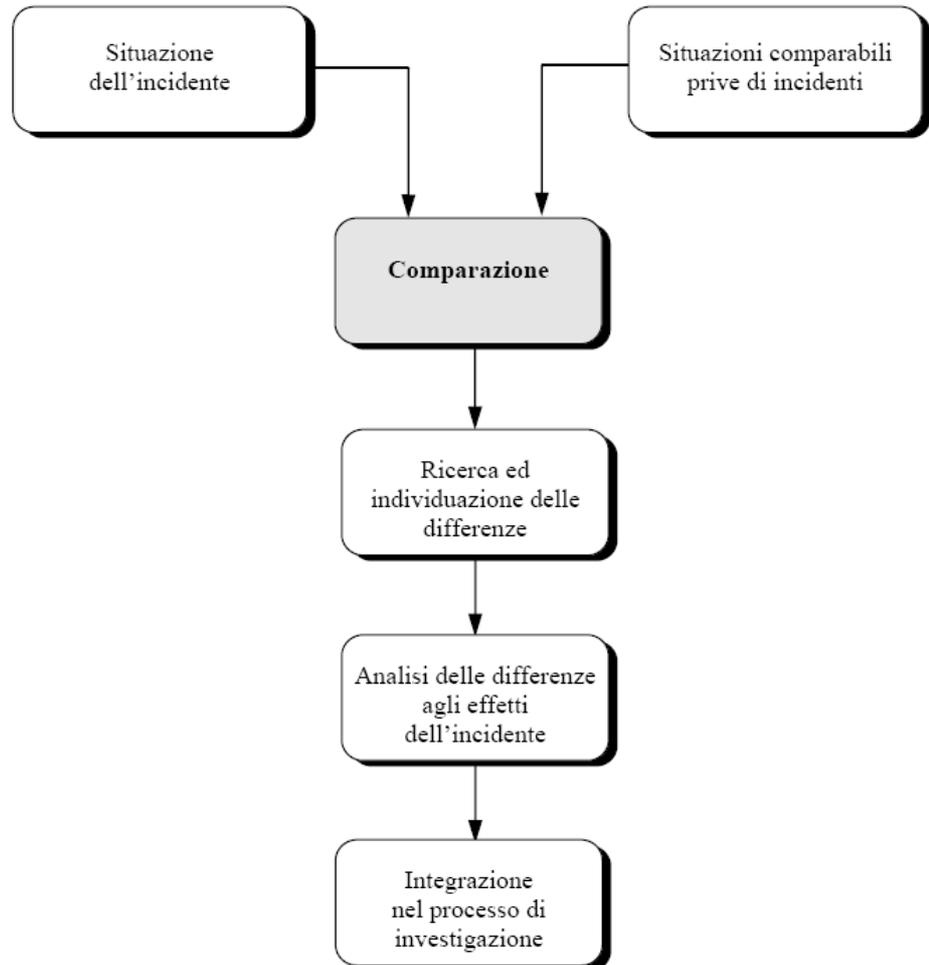


Figura 68 – I sei passaggi della Change Analysis

FATTORI	Situazione presente	Precedenti comparabili	Differenze	Cambiamenti influenti
Cosa Oggetti Energia Difetti Dispositivi di protezione				
Dove Sull'oggetto Nel processo Luogo				
Quando Nel tempo Nel processo				
Chi Operatore Colleghi di lavoro Supervisore Altri				
Compiti Obiettivo Procedura Qualità				
Condizioni di lavoro Ambiente Straordinario Programma Ritardi				
Evento scatenante				
Controlli manageriali Catena di controllo Analisi dei pericoli Monitoraggio Revisione del rischio				

Tabella 52-Foglio di lavoro per l'analisi degli incidenti con la *Change Analysis*

La necessità della *Change Analysis* in funzione della sicurezza è dettata dal semplice fatto che qualsiasi sistema operativo reale è costantemente sottoposto a cambiamenti nel personale, nei sistemi procedurali e nelle attrezzature. Sfortunatamente, quando si apportano questi cambiamenti spesso non si valuta il loro effetto sul resto del sistema; queste mancanze e omissioni possono, in molti casi, portare all'evento indesiderato. Le tecniche della *Change Analysis* possono, dunque, aiutare la ricerca nelle seguenti aree:

- Eliminazione degli inconvenienti: spesso i fatti rilevanti si evidenziano facilmente se vengono identificati i loro elementi peculiari. La Change Analysis è un modo efficiente di ricercare informazioni addizionali.

- Cause non note: è importante che tutti i cambiamenti e le differenze siano identificati, sia che essi sembrino cause di variazione oppure no. La Change Analysis aiuta a identificare i fattori causali che non sono ovvi.

- Identificazione di fattori non più disponibili a causa dei cambiamenti: quando un cambiamento non è identificato e controllato esso potrebbe velocemente portare ad azioni non coordinate, a causa delle quali il personale, anche se esperto e preparato, può cadere in errore in situazioni anomale o di emergenza.

- Rapida soluzione dei problemi: quando il tempo a disposizione è breve e la necessità di un'azione di rimedio è urgente, la tecnica della Change Analysis facilita un approccio sistematico alla soluzione dei problemi.

- Esclusione di soluzioni non valide: quando è necessaria una soluzione per problemi che si ripresentano con caratteristiche simili, è di grande aiuto nella distinzione delle cause dai sintomi.

3.2.8 IL M.O.R.T.

La tecnica M.O.R.T. (*Management Oversight and Risk Tree*) è una procedura analitica che permette un approccio disciplinato alla ricerca dei fattori contributivi di un evento indesiderato, attraverso una struttura logica ad albero come guida alla ricerca dei fatti. I diagrammi o le tabelle sono il cuore del M.O.R.T. L'albero logico illustra una lunga serie di domande intercorrelate. La tecnica M.O.R.T. è simile alla F.T.A. ma è più generalizzata e ha caratteristiche innovative. Una volta completata, permette una grande visibilità del processo di analisi dell'evento. Permette all'investigatore di rivedere i risultati dell'indagine

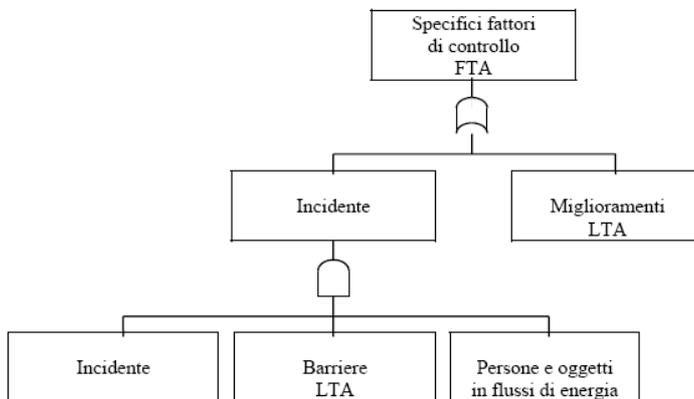
e di presentarli in modo comprensibile e di utilizzarli come riferimento futuro, presentandoli in modo significativo, e registra i progressi e i risultati dell'indagine come riferimento per il futuro. I simboli del diagramma M.O.R.T. sono simili a quelli usati nell'F.T.A. ma non identici (tabella 53). Il diagramma M.O.R.T. è un albero logico nel quale l'evento indesiderato è il top event dal quale si ripartono tre diramazioni principali (figura 69). La prima studia i fattori S, cioè gli specifici errori od omissioni associati con il top event investigato; la seconda elenca i fattori R, cioè i rischi assunti. Questo ramo una volta correttamente valutato, non viene investigato, poiché i fattori che lo compongono, i rischi assunti appunto, non sono evitabili o lo sono a un costo proibitivo. La terza diramazione considera i fattori M, ovvero le caratteristiche del sistema di management che ha contribuito al top event.

Simbolo	Funzione logica
Porta AND 	L'evento in uscita accade solo quando sono presenti congiuntamente tutti gli eventi in entrata
Porta OR 	L'evento in uscita accade quando è presente uno o più degli eventi in entrata
Simboli di tipo indicativo	
	Indica un evento, solitamente un guasto, che risulta dalla combinazione di più guasti primari
	Indica un evento che mostra un'analisi soddisfacente o completa
	Indica un evento normale
	Indica una causa elementare (o prima) della quale si conosce la probabilità di accadimento basata su risultati di test o su analisi di guasti reali
	Indica un evento finale della sequenza, mancanza di soluzione o di informazioni
	Indica il rimando ad un altro albero di guasto (o altra parte dell'albero)
	Indica i rischi assunti

Tabella 53-I simboli del M.O.R.T.

Si usa l'albero logico M.O.R.T. anche per esaminare l'adeguatezza di determinate misure preventive comportamentali oltre che per investigare sulle cause dell'evento. Se in determinate attività dell'albero le misure adottate non sono idonee, esse vengono contraddistinte con il termine LTA (*less than adequate*). Il top event indica perdite, eventi indesiderati, danni fisici e materiali, o interruzioni di funzionamento. Un'analisi con questa tecnica, parte con la

stesura del ramo S, che deve essere la più rigorosa possibile e che, partendo da pochi fattori, porta a individuare altri fattori S (figura 69). Il ramo M viene indagato separatamente dal processo che ha prodotto le condizioni per il verificarsi dell'evento indesiderato (figura 70).



- | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------|
| Informazioni tecniche | Sulle fonti di energia | Funzionali |
| Mezzi operativi | frapposte | Non funzionali |
| Manutenzione | Per le persone e gli | |
| Suprvisione | oggetti | |
| Supervisione qualificata | Segregazione nel | |
| | tempo | |
| | e nello spazio | |

Figura 69 – I fattori S

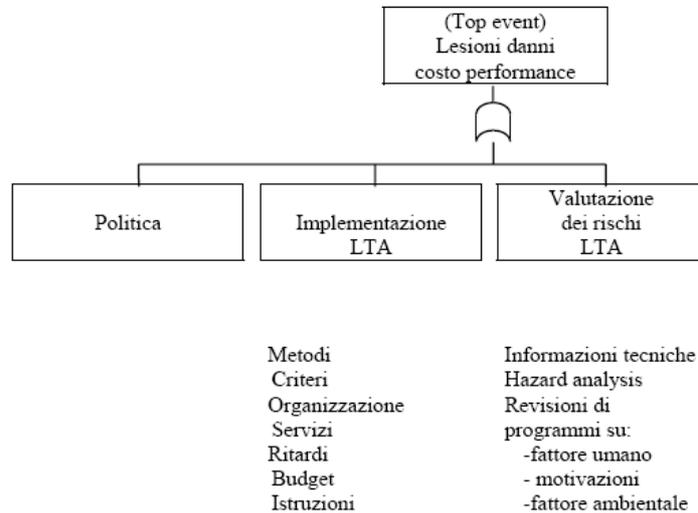


Figura 70 – I fattori M

Procedendo in quest'analisi si possono evidenziare situazioni LTA, che a loro volta vengono ulteriormente analizzate al fine di individuare ed eliminare le cause prime. Questo diagramma è un ottimo strumento di lavoro che permette un approccio "a ruota libera" se sviluppato dall'alto verso il basso e osservando la giusta sequenza; esso può, eventualmente, essere completato da una relazione finale. Deve essere chiarito che il M.O.R.T. non è una tecnica da usare in campo, ma uno strumento analitico per riesaminare e ordinare i fatti e gli elementi raccolti sul campo; tuttavia è uno strumento di grande valore nell'ordinare i pensieri e il processo investigativo ed è di grandissima utilità nell'analizzare fatti non ancora scoperti e nell'evidenziare la necessità di analisi dettagliate di alcuni aspetti dell'evento. Normalmente, il M.O.R.T. è usato come strumento di lavoro che parte da una prima raccolta dei fatti e si sviluppa con l'estendersi dell'investigazione. In questo modo, esso focalizza situazioni incerte e traccia le linee guida per un'indagine più profonda in quelle aree di incertezza.

3.3. ANALISI DEI MODI E DEGLI EFFETTI DI GUASTO

3.3.1. CENNI STORICI

L'analisi dei modi e degli effetti di guasto è una delle principali metodologie che consente di ottenere elevati valori di affidabilità dei sistemi [71]. Il raggiungimento di tali elevati valori di affidabilità è legato alla capacità dei progettisti di avere una visione globale che, sin dalla fase del progetto appunto, riesca a tenere conto delle possibilità e delle rispettive modalità di guasto delle parti che costituiscono il loro sistema. Guardando al passato si può dire che la FMEA è una tecnica conosciuta, ed in parte è utilizzata, da circa un centinaio di anni, cioè da quando tecnici e del ingegnere coinvolti in progettazioni complesse si sforzavano a comprendere la possibile esistenza di rischi derivanti da potenziali modi di guasto durante la vita operativa dei sistemi da realizzare. Le prime esperienze sistematiche furono intraprese negli Stati Uniti dall'aeronautica militare la quale sviluppò e ricerche per utilizzare al meglio, senza rischi, il fattore umano costituito dai piloti, ufficiali e tecnici di bordo. Tuttavia solo da alcuni decenni si è assistito al rafforzamento e alla diffusione della metodologia a seguito della strutturazione della norma US MIL-STD-1629A. In particolare, la FMEA è stata sviluppata nell'ambito della programma spaziale lunare della NASA, come precedentemente ricordato, per valutare tutti i problemi che sarebbero potuti presentare, quali il cattivo funzionamento dei vincoli e degli equipaggiamenti spaziali. Il risultato fu il successo dell'allunaggio del 1969. L'avvento dell'elettronica ha permesso attraverso l'informatizzazione, degli gestire agevolmente grosse quantità di informazioni/dati, nel caso della FMEA si riferiscono a tutti i modi di guasto dei componenti costitutivi dei sistemi.

3.3.2. GENERALITÀ

In generale, ogni guasto o ogni modo di guasto di un componente altera le prestazioni del sistema. Lo studio dell'affidabilità, della sicurezza e della disponibilità di un sistema richiede analisi complementari, sia qualitative sia quantitative. Queste analisi possono essere impiegate nelle varie fasi progettuali,

oppure ha prodotto realizzato, e al fine di fornire indicazioni sulle conseguenze che le soluzioni adottate nel progetto potranno avere sul comportamento a lungo termine del sistema da esso originato. Risulta così più facile ed immediato intraprendere le azioni opportune per portare l'affidabilità e la disponibilità di una sistema ai livelli desiderati, o comunque, per raggiungere obiettivi definiti quali, ad esempio, la riduzione delle probabilità di guasti critici. Molte tecniche di analisi dell'affidabilità dei sistemi si propongono soltanto risultati di tipo qualitativo; esse possono suddividersi in metodi deduttivi e metodi induttivi ed effettuano un'analisi della struttura del sistema volta a stabilire le interdipendenze tra guasti dei componenti diversi e tra questi e il guasto di tutto il sistema. I metodi deduttivi studiano la propagazione di un guasto dal livello di complessità più alto ai livelli man mano più bassi, ovvero tendono a determinare quali cause possono essere all'origine di ogni modalità di guasto prevedibile per il sistema. Essi focalizzano pertanto l'attenzione sull'evento fondamentale di un determinato guasto del sistema e consentono di modificare e la sua struttura per ridurre la probabilità del tipo di guasto considerato; si rilevano pertanto utili nelle prime fasi di progettazione del sistema per adattare e via via il progetto alle esigenze affidabilistiche derivanti dalle modalità di impiego delle apparecchiature. I metodi induttivi procedono invece dai livelli di complessità più elementari a quello più elevato, cioè tendono a individuare quali conseguenze sulla funzionalità del sistema possa avere il guasto di un singolo componente. Essi prendono all'avvio dall'analisi delle modalità di guasto dei singoli componenti per studiarne la propagazione ai livelli superiori di complessità; consentano pertanto un esame rigoroso degli effetti di questi guasti sulla funzionalità di un sistema ma richiedono la conoscenza della sua struttura e si applicano quindi nelle fasi finali di progettazione o progetto realizzato. La tecnica, applicata in questo nostro lavoro, di analisi dei modi e degli effetti di guasti, comunemente indicata anche nella letteratura tecnica con la sigla FMEA (derivante dalla terminologia inglese, "*Failure Modes and Effects Analysis*"), è un metodo induttivo che procede dal basso verso l'alto per fornire informazioni qualitative sulla affidabilità di una apparecchiatura. La FMEA è basata su di un livello definito di componente o sottoinsieme, per il quale si disponga di informazioni di base sui guasti. Partendo dalle caratteristiche di un guasto degli

elementi fondamentali e dalla struttura funzionale del sistema, la FMEA permetterle di determinare le relazioni esistenti fra i guasti degli elementi e i guasti, e i difetti e le difficoltà di funzionamento, la degradazione delle prestazioni o dell'integrità del sistema. Per poter studiare i guasti indotti o di ordine più che elevato del sistema o dei sottosistemi è talvolta necessario esaminare anche la successione cronologica degli avvenimenti. In senso stretto la FMEA si limita ad una analisi qualitativa dei modi di guasto dell'hardware e non include nè gli errori umani nè gli errori del software malgrado il fatto che i sistemi attuali siano generalmente soggetti anche a questi. In senso più lato questi fattori potrebbero però esservi compresi.

3.3.3. UTILIZZAZIONE DEI SCOPI DELLA FMEA

Questa tecnica può essere applicata a una vasta e gamma di problemi e inoltre, può essere utilizzata per i sistemi tecnici, basati su tecnologie diverse (elettrici, meccanici, idraulici,) o su combinazioni di queste, il modo più o meno approfondito o con modifiche in funzione dello scopo da raggiungere. La FMEA è una tecnica di supporto all'esame critico del progetto durante tutte le sue fasi, mentre alla fine della sua realizzazione può considerarsi come uno strumento di verifica rilevandosi essenziale per dimostrare la conformità del sistema progettato alle norme stabilite, ai regolamenti e alle esigenze dell'utilizzatore. Le informazioni fornite dalla FMEA permettono di identificare le priorità per i controlli di processo e le ispezioni previste nel corso della costruzione e dell'installazione nonché per le prove di qualifica, di approvazione, di accettazione e di messa a fine esercizio. La FMEA fornisce dati indispensabili per le procedure di diagnostica e di manutenzione. Nel decidere il modo e l'estensione di applicazione della FMEA a un dispositivo o a una sistema si dovrebbero considerare gli scopi specificati per i quali sono richiesti i risultati della FMEA, la connessione temporale con altre attività e l'importanza di definire un certo grado di consapevolezza e di controlli per i modi e gli effetti dei guasti indesiderabili. Ciò conduce alla pianificazione della FMEA in termini qualitativi, a livelli specifici (sistema, sottosistema, componenti, oggetto) per stabilire una stretta connessione con il processo interattivo di

progettazione e di sviluppo. Prendiamo adesso in esame alcuni degli scopi principali in a cui la FMEA è destinata:

1) Valutare gli effetti e le sequenze di eventi provocati da ciascun modo identificato di guasto di un dispositivo, quale che sia l'origine, ai diversi livelli del sistema;

2) Determinare l'importanza o la criticità di ogni modo di guasto rispetto al funzionamento corretto o alle prestazioni del sistema, e valutarne l'impatto sull'affidabilità e/o sulla sicurezza del processo considerati;

3) Classificare i modi di guasto identificati in base alla facilità con la quale si possono rilevare, diagnosticare e controllare, alla sostituibilità degli oggetti, alle azioni di compensazione ed operative (riparazione, manutenzione, logistica) ed a ogni altra caratteristica particolare.

Vediamo alcuni esempi di applicazioni possibili ed i vantaggi della FMEA:

a) Determinare la necessità di:

- Ridondanze;

- Particolarità di progetto che aumentino la probabilità di conseguenze “non critiche” di guasti;

- Ulteriori sovradimensionamenti e/o semplificazioni del progetto;

b) Determinare la necessità di scegliere materiali, parti, dispositivi o componenti diversi;

c) Identificare le conseguenze gravi dei guasti e pertanto determinare se è necessario rivedere e modificare il progetto;

d) Trovare tutto ciò che può presentare rischi per la sicurezza o sollevare problemi di responsabilità legale e riscoprire la non conformità ai requisiti stabiliti per legge;

e) Stabilire cicli di utilizzazione che possono far prevedere ed evitare i guasti dovuti all'usura;

f) Evidenziare le aree fondamentali sulle quali concentrare i controlli di qualità, ispezioni e verifiche dei processi di fabbricazione;

g) L'evitare modifiche costose e identificando il più presto possibile le carenze di progettazione;

h) Fornire informazioni che permettono di definire le disposizioni per la manutenzione preventiva o correttiva e per la messa a punto di guide alla ricerca di guasti, di dispositivi integranti di prova ed opportuni i punti di controllo;

i) Facilitare il progetto di sequenze per isolare e la previsione di modi alternativi di funzionamento e di riconfigurazione;

3.3.4. LIMITI DI INCONVENIENTI DELLA FMEA

La FMEA è estremamente efficace quando è applicata all'analisi di elementi che provocano un guasto dell'intero sistema. Nel caso di sistemi complessi che hanno funzioni molteplici e comportano un numero elevato di componenti, la FMEA può essere però molto difficile della sua applicazione molto noiosa. Questo si spiega anche con l'enorme volume di informazioni dettagliate sul sistema che devono essere prese in considerazione. Questa difficoltà può essere ulteriormente accresciuta se sono possibili più modi operativi e se occorre tener conto anche delle politiche di riparazione e di manutenzione. Un'altra limitazione è che gli errori umani normalmente non sono inclusi, nondimeno, la FMEA può identificare i componenti più vulnerabili agli errori predetti. Ulteriore limitazione è si presenta quando vi sono importanti effetti dovuti all'ambiente.

3.3.5. PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA FMEA

Qui di seguito riportiamo sinteticamente quelli che sono le fasi da seguire nell'applicazione della tecnica FMEA riservandoci di trattarle dettagliatamente in seguito direttamente applicabile alla pompa oggetto di questo lavoro. La FMEA richiede:

- la scomposizione dei sistemi in elementi;
- Diagrammi della struttura funzionale del sistema e identificazione dei diversi dati necessari per l'esecuzione delle FMEA;
- L'indicazione dei modi di guasto di interesse e della loro criticità;
- Formulazione di modifiche progettuali o stesura del piano di manutenzione correttivo.

Dobbiamo, quindi, dare la definizione della struttura funzionale del sistema e reperire le informazioni necessarie per l'esecuzione della FMEA, quali ad esempio la struttura del sistema, l'avviamento, l'uso ed il controllo dello stesso. Inoltre dobbiamo dare la rappresentazione della struttura del sistema ed indicare i possibili modi di guasto.

3.4. IL PROCESSO PRODUTTIVO E I PRODOTTI DELLA SINTERIZZAZIONE

3.4.1 METALLURGIA DELLE POLVERI

La metallurgia delle polveri è una particolare tecnologia atta a produrre pezzi metallici o metallo-ceramici finiti partendo direttamente dalle polveri, preventivamente miscelate, pressandole fortemente nella forma desiderata e sottoponendo infine al trattamento di “sintetizzazione”, che consiste in un opportuno mantenimento, generalmente in atmosfera controllata, ad una

temperatura tale da provocare l'agglomerazione di tutta la massa, senza peraltro giungere alla fusione del materiale. L'importanza di questa tecnologia apparentemente semplice è andata via via crescendo negli ultimi decenni che da oggi sono numerosi i campi in cui, per motivi che verranno esaminati in seguito, essa si è affermata incontrastata oppure costituisce una valida alternativa, soprattutto sotto il profilo economico, alle tradizionali tecnologie di produzione. Nonostante ciò, le origini della metallurgia delle polveri sono tutt'altro che recenti e numerosi sono gli esempi di oggetti realizzati nell'antichità con processi nei quali si possono intravedere alcuni aspetti essenziali propri di questa tecnologia. L'affermazione della metallurgia delle polveri per produzione su scala industriale sia ha agli inizi di questo secolo in tre distinti campi di applicazione, nei quali si sfruttano altrettante possibilità offerte da questa tecnologia: ottenere pezzi solidi senza giungere al punto di fusione del metallo, forma e dimensioni dei pori che contraddistinguono i materiali che sintetizzati, unire in una struttura uniforme materiali praticamente non miscibili. Dall'allora ai giorni nostri la metallurgia delle polveri ha acquistato sempre maggiore importanza, interessando vari settori dell'industria; i continui progressi dei metodi di produzione delle polveri metalliche e le migliori qualità raggiunte hanno permesso infatti la realizzazione di più disparati oggetti.

3.4.2 DESCRIZIONE DEL PROCESSO PRODUTTIVO

Verrà data una sintetica descrizione di quelle che sono le fasi principali del processo produttivo seguito nella metallurgia delle polveri. Il materiale di partenza sono polveri di carburi metallici, di cui il più usato è il carburo di tungsteno (Wc) , e polveri di metalli, in particolare il cobalto (Co).

I metodi per la preparazione delle polveri metalliche possono essere suddivisi in due gruppi: i processi meccanici ed i processi chimici o chimico-fisici. Tra i primi è opportuno ricordare la lavorazione agli utensili, la frantumazione, la macinazione e la granigliatura, mentre al secondo appartengono la decomposizione termica, la condensazione, la riduzione, la precipitazione e sostituzione. Nel prendere in considerazione le proprietà delle polveri metalliche, allo scopo di operare una scelta a per una determinata

applicazione, è necessario fare una distinzione fra le proprietà fisiche e quelle chimiche. Fra le prime possono essere elencate: la grandezza delle particelle, la loro distribuzione, la loro forma, la densità apparente, lo scorrimento, la comprensibilità e la compattabilità; fra le seconde è di preponderante importanza la valutazione delle impurezze. Prima di essere compattate le polveri vengono sottoposte ad una serie di operazioni tra cui riveste particolare importanza la miscelazione, realizzata in appositi mulini a sfere, con opportune quantità di lubrificante solido (paraffina) e di un solvente del lubrificante (alcol isopropilico) ed altre eventuali aggiunte di lega. L'alcol, liquido basso bollente, ha la funzione di sciogliere la paraffina e di facilitarne l'uniforme distribuzione nella massa di polveri, formando un impasto fluido. La paraffina ha la funzione, dopo l'allontanamento del solventi, di ricoprire le particelle di polvere e di favorirne l'unione la compattazione all'atto della successiva pressatura o estrusione. Dopo la miscelazione, il solvente (l'alcol isopropilico) deve essere allontanato e recuperato per consentire la deposizione della paraffina sulle particelle di polvere. L'asciugatura viene effettuata anche nel mulino applicando un condotto di aspirazione, riscaldano la miscela mediante acqua calda che viene fatta passare in una intercapedine e conducendo l'operazione sotto vuoto. La miscela prodotta può essere sottoposta a due diversi processi: la pressatura o estrusione.

La pressatura può essere di tipo meccanico di tipo idraulico ed iso-statico.

La pressatura meccanica viene impiegata per la produzione di pezzi di forma definita e di dimensioni medio piccole con stampi che consentono di ottenere pezzi estremamente precisi. I pezzi ottenuti non devono essere ulteriormente lavorati, pertanto vengono successivamente presinterizzati in unico forno.

Attraverso la pressatura idraulica è possibile stampare dei parallelepipedi di dimensioni medio grosse che vengono successivamente sottoposti alla presinterizzazione e quindi al taglio nelle forme e dimensioni desiderate. La pressatura idraulica ha però l'inconveniente di fornire un materiale non isotropo

per cui al momento della pre-sinterizzazione il ritiro volumetrico non è uniforme; si ricorre quindi alla ripressatura isostatica.

Il processo di estrusione viene impiegato per ottenere dei semilavorati di sezione rettangolare, circolare o speciale e di lunghezza elevata. Il prodotto estruso viene successivamente sottoposto a pre-sinterizzazione, taglio e sinterizzazione.

La delubrificazione e pre-sinterizzazione è un trattamento termico finalizzato a:

- eliminazione del lubrificante impiegato come legante per le fasi di pressatura o estrusione;
- Conferimento di resistenza meccanica idonea per le successive lavorazioni di formatura.

A questo trattamento, che avviene in forni con atmosfera controllata di azoto ed idrogeno, sono destinati i materiali ottenuti per estrusione o per pressatura idraulica ed isostatica. Il materiale pre-sinterizzato, ha ancora le caratteristiche della polveri partenza, per cui eventuali non conformità possono essere recuperate rimacinando il materiale.

I prodotti della pre-sinterizzazione vengono lavorati alle macchine utensili per il conferimento della forma e delle dimensioni desiderate.

La sinterizzazione è il trattamento fondamentale e finale di tutto il ciclo di lavorazione, viene eseguito sotto vuoto o in forni ad induzione o a resistenza, ed ha lo scopo di trasformare in un corpo solido le polveri previamente pressate meccanicamente o pre-sintetizzate; in questa fase avvengono quelle profonde modificazioni delle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche che permettono di raggiungere le particolari caratteristiche, tipiche di questi prodotti. Due sono i parametri più importanti della sinterizzazione: tempo e temperatura; oltre a questi intervengono anche altre numerose variabili quali: la forma e le

dimensioni delle particelle, il loro stato superficiale, in grado di compattazione, l'atmosfera in cui si opera la sintetizzazione. Per ogni tipo di polvere vi sono dei limiti pratici entro cui si possono far variare tempo e temperatura, in quanto a temperature troppo basse si dovrebbero prevedere tempi troppo lunghi e quindi non economici, ed a temperature troppo alte vi sarebbero, oltre al pericolo di fondere il compatto, quelli dell'insorgere di altri fenomeni come le trasformazioni allotropiche, l'evaporazione o una eccessiva solubilità dei gas, che potrebbero compromettere i risultati finali. In generale si può dire che all'aumentare della temperatura e della durata, tendono anche ad aumentare la densità, la resistenza alla trazione e all'allungamento. Piuttosto complicati sono meccanismi con cui avvengono i processi di sinterizzazione in quanto coinvolgono fenomeni di diffusione allo stato solido, di ricristallizzazione e di ingrossamento dei grani; un sintetico cenno dell'argomento è quanto mai arduo. Si osservi innanzitutto che durante l'operazione di sinterizzazione si ha una modificazione geometrica delle particelle metalliche compattate, modificazione collegata ai cambiamenti nella forma e nelle dimensioni della porosità; infatti, le particelle compattate si agglomerano, saldandosi l'una all'altra; aumenta con il tempo la superficie di contatto, e conseguentemente si ha una continua contrazione dei pori, che porta in generale ad un aumento di diversità del materiale, come conseguenza della diminuzione delle dimensioni. E' estremamente importante conoscere il grado di diminuzione delle dimensioni cui è generalmente soggetto un pezzo durante la sinterizzazione, allo scopo di poter dimensionare correttamente la matrice per la pressatura e contenere le tolleranze dimensionali entro i limiti desiderati.

Qui di seguito vengono riportati, in un breve elenco, alcuni dei prodotti ottenibili tramite il processo produttivo di sinterizzazione:

- cilindri grezzi e rettificato
- barette
- testine per frese
- Matrici per stampaggio
- Blocchi per costruzione di stampi, punzoni, matrici

- Anelli e boccole antiusura
- Placchette ISO
- Placchette sagomate per legno
- coltellini grezzi e rettificati a gettare
- Spigolatori
- barrette con spoglia
- Inserti per estrazione di pietre e marmi
- Prismi per corone di sonde
- Cuspidi per lavorazioni stradali
- Filiere per la fabbricazione dei laterizi
- Inserti per l'industria meccanica

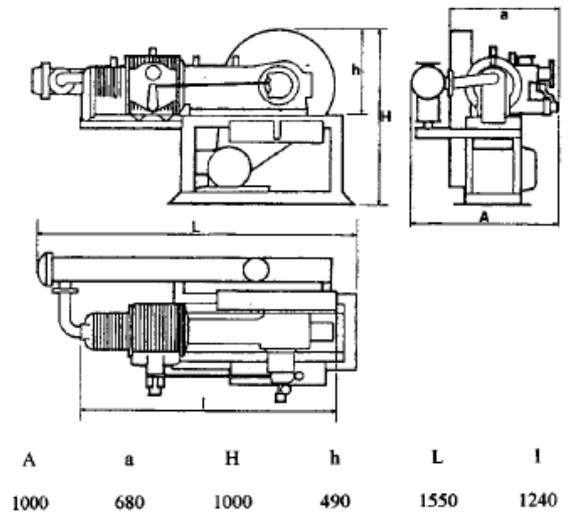
3.4.3 APPLICAZIONE DELLA FMEA AL CASO DEI PRODOTTI SINTERIZZATI

All'interno del ciclo produttivo appena descritto si è deciso di applicare la tecnica FMEA nel reparto dedito all'essiccamento delle polveri e conseguente recupero dell'alcool isopropilico, soffermando l'attenzione sulla pompa a pistone per vuoto che sovrintende alle suddette funzioni. Prendiamo adesso in esame quelle che sono le tappe fondamentali da seguire nell'applicazione della tecnica FMEA. La pompa in questione riveste quindi all'interno del ciclo produttivo che un ruolo di vitale importanza, non tanto perché consente di recuperare circa l'80% dell'alcool isopropilico utilizzato nel ciclo, quanto piuttosto perché permette di ottenere un prodotto idoneo a subire le fasi seguenti del ciclo produttivo. La pompa a pistone per vuoto, modello VB, presenta le seguenti caratteristiche tecniche:

- potenza motore 3KW
- Portata 100m³/h
- Giri al minuto 250
- Vuoto 5.3 mbar

- \varnothing aspirazione scarico 1 1/2" pollici
- Peso totale 380 Kg

Il motore elettrico mette in rotazione il volano, che, tramite l'albero a gomiti aziona la biella, il pistone, all'asta di distribuzione e il cassetto. Il pistone durante la sua corsa aspira dalle feritoie lasciate libere dal cassetto i gas nel cilindro scarica, tramite le valvole, quelli precedentemente aspiranti nella sua corsa in senso inverso. Essendo funzionamento doppio effetto, i nastri vengono aspirati e caricati in entrambi i sensi della corsa del pistone. La pompa opera in modo discontinuo, in condizioni normali di funzionamento, per circa 20/22 ore al giorno. Nelle rimanenti ore di inattività è possibile, quindi, effettuare la manutenzione ordinaria. La pompa, inoltre, alle seguenti dimensioni di ingombro (mm):



La lubrificazione della pompa è ottenuta da un gruppo composto da due pompe, una a pistoncini ed una a ingranaggi:

- la pompa a pistoncini aspira olio dal serbatoio separato e lubrifica il cilindro, il cassetto e i cuscinetti interni ed esterni della leva interna. L'olio non viene recuperato e quindi nel serbatoio ci sarà sempre olio nuovo; questo permette di salvaguardare la pompetta a pistoncini e di lubrificare i cilindri ed il cassetto sempre con olio pulito;
- la pompa ad ingranaggi lubrifica la biella, il sistema testacroce, lo spinotto e l'asta del pistone.

Quest'olio è recuperato nel basamento, pulito attraverso il filtro e rimesso in circolazione dalla pompa stessa.

Sono stati elaborati diversi diagrammi a blocchi indispensabili per mettere in evidenza gli elementi funzionali del sistema e per facilitare la comprensione tecnica delle funzioni del sistema e la loro analisi. Questi diagrammi mostrano, scendendo sempre più nel particolare, tutte le relazioni e le interdipendenze funzionali esistenti fra questi elementi e ciò permette di seguire le tracce dei guasti funzionali in tutto il sistema. Il primo diagramma a blocchi funzionale (figura 71) è relativo all'intero ciclo produttivo ed è stato realizzato o per vedere come la funzione esplicata dalla pompa, oggetto dello studio, si collochi all'interno dello stesso. Da questo diagramma possiamo dedurre che, non essendoci possibilità di ridondanza o sequenze alternative del processo produttivo che consentano il regolare funzionamento dell'intero impianto qualora venisse meno la funzionalità della pompa, la stessa riveste un ruolo di primaria importanza all'interno del ciclo produttivo e che, quindi, necessita della massima affidabilità. Il secondo diagramma a blocchi funzionale (figura 72) è relativo al solo reparto dedito al recupero dell'alcool isopropilico e di cui la pompa è parte fondamentale. In questo diagramma si possono notare le relazioni funzionali esistenti tra i vari elementi che consentono, avendo come input il fluido prelevato dal mulino o dall'attritore, di fornire in output alcool isopropilico controllato e pronto per essere riutilizzato nel processo produttivo. Si può notare anche la presenza di due pompe (n°2700, n°2900) oltre a quella a pistone per vuoto. La prima ha il compito di trasferire continuamente l'alcool dal serbatoio n°2500 al serbatoio n°2800 che è di dimensioni molto più grandi, la seconda

provvede invece a trasferire l'alcool da quest'ultimo serbatoio al ciclo di lavorazione solo quando richiesto. Il terzo diagramma a blocchi funzionali (figura 73), infine, è relativo alla sola pompa a pistone, ed in esso si può vedere la sequenza funzionale delle fasi che si effettuano nella pompa per la realizzazione del vuoto, la conseguente aspirazione ed infine lo scarico del fluido. Sempre nel diagramma in questione, per quanto riguarda la lubrificazione della pompa, si può osservare un unico blocco lubrificazione (n°2120) relativo alla pompa a pistoncini. Qualora dovesse venir meno la funzionalità di detto blocco noteremo come questo andrebbe ad incidere negativamente su tutti e tre blocchi con cui esso delegato (2100,2160,2210). Per tutti e tre diagrammi descritti e di seguito riportati è stata adottata, nel rispetto delle indicazioni fornite dalla norma MIL-STD-1629A, una numerazione che permette di individuare univocamente ciascun elemento del sistema.

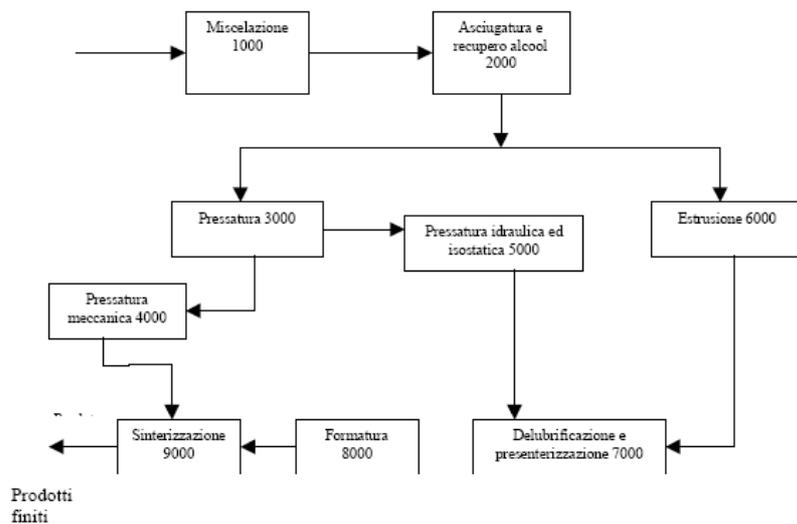


Figura 71 – 1° Schema a blocco funzionale

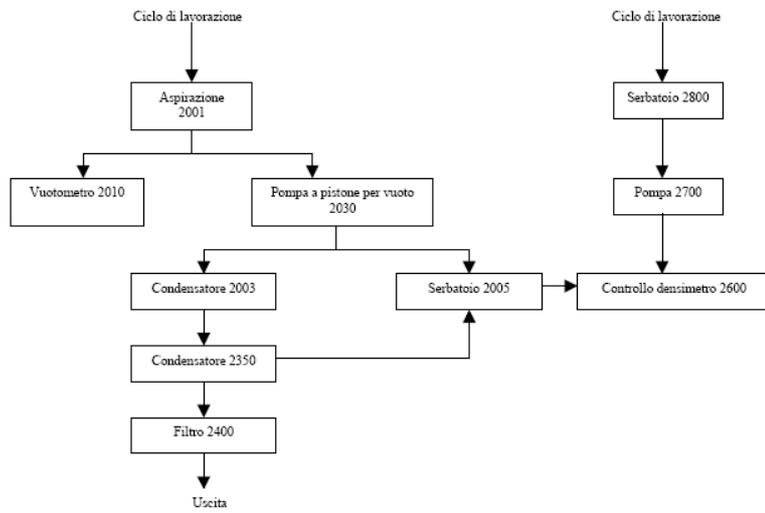


Figura 72 – 2° Schema a blocco funzionale

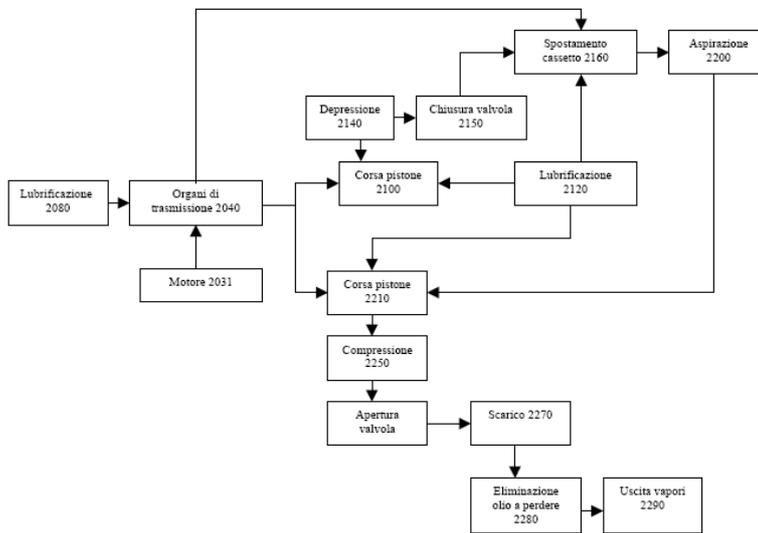


Figura 73 – 3° Schema a blocco funzionale

Le regole per scegliere i livelli del sistema per l'analisi dipendono dai risultati ricercati e dalle informazioni disponibili sul progetto[72]. Partendo dal diagramma a blocchi funzionali della pompa pistone si è preso in considerazione ciascun blocco, escludendo quello relativo a motore che è stato considerato unico. Per ciascun blocco, dovendo nel nostro caso ottenere come risultato dell'analisi un piano di manutenzione ed eventuali modifiche strutturali, ed avendo a disposizione, tra gli altri, la tavola dei ricambi della pompa, si è deciso di scendere con il livello di analisi più basso a ogni singolo componente passibile di sostituzione. Per quanto riguarda la documentazione è vantaggioso a effettuare la FMEA utilizzando moduli concepiti espressamente per il sistema in esame e preparati in funzione degli obiettivi ricercati. Le informazioni richieste dal modulo, suddivisi in colonna, sono:

- a) numero di identificazione dell'elemento del sistema preso in considerazione;
- b) Denominazione dell'elemento;
- c) funzione svolta dalle elemento;
- d) Modi e cause di guasto;
- e) Modi di operare dell'elemento;
- f) Effetti del guasto;
- g) Metodi di rilevamento dei guasti;
- h) Provvedimenti compensativi previsti;
- i) Giudizio qualitativo sull'importanza del guasto;
- j) Osservazioni.

Di seguito vengono riportati per ogni blocco funzionale, tutti gli elementi che fanno parte, il relativo numero di identificazione ed il numero del corrispondente foglio di lavoro FMEA. Vengono inoltre riportati disegni che illustrano i pezzi essenziali della pompa del gruppo lubrificazione.

Livello di dettaglio: Organi di trasmissione (Blocco 2040)

Numero di identificazione	Componente nomenclatura	Numero foglio di lavoro FMEA
2041	Cinghia	3.5.1
2042	Volano	3.5.1
2043	Rondella volano	3.5.1
2044	Supporto lato volano	3.5.1
2045	Guarnizione supporto lato volano	3.5.1
2046	Anello di tenuta	3.5.2
2047	Cuscinetto	3.5.2
2048	Albero a gomito	3.5.2
2049	Biella	3.5.2
2050	Bulloni per biella	3.5.2
2051	Spessori per biella	3.5.2

2052	Testa a croce	3.5.3
2053	Spinotto	3.5.3
2054	Vite arresto spinotto	3.5.3
2055	Controdado	3.5.3
2056	Asta per pistone	3.5.3

2057	Premistoppa	3.5.3
2058	Guarnizione cassa stoppa	3.5.4
2059	Prigionieri per premistoppa	3.5.4
2060	Supporto lato distribuzione	3.5.4
2061	Guarnizione supporto lato distribuzione	3.5.4
2062	Coperchio per supporto	3.5.4
2063	Cuscinetto	3.5.5
2064	Anello di tenuta	3.5.5
2065	Perno comando distribuzione	3.5.5
2066	Cuscinetto	3.5.5
2067	Levetta per pompa olio	3.5.6
2068	Testa tirante sinistra	3.5.6
2069	Asta di distribuzione	3.5.6
2070	Testa tirante destra	3.5.6
2071	Cuscinetto	3.5.6

Livello di dettaglio: Lubrificazione con pompa a ingranaggi (Blocco 2080)

Numero di identificazione	Componente nomenclatura	Numero foglio di lavoro FMEA
2081	Flangia per pompa a vuoto	3.5.7
2082	Albero di comando	3.5.7
2083	Perno di trasmissione	3.5.7
2084	Dado	3.5.7
2085	Flangia	3.5.8
2086	Basamento contenente olio di riciclo	3.5.8
2087	Indicatore di livello	3.5.8
2088	Tubazione di aspirazione olio al filtro	3.5.9
2089	Filtro	3.5.9
2090	Tubazione di aspirazione olio pompa a ingranaggi	3.5.9
2091	Ingranaggi	3.5.9
2092	Tubazione mandata olio	3.5.10
2093	Distributore olio biella albero a gomito	3.5.10
2094	Oliatore stelo pistone e sistema testa a croce	3.5.10

Livello di dettaglio: Corsa pistone (Blocco 2100 e 2210)

Numero di identificazione	Componente nomenclatura	Numero foglio di lavoro FMEA
2101	Dado per pistone	3.5.12
2102	Pistone	3.5.12
2103	Segmenti	3.5.12
2104	Cilindro	3.5.12
2105	Guarnizione cilindro	3.5.12
2106	Testa cilindro	3.5.13
2107	Prigionieri testa cilindro	3.5.13
2108	Fondo cilindro	3.5.13
2109	Guarnizione fondo cilindro	3.5.13
2110	Prigionieri cilindro	3.5.13

Livello di dettaglio: Lubrificazione pompa a pistoncini (Blocco 2110)

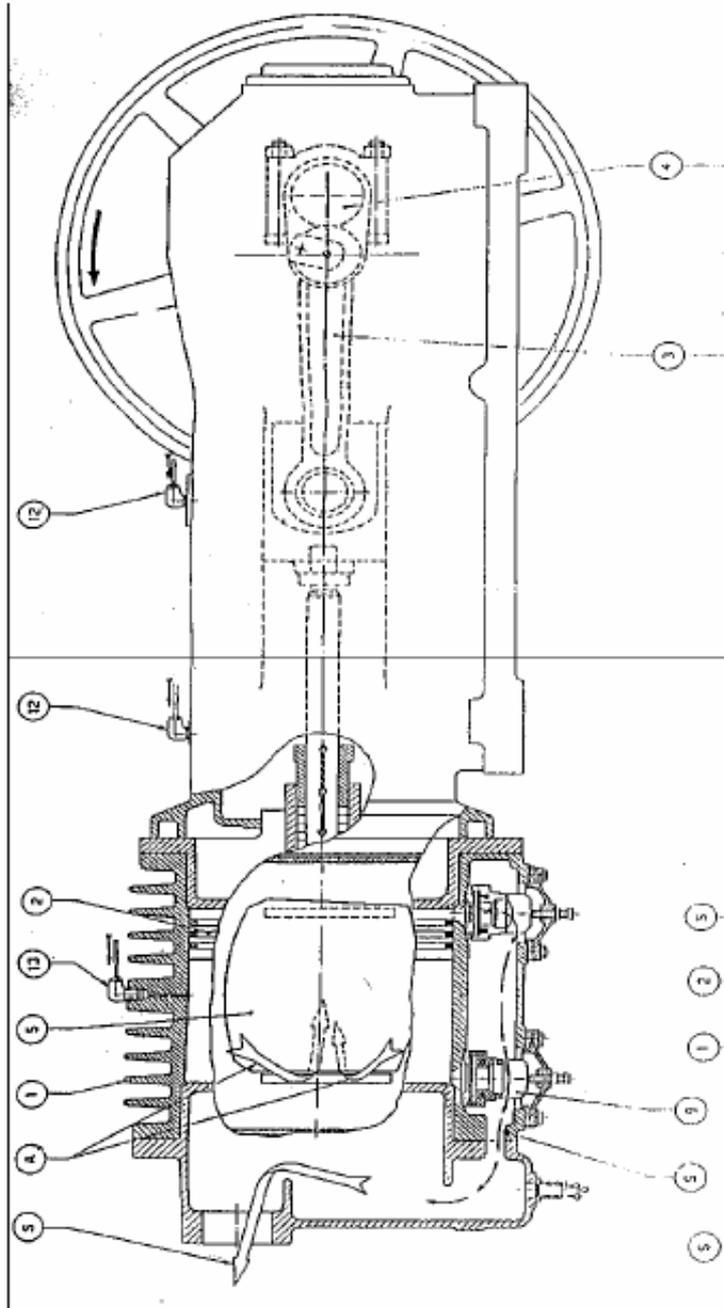
Numero di identificazione	Componente nomenclatura	Numero foglio di lavoro FMEA
2121	Ruota dentata	3.5.14
2122	Chiavetta	3.5.14
2123	Albero di distribuzione	3.5.14
2124	Corpo pompa	3.5.14
2125	Molla per attivazione comando manuale	3.5.14
2126	Manovella per lubrificazione manuale	3.5.15
2127	Camma a disco per azionamento pistoncini	3.5.15
2128	Pistoncini pompanti	3.5.15
2129	Vite di regolazione	3.5.15
2130	Serbatoio olio nuovo	3.5.15
2131	Tubazione aspirazione pompa a pistoncini	3.5.16
2132	Tubazione mandata olio	3.5.16
2133	Lubrificazione boccola-leva interna	3.5.16
2134	Oliatore cassetto	3.5.17
2135	Oliatore cilindro	3.5.17

Livello di dettaglio: Spostamento cassetto di aspirazione (Blocco 2160)

Numero di identificazione	Componente nomenclatura	Numero foglio di lavoro FMEA
2161	Perno per leva esterna	3.5.18
2162	Leva esterna	3.5.18
2163	Rondella di rame	3.5.18
2164	Rondella leva esterna	3.5.18
2165	Anello di tenuta	3.5.18
2166	Ghiera reggispinta	3.5.19
2167	Cuscinetto	3.5.19
2168	Guarnizione	3.5.19
2169	Anello di tenuta	3.5.19
2170	Anello di centraggio	3.5.20
2171	Boccola in bronzo	3.5.20
2172	Boccola temperata	3.5.20
2173	Leva interna	3.5.20
2174	Molla per cassetto	3.5.20
2175	Cassetto di aspirazione	3.5.21
2176	Coperchio cassetto	3.5.21
2177	Guarnizione coperchio cassetto	3.5.21
2178	Prigionieri coperchio cassetto	3.5.21

Livello di dettaglio: Apertura e chiusura valvola di scarico (Blocco 2150 e 2260)

Numero di identificazione	Componente nomenclatura	Numero foglio di lavoro FMEA
2151	Sede valvola	3.5.22
2152	Guarnizione	3.5.22
2153	Valvola	3.5.22
2154	Molla	3.5.22
2155	Guida valvola	3.5.23
2156	Prigioniero	3.5.23
2157	Guarnizione coperchio valvola	3.5.23
2158	Coperchio valvola	3.5.23



Pos.	Descrizione	Riferimento
1	Basamento	3502
2	Supporto lato volano	1179
3	Supporto lato distribuzione	1180
4	Coperchio per supporto	1182
5	Flangetta per pompa olio	3474
6	Volano	1181
7	Rondella volano	1184/9
8	Albero a gomito	1184/1
9	Biella	3246/1
10	Bulloni per biella	3246/2
11	Spessori per biella	4759
12	Spinotto	1148
13	Vite arresto spinotto	3246/3
14	Testa a croce	1111
15	Coperchio laterale	1115
16	Coperchio di fondo	1116
17	Premistoppa	1177
18	Prigionieri per premistoppa	4775/2
19	Fondo cilindro	3732
20	Cilindro	3731
21	Asta pistone	1193/1
22	Controdado	1193/2
23	Pistone	1169
24	Dado per pistone	1193/3
25	Segmenti	1194
26	Testa cilindro	4584
27	Coperchio cassetto	1165
28	Leva interna	1173
29	Cassetto	1170
30	Molla per cassetto	1183
31	Boccola temperata	1184
32	Boccola in bronzo	1185
33	Cuscinetto	4777/12
34	Cuscinetto	4777/12
35	Ghiera reggiopinta	1175
36	Leva esterna	1174/1
37	Rondella leva esterna	1174/2
38	Anello di centraggio	1166
39	Perno per leva esterna	1187
40	Perno comando distribuzione	1195
41	Levetta pompa olio	1120
42	Testa tirante destra	4602/3
43	Testa tirante sinistra	4602/2
44	Asta distribuzione	4774
45		
46		
47		
48		
49		
50	Valvola completa	1176
51	Coperchio valvola	1172
52		
53		
54		
55		
56	Guarnizione coperchio valvola	4612
57		
58		
59	Guarnizione supporto lato volano	4752
60	Guarnizione supporto lato distribuzione	4753
61	Guarnizione coperchi laterali	4754
62	Guarnizione coperchio di fondo	4615
63	Guarnizione fondo cilindro	4755
64	Guarnizione cilindro	4760
65	Guarnizione coperchio cassetto	4761
66		
67	Cuscinetto	4777/4
68	Cuscinetto	4777/8
69	Cuscinetto	4777/1
70	Cuscinetto	4777/9
71	Anello di tenuta	4778/5

72	Anello di tenuta	4778/5
73	Guarnizione cassa stoppa	4778/13
74	Anello di tenuta	4778/2
75	Guarnizione	4778/15
76	Anello di tenuta	4778/5
77	Pompa di lubrificazione	
78	Rondella di rame	
79	Tappo con sfiato	
80	Prigionieri cilindro	4776/2
81	Prigionieri testa cilindro	4776/9
82	Prigionieri coperchio cassetto	4776/11
Particolari per valvole		
Pos.	Descrizione	Riferimento
91	Sede valvola	1189/1
92	Guida valvola	1171
93	Valvola	1190
94	Molla	4135
95	Guarnizione	4613
96	Prigioniero	1189/2

Sulla base degli elenchi dei singoli elementi stilati precedentemente per ciascun blocco funzionale, si è proceduto alla stesura dei moduli prendendo in considerazione un elemento alla volta. Per ciascun elemento è stata indicata la funzione svolta ed è stata data una sintetica descrizione del modo di operare. È stata quindi fatta una ipotesi sul modo di guasto, sulla causa che lo ha provocato, sugli effetti del guasto e sul modo di identificazione dello stesso. Gli effetti di guasto sono stati suddivisi in tre categorie: nella prima sono stati riportati gli effetti locali, ossia le conseguenze dirette che ciascun modo di guasti ipotizzato ha sul suo funzionamento, sulla funzione o sullo stato dell'elemento; nella seconda sono stati riportati gli effetti di livello superiore successivo, ossia le conseguenze che ciascun modo di guasto ipotizzato ha sul livello immediatamente superiore di analisi rispetto quello preso in considerazione; nella terza ed ultima sono inclusi gli effetti finali, cioè l'impatto che il modo di guasto ipotizzato ha sul livello più alto del sistema. Vengono inoltre indicati per ogni modo di guasto il possibile provvedimento compensativo per prevenirne o attenuarne gli effetti e una definizione qualitativa dell'importanza dello stesso. Da quest'ultima è possibile individuare gli elementi critici del sistema e cioè quelli che migliorandone opportunamente l'affidabilità assicurano un buon funzionamento e il miglioramento delle prestazioni del sistema [73].

3.5. RISULTATI DELLA FMEA

3.5.1. OBIETTIVI

Una volta stilati i moduli FMEA possiamo passare all'indicazione degli obiettivi da raggiungere. Sostanzialmente sono due gli aspetti sui quali soffermiamo la nostra attenzione: la manutenibilità e la sicurezza. Saranno essi, quindi, gli obiettivi verso cui indirizzare provvedimenti possibili, di progetto ed operativi, al fine di prevenire eventi particolari indesiderabili. I primi guasti presi in considerazione sono quelli che presentano una classificazione della gravità di tipo “catastrofica” e cioè quella categoria di guasti che oltre a provocare la perdita delle funzioni essenziali del sistema, provocando danni importanti dello stesso, potrebbero causare morti e/o menomazioni. Successivamente si esaminano i guasti appartenenti alla classe di gravità “critica” che possono provocare gli stessi inconvenienti nella classe precedente ad eccezione della probabilità di morti e/o menomazioni. Per ultimi vengano esaminati guasti appartenenti alla classe di gravità “marginale” e “poco importante” che potrebbero causare danni di lieve entità o trascurabili al sistema o all'ambiente circostante.

3.5.2. MODIFICHE PROGETTUALI

In riferimento ai guasti di gravità catastrofica, eventi, questi, inerenti l'asta di distribuzione o organi ad essa direttamente collegati, che nel rispetto delle norme di sicurezza imposte dalla Direttiva Macchine, si potrebbe predisporre un Carter protettivo dell'asta stessa, non fisso facilmente smontabile per l'esecuzione della manutenzione ordinaria. Il carter andrebbe fissato al coperchio cassetto, da una parte, e dal coperchio per supporto dall'altra, lasciando esterno il gruppo pompe per la lubrificazione. Inoltre, sul carter si dovrebbero predisporre due aperture, una in corrispondenza della base della leva esterna ed una in prossimità dell'asta di distribuzione, per ispezionare gli organi di trasmissione e verificarne il corretto funzionamento. Il materiale da utilizzare potrebbe essere lo stesso del Carter protettivo del volano. Sempre nel rispetto delle norme di sicurezza vigenti si potrebbero predisporre una protezione fissa per evitare i

rischi dovuti alle elevata temperatura dell'unica zona con temperatura pericolosa. Questa è la testa del cilindro la quale potrebbe essere opportunamente protetta con un Carter tubolare al fine di evitare contatti accidentali e/o casuali. I predetti Carter protettivi dovrebbero rispondere ai seguenti requisiti: costruzione robusta, non provocare rischi supplementari, non essere facilmente eludibili o resi inefficaci, non permettere l'accesso agli elementi mobili durante il movimento ed infine richiedere un'apposita chiave per la loro rimozione. Se si registrano rotture ripetute è consigliabile verificare il funzionamento dei meccanismi collegati all'asta di distribuzione e la qualità dei materiali impiegati per procedere, eventualmente, al corretto montaggio o all'utilizzazione di materiali più resistente alle sollecitazioni. Un altro punto delicato della macchina che potrebbe richiedere la modifica di una parte esterna è il supporto lato distribuzione. Il esso è alloggiato un anello di tenuta che ha il compito di impedire la fuoriuscita dell'olio contenuto nel basamento. Nel caso di rottura di detto anello l'olio non è più disponibile per lubrificare la biella causandone il grippaggio. È per questo motivo, quindi, che sarebbe opportuno modificare il supporto lato distribuzione, realizzando in esso una apertura che consenta di visualizzare la parte interessata e di individuare immediatamente l'eventuale perdita di olio così da intervenire tempestivamente per la sostituzione. Un'altra modifica che si potrebbe prevedere è l'impiego di un sistema di diagnostica in grado di valutare almeno le prestazioni principali e le condizioni di funzionamento della pompa. Questo porterebbe a una serie di vantaggi tra i quali:

- Tendenza all'eliminazione di rottura
- Aumento della disponibilità del macchinario
- Riduzione dei costi di manutenzione
- Ottimizzazione dell'impiego di parti di ricambio.

Naturalmente è chiaro che la diagnostica diventa utile, raccomandabile o necessaria in funzione del grado di criticità della macchina nell'impianto, sia esso di nuova costruzione o da ammodernare. E' facilmente comprensibile che

un macchinario di grosse dimensioni, senza riserva rappresenta una perdita produttiva elevata in caso di fermata, o che presenti in esercizio rischi per la sicurezza del personale debba essere dotato di sistemi di monitoraggio continui. La larga diffusione dei computers sta nella realizzazione di sistemi a microprocessore dedicati al controllo ed all'acquisizione dati hanno consentito in questi ultimi anni notevoli progressi nel campo dell'automazione e della diagnostica. Questi sistemi hanno infatti permesso di acquisire, a costi sempre più contenuti le misure di notevoli quantità di variabili e di eseguire su di esse una serie di operazioni di elaborazioni, correlazione, verifica e memorizzazione capaci non solo di definire nei minimi dettagli le condizioni di funzionamento attuali, ma anche di conservare la memoria storica di quelle passate e consentire previsioni su quelle future. È evidente, quindi, in netto progresso qualitativo chi si otterrebbe in termini di definizione dello stato operativo della macchina. Vediamo ora quali sono i principali parametri, con relativi sensori, da acquistare ai fini della diagnostica. Si potrebbe prevedere dei sensori di pressione in corrispondenza delle mandate della pompa a pistoncini e di quella ad ingranaggi. In questo modo si verificherebbe il giusto flusso di olio per la lubrificazione dell'intera pompa, evitando così tutti gli inconvenienti legati alla carenza o mancanza di lubrificazione. Un altro tipo di sensori che si potrebbero utilizzare sono quelli di temperatura. Un sensore di questo tipo lo si potrebbe prevedere nel basamento con la funzione di rilevare la temperatura dell'olio e quindi di verificarne le caratteristiche; un innalzamento della temperatura, ad esempio, potrebbe influire negativamente sulla viscosità dell'olio. Un altro sensore potrebbe essere impiegato per rilevare la temperatura della testa del cilindro; in questo caso un innalzamento della temperatura sarebbe il sintomo che all'interno del cilindro sono aumentati gli attriti e che quindi bisogna procedere ad una verifica degli organi interni. Si potrebbe utilizzare un altro tipo di sensore per rilevare la presenza di olio nel lato esterno del supporto lato distribuzione, sintomo che denuncerebbe il non perfetto funzionamento dell'anello di tenuta. In questo caso si potrebbero utilizzare dei rilevatori di nebbie d'olio. Il surriscaldamento locale delle superfici di contatto degli organi meccanici in movimento relativo provocherebbe l'immediata evaporazione dell'olio presenti su di esse che, diffondendosi nell'atmosfera circostante più

fredda, condenserebbe sotto forma di minutissime goccioline, producendo una sorte di nebbia che verrebbe rilevata al suo insorgere dei suddetti sensori. Il rivelatore consentirebbe così di fermare immediatamente la pompa e di ripristinare l'anello di tenuta. Si potrebbe prevedere inoltre un sensore di battito testa cilindro che sia in grado di evidenziare il cattivo funzionamento del sistema a causa della presenza di fasi liquide. In conclusione possiamo dire che l'utilizzazione di sistemi di diagnostica apporterebbe un contributo decisivo in termini di efficienza, economicità e sicurezza; infatti, attraverso un controllo rigoroso e metodologico dei parametri di macchina e di processo, permetterebbero di ottimizzare i rendimenti e di razionalizzare i programmi di manutenzione stabilendone tempi e metodi.

3.5.3. PROVVEDIMENTI MANUTENTIVI

La necessità di eseguire la manutenzione riveste un ruolo molto importante, poiché se è vero che il grado di affidabilità e funzionalità di una macchina è definito durante il suo progetto, un corretto programma manutentivo è capace di conservare in esercizio le macchine a loro massimo grado di economicità e qualità[73]. Dall'analisi dei moduli FMEA possiamo dedurre le indicazioni per effettuare la manutenzione, ormai integrata nella progettazione fin dallo stadio della concezione come modo organizzato di condurre macchine ed impianti per massimizzare la produttività, adottando misure, usando attrezzature e disponendo opere provvisorie tali da consentire l'effettuazione dei lavori in condizioni il più possibile di sicurezza.

- Organi di trasmissione

Incominciamo col prendere in considerazione tra gli organi trasmissioni le cinghie e proseguiamo poi con gli altri secondo l'ordine riportato sui moduli. Per questi elementi si consiglia di verificarne periodicamente la giusta tensione, operando eventualmente sugli appositi organi di regolazione, per evitare così slittamenti ed usura precoce delle stesse. Qualora si dovesse accertarne l'usura o si dovesse raggiungere il tempo di vita previsto, bisognerebbe procedere immediatamente alla loro sostituzione. Controllare gli elementi di serraggio del

volano sull'albero, l'integrità della guarnizione supporto lato volano e dell'anello di tenuta verificando sia l'assenza di perdite di olio che l'assenza di vibrazioni che potrebbero essere sintomo del dis-assamento del cuscinetto. Di quest'ultimo, comunque, quando possibile bisogna controllarne oltre all'integrità anche alla lubrificazione. Quando possibile si deve procedere ad una verifica dell'integrità superficiale dell'asta del pistone. Ci si deve assicurare che non vi siano possibili trafiletti dovuti all'usura o all'allentamento del premistoppa che andrebbero ad inquinare l'olio presente nel serbatoio ricavato nel basamento. La presenza di alcool in quest'olio può danneggiare sia la pompa a vuoto sia la pompa di lubrificazione ad ingranaggi, quindi bisogna controllare periodicamente la sua acidità ed eventualmente sostituirlo con olio nuovo. Onde evitare i suddetti inconvenienti bisogna verificare il serraggio dei prigionieri per premistoppa. Per quanto riguarda il supporto lato distribuzione occorre controllare periodicamente la tenuta degli anelli, la guarnizione del supporto e provvedere ad ingrassare e verificare l'integrità del cuscinetto della testa tirante di sinistra, operazione quest'ultima effettuare anche sul cuscinetto della testa tirante destra.

- Lubrificazione con pompa a ingranaggi

È consigliabile pulire l'interno del basamento togliendo il tappo dello stesso e scaricandone l'olio. Quindi, dopo aver tolto i coperchi, posteriore e laterali, pulire accuratamente l'interno del basamento ed il filtro, rimuovendo i depositi che eventualmente si saranno formati, provvedendo, per quest'ultimo, se necessario alla sostituzione. Dopo avere controllato il buono stato delle guarnizioni, rimontare i coperchi ed il tappo e riempire con olio nuovo il serbatoio ed il filtro. Controllare giornalmente l'indicatore del livello dell'olio contenuto nel basamento ed il flusso dello stesso nel distributore biella albero a gomito, nell'oliatore stelo pistone e sistema testa a croce ed eventuali perdite lungo le tubazioni.

- Corsa pistone

Sarebbe opportuna una verifica periodica della tenuta delle guarnizioni del cilindro e del fondo dello stesso. Per quanto riguarda gli altri componenti interni

e quindi facilmente ispezionabili bisognerebbe prevedere un periodo di vita utile superato il quale si dovrebbe procedere alla sostituzione degli organi di inefficienti.

- Lubrificazione con pompa pistoncini

Una verifica giornaliera va fatta a livello dell'olio nuovo contenuto nel serbatoio, con eventuale aggiunta, alle tubazioni di aspirazione e di mandata, agli oliatori del cassetto, del cilindro è della boccola leva interna. A proposito delle tubazioni in genere c'è da dire che esse subiscono facilmente danni meccanici soprattutto quando il loro fissaggio viene variato a seguito di manutenzione sulla macchina. Anche i supporti e le strutture di fissaggio devono essere sottoposti a ispezione e manutenzione perché i tubi fissati o montati male tendono a vibrare. Per motivi di sicurezza le tubazioni flessibili vanno sostituite ogni due anni di funzionamento anche se esteriormente si presentano intatte, al fine di evitarne la rottura con ovvie conseguenze spiacevoli. I flessibile vanno infine controllati visivamente con grande frequenza per accertarne l'eventuale esistenza di zone usurante.

- Apertura e chiusura valvola di scarico

È necessario verificare la tenuta delle valvole e quindi il mantenimento del vuoto. Nel caso in cui ciò non si dovesse verificare smontare i coperchi posti sotto al cilindro ed estrarre le valvole complete, pulire accuratamente le sedi del cilindro, controllare che la valvola, molla, sede e guida valvola siano in perfetto ordine. Bisognerebbe procedere alla rettifica delle sedi delle valvole e delle valvole ed alla verifica dell'accoppiamento. Inoltre sostituire la guarnizione ingrassandola su entrambi i lati con grasso denso e montare la valvola completa nel suo alloggiamento facendola ruotare il modo da essere sicuri che sia entrata nella sua centratura. La valvola completa rimarrà attaccata nella sua sede; si prenderà allora il coperchio con la relativa guarnizione opportunamente controllata e, tenendo la vite centrale quasi tutta svitata, verrà montato nella sua sede, saranno chiuse le due viti laterali, verrà quindi serrata leggermente la vite centrale, senza esagerare, è bloccata con il controdado.

- Spostamento Cassette Di Aspirazione

Verrà controllato lo stato della rondella di rame e di quella della leva esterna onde evitare l'allentamento del bullone e il conseguente gioco tra leva esterna ed interna che potrebbe comportare delle perdite di tenuta. Sarà verificata l'efficienza dell'anello di tenuta, della guarnizione ed il corretto serraggio della ghiera reggispinta in presenza di perdite di olio ed inoltre sarà controllato l'eventuale gioco della leva interna. Di fondamentale importanza è il controllo, con eventuale sostituzione, se necessario, del gruppo anello di tenuta guarnizioni, che ha il compito di mantenere il vuoto ed impedire la miscelazione del fluido con l'olio, e delle boccole, temprata ed in bronzo, che garantiscono il mantenimento in asse della leva interna e di conseguenza della tenuta. Non si deve trascurare la verifica dell'integrità dei cuscinetti e la loro lubrificazione. Periodicamente verrà tolto il tappo posto nella parte inferiore del coperchio cassetto e scaricato lo sporco accumulato all'interno onde evitare la limitazione di funzionalità della leva interna.

Sistema Pompa per vuoto:
 Livello di dettaglio: Organi di trasmissioni
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3
 Missione: Conversione del moto rotativo in moto alternato

Data:
 Foglio 1 di 6
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ.sup.	Eff. Finali			
2041	Cinghia	Trasmiss. Moto rot.	Slittamento scarsa tensione Lacerazione usura	Collegamento del motore con gli organi di trasmissione	Blocco trasmiss. di moto rot.	Blocco organi di trasmiss.	Fermata pompa	Motore elettrico gira a vuoto Blocco degli organi di trasmissione	Sistema alternativo di trasmiss. Sostituz.	Critica
2042	Volano	Regolarizzazione moto rot. Bilanciam	Spaccature Vibrazioni	Compensa eventuali differenze di vel. Tra motore e albero	Blocco effetto regolarizz.	Blocco organi di trasmiss.	Fermata pompa	Motore elettrico gira a vuoto Emissioni acustiche	Sostituzioni	Critica
2043	Rondella Volano	Bloccaggi o volano	Deformazioni Vibrazioni	Serraggio del volano sull'albero	Slittam. Volano albero	Funziona uniforme trasmiss.	Funziona irregolar pompa	Accentuazioni vibrazioni	Sostituzione	Marginale
2044	Supporto lato volano	Sostegno organi distribuz.	Distacco violento Urti vibrazioni	Sostegno albero a gomito alloggiam. o anello e Cuscinetto, anello tenuta e guarniz.	Allontanament. e	Perdita olio	Grippagg	Perdita olio	Indicatore controllo olio Sostituz.	Critica
2045	Guarnizione di supporto	Tenuta olio	Lacerazione, Invecchiamento Rinsecchimento	Impedisce la fuoriuscita di olio tra supporto e basamento	Perdita olio	Calo livello olio basamento	Maggior consumo olio	Perdita olio	Controllo serraggio parti Sostituzion	Poco importante

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Organi di trasmissione
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3
 Missione: Conversione del moto rotativo in moto alternato

Data:
 Foglio 2 di 6
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ.sup.	Eff. Finali			
2046	Anello di tenuta	Tenuta olio	Deformazione Usura	Impedisce la fuoriuscita di olio tra volano e supporto	Perdita olio	Calo livello olio basament	Maggior consumo olio	Perdita olio	Sostituzion	Marginal
2047	Cuscinetto	Riduzione attrito	Disassamento Usura	Conversione attrito radente in volvente	Aumento attrito	Usura componenti	Gioco albero a gomito	Emissioni acustiche Vibrazioni	Sostituzion	critica
2048	Albero a gomito	Rtrasmiss. Moto	Spaccatura Fatica o difetti materiali	Trasf. Del moto rotatorio in alternato	Blocco trasmiss	Blocco organi di trasmissione	Fermata pompa	Fermata pompa Emissioni acustiche	Sostituzion	critica
2049	Biella	Trasmiss. Moto alternato	Spaccatura Fatica	Collegamento albero a gomito con spinotto	Blocco trasmiss	Fermata pistone	Fermata pompa	Fermata moto alternato e pompa	Sostituzion	critica
2050	Bulloni per Biella	Bloccaggi biella	Spanatura Surriscaldamento o Usura	Bloccaggio biella all'albero a gomito	Blocco trasmiss	Fermata pistone	Fermata pompa	Fermata moto alternato e pompa	Sostituzion	critica
2051	Spessori per biella	Distanziatori	Deformazione Usura	Impedire contatto tra albero a gomito e piede della biella	Aumento del gioco	Dannegg. Biella e albero	Lieve diminuzione corsa pistone	Leggerissimo calo della portata	Controllo serraggio parti	critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Organi di trasmissione
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3
 Missione: Conversione del moto rotativo in moto alternato

Data:
 Foglio 3 di 6
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ.sup.	Eff. Finali			
2052	Testa a croce	Trasmiss. Puro motore alternato	Spaccatura Usura	Conversione moto oscillo-alternato puramente alternato	Blocco trasmiss. moto rot	Fermata pistone	Fermata pompa	Fermata pompa	sostit	Critica
2053	Spinotto	Collegam.	Spaccatura Fatica	Accoppiamento testa biella e sistema testa a croce	Distacco biella testa a croce	Fermata pompa	Blocco pistone	Fermata pompa	sostit	Critica
2054	Vite arresto spinotto	Bloccaggi o spinotto	Taglio Fatica	Impedire lo scorrimento della testa della biella lungo lo spinotto	Distacco testa vite	Emissioni acustiche	Aumento sollecitazione biella	Emissioni acustiche	sostit	Marginale
2055	Controdado	Bloccaggi o asta del pistone	Spanatura Eccessive sollecitazioni alternate	Bloccaggio del collegamento testa a croce e asta del pistone	Allentamento bloccaggio asta	Fermata pompa	Blocco pistone	Fermata pompa	sostit	Critica
2056	Asta per pistone	Trasmiss. Moto	Spaccatura e spanatura fatica	Collegamento tra testa a croce e pistone	Interruzione trasmissione	Emissioni acustiche	Fermata pompa	Emissioni acustiche e fermata pompa	sostit	Critica
2057	Premistoppa	Elemento di spinta	Deformazione Usura	Esercita pressione sulla guarnizione	Perdita olio e pressione	Presenza di alcool nel serbatoio olio	Calo rendimento pompa	Presenza di alcool nel serbatoio olio	Regolazione premistoppa	Critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Organi di trasmissione
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3
 Missione: Conversione del moto rotativo in moto alternato

Data:
 Foglio 4 di 6
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2058	Guarnizione cassa stoppa	Elemento di tenuta	Lacerazione Invecchiamento Rinsecchimento	Impedisce il passaggio dell'olio e depressurizzazione	Perdita olio e pressione	Diminuzione della portata	Calo rendimento pompa	Presenza di alcool nel serbatoio dell'olio	Regolazione e premistoppa	Critica
2059	Prigionieri premistoppa	per Regolazione spinta	Spanatura Usura	Regola la pressione sulla guarnizione cassa stoppa	Allentamento prigioniero	Spostamento premistoppa	Diminuzione tenuta	Perdita olio e pressione	e sostituzione	Marginale
2060	Supporto distribuzione lato	Sostegno organi di distrib.	Distacco Urto violento vibrazione	sostegno albero a gomito, alloggiamento cuscinetto, anello tenuta e guarnizione	Allontanamento anello e guarniz.	Perdita olio	Grippaggio	Perdita olio	Indicatore controllo olio Sostituzione	Critica
2061	Guarnizione supporto lato distribuzione	tenuta olio	Lacerazione Invecchiamento Rinsecchimento	impedisce la fuoriuscita di olio tra il supporto e basamento	Perdita olio	Calo livello olio basamento	Maggior consumo olio	Perdita olio	Controllo serraggio parti Sostituzione	Poco importante
2062	Coperchio per supporto	Copertura sostegno	spaccatura Urto violento	Copre gli organi di trasmissione e sorregge il gruppo per la lubrificazione	Allontanamento gruppo lubrificazione	Interruzione lubrificazione	Grippaggio	Riscaldamento organo trasmissione Fermata pompa	Lubrificazione manuale	Critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Organi di trasmissione
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3
 Missione: Conversione del moto rotativo in moto alternato

Data:
 Foglio 5 di 6
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2063	Cuscinetto	riduzione attrito	disassamento usura	conversione attrito radente in volvente	aumento attrito	usura componenti	gioco albero gomito	emissioni acustiche vibrazioni	sostituz	Critica
2064	anello di tenuta	tenuta olio	deformazione usura	impedisce la fuoriuscita di olio tra albero a gomito e supporto	perdita olio	calo livello olio basamenti	maggior consumo olio	perdita olio	sostituz	Critica
2065	perno comando distribuzione	sostegno trasmissione moto	spaccatura fatica o difetti materiali	allineamento cuscinetto e trasformazione da moto rotatorio in alternato	blocco trasmissione gruppo lubrificaz	blocco cassetto di aspirazione e lubrificazione	grippaggio	formata pompa	sostituz	Critica
2066	Cuscinetto	diminuzione attrito	disassamento usura vibrazioni	conversione attrito radente in volvente	aumento attrito	usura componenti	gioco asta di distribuzione	emissioni acustiche vibrazioni	sostituz	marginale
2067	levetta per pompa olio	collegamento	spaccatura taglio	trasmissione moto all'albero comando pompe	blocco gruppo di lubrificaz	blocco lubrificazione	grippaggio	formata pompa	lubrificazioni e manuale	Critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Organi di trasmissione
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3
 Missione: Conversione del moto rotativo in moto alternato

Data:
 Foglio 6 di 6
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2068	testa tirante sinistra	collegamento	spaccatura fatica vibrazioni	trasmissione moto all'asta di distribuzione	blocco asta di distribuzione	blocco cassetto di aspirazione	perdita funzionalità pompa	asta di distribuzione ferma	sostituz	Critica
2069	asta di distribuzione	trasmissione moto	spaccatura fatica	trasmissione moto alternato dal perno alla leva esterna	blocco trasmiss	blocco cassetto di aspirazione	perdita funzionalità pompa	emissioni acustiche ispezione visiva	sostituz	catastrofica
2070	testa tirante destra	collegamento	spaccatura fatica vibrazioni	trasmissione moto alla leva esterna	blocco leva esterna	blocco cassetto di aspirazione	perdita funzionalità pompa	leva esterna ferma ispezione visiva	sostituz	catastrofica
2071	Cuscinetto	diminuzione attrito	disassamento usura vibrazioni	conversione attrito radente in volvente	aumento attrito	usura componenti	gioco asta di distribuzione	emissioni acustiche vibrazioni	sostituz	marginale

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione con pompa ad ingranaggi
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione biella-albero a gomito e asta pistone

Data:
 Foglio 1 di 5
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2081	flangia per pompa a vuoto	distanziatore a pressione	spaccatura a vibrazioni	collegamento tra gruppo lubrificante e coperchio per supporto	allentamento di bulloni sostegno gruppo pompe	allontanamento di pompe	blocco lubrificazione	grippaggio	lubrificazione e manuale sostituz.	critica
2082	albero di comando	trasmis. Moto	spaccatura usura sollecitazioni torsionali	collegamento levetta per pompa olio con perno di trasmissione	blocco trasmissione	blocco pompe	blocco lubrificazione	grippaggio	sostituz.	critica
2083	perno di trasmissione	collegamento	spanatura torsione spaccatura usura	collegamento albero di comando con pompa ad ingranaggi	blocco trasmissione	blocco pompa ad ingranaggio	blocco lubrificazione biella albero gomito asta pistone	grippaggio	sostituz.	critica
2084	Dado	bloccaggio	spanatura usura	impedisce lo svitamento tra basamento e flangia	possibile allentamento flangia	possibile allentamento pompa ingranaggio	possibile blocco pompa ad	grippaggio	controllo serraggio dado sostituzione	marginale

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione con pompa ad ingranaggi
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione biella-albero a gomito e asta pistone

Data:
 Foglio 2 di 5
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2085	Flangia	distanziatore a pressione	spaccatura a vibrazioni	collegamento tra basamento e pompa ad ingranaggi	allentamento dado	possibile allentamento pompa ingranaggi	possibile blocco pompa ad	grippaggio	sostituz.	marginale
2086	Basamento contenente olio di riciclo	deposito raccogliore	spaccatura urto violento a vibrazioni	consente il recupero dell'olio per la lubrificazione di biella a libero a gomito e asta pistone	perdita olio	blocco lubrificazione	grippaggio	perdita olio	ripulitura livello olio sostituz.	critica
2087	indicatore di livello	controllo	ostruzione olio sporco	indica il livello dell'olio nel basamento	perdita controllo livello olio	condizione insicura lubrificazione	blocco lubrificazione	livello oli fisso	pulizia ripulitura livello olio sostituz.	critica
			frantumato esterno	uso indica il livello dell'olio nel basamento	perdita olio	possibile svuotamento serbatoio olio	blocco lubrificazione	perdita olio	sostituz.	critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione con pompa ad ingranaggi
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione biella-albero a gomito e asta pistone

Data:
 Foglio 3 di 5
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2088	tubazione di aspirazione olio al filtro	convogliamento fluidi	ostruzione olio sporco	trasporto olio dal serbatoio al filtro	blocco convogliamento	blocco aspirazione olio	blocco lubrificazione	grippaggio	sostituz.	critica
			spaccatura esterno	urto trasporto olio dal serbatoio al filtro	blocco convogliamento	perdita olio	svuotamento serbatoio olio	perdita olio	sostituz.	critica
2089	Filtro	pulizia olio	intasamento saturazione di impurità	eliminazione impurità	induzione portata olio	lubrificazione componenti scadente	usura componenti	grippaggio	sostituz.	critica
2090	tubazione di aspirazione olio pompa a ingranaggi	convogliamento fluidi	ostruzione olio sporco	trasporto olio dal filtro alla pompa ad ingranaggi	blocco convogliamento	blocco aspirazione olio	blocco lubrificazione	grippaggio	sostituz.	critica
			spaccatura esterno	urto trasporto olio dal filtro alla pompa ad ingranaggi	blocco convogliamento	perdita olio	svuotamento filtro	perdita olio	sostituz.	critica
2091	Ingranaggi	pomoaggi usura	diminuzione usura	portata erogazione olio per la lubrificazione degli organi di trasmissione	perdita efficienza della pompa	scarsa lubrificazione componenti	usura componenti	grippaggio	sostituz.	critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione con pompa ad ingranaggi
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione biella-albero a gomito e asta pistone

Data:
 Foglio 4 di 5

Compilata da

Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione e Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2092	tubazione mandata olio	convogliamento fluidi	ostruzione olio sporco	trasporto olio dalla pompa agli oliatori	blocco convogliamento			grippaggio	sostituz	critica
			spaccatura esterna	urto dalla pompa agli oliatori	blocco convogliamento	blocco mandata	svuotamento serbatoio olio	perdita olio	sostituz	critica
2093	Distributore olio biella-albero a gomito	lubrificazione	spanatura usura	erogazione costante olio sulla biella e albero a gomito	perdita olio	diminuzione lubrificazione componenti	usura componenti	perdita olio	ispezione flettatura e guarnizione di tenuta	critica
			spaccatura esterna	urto	erogazione costante olio sulla biella e albero a gomito	perdita olio	assenza lubrificazione componenti	grippaggio	perdita olio	sostituz

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione con pompa ad ingranaggi
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione biella-albero a gomito e asta pistone

Data:
 Foglio 5 di 5

Compilata da

Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione e Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2094	oliatore stelo pistone e sistema testa croce	lubrificazione	spanatura usura	erogazione costante olio sullo stelo del pistone e sulla testa a croce	perdita olio	diminuzione lubrificazione componenti	usura componenti	perdita olio	ispezione flettatura e guarnizione di tenuta	critica
			spaccatura esterna	urto	erogazione costante olio sullo stelo del pistone e sulla testa a croce	perdita olio	assenza lubrificazione componenti	grippaggio	perdita olio	sostituz

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: corsa pistone
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3
 Missione: realizzazione della depressione

Data:
 Foglio 1 di 2

Compilata da

Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione e Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2101	dado per pistone	bloccaggio	spanatura eccessivo sforzo	serraggio pistone e asta del pistone	allentamento serraggio	distacco pistone dall'asta del pistone	blocco mandata pompa	emissioni acustiche perdita funzionalità della pompa	sostituz	critica
2102	Pistone	depressione compressione	grippaggio assenza lubrificazione	crea la depressione e la compressione per la mandata	bloccaggio al cilindro	blocco mandata pompa	fermata pompa	fermata pompa	controllo lubrificazione e sostituz	critica
2103	Segmenti	tenuta	spaccatura usura mancanza lubrificazione	impediscono il passaggio del fluido tra le due camere	perdita tenuta	rigatura cilindro	diminuzione portata pompa	calo rendimento pompa possibile grippaggio pompa	sostituz controllo lubrificazione e grippaggio pompa	critica
2104	Cilindro	contenitori e fluidi e pistone	rigatura mancanza olio	delimita la corsa del pistone nelle due fasi	perdita tenuta	diminuzione portata	calo rendimento pompa	grippaggio per riscaldamento parti	sostituz controllo lubrificazione e grippaggio pompa	critica
2105	Guarnizione cilindro	tenuta	lacerazione invecchiamento rinsecchimento	impedisce la perdita di tenuta tra il cilindro e la testa del cilindro	perdita tenuta	diminuzione della pressione e della mandata	calo rendimento pompa	perdita fluido	controllo serraggio parti sostituz	critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: corsa pistone
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5
 Missione: realizzazione della depressione

Data:
 Foglio 2 di 2
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2105	testa cilindro	tenuta e convogliamento	spaccatura urto esterno e interno (pistone dado o segmenti)	delimita la camera del cilindro e il percorso dei fluidi di scarico	scambio fluidi tra cilindro e sede di scarico	cattivo funzionamento	diminuzione della portata	emissioni acustiche tracce di olio negli scarichi perdite di fluidi	sostituz	critica
2107	prigionieri testa cilindro	serraggio	spanatura usura	fissano il cilindro alla testa del cilindro	allentamento testa cilindro	perdita fluido	calo rendimento pompa	perdite di fluido	controllo serraggio e sostituz	critica
2108	fondo cilindro	tenuta e scorrimento	spaccatura urto	delimita la camera del cilindro e la sede di scorrimento dell'asta di pistone	diminuzione della portata	miscelazione fluido olio	cattivo funzionamento	innalzamento livello olio emissioni acustiche	sostituz	critica
2109	Guarnizione cilindro	fondo tenuta	lacerazione invecchiamento rinseccamento	impedisce la perdita di tenuta tra il fondo del cilindro e il basamento	perdita di tenuta	aumento consumo olio	calo livello olio	perdita olio	controllo serraggio parti e sostituz	critica
2110	prigionieri cilindro	serraggio	spanatura usura	fissano il cilindro al fondo del cilindro e al basamento	allentamento del cilindro	perdite fluido e olio	calo rendimento pompa	perdita fluido e olio	controllo serraggio e sostituz	critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione pompa e pistoncini
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione cilindro e cassetto di aspirazione

Data:
 Foglio 1 di 4
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2121	ruota dentata	trasmissione moto	spaccatura usura	trasmette il moto dal rotatorio dall'albero di comando all'albero di distribuzione	blocco trasmissione	blocco lubrificazione	grippaggio	fermata pompa	sostituz lubrificazione e manuale	critica
2122	Chiavetta	essaggio	spaccatura taglio	garantisce trasmissione tra la ruota dentata e l'albero di distribuzione	blocco trasmissione	blocco lubrificazione	grippaggio	fermata pompa	sostituz lubrificazione e manuale	critica
2123	albero di distribuzione	trasmissione moto	spaccatura torsione	trasmette il moto dalla ruota dentata alla camma a disco	blocco trasmissione	blocco disco	camma lubrificazione	fermata pompa	sostituz lubrificazione e manuale	critica
2124	Corpo pompa	alloggiamento	spaccatura urto esterno	racchiude in esso tutti i componenti della pompa	perdita olio	fermo pompa a pistoncini	blocco lubrificazione	grippaggio perdite olio	e sostituz	critica
2125	molla per attivazione comando manuale	sostanzamento albero di distribuzione	perdita di elasticità invecchiamento	permette l'attivazione del comando manuale	disinserimento trasmissione	blocco pompa a pistoncini	blocco lubrificazione	grippaggio	sostituz	critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione
 pompa e pistoncini
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3,
 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione cilindro e cassetto di aspirazione

Data:
 Foglio 2 di 4
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione e Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2126	Manovella per lubrificazione manuale	emergenza	spaccatura parte della trasmissione usura	garantisce la trasmissione d'emergenza per la lubrificazione	la gira a vuoto	blocco trasmissione	blocco lubrificazione manuale	grattamento a vuoto manovella	sostituz	marginale
2127	camma a disco per azionamento pistoncini	comando vite di regolazione	consumo usura	determina il moto alternato dei pistoncini pompanti	riduzione alzata vite regolazione	riduzione efficienza pompa a pistoncini	diminuzione lubrificazione	eccessivo riscaldamento del cilindro	intervento sulla vite di regolazione	marginale
2128	pistoncini pompanti	pompaggio	spaccatura usura	determina la mandata dell'olio per la lubrificazione	blocco pistoncino	blocco pompaggio	grippaggio	fermata pompa	sostituz	critica
2129	vite per regolazione	regolazione	spanatura usura	regola l'alzata del pistoncino e quindi la portata	allentamento vite	perdita capacità di regolazione	cattivo funzionamento pompa	eccessivo riscaldamento del cilindro	sostituz intervenire sulla vite di regolazione	marginale
2130	serbatoio olio nuovo	contenitore	spaccatura esterno	recipiente olio nuovo per lubrificazione con pompa a pistoncini	perdita olio	blocco mandata pompa a pistoncini	blocco lubrificazione	perdita olio	riparare e verificare il livello dell'olio	critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione
 pompa e pistoncini
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3,
 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione cilindro e cassetto di aspirazione

Data:
 Foglio 3 di 4
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione e Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2131	Tubazione aspirazione pompa a pistoncini	convogliamento fluidi	spaccatura esterno	urto trasporto olio dal serbatoio alla pompa a pistoncini	blocco convogliamento	blocco mandata pompa a pistoncini	blocco lubrificazione	grippaggio	sostituz	critica
2132	tubazione mandata olio	convogliamento fluidi	spaccatura esterno	urto trasporto olio dalla pompa a pistoncini agli oliatori	blocco convogliamento	perdita olio	svuotamento serbatoio olio	perdita olio	sostituz	critica
2133	Lubrificatore boccola leva interna	lubrificazione	spanatura usura	erogazione costante olio sulla boccola	perdita olio	diminuzione lubrificazione componenti	usura componenti	perdita olio	ispezione flettatura e guarnizioni di tenuta	critica
			spaccatura esterno	urto erogazione costante olio sulla boccola	perdita olio	assenza lubrificazione componenti	aumento attriti negli organi del cassetto	perdita olio	sostituz	critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione
 pompa e pistoncini
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3,
 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione cilindro e cassetto di aspirazione

Data:
 Foglio 4 di 4
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione e Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità	
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali				
2134	oliatore cassetto	lubrificazione	spanatura usura	diminuzione attrito cassetto sul cilindro	del	perdita olio	diminuzione lubrificazione cassetto	usura cassetto	perdita olio	ispezione flettatura e guarnizioni di tenuta	critica
			spaccatura esterno	urto diminuzione attrito cassetto sul cilindro	del	perdita olio	assenza lubrificazione cassetto	maggior usura cassetto	perdita olio	sostituz	critica
2135	oliatore cilindro	lubrificazione	spanatura usura	diminuzione attrito pistone e cilindro	tra	perdita olio	diminuzione lubrificazione componenti	usura componenti	perdita olio	ispezione flettatura e guarnizioni di tenuta	critica
			spaccatura esterno	urto diminuzione attrito pistone e cilindro	tra	perdita olio	assenza lubrificazione componenti	grippaggio	perdita olio	sostituz	critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: spostamento cassetto di lubrificazione
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3
 Missione: consentire l'aspirazione del fluido ed il riempimento del cilindro

Data:
 Foglio 1 di 4
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione e Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità	
					Eff. Locali	Liv. Succ.sup.	Eff. Finali				
2161	perno per leva esterna	collegamento	spaccatura taglio	trasmissione all'asta di distribuzione alla leva esterna	moto trasmissione	blocco trasmissione	blocco cassetto	perdita funzionalità pompa	emissioni acustiche ispezione visiva	sostituz	catastrofica
2162	leva esterna	trasmissione	spaccatura fatica	trasmissione all'asta di distribuzione alla leva interna	moto trasmissione	blocco trasmissione	blocco cassetto	perdita funzionalità pompa	emissioni acustiche ispezione visiva	sostituz	catastrofica
2163	rondella di rame	tenuta	deformazione usura	impedisce la fuoriuscita di olio tra leva esterna ed interna		perdita olio	allentamento dado	allentamento leva esterna	gioco leva esterna	controllo serraggio dado sostituz	marginale
2134	rondella leva esterna	bloccaggio	deformazione usura	garantisce il serraggio tra leva esterna e i dado		allentamento dado	perdita olio	allentamento leva esterna	gioco leva esterna	controllo serraggio dado sostituz	marginale
2165	anello di tenuta	tenuta olio	deformazione usura	impedisce la fuoriuscita del olio tra la leva esterna e la ghiera reggispira		perdita olio	diminuzione lubrificazione	usura componenti (cuscin.)	perdita olio	sostituz	marginale

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: spostamento cassetto di lubrificazione
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3
 Missione: consentire l'aspirazione del fluido ed il riempimento del cilindro

Data:
 Foglio 2 di 4
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione e Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ.sup.	Eff. Finali			
2166	ghiera reggispira	sostegno	spanatura allentamento vibrazioni	sostiene tramite ghiera la leva interna	allontanamento	allontanamento leva interna	diminuzione aderenza cassetto cilindro	emissioni acustiche perdita olio perdita tenuta olio	controllo serraggio ghiera sostituz	critica
2167	Cuscinetto	diminuzione attrito	disassamento usura	diminuisce l'attrito mantiene in asse la leva interna e ne impedisce lo scorrimento	disassamento	usura componenti e perdita tenuta vuoto	perdita olio	gioco leva esterna tenuta vuoto	sostituz	critica
2168	Guarnizione	tenuta fluido	lacerazione invecchiamento rimseccamento	impedisce lo scorrimento del fluido	scambio di fluidi e perdita al vuoto	presenza di olio nel fluido di aspirazione	probabil. Perdite fluido esterna	presenza di olio nello scarico perdita tenuta vuoto	sostituz	marginale
2169	anello di tenuta	tenuta	deformazione usura	impedisce lo scambio fluido olio	scambio di fluidi e perdita al vuoto	presenza di olio nel fluido di aspirazione	probabil. Perdite fluido esterna	presenza di olio nello scarico perdita tenuta vuoto	sostituz	marginale

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione pompa e pistoncini
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3, 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione cilindro e cassetto di aspirazione

Data:
 Foglio 3 di 4
 Compilata da
 Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto e cause	Fase della missione e Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ.sup.	Eff. Finali			
2170	anello di centraggio	centraggio	deformazione usura	garantisce il corretto fissaggio del coperchio cassetto per assicurare la giusta posizione della leva interna	errato montaggio coperchio cassetto	alloggiamento errato leva interna	usura componenti	rapido degrado componenti interni	sostituz	critica
2171	boccola in bronzo	protezione e diminz. Attrito	assottigliamento usura	impedisce l'usura della sede del perno della leva interna	disassamento	usura componenti	perdita aderenza cassetto	gioco leva esterna diminuzione portata	sostituz	critica
2172	boccola temperata	protezione e diminz. Attrito	assottigliamento usura	impedisce l'usura della sede del perno della leva interna	disassamento	usura componenti	perdita aderenza cassetto	gioco leva esterna diminuzione portata	sostituz	critica
2173	leva interna	trasmss. Moto	spaccatura sollecitazioni torsionali e flessionali	trasmissione moto della leva esterna al cassetto	blocco trasmissione	blocco cassetto	perdita funzionalità pompa	blocco mandata	sostituz	critica
2174	molla per cassetto	compressione	perdita di elasticità invecchiamento	mantiene il cassetto aderente al cilindro	perdita di elasticità invecchiamento	parziale ritorno di aspirazione	diminuzione portata pompa	diminzione rendimento pompa	sostituz	marginale

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: Lubrificazione
 pompa e pistoncini
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.3,
 3.4.4, 3.4.5
 Missione: Lubrificazione cilindro e cassetto di aspirazione

Data:
 Foglio 4 di 4

Compilata da

Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2175	cassetto di aspirazione	controllo aspirazione	consumo usura	consente con il suo moto l'alternarsi dell'apertura e chiusura dell'aspirazione	perdita aderenza cassetto	parziale ritorno del fluido di aspirazione	diminuzione portata pompa	diminuzione rendimento pompa	sostituz	poco importante
2176	coperchio cassetto	sostegno sede aspirazione	spaccatura esterno o interno	alloggiamento organi di trasmissione e convogliamento trasmissione	perdita fluidi	perdita aspirazione	calo rendimento pompa	perdita fluidi	sostituz	critica
2177	Guarnizione coperchio cassetto	tenuta	lacerazione invecchiamento	garantisce la tenuta del coperchio cassetto	perdita di aspirazione	perdita fluidi	calo rendimento pompa	perdita fluidi	controllo serraggio coperchio sostituz	marginale
2178	Prigionieri coperchio cassetto	serraggio	spanatura usura	fissano il coperchio cassetto al cilindro	allentamento coperchio	perdita aspirazione	disassamento organi di trasmissione	gioco coperchio perdita fluidi	controllo serraggio sostituz	marginale

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: apertura e chiusura valvola di scarico
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1,
 3.4.2, 3.4.3
 Missione: consentire l'uscita del fluido dal cilindro

Data:
 Foglio 1 di 2

Compilata da

Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2151	sede valvola	collegamento	deformazione errato	garantisce il perfetto alloggiamento della valvola del cilindro	sfiliato valvola	diminuzione portata pompa	calo rendimento pompa	calo rendimento pompa	controllo assemblaggio sostituz	critica
2152	Guarnizione	tenuta	lacerazione invecchiamento	elemento di tenuta tra la sede della valvola e il cilindro	perdita di tenuta	diminuzione portata pompa	calo rendimento pompa	calo rendimento pompa	controllo serraggio coperchio valvola sostituz	critica
2153	Valvola	controllo scarico	deformazione lacerazione usura	spostandosi permette l'uscita del fluido	la valvola non chiude	diminuzione portata pompa	calo rendimento pompa	sostituz	sostituz	critica
2154	Molla	compressione	perdita di elasticità invecchiamento	spostandosi permette l'uscita del fluido e ritornando in posizione garantisce la chiusura della valvola	la valvola non chiude	diminuzione portata pompa	calo rendimento pompa	sostituz	sostituz	critica

Sistema: Pompa per vuoto
 Livello di dettaglio: apertura e chiusura valvola di scarico
 Disegni di riferimento: Figure 3.4.1,
 3.4.2, 3.4.3
 Missione: consentire l'uscita del fluido dal cilindro

Data:
 Foglio 2 di 2

Compilata da

Approvata da

Numero di identific.	Componente/Identific. Funzionale nomenclatura	Funzione	Modi di guasto cause	Fase della missione Modi di operare	Effetti del guasto			Metodo di ident. del guasto	Provvedim. Compensat.	Classe di gravità
					Eff. Locali	Liv. Succ. sup.	Eff. Finali			
2155	guida valvola	alloggiamento	spaccatura montaggio errato	alloggiamento prigioniero e valvola	cattivo funzionamento valvola	possibile influenza negativa sulla sede	possibile distacco corpo valvola	emissioni acustiche calo rendimento pompa	sostituz	critica
2156	Prigioniero	serraggio	spanatura usura	fissano la guida valvola alla sede valvola e comprimono la molla	allentamento guida valvola	allentamento guida valvola	cattivo funzionamento componenti valvola	emissioni acustiche	sostituz	critica
2157	Guarnizione coperchio valvola	tenuta fluido	lacerazione invecchiamento	impedisce la fuoriuscita del fluido tra cilindro e coperchio valvola	perdita di fluido	diminuzione portata pompa	calo rendimento pompa	perdita fluido	controllo serraggio sostituz	marginale
2158	coperchio valvola	sostegno contenitore	spaccatura eccessivo serraggio urto esterno	sostiene la guida valvola	perdita di fluido	diminuzione portata pompa	calo rendimento pompa	notevole perdita fluido	sostituz	critica

4. IL TOTAL QUALITY PROJECT

4.1. MOTIVAZIONI

Se lo sviluppo dei prodotti è pilotato dalla voce degli ingegneri e dei dirigenti, non da quella dei clienti, occorre cambiare il tipo di approccio, dal momento che, come abbiamo visto nei capitoli precedenti, bisogna far precedere sempre le esigenze del cliente. Venendo meno a questo principio numerose inefficienze emergono sia nello sviluppo dei prodotti che nella produzione. Le prime comprendono:

- la perdita di vista del cliente;
- problemi nella programmazione temporale del prodotto;
- risorse inadeguate;
- uso improprio delle prove sul prodotto;
- progetto nuovo ma non migliore;
- problemi per le modifiche di progetto;
- confinamento delle attività di progetto;
- progettare e costruire entro tolleranze di specifica anziché sui valori d'obiettivo;

- considerazione inadeguata delle necessità di chi produce;
- ottimizzazioni troppo precarie.

Le seconde includono:

- processi produttivi inefficienti;
- inventività eccessiva;
- costi aggiuntivi per migliorare la qualità;
- dipendenza da procedure sensibili al comportamento dell'operatore.

Per far fronte a tutte queste esigenze ed evitare di incorrere negli errori sopra descritti è possibile investire “in prevenzione”, cioè in un’attenta fase di pianificazione degli interventi da operare in fase di progettazione con il supporto integrato di una serie di strumenti operati come quelli analizzati nei capitoli precedenti. Il tutto dovrà essere coordinato da un team interfunzionale. Vediamo più in dettaglio di capire la procedura di approccio alle problematiche in fase di progettazione del TQP (Total Quality Project) e ancora meglio da chi è costituito il gruppo di lavoro ed i principi che ne sono alla base [74].

4.2. DESCRIZIONE

Il Total Quality Project è applicato da un gruppo di lavoro interfunzionale costituito dalle seguenti figure:

- Marketing/vendite
- Progettazione
- Industrializzazione
- Acquisti

- Produzione
- Assistenza tecnica
- Qualità

L'esperienza inoltre suggerisce di far partecipare al gruppo i fornitori dei componenti ritenuti di particolare importanza per il completamento del prodotto. Altre regole di cui bisogna tenere conto nella costituzione del gruppo sono:

- limitare il più possibile il numero dei partecipanti pur consentendo una rappresentanza per tutte le funzioni precedentemente richieste ed ove fosse possibile del cliente

- La partecipazione di ogni membro al gruppo deve essere condivisa dagli altri componenti

- Il team leader deve esercitare potere decisionale attraverso la "leadership" e non per "comando"

- I membri devono essere collocati fisicamente vicini in modo tale da facilitare la comunicazione tra le funzioni e conseguentemente:

- Favorire la comprensione delle esigenze del cliente
- La comprensione dei processi produttivi
- Lo sviluppo di relazioni informali
- L'assunzione delle decisioni

5.2.1 IL RUOLO DEL TQP

Il TQP garantisce una piena coerenza tra la progettazione del prodotto e quella del processo di produzione facilitando l'integrazione tra le diverse funzioni del prodotto, evidenziandone le iterazioni e i mutui condizionamenti.

Infatti integra il processo attraverso cui si trasferiscono le esigenze del cliente alle specifiche tecniche relative a ciascuno stadio dello sviluppo del prodotto fornendo una scala di priorità per le caratteristiche del prodotto e per quelle del processo produttivo ed evidenziando le aree che richiedono ulteriori analisi [75].

Il TQP, attraverso un attento impiego delle tecniche precedentemente studiate per l'ottimizzazione delle diverse fasi della progettazione, sfrutta il QFD per analizzare le esigenze dei clienti, trasferirle al prodotto e generare nel contempo un meccanismo di retroazione positiva atto ad identificare quali strumenti d'analisi è meglio usare durante il ciclo di sviluppo del prodotto e, documentandone l'utilizzo, ne fissa le conoscenze secondo lo schema riportato in figura (Figura 74).

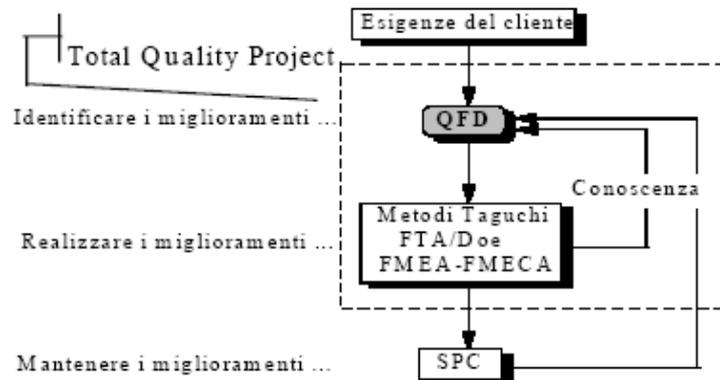


Figura 74 – Strumenti di analisi del TQP

Per poter affrontare i diversi problemi in maniera sistemica, il TQP cambia completamente l'approccio per lo sviluppo di un nuovo prodotto. Infatti il tradizionale sviluppo sequenziale di figura 75 viene sostituito dallo schema riportato in figura 76. Come è facilmente comprensibile, tutte le fasi iniziali vengono svolte simultaneamente secondo una metodologia già collaudata nel *Concurrent Engineering*.

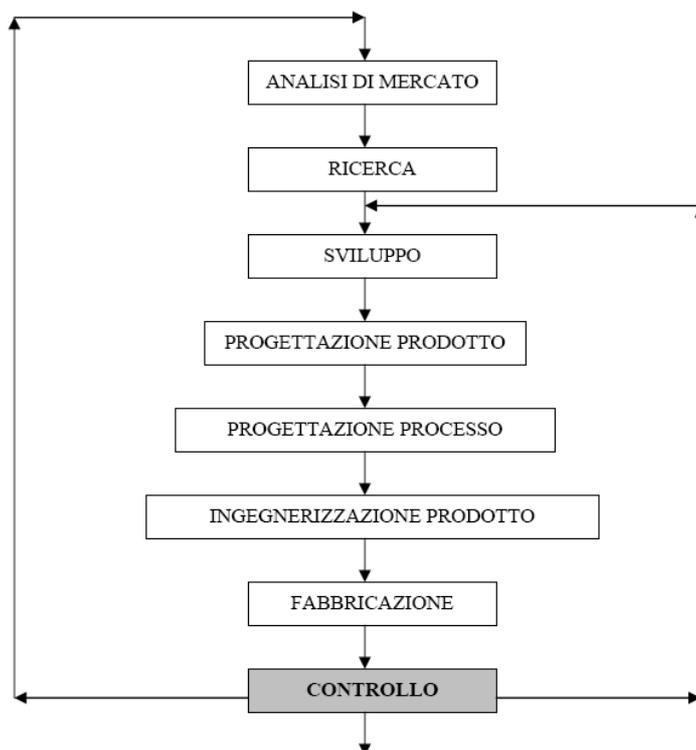


Figura 75 – Schema tradizionale

In questo modo vengono fornite semplici soluzioni a due annosi problemi della produzione tradizionale:

1. la suddivisione in dipartimenti;
2. la serializzazione temporale delle attività.

E' evidente che tali vantaggi possono essere conseguiti solo con un continuo ed affiatato lavoro di gruppo e cooperazione. Il TQP diventa allora un meccanismo per la comunicazione tra le varie aree che lavorano sul progetto. Con questo approccio i gruppi di lavoro sono più partecipi e critici.

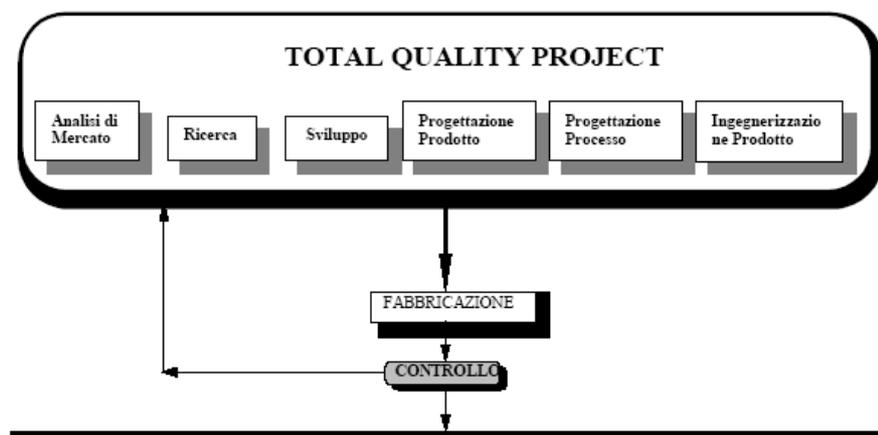


Figura 76 – Schema d’approccio secondo la TQP

I benefici a breve termine consentiti dal TQP comprendono:

- cicli di sviluppo dei prodotti più brevi;
- meno modifiche di progetto;
- meno problemi di avviamento;
- qualità ed affidabilità migliorate;
- risparmi dall’ottimizzazione del progetto del prodotto e del processo.

Lo “schema di funzionamento” del TQP mette in evidenza come il ruolo del QFD sia essenziale dal momento che mediante un corretto impiego del *Quality Function Deployment* è possibile creare una solida base di conoscenze progettuali. Dopo aver svolto con successo un’applicazione di questa metodologia, la base di conoscenze creata diventa un deposito d’informazioni tecniche d’estrema rilevanza. Le tabelle ed i documenti, preparati durante lo svolgimento del QFD, costituiscono una documentazione di lavoro alla quale è facile riferirsi e dalla quale si possono trarre spunti interessanti per i nuovi

progetti. Essa infatti illustra quali decisioni sono state prese e perché; quindi si semplificano le situazioni decisionali simili. Inoltre tale base aiuta a prevenire che i problemi che si sono presentati si ripresentino. Naturalmente il solo impiego del QFD non è esaustivo, anzi la sua applicazione non deve essere lasciata al caso, ma deve essere introdotto solo in particolari fasi del processo di progettazione opportunamente individuate dal TQP. Per meglio comprendere questo punto è indispensabile, in primo luogo, analizzare in dettaglio l'evoluzione dello sviluppo di un nuovo progetto [76].

4.3. LE FASI DELLA PROGETTAZIONE

I principi guida del TQP sono:

- individuare nella soddisfazione del cliente il parametro di misura della qualità del progetto finale
- integrare tutti gli elementi associati all'interno del ciclo di vita del prodotto già nelle prime fasi di sviluppo (fase di fattibilità e progetto preliminare)
- selezionare e coinvolgere sin dalle prime fasi i fornitori delle parti più importanti del prodotto finale
- iniziare il progetto di dettaglio solo dopo che sono stati definiti, specificati ed integrati nel progetto tutti gli elementi del ciclo di vita del prodotto
- sviluppare il progetto con il contributo di tutte le funzioni aziendali coinvolte nel ciclo di vita del prodotto e, se possibile, anche con l'utilizzatore finale
- introdurre per ogni funzione il diritto di veto su scelte di progetto, subordinandolo alla proposta di alternative fattibili ed efficaci

- migliorare in modo continuo il processo di sviluppo nei nuovi prodotti.

4.4. LA STRUTTURA DI SUPPORTO DEL TQP

La complessità crescente dei prodotti moderni, o meglio delle esigenze dei consumatori o utilizzatori, richiede un nuovo approccio al loro sviluppo. Questo non solo per quanto concerne la dimensione temporale del problema, ma anche e soprattutto per quella qualitativa riguardante la completa soddisfazione delle esigenze del cliente. Ben diverso è infatti pensare un prodotto per un mercato nuovo e in crescita, come potrebbe essere oggi quello dei paesi dell'Est-Europa, in cui il problema principale è la disponibilità del bene, dal pensarlo per dei mercati saturi, come sono oggi quelli dell'Europa occidentale, degli Stati Uniti e del Giappone. Il concetto stesso di prodotto in questi mercati si è modificato mettendo insieme aspetti riguardanti i costi, il servizio, l'innovazione dell'immagine di chi lo propone. Sorge quindi la fondamentale esigenza di accorciare il più possibile la distanza fra chi pensa, disegna, produce e distribuisce il prodotto e chi lo acquista e utilizza. Essa è inoltre tanto più marcata quanto più grande è la dimensione dell'azienda. L'artigiano non ha questa esigenza: è lui stesso che prende contatto con il cliente rilevandone le necessità, che progetta il prodotto, acquista i materiali da utilizzare, lo costruisce, lo consegna e assiste il cliente nell'utilizzo. Il problema nasce quando, aumentando le dimensioni dell'azienda, persone diverse incominciano a dividersi il lavoro relativo alla concezione, alla produzione, alle vendite all'assistenza del prodotto. La necessità, inoltre, di competenze specialistiche di tipo funzionale tende a innalzare delle barriere di tipo culturale e di linguaggio all'interno dell'organizzazione aziendale. L'approccio di gruppo, che abbate le barriere funzionali e porta a conoscenza di tutti le reali esigenze del cliente finale che utilizza il prodotto, diventa quindi una strada obbligata per le aziende che vogliono mantenere una posizione di rilievo. Esso viene chiamato indifferentemente *Ingrated Product Develepment* (IDP) o *Total Quality Project* (TQP). In definitiva potremo definire il TQP nel seguente modo: il *Total Quality Project* è un approccio sistematico allo sviluppo congiunto del prodotto, del processo di produzione e del supporto logistico occorrente per mantenerlo

operativo. L'obiettivo di questo approccio è di far considerare, fin dalle prime fasi, dello sviluppo tutti gli elementi del ciclo di vita del prodotto, dalla sua concezione fino alla sua alienazione, compresi qualità, costi, programmi di produzione e requisiti dell'utente. Il *Total Quality Project* segue alcuni principi guida:

- Porre la soddisfazione del cliente come misura finale della qualità del progetto
- Integrare tutti gli elementi associati all'interno ciclo di vita del prodotto nelle prime fasi di sviluppo
- Iniziare il progetto di dettaglio solo dopo che sono stati definiti, specificati e integrati nel progetto tutti gli elementi del ciclo di vita del prodotto
- Selezionare e coinvolgere fin dalle prime fasi i fornitori delle parti più importanti del prodotto
- Sviluppare il progetto con il contributo di tutte le funzioni aziendali coinvolte nel ciclo della vita del prodotto e se possibile, anche con l'utilizzatore finale
- Introdurre per ogni funzione diritto di veto su scelte di progetto, subordinandolo alla proposta di alternative fattibili ed efficaci
- Migliorare in modo continuo il processo di sviluppo nei nuovi prodotti.

La struttura fondamentale del TQP si basa essenzialmente su quattro elementi:

- l'organizzazione
- la gestione
- le tecniche

- gli strumenti di supporto.

Il ruolo dell'organizzazione è quello di:

- attivare fin dalle prime fasi le considerazioni riguardanti tutto il ciclo di vita del prodotto
- favorire la diffusione delle informazioni a tutte le funzioni interessate
- risolvere i conflitti migliorando la progettazione del prodotto e del processo.

Il ruolo della gestione è quello di coordinare le attività e le risorse coinvolte.

Il ruolo delle tecniche è quello di fornire approcci di progettazione orientati alla considerazione anticipata di tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto.

Il ruolo degli strumenti è quello di supportare l'organizzazione, la gestione e l'impiego delle tecniche.

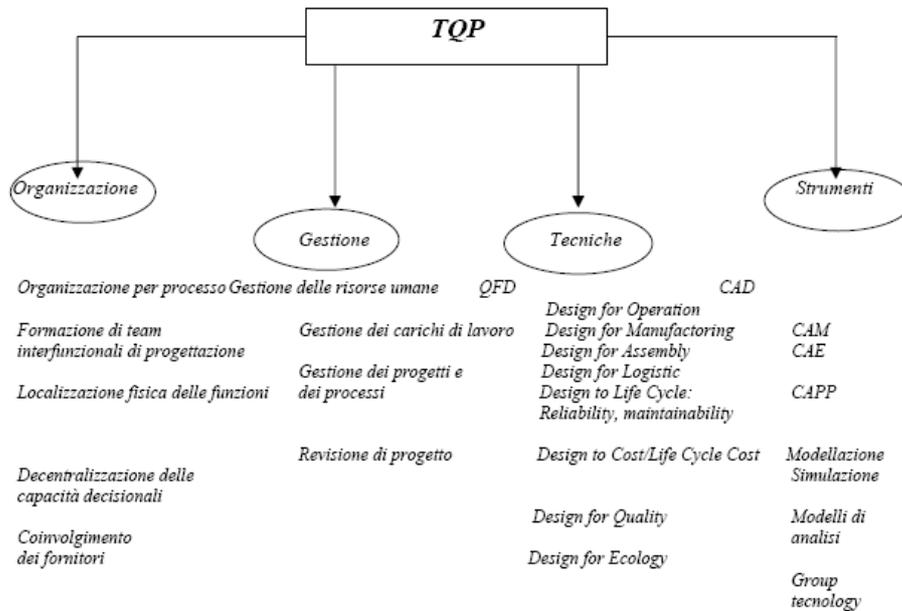


Figura 77 – Strumenti del TQP

4.5. L'ORGANIZZAZIONE

4.5.1. LA STRUTTURA ORGANIZZATIVA

La struttura organizzativa gioca un ruolo importante nel processo di sviluppo di un prodotto. Essa condiziona infatti pesantemente l'impegno, la comunicazione e i processi decisionali. Per quanto concerne l'impegno, negli approcci tradizionali, il contributo allo sviluppo di un prodotto è normalmente una delle tante attività che un responsabile funzionale e le sue linee operative devono affrontare quotidianamente. I problemi che sorgono in quest'ambito non appaiono di solito urgenti e sono considerati rimandabili nel tempo, si ritiene che i problemi da affrontare subito siano quelli che derivano dalle attività quotidiane dell'azienda. Spesso, inoltre, le persone non sono nemmeno informate su quali siano gli obiettivi e le tempistiche del lancio sul mercato dei nuovi prodotti. Per

quanto concerne invece la comunicazione ed i processi decisionali, le normali procedure aziendali, basate su invii da un funzione all'altra di comunicazioni, note, relazioni ecc, contribuiscono inevitabilmente ad allungare i tempi del processo. Le scelte organizzative devono quindi favorire sia la focalizzazione dell'impegno di una funzione su obiettivi di prodotto, di tempi e di costi, sia la comunicazione rapida ed informale, amministrando le informazioni necessarie all'assunzione di decisioni. Ogni schema organizzativo rappresenta una modellazione imperfetta ed incompleta delle relazioni formali intercorrenti tra le funzioni rappresentate.

Le relazioni informali che fanno vivere l'azienda ogni giorno non compaiono negli organigrammi. Questi infatti evidenziano unicamente la natura dell'autorità delegata ai vari livelli organizzativi. Ciò che distingue l'organizzazione orientata alla riduzione dei tempi di sviluppo da quelle tradizionali è:

- l'orientamento al processo

- il rapporto tra l'autorità delegata a responsabile del gruppo di progetto e quella conferita ai responsabili funzionali per quanto concerne la gestione delle risorse e le decisioni riguardanti il prodotto;

- le relazioni e il modo di interagire tra i componenti del gruppo di progetto.

Tutti i modelli organizzativi del TQP tendono ad introdurre nella tradizionale struttura di tipo funzionale un presidio di processo. Ciò avviene con modalità diverse che possono essere schematizzate secondo tre tipologie. Una prima fase organizzativa che ha un team leader di basso peso (figura 78), che delega una responsabilità di semplice coordinamento delle attività e delle risorse ad una persona che occupa una posizione gerarchica di più basso livello rispetto ai responsabili di funzione. I partecipanti al progetto rispondono ai responsabili di funzione che provvedono a riassegnare le risorse a seconda delle necessità. Questo modello organizzativo, largamente diffuso nelle aziende occidentali, costituisce normalmente il primo tentativo verso l'integrazione interfunzionale.

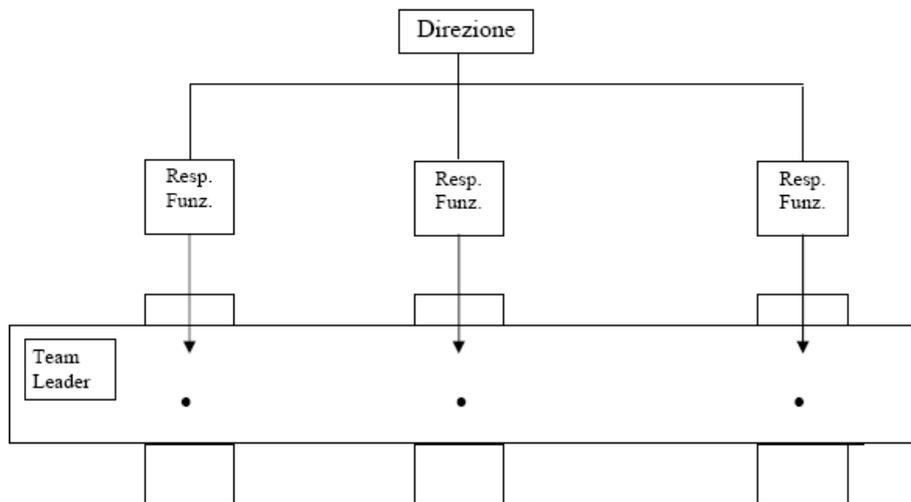


Figura 78 – Schema d’approccio tradizionale

La sua debolezza deriva dal fatto che il team leader non ha un potere reale e può soltanto coordinare piani di attività decisi da altri che, gestendo risorse di area funzionale, hanno necessariamente obiettivi diversi [76]. I responsabili funzionali sono di fatto responsabili anche dello sviluppo del prodotto ed il team leader si limita a supportarli favorendo la comunicazione, la progettazione ed il controllo delle attività. Il pericolo maggiore che si corre adottando questo tipo di organizzazione è di sopravvalutarne le potenzialità pensando di avere a disposizione un vero gruppo di progetto. In realtà, il più delle volte l’attività di coordinamento svolta dal team leader favorisce la comunicazione, ma incrementa anche il livello di burocrazia esistente in azienda. Percepiti i limiti del primo tipo di struttura, molte aziende provvedono a rinforzarla scegliendo un team leader di posizione gerarchica pari a quella dei responsabili funzionali. Questo modello organizzativo corrisponde sostanzialmente alla tradizionale organizzazione a matrice con cui si ricerca un bilanciamento tra l’autorità della funzione ed il potere delegato al Team Leader. Al suo interno le soluzioni possono essere diverse. Il rischio da evitare è soprattutto quello di non definire

in modo preciso e chiaro i tipi di responsabilità. Normalmente al team leader viene delegato il controllo delle attività e dei tempi legati al prodotto in fase di sviluppo e, ai capi funzionali, responsabilità di tipo tecnico quali, per esempio, la scelta della metodologia e degli standard da utilizzare. In linea teorica le forme organizzative in cui le responsabilità vengono bilanciate tra più parti rappresentano un buon modello. E' tuttavia sul terreno operativo, dove è estremamente difficile tracciarne in modo preciso i confini delle responsabilità, che nascono i problemi. Il superamento di questo modello si ottiene scegliendo un team leader di livello gerarchico superiore a quello dei responsabili funzionali (figura 79). Al team leader viene assegnato il completo controllo del progetto e delle risorse umane coinvolte. I responsabili funzionali svolgono compiti amministrativi nei confronti del personale facente parte del gruppo di progetto. Una volta concluso il progetto la responsabilità totale delle risorse umane ritorna alle funzioni. Questo tipo di organizzazione, concentrando l'autorità completa per tutti gli aspetti riguardanti lo sviluppo del prodotto nella figura del team leader, supera le possibili ambiguità insite nel modello a matrice. La coerenza professionale e specialistica è assicurata dall'apparenza amministrativa dei componenti del gruppo di progetto ad un'area funzionale. Questi inoltre, a fine progetto, tornano a dipendere completamente dal loro capo funzione. Il terzo modello organizzativo di riferimento per il Total Quality Project è il cosiddetto *Tiger Team* (figura 80).

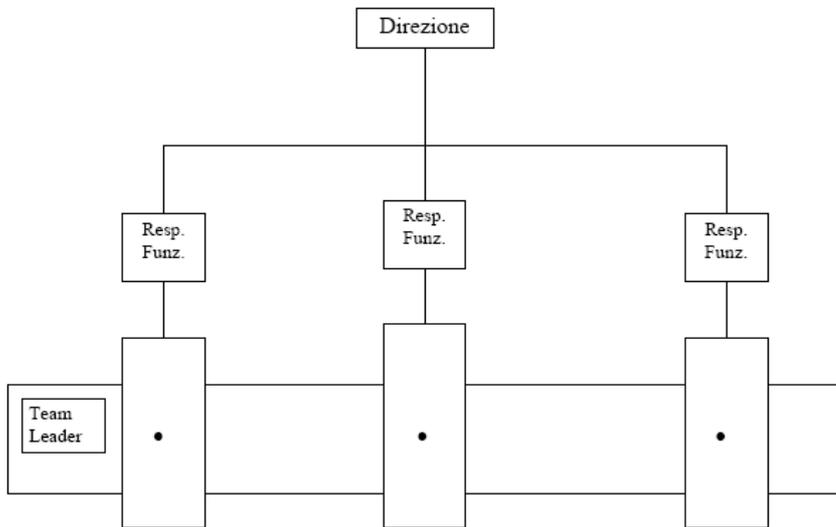


Figura 79 – Schema d’approccio con team leader gerarchico

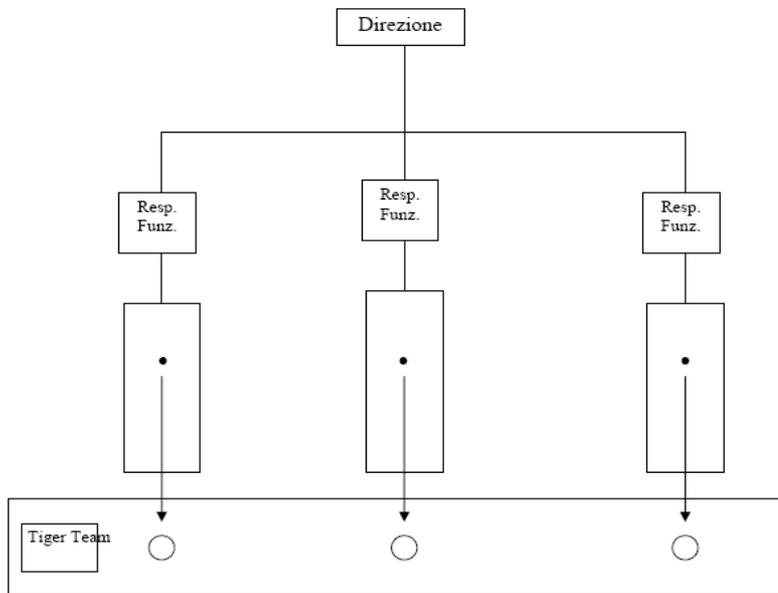


Figura 80 – Schema d’approccio TQP con il Tiger Team

Si tratta, senza dubbio, del modello più efficace per ridurre i tempi di sviluppo dei nuovi prodotti. Esso prevede la completa indipendenza del gruppo di progetto dalla struttura gerarchica aziendale. I componenti del gruppo, spesso, vengono collocati in un'area specificatamente dedicata al progetto. Il gruppo rimane in vita fino al completamento del progetto. Questo approccio è sicuramente quello che maggiormente riesce a coordinare e gestire i problemi del gruppo di progetto ed è pertanto il modello di riferimento più interessante per il TQP. Tuttavia una modifica essenziale, emersa dagli studi compiuti su diversi gruppi di lavoro, è quella di far in modo che il team leader sia di "peso elevato" in modo da evitare che nascano conflitti nella struttura aziendale che potrebbe vedere il *tiger team* come un gruppo di élite. Non solo la presenza di un'autorità forte, rispetto al tradizionale *tiger team*, consentirebbe un monitoraggio delle attività del gruppo da parte della direzione. La presenza di una funzione di spicco nel gruppo faciliterebbe invece il continuo collegamento tra il progetto sviluppato dal gruppo e le richieste dell'alta direzione [77].

4.5.2. SVILUPPO DEI NUOVI PRODOTTI

Le varie strutture organizzative adottate dalle aziende per applicare i principi del *Total Quality Project* sono emblematiche del cambiamento in corso. In particolare, lo è il passaggio da un'ottica di tipo funzionale, in cui le ottimizzazioni vengono ricercate a livello di specializzazione, a un'ottica di processo (figura 81) in cui viene ricercata un'ottimizzazione globale.

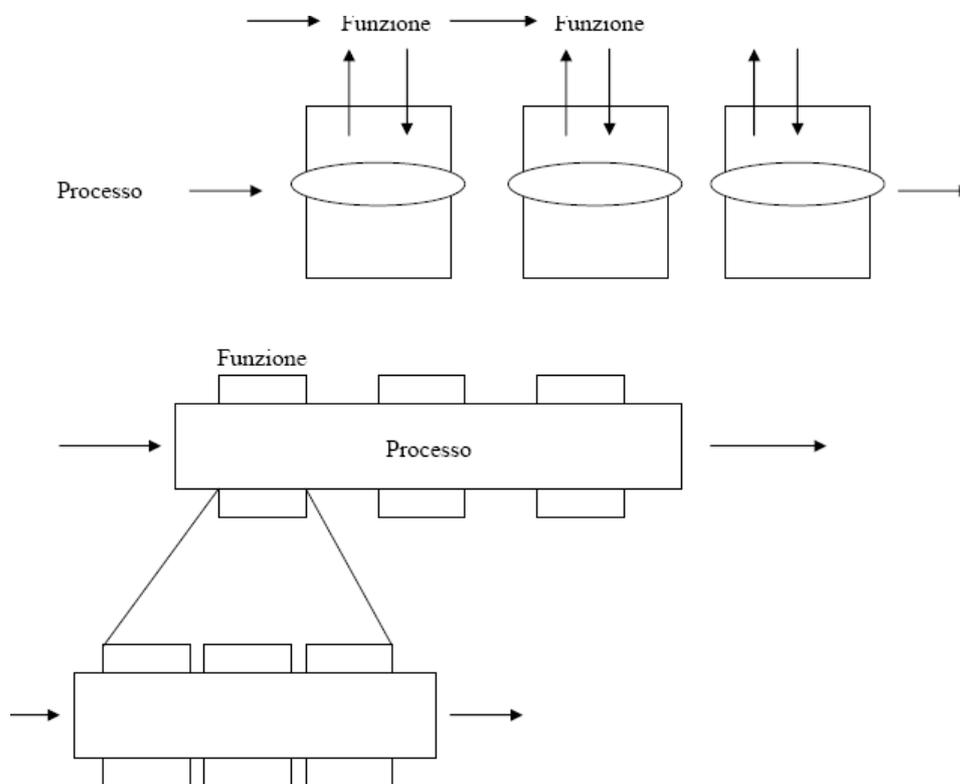


Figura 81 – Ottimizzazione globale a livello di specializzazione

L’approccio per processo può dare origine a due diverse strutture organizzative, tutte riconducibili, comunque, a un modello a matrice, in cui l’operatività e il successo si giocano nel corretto bilanciamento tra le responsabilità funzionali (verticali) e quelle di processo/progetto (orizzontali). In particolare occorre definire bene i significati di:

- responsabilità dello sviluppo delle conoscenze;
- responsabilità di progetto.

Per quanto riguarda le conoscenze, è possibile in linea del tutto generale affermare che esse si concretizzano in uomini e metodi, ma anche in strumenti, in tecnologie e in componenti utilizzabili in nuovi prodotti. Le responsabilità di progetto si concretizzano, invece, nella capacità di fare le cose giuste utilizzando le risorse e le conoscenze aziendali (messe a disposizione dalle funzioni specialistiche). L'organizzazione a matrice presuppone anche una diversa impostazione del modo di sviluppare i nuovi prodotti. Occorre, innanzitutto, separare bene le attività di innovazione tecnica e tecnologica da quelle relative all'innovazione del prodotto (regola della preliminarità) e successivamente definire una pianificazione del prodotto che utilizzi componenti, parti e tecnologie già esistenti. Il compito di chi è responsabile dello sviluppo del prodotto è quello di attingere componenti, metodi e tecnologie già predisposti, che potrebbero essere già stati utilizzati in altri prodotti o meno. Nel primo caso si è soliti indicare il riutilizzo con il termine inglese *carry-over*; nel secondo caso si dice che componenti sono stati sviluppati e posti "a scaffale" (in inglese, *shelf*). Nelle organizzazioni più complesse, le responsabilità di processo possono investire una pluralità di progetti (famiglie di prodotti, segmenti di mercato ecc.). Le modalità di raggruppamento dei progetti e di costituzione del team variano anche in funzione della tipologia di prodotto e delle dimensioni dell'azienda. In alcuni casi, per bilanciare la necessità di saturare le persone con quella di partecipare al team di progetto, vengono definite strutture più articolate basate su:

- un *core-team*, costituito da un numero ristretto di rappresentanti delle diverse funzioni, impegnati a tempo pieno sul progetto, oppure che agiscono come referenti delle funzioni;
- altri partecipanti nelle diverse fasi, che possono intervenire per tempi limitati o lavorare contemporaneamente su più progetti.

4.5.3. RUOLI NEL GRUPPO INTERFUNZIONALE

Il ruolo del team leader è determinante per il successo del gruppo di progetto. Deve essere ufficializzata la sua responsabilità; non devono a questo

riguardo sussistere ambiguità. Spesso la direzione aziendale non assegna in modo preciso questa responsabilità, adducendo una serie di ragioni: “ognuno deve sentirsi responsabile”, “il team leader cambia in relazione alla fase di sviluppo”, “è meglio che emerga un leader naturale”. Inevitabilmente questa “non scelta” porta a perdite di tempo nella gestione del progetto e a un aumento di conflittualità. Il ruolo del team leader è intimamente legato a quello dei momenti del gruppo. Oltre a questo ruolo, ne esistono altri tre che sono fondamentali per il successo del gruppo. Occorre innanzitutto quello che negli Stati Uniti viene chiamato *product champion* o *product sponsor*. È un ruolo esterno al gruppo di progetto. Chi lo ricopre ha il compito di assicurare che l’organizzazione aziendale risponda con sollecitudine alle richieste del gruppo. La scelta deve cadere su un personaggio di alto livello, in grado di dedicare del tempo al gruppo di progetto e, soprattutto, che creda nel prodotto che si sta sviluppando. Il secondo ruolo è quello di riferimento tecnologico. Chi lo ricopre deve travasare nel gruppo tutte le possibili informazioni tecniche e tecnologiche che possono essere utili allo sviluppo del prodotto. Ogni membro del gruppo dovrebbe idealmente fare da riferimento tecnologico. Poiché normalmente solo poche persone possiedono l’inclinazione naturale a trasferire ad altri quanto apprendono, è indispensabile nella scelta dei membri individuarne almeno uno con queste caratteristiche. Il terzo ruolo è quello dell’esperto. Di solito gli specialisti non sono particolarmente adatti a lavoro di gruppo. Poiché, tuttavia, il loro apporto è indispensabile se si vogliono introdurre nel prodotto contenuti innovativi, si devono individuare degli esperti di riferimento all’interno dell’organizzazione aziendale e coinvolgerli, quando necessario, nel progetto. Come già detto, quello del team leader è il ruolo fondamentale per il successo del progetto. Le caratteristiche che deve possedere sono:

- una forte esperienza tecnica, senza la quale non sarebbe credibile nei confronti degli altri membri del gruppo;
- un’esperienza interfunzionale che gli consenta di capire il modo in cui lavora l’azienda e anticipare i problemi insiti in ogni attività;

- una completa e chiara visibilità su ciò che il prodotto rappresenta per l'azienda e i suoi fattori determinanti per il suo successo;
- una capacità di intrattenere stretti rapporti con i responsabili funzionali aziendali e con lo sponsor del prodotto;
- una capacità gestionale;

Per quanto concerne l'area o la funzione aziendale da cui è opportuno che provenga il team leader, molto si è discusso, si discute e si discuterà in futuro. Progettazione, marketing, produzione, in alcune aziende anche acquisti, possono fornire il team leader. La scelta dipende dalla tipologia dell'azienda, di prodotto, di mercato e, soprattutto, dalla disponibilità di personaggi che posseggano le caratteristiche richieste, i quali non sono mai molto numerosi. Anche nella gestione e nell'andamento del gruppo di progetto il team leader svolge un ruolo fondamentale. Nei confronti degli altri membri il suo stile di comportamento non deve essere ispirato a un modello gerarchico. Egli non deve dirigere il gruppo, ma facilitarne il lavoro, dedicando la maggior parte del suo tempo a coordinare e a formarne i membri.

4.5.4. IL COINVOLGIMENTO DEL MANAGEMENT

Il TQP non è una tecnica ma una filosofia di management. Il presupposto di base è la chiara comprensione di ruoli e responsabilità, metodologie di pianificazione e di gestione, leadership e coinvolgimento. Tradizionalmente (figura 82) l'attenzione e il coinvolgimento della direzione nel processo di sviluppo dei nuovi prodotti sono relativamente bassi nelle prime fasi, quando si è ancora lontani dalla data prevista di avvio della produzione. L'attenzione diventa invece massima quanto più si è vicini a questa data, allorché inevitabilmente ci si trova a dover gestire ritardi e problemi. Il primo cambiamento culturale richiesto al management è quindi quello di considerare le prime fasi dello sviluppo di un nuovo prodotto come le più importanti. In queste fasi esistono infatti ampie possibilità di influenzare i risultati economici del progetto; man mano che il tempo passa e vengono prese delle decisioni, queste possibilità

diminuiscono e un intervento tardivo della direzione aziendale potrebbe risultare inutile se non addirittura controproducente. Questo atteggiamento sembra stia finalmente diffondendo, anche se con fatica: lo sviluppo dei prodotti incomincia a essere considerato come il principale fattore per la crescita e la redditività dell'azienda.

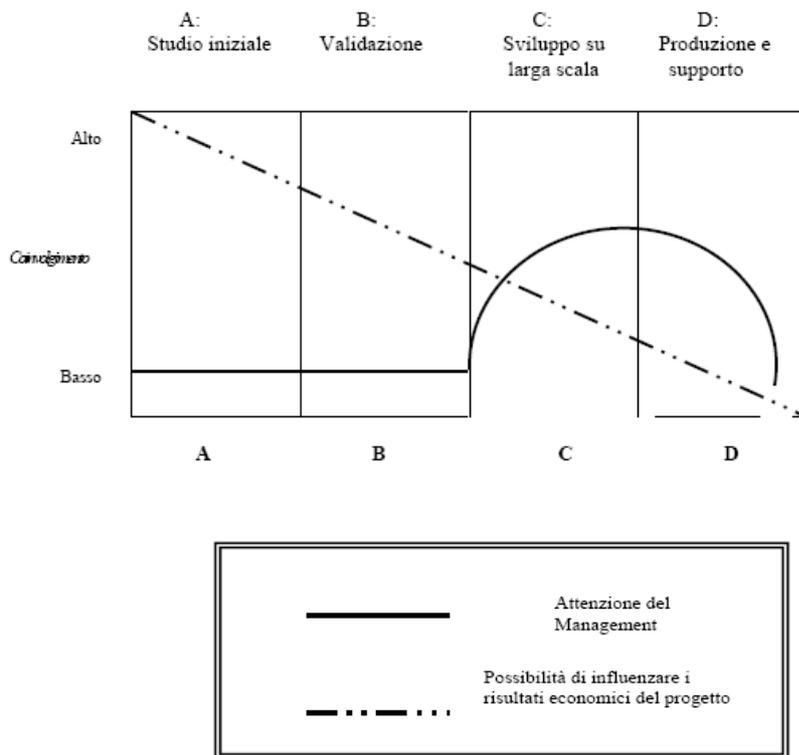


Figura 82 – Sviluppo di un prodotto

È comunque importante sottolineare che è attraverso i messaggi comportamentali che la direzione aziendale indica a tutti il suo impegno e il suo coinvolgimento. Questi messaggi sono, per esempio:

- presenziare ad alcune fasi critiche

- non anteporre esigenze contingenti a quelle di sviluppo dei nuovi prodotti
- prestare continua attenzione all'avanzamento del processo (non un'attenzione episodica o limitata a prefissare i tempi).

4.5.5. LA FORMAZIONE

A supporto del TQP gioca un ruolo importante la formazione, che deve in linea generale:

- assicurare la comprensione dell'approccio
- garantire l'assimilazione delle modalità operative e organizzative da parte di tutti
- assicurare la conoscenza e l'impiego delle tecniche di supporto da parte di membri del gruppo di progetto.

Per quanto riguarda specificatamente la figura del progettista, la formazione deve consentirgli l'acquisizione dell'esperienza e della sensibilità necessarie per valutare gli aspetti riguardanti le esigenze dei clienti, la produzione e il supporto post-vendita.

4.5.6. IL SISTEMA DEI RICONOSCIMENTI

Con un approccio allo sviluppo di nuovi prodotti di questo tipo ci si attende che ogni persona coinvolta nel processo si senta intensamente impegnata nel conseguimento degli obiettivi. In quest'ottica anche il sistema aziendale di riconoscimenti deve essere rivisto. I principi di riferimento per questa operazione sono:

- l'incoraggiamento e lo stimolo a conseguire gli obiettivi del gruppo
- i riconoscimenti di gruppo

- la definizione chiara e univoca dell'obiettivo e del modo di misurarlo
- la pianificazione anticipata delle successive opportunità di carriera per i membri del gruppo.

Quest'ultimo punto necessita di particolare attenzione da parte della direzione. I membri del gruppo di progetto, se ben guidati, vivono intensamente lo sviluppo del prodotto. Quanto più intensivamente hanno perseguito l'obiettivo, tanto più brusca sarà per loro la fine del progetto. La direzione aziendale se vuole mantenere alta la motivazione a partecipare a progetti a termine, deve assolutamente pianificare in anticipo le opportunità di carriera per questi individui. Devono essere sicuri che l'azienda "non si dimentichi di loro".

4.6. LA GESTIONE

4.6.1. LA SOVRAPPOSIZIONE DELLE FASI

Uno degli aspetti caratterizzanti dell'approccio del *Total Quality Project* è quello relativo alla gestione delle diverse fasi del processo di sviluppo dei nuovi prodotti. Il processo tradizionalmente seguito dalle aziende occidentali è di tipo sequenziale (figura 83).

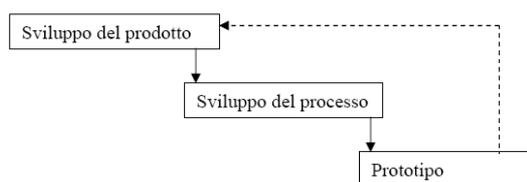


Figura 83 – Schema d'approccio sequenziale per sviluppo nuovi prodotti

Le informazioni vengono trasmesse da una fase a quella successiva, ma solo quando la prima si è conclusa. Vi è solo una piccola sovrapposizione delle attività. Ogni fase ha inizio solo dopo il completamento della precedente. Tra

una fase e l'altra vengono effettuate verifiche e prese decisioni. Nell'impostazione giapponese, alla quale si rifà il *Total Quality Project*, le diverse fasi sono sovrapposte e gestite in parallelo (figura 84).

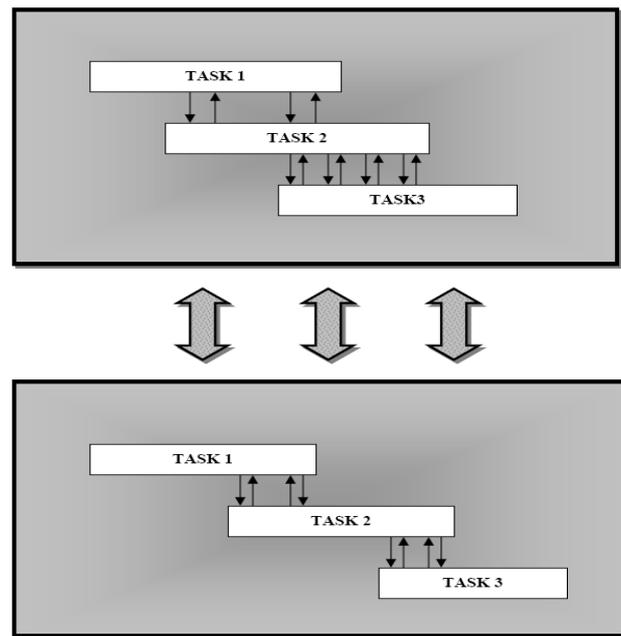


Figura 84 – Sviluppo del prodotto con approccio TQP

Viene attuato dall'inizio lo scambio di informazioni con attività più a valle. Il processo per fasi sequenziali ha avuto origine presso la NASA. L'ente statunitense si poneva l'obiettivo di controllare lo sviluppo dei complessi progetti spaziali attraverso una serie di punti di controllo. L'importanza di un attento controllo di questi progetti, è d'altra parte evidente se si pensa alla loro rilevanza economica e organizzativa. La suddivisione delle attività in fasi distinte e separate e l'impossibilità di passare a una fase successiva se prima non è stata controllata la precedente, rispondono a una logica di minimizzazione del rischio tecnico. Questa è una logica perfettamente aderente alla finalità dell'ente spaziale USA. Se trasferita in modo acritico in aziende che competono sul

mercato, comporta a fronte di una riduzione del rischio tecnico, un inevitabile aumento di tempo di sviluppo, con un conseguente incremento del rischio di mercato. Se si osserva il processo schematizzato nella figura 85 possiamo infatti notare che:

- le attività di ogni fase devono essere completate prima di poter essere verificate;
- le funzioni aziendali coinvolte nel processo intervengono in fasi diverse e tendono, di conseguenza, a lavorare separatamente;
- importanti attività produttive non possono iniziare prima del completamento delle prime tre fasi.

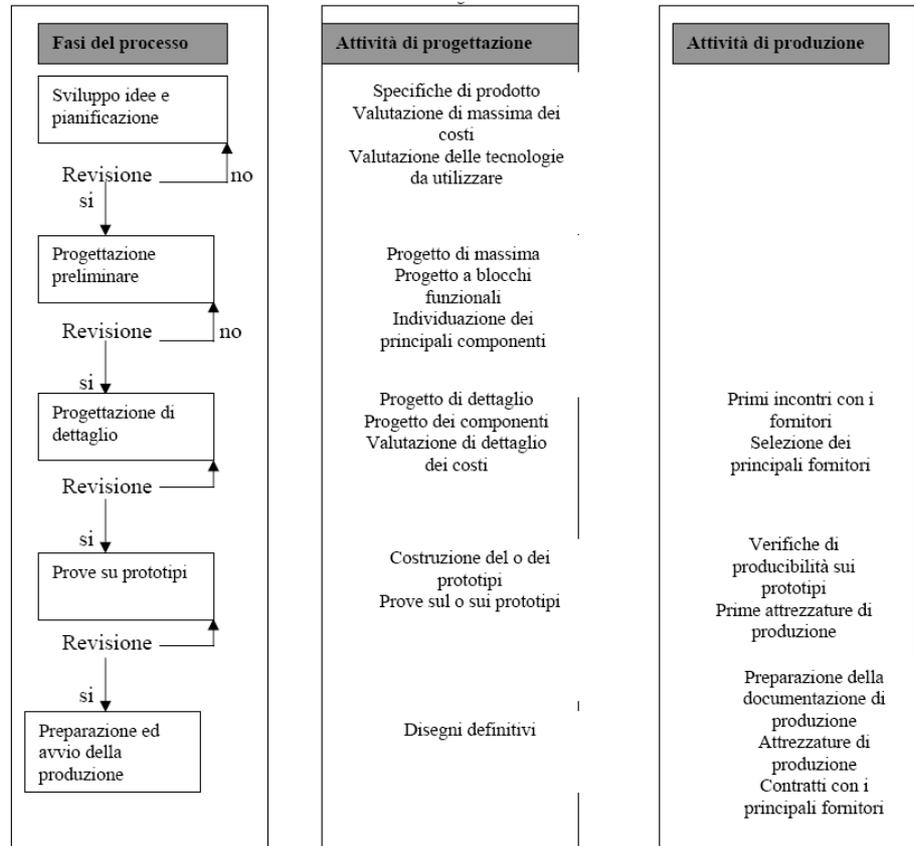


Figura 85 – Processo per fasi sequenziali

Una diversa organizzazione, quale quella rappresentata nella figura 86, oltre a rafforzare gli scambi di informazione all'interno di una stessa funzione consente di anticipare alcune attività inerenti alla produzione. Le attività descritte nei blocchi non devono necessariamente essere completate prima di venir utilizzate come informazioni dalle altre funzioni. Inevitabilmente, l'impiego di informazioni relative a un processo in evoluzione può comportare successive revisioni e modifiche. Questo aspetto spinge molti responsabili di funzioni a valle della progettazione a non gradire questo approccio e a preferirgli quello per fasi sequenziali. Ci si illude infatti che sia possibile congelare il progetto al termine di una fase, non introducendovi più successive modifiche.

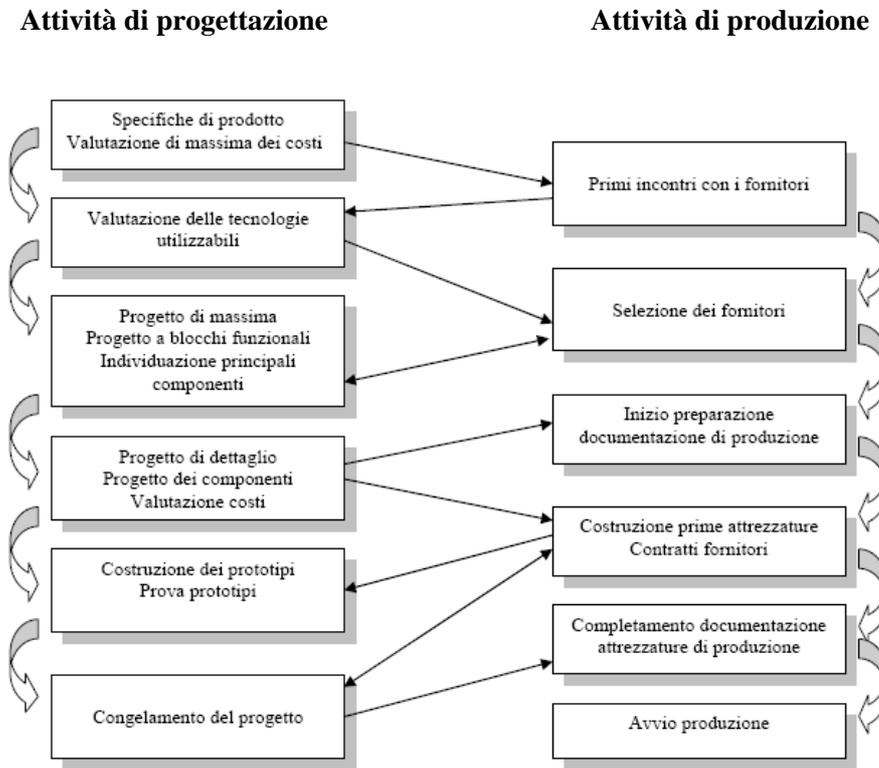


Figura 86 – Altro processo per fasi sequenziali

L'esperienza ha, però, dimostrato il contrario. Il fatto stesso che alcune funzioni intervengano solo a valle della progettazione comporta che i loro problemi emergano tardivamente e spesso richiedano modifiche e ripensamenti del progetto. Il coinvolgimento delle altre funzioni aziendali fin dalle prime fasi dello sviluppo consente comunque di anticipare i problemi e di risolverli nel modo più veloce e meno costoso possibile, magari solo cambiando un disegno o dimensionando un componente in un modo diverso. Adottare un processo di tipo parallelo, invece di un tipo sequenziale, comporta anche un diverso approccio organizzativo e gestionale. Nel processo sequenziale la direzione aziendale è in grado di controllare direttamente con uno sforzo minimo l'evoluzione del progetto nelle sessioni di revisione del progetto. Nel processo di tipo parallelo,

questo controllo è delegato a un gruppo di progetto. Il team leader responsabile di quest'ultimo deve esercitare un controllo continuo ma informale, che gli consenta di mantenere aggiornata la direzione. Tra questi due estremi esistono, ovviamente innumerevoli altre possibilità. Esse vanno valutate e tarate sulle esigenze specifiche di ogni azienda. Lo stato di avanzamento di un progetto di piccole dimensioni può risiedere anche solo nella testa del suo responsabile. Un progetto di medie dimensioni, in cui sono coinvolte più di una decina di persone, richiede già un minimo di struttura di controllo. Un progetto di grandi dimensioni come quello di sviluppo di auto o computer, richiede una solida procedura, soprattutto per quanto concerne la gestione dello scambio di informazioni e l'interfacciamento tra i diversi enti coinvolti. Inoltre, come è illustrato nella figura 87, il livello di controllo cresce col progredire del ciclo di sviluppo.

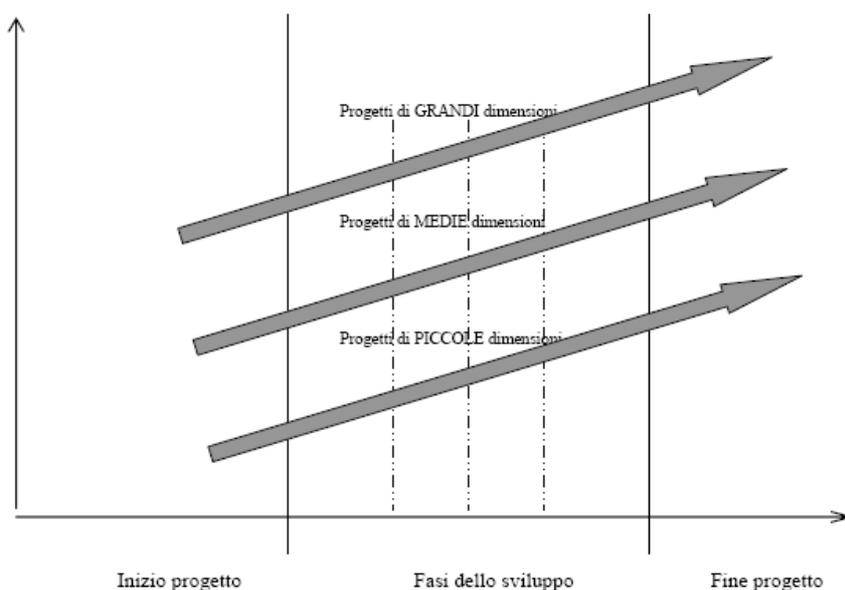


Figura 87 – Livello di controllo

Ciò risulta evidente se si pensa che, avvicinandosi la fase di avvio della produzione, cresce anche il numero delle persone coinvolte oltre naturalmente

alla documentazione prodotta. Nelle ultime fasi peraltro rimane sempre meno tempo per reagire a eventuali problemi. Va ulteriormente sottolineato che il livello di controllo non dipende dalle dimensioni dell'azienda bensì da quelle del progetto. Concludendo, si può riassumere quanto detto richiamando l'importanza di una procedura per lo sviluppo dei nuovi prodotti corretti e bilanciati: né troppo rigida da rallentare lo sviluppo, né troppo blanda da lasciare il processo in un perenne stato confusionale, nel quale le decisioni vengono prese, ma gli obiettivi sono continuamente modificati. È sicuramente di vitale importanza definire accuratamente le varie responsabilità e separare quelle delegate alle funzioni coinvolte o al gruppo di progetto da quelle specifiche della direzione aziendale. In molte aziende ha avuto successo l'attribuzione, a chi deve sviluppare il prodotto, prestazioni, *design*, costo. È stata, invece, mantenuta presso la direzione la responsabilità di tipo strategico: tempi, risorse, cambiamenti significativi degli obiettivi, cancellazione del progetto. In tutti i casi in cui la direzione viene coinvolta nelle micro-decisioni inevitabilmente si allungano i tempi. Un'ultima avvertenza è quella di non appesantire troppo il processo con un'attività di documentazione amministrativa e di controllo che sottrarrebbe tempo alle attività tecniche.

4.6.2. LA REVISIONE DEL PROGETTO

La revisione di quanto è stato fatto fino ad un certo istante, prima di procedere oltre, costituisce un modo efficace per evitare di commettere errori e, in particolare, di ripetere quelli del passato. La parola revisione (in inglese *review*) può assumere diverse connotazioni: può indicare una semplice verifica di informazioni o anche un riesame dell'oggetto della revisione attento e dettagliato. Durante lo sviluppo di un prodotto (o di un progetto) la revisione rappresenta un momento di pausa che consente di riflettere su questo fatto, su cosa rimane da fare, sulla direzione seguita (è quella giusta?) e su cosa eventualmente bisogna fare per rimediare a errori commessi. Le revisioni, in fondo, fanno parte del normale processo di progettazione. La normale interazione tra il responsabile della progettazione e il progettista ("Come sta andando il progetto?", "Bene!"; oppure "Abbiamo qualche problema nel...") costituisce solo uno scambio di informazioni indispensabili per il proseguimento

del lavoro. La complessità dei prodotti moderni, dei processi di fabbricazione e delle esigenze degli utilizzatori richiede a chi progetta competenze e conoscenze molto vaste. Nella realtà ci si trova a operare con tecnici che conoscono a fondo solo alcuni degli elementi che sono coinvolti nella creazione di un prodotto. Sono, per esempio, specialisti in elettronica, meccanica, materie plastiche, oppure specialisti in tecnologie produttive. Spesso molti tecnici sono giovani e non possiedono il bagaglio di lezioni imparate attraverso l'esperienza. In questi casi, non basta più la semplice interazione tra il capo-progetto e i suoi collaboratori. Occorre un metodo che consenta a tutti di esaminare il progetto in modo sistematico e di assicurare alla direzione che i problemi vengano appropriatamente gestiti e che ci si stia muovendo coerentemente con gli obiettivi prefissati. Questo metodo, chiamato appunto revisione del progetto (*Design Review*), è costituito da un'analisi sistematica di tutti gli aspetti tecnici e tecnologici del progetto. L'organizzazione della revisione del progetto: l'obiettivo principale della revisione del progetto è di ridurre i costi e i tempi, prevenendo i problemi. Per questi motivi essa deve essere condotta da un gruppo di persone che conoscano complessivamente tutti gli aspetti legati al ciclo di vita del prodotto. Devono quindi parteciparvi esperti di metodi e di tecnologie di produzione, di materiali e di componenti, delle problematiche di acquisto, di logistica, di affidabilità e di assistenza tecnica, di mercato, di costi industriali, e, naturalmente, di progettazione. Per risultare efficace, visto anche il numero di persone coinvolte, deve essere adeguatamente strutturata e organizzata. Innanzitutto occorre che tutti si preparino. Ciò comporta una diffusione anticipata di tutte le informazioni necessarie. Questo è un compito che spetta al responsabile del gruppo di revisione. Particolare attenzione va, inoltre, posta alla preparazione dell'ambiente in cui effettuare la riunione e ai suoi supporti da utilizzare (stanza, disponibilità di schermi per proiettare diapositive o lucidi, schermo CAD, lavagne ecc.). Il responsabile del gruppo di revisione del progetto deve inoltre distribuire in modo adeguato il tempo: circa il 50% di esso va dedicato all'esposizione dei problemi e altrettanto ne dovrà essere dedicato alla loro discussione. Il responsabile dovrà infine prevenire i possibili conflitti, mantenendo, durante la riunione, un clima costruttivo di libero scambio di opinioni su fatti tecnici, senza perdere mai di vista gli obiettivi. Una riunione di

revisione del progetto può avere una durata compresa tra la mezza giornata e i due giorni, a seconda della complessità del progetto. Ogni partecipante presenta e discute con il gruppo gli elementi di propria responsabilità. Di massima i passi da seguire sono:

- una breve introduzione che consenta a tutti i partecipanti di essere aggiornati sull'andamento del progetto;
- il richiamo dei requisiti più importanti;
- una breve presentazione delle alternative di progetto possibili e di quella scelta;
- l'identificazione dei problemi esistenti o possibili in relazione allo stato di avanzamento del progetto;
- la discussione e l'utilizzo di metodologie di *problem solving* per affrontare i problemi esistenti;
- la formalizzazione delle soluzioni trovate al fine di risolvere i problemi.

Per facilitare la formalizzazione su un documento dei risultati della riunione, a uno dei partecipanti è assegnato il ruolo di segretario della riunione. Tempestivamente, ovvero nell'arco di pochi giorni, le decisioni prese e i commenti fatti dovranno essere distribuiti dal segretario a tutti i partecipanti. Gli strumenti della revisione del progetto: Per facilitare lo svolgimento della verifica e assicurarsi che vengano considerati tutti gli aspetti importanti, si possono approntare opportune liste di controllo, o check-list, che contengono l'elenco degli elementi da verificare durante la revisione di un progetto e che sono di solito specifiche per il tipo di prodotto in esame. A titolo di esempio, nella figura 88, è riportata una lista generale di punti da verificare che può essere considerata valida per un gran numero di prodotti.

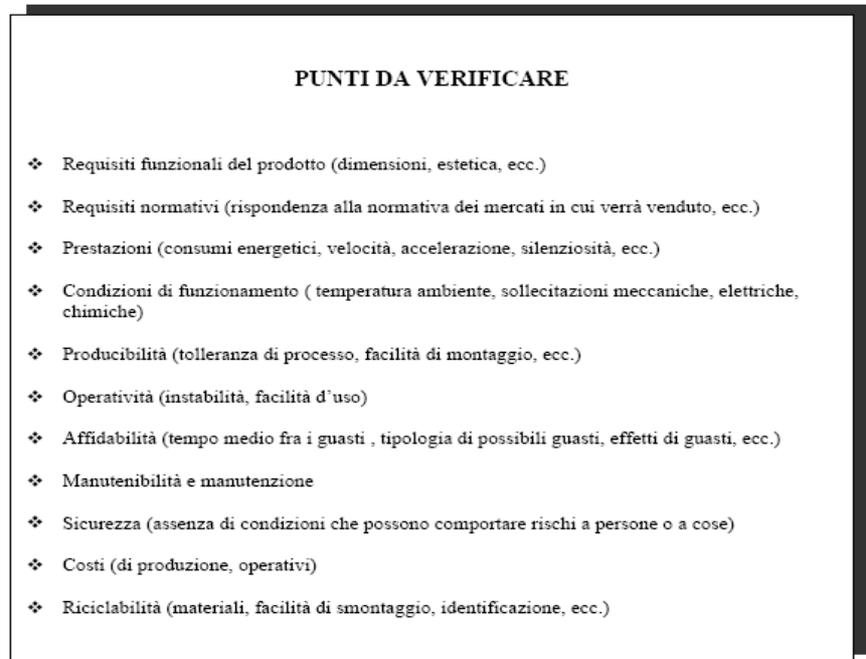


Figura 88 – Lista generale dei punti da verificare

Spesso, per quanto concerne l'analisi del prodotto in relazione al suo processo produttivo e al suo funzionamento, viene utilizzata la tecnica FMECA (*Failure Mode Effects and Criticality Analysis*). Questa tecnica consente di esaminare in modo sistematico il prodotto e il processo produttivo evidenziandone le criticità. La frequenza della revisione del progetto Il numero delle revisioni del progetto da effettuare nel corso dello sviluppo di un prodotto è in funzione della sua complessità e del grado di rischio associato alle decisioni da prendere. In linea del tutto generale è possibile affermare che è necessario almeno una revisione del progetto dopo la costruzione del prototipo. In questa fase è stato raccolto, in genere, un cospicuo numero di informazioni e sussistono ancora grandi opportunità di apportare modifiche al prodotto. È comunque da rilevare che più si anticipano gli istanti di revisione critica del progetto, più bassi sono I costi dell'effettuazione delle modifiche e più si riduce il rischio di slittamento del programma. In particolare, se si adotta una metodologia di

sviluppo dei nuovi prodotti basati sul controllo delle diverse fasi (*Phase Control*), la revisione formale del progetto può essere svolta nei momenti decisionali tra una fase e quella successiva (figura 89) [78].

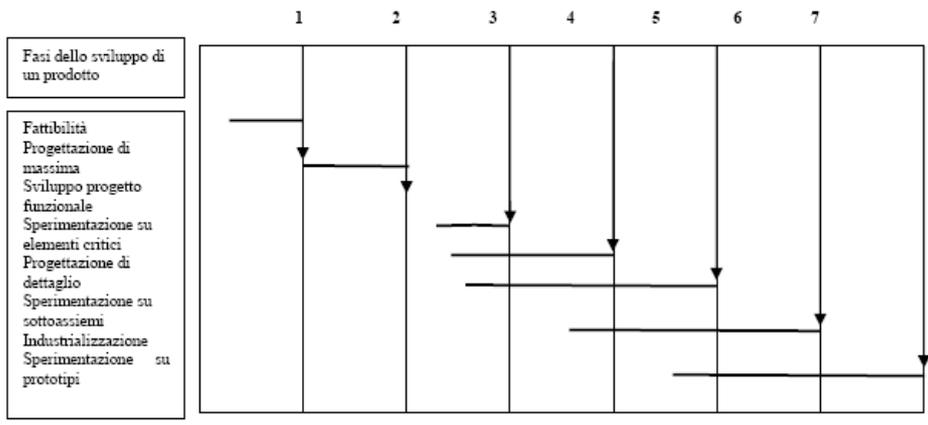


Figura 89 – Fasi dello sviluppo di un prodotto

A titolo di esempio nella figura 90 sono riportati gli scopi e i documenti oggetto della revisione del progetto nelle diverse fasi di sviluppo di un prodotto.

Fasi di sviluppo del progetto	Scopo della revisione	Documenti di lavoro
Fine fattibilità e avvio progettazione di massima	Verifica di conformità con quanto richiesto dal mercato-cliente – Verifica delle tecnologie in gioco - verifica degli obiettivi di costo	Primi disegni – schemi di principio
Avvio del progetto funzionale	Verifica di conformità con quanto richiesto dal mercato-cliente – Verifica dell'utilizzabilità di esperienze passate – Verifica degli obiettivi di costo	Disegni di assieme – disegni di sottoassiemi – schemi di principio – calcoli tecnici – analisi di affidabilità
Dopo la sperimentazione su elementi critici	Decisioni su elementi critici – Verifiche tecnologiche	Relazione del programma di sperimentazione
Fine progettazione di dettaglio	Verifiche del livello di qualità – verifica affidabilità manutenibilità e sicurezza – verifica di producibilità – verifica di dettaglio dei costi	Schemi e disegni generali e di dettaglio – specifiche dei sottoassiemi e componenti – calcoli tecnici – risultati delle analisi di affidabilità
Dopo la sperimentazione su sottoassiemi	Individuare eventuali provvedimenti correttivi – sintesi delle modifiche da apportare al progetto	Relazioni riguardanti la sperimentazione – relazioni riguardanti modifiche
A fine progettazione costruttiva	Verifica di producibilità e montabilità – verifica affidabilità manutenibilità e sicurezza – verifica dei costi	Disegni costruttivi – distinte materiali – cicli di lavorazione – attrezzature di produzione – ciclo di controllo qualità
Dopo la sperimentazione su prototipi	Individuare eventuali provvedimenti correttivi – sintesi delle modifiche da apportare al prodotto	Relazione riguardanti la sperimentazione – relazioni riguardanti modifiche

Figura 90 – Fasi dello sviluppo di un prodotto e documenti ad essa relativi

La revisione del progetto non allunga i tempi: la revisione del progetto può, in generale, avere uno scopo tecnico e cioè quello di individuare e di risolvere i problemi. Può anche avere uno scopo gestionale ovvero quello di controllare l'avanzamento del lavoro e di riallocare le risorse. Le riunioni formali, ben preparate e strutturate, sono molto efficaci per assicurare un accurato controllo del progetto, ma in genere tendono a rallentare il processo di sviluppo del prodotto. È più conveniente, soprattutto per quanto riguarda gli aspetti tecnici (funzionalità, affidabilità, producibilità), ricorrere a riunioni informali, veloci e frequenti, nelle quali vengano scambiate le informazioni necessarie, con una produzione di documentazione ridotta al minimo, piuttosto che a poche riunioni formali. È infatti molto importante lo scambio di informazioni, anche se parziale, che avviene mentre il progetto è in evoluzione e accetta qualunque modifica. Molte aziende adottano una combinazione di riunioni informali e formali; questo modo di procedere si sposa bene con il lavoro di gruppo tipico del *Total Quality Project*. Con questo approccio, infatti, non si procede per passi successivi, con un passaggio di consegne da un team all'altro secondo una procedura pre-codificata, ma con uno sviluppo continuo, imperniato su un

gruppo di progetto interfunzionale la cui composizione varia a seconda della fase in cui ci si trova. Tra una fase e l'altra le revisioni sono formali, mentre all'interno di ogni fase il gruppo di progetto interfunzionale è in grado di riunirsi frequentemente in modo informale (figura 91). Aumenta, così, anche l'efficacia, in quanto alle revisioni formali si arriva avendo già risolto la maggior parte dei problemi.

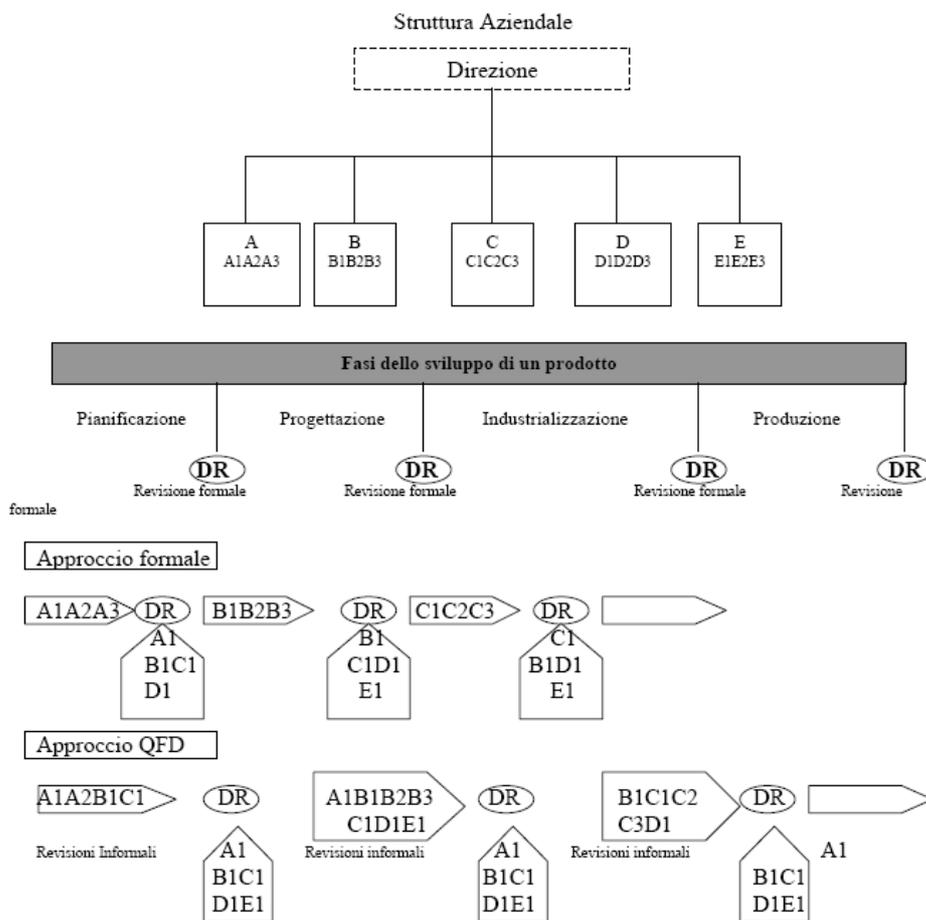


Figura 91 – Altro schema per le fasi di sviluppo del prodotto

4.7. L'AMBIENTE DI LAVORO E GLI STRUMENTI

4.7.1. LA PATRIMONIALIZZAZIONE DELLE CONOSCENZE

Imparare dall'esperienza. Il ciclo di vita di un prodotto è costituito da una serie di fasi: la definizione delle sue specifiche, lo studio di fattibilità, il progetto preliminare, il progetto di dettaglio, la sperimentazione prototipica, la definizione dei cicli e delle attrezzature di produzione, la produzione, la vendita, l'utilizzo da parte del cliente. In ognuna di queste fasi interviene una specifica funzione aziendale. In linea del tutto teorica, il prodotto dovrebbe passare da una funzione all'altra fino ad arrivare al cliente. In ogni fase, in realtà, nascono delle richieste di modifica, perché il prodotto non si adatta completamente alle esigenze della funzione che lo prende in carico. Ciò in quanto nella progettazione non si è tenuto conto di queste esigenze. Questo tipo di processo, con la presenza dei continui ricicli, è molto diffuso e viene ripetuto per ogni nuovo prodotto. Le aziende occidentali infatti tendono normalmente a ripartire ogni volta da capo. Un principio base su cui è impostato il processo di sviluppo dei prodotti in Giappone è, per contro, quello di non ripetere due volte gli stessi errori. Un famoso consulente giapponese sostiene che la chiave del successo sta nell'apprendimento dall'esperienza. Nella fase di avvio della produzione, i primi modelli di auto prodotte in Giappone nel dopoguerra presentavano un numero elevato di problemi. Gli ingegneri progettisti si misero a seguire attentamente questa fase annotandoli tutti, rilevando le cause che li avevano generati e le soluzioni adottate. I modelli successivi non presentano più gli stessi problemi. Apprendimento del singolo e apprendimento dell'organizzazione: Se la chiave del successo è l'apprendimento dall'esperienza, dovrebbero bastare dei progettisti con l'esperienza di più progetti per evitare gli errori già commessi in passato. Questo è vero in parte. Occorre infatti osservare che la complessità di molti prodotti moderni richiede il lavoro di più persone sullo stesso progetto. Non tutti possono possedere il medesimo livello di esperienza e non tutti hanno avuto le stesse esperienze. Inoltre, nelle aziende esiste un *turn over* fisiologico a causa del quale molte delle esperienze fatte, associate ai singoli progettisti vengono perse dall'azienda. In definitiva, affidandosi a solo apprendimento dei

singoli, l'azienda nel suo complesso non è in grado di apprendere. L'apprendimento di un'organizzazione può avvenire solo attraverso una formalizzazione dell'esperienza in modo da renderlo disponibile a tutti. Nelle aziende giapponesi esistono e sono ancora accessibili a tutti i livelli dell'organizzazione, manuali di progettazione tenuti in costante aggiornamento e contenenti:

- procedure per la valutazione dei costi, il dimensionamento delle parti, lo sviluppo dei processi, ecc.

- procedure per la gestione delle riunioni

- procedure decisionali che documentano quanto è accaduto in passato, gli errori commessi, i rimedi, i criteri di scelta e quant'altro necessario. L'uso dei manuali come strumento di diffusione dell'esperienza fa da sempre parte della cultura industriale statunitense. Il Ministro della Difesa di quel Paese da più di trent'anni mette a disposizione dell'industria i *Military-Handbook* che riassumono l'esperienza effettuata nello sviluppo dei nuovi prodotti. Le stesse tecniche altro non sono che la formalizzazione dei requisiti delle fasi a valle della progettazione illustrate dal progettista. Molte aziende italiane hanno, un passato più o meno recente sull'esempio di aziende statunitensi, sviluppato dei manuali di progettazione. Il più delle volte, dopo un impiego iniziale, essi sono però stati relegati in un armadio accanto ad altri illustri compagni. Ciò è potuto avvenire perché si è erroneamente pensato di risolvere il problema una volta per tutte o non si è capito che il manuale è uno strumento di apprendimento collettivo e come tale in continuo aggiornamento [78].

4.7.2. L'UBICAZIONE FISICA DEL TEAM DI PROGETTO

Collocare i membri del gruppo di progetto fisicamente vicini favorisce la comunicazione e la comprensione dei requisiti e dei vincoli e la presa di decisioni. Tutte le aziende che hanno affrontato il tema del *Total Quality Project* o meglio la riorganizzazione per processi, hanno individuato nel lay-out degli uffici, dei laboratori e dei reparti di costruzione e di verifica dei prototipi, un

elemento determinante per la completa riuscita del progetto. Il lay-out deve essere coerente con la struttura organizzativa che si adotta (figura 92).

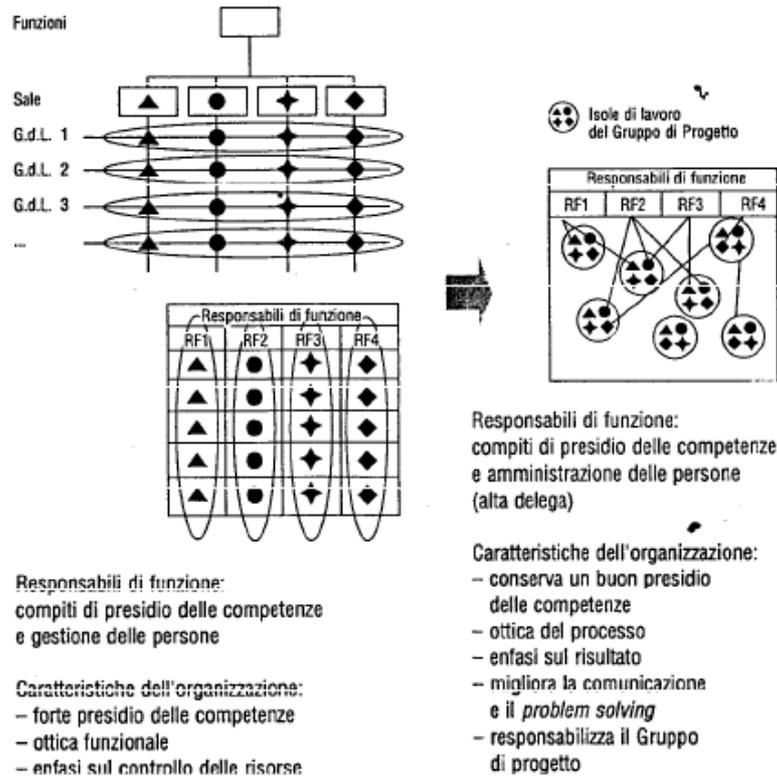


Figura 92 – Lay-out e struttura organizzativa

Devono quindi, in linea di massima, essere previste aree ben definite riservate al team di progetto, comprendenti le zone in cui poter svolgere il lavoro di gruppo. Quest'ultimo aspetto è particolarmente importante in quanto con l'approccio del *Total Quality Project* le riunioni sono numerose e i partecipanti di vario genere. Le aree di riunione devono essere fornite di tutte le attrezzature necessarie affinché gli scambi di idee possano avvenire in maniera attiva e fattiva. Nelle aziende giapponesi esistono sale dedicate alla generazione e discussione delle idee. I tecnici vi si possono riunire in un qualsiasi momento a

discutere liberamente; sulle pareti si possono appendere disegni, schizzi, tabelle o altri documenti. Le aziende europee e italiane, in particolare, hanno la tendenza a creare uffici in locali privati, riservati a poche persone. Questo aspetto è forse anche un frutto di una cultura individualistica e orientata alla funzione aziendale. In Giappone per tradizione gli uffici sono ubicati in grandi sale organizzate (figura 93) però per favorire sia le attività individuali che quelle collettive.

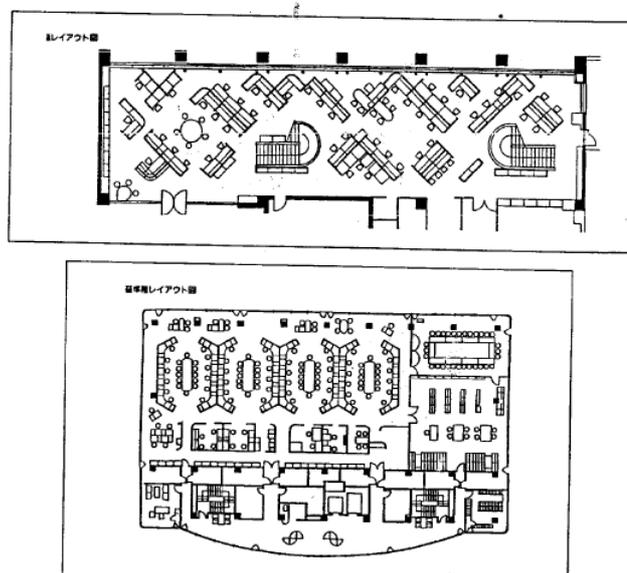


Figura 93 – Lay-out e struttura organizzativa di provenienza giapponese

Inoltre in considerazione anche della dinamica dei progetti, i lay-out non sono definiti in modo statico e rigido, ma sono dinamici e flessibili. Questo approccio, basato sull'impiego di pareti di separazione facilmente spostabili consente di adattare l'ambiente alle diverse esigenze che sorgono nel corso dello sviluppo del progetto. Dal punto di vista pratico-operativo esistono tuttavia dei vincoli legati all'impiantistica di supporto che vanno attentamente valutati e progettati [78].

4.7.3. IL RUOLO DEGLI STRUMENTI INFORMATICI

Gli strumenti informatici possono svolgere un ruolo importante a supporto del *Project Quality Team*. In linea del tutto generale si possono individuare cinque aree nelle quali questi strumenti vengono applicati:

- la gestione dei progetti
- la gestione dei dati tecnici
- l'integrazione di processo
- la simulazione
- la produzione dei disegni di progetto

La documentazione di progetto è lo strumento che consente alle diverse funzioni aziendali di trasferire le informazioni necessarie alla realizzazione del prodotto e di controllarne l'evoluzione. Nel *Total Quality Project* l'esigenza di anticipare il più a monte possibile nel processo di sviluppo dei prodotti le considerazioni che riguardano l'intero ciclo di vita del prodotto può essere supportata da sistemi di gestione dati. Questi sistemi chiamati con acronimi diversi consentono di ottenere la completa condivisione delle informazioni e di gestirne l'evoluzione. Tra le principali funzionalità normalmente disponibili vi sono:

- la gestione delle versioni del prodotto e delle revisioni
- la gestione dell'avanzamento fisico della progettazione
- la gestione di livelli differenti di accesso alle informazioni che sono disponibili
- la gestione della distinta base e quella della configurazione del prodotto in questione

- una serie di controlli orientati a ridurre le possibilità di errori.

L'estensione di queste basi di dati comuni può coinvolgere anche i principali fornitori partecipanti allo sviluppo del prodotto. L'utilizzo di sistemi CAD può aiutare a ridurre drasticamente i tempi in alcune fasi del processo di sviluppo dei prodotti. Questi sistemi consentono infatti di creare, mediante una descrizione matematica della geometria, modelli bidimensionali e tridimensionali di oggetti. Con questa descrizione è possibile realizzare delle successive elaborazioni e manipolazioni. Nella fase di verifica mediante la costruzione di simulacri e prototipi, impiegando tecnologie di stereolitografia si possono costruire in poche ore dei modelli di resina partendo dai modelli matematici CAD a tre dimensioni. L'evoluzione tecnologica di questi strumenti ha avuto un notevole impulso negli ultimi anni e ha rivoluzionato l'approccio metodologico allo sviluppo dei nuovi prodotti, consentendo di verificare in anticipo i parametri fisici degli oggetti. Nelle fasi di industrializzazione del prodotto, grazie all'integrazione con le macchine a controllo numerico, vengono generati in automatico i tracciati degli utensili per le lavorazioni meccaniche. Nel corso di un progetto si rende spesso necessario valutare sulla carta alcune caratteristiche di progetto, per esempio il dimensionamento di parti, spazi fisici, ingombri, movimenti, ecc. Come più volte affermato la possibilità di anticipare queste valutazioni consente di ridurre i rischi di modifiche successive. Per una oramai ampia tipologia di prodotti e di problemi, sono stati sviluppati dei programmi che forniscono un buon supporto nelle fasi di definizione del prodotto o dei suoi componenti. Questi supporti vengono normalmente indicati con l'acronimo CAE e vengono integrati con i sistemi CAD; con i sistemi più sofisticati si possono effettuare i calcoli direttamente all'interno del programma di modellazione ed è possibile visualizzare i risultati in forma grafica utilizzando dei colori diversi e delle tecniche di animazione. Con altri ancora vengono simulati i cinematismi per verificare il corretto posizionamento prima di effettuare costose sperimentazioni su prototipi o addirittura al posto di queste. La produzione automatica dei disegni di progetto direttamente dai modelli CAD giustifica spesso da sola l'uso di questo strumento. Con essa è infatti possibile, per prodotti complessi aumentare notevolmente la produttività sia per quanto concerne i disegni per la produzione sia per quanto concerne le illustrazioni da

incorporare nella documentazione di vendita, di uso o di manutenzione. I moderni sistemi CAD contengono infatti dei programmi con cui è possibile definire delle viste bidimensionali e delle sezioni del modello solido con delle annotazioni particolari e una simbologia standard. Inoltre ogni cambiamento di progetto comporta la necessità di aggiornare un numero elevato di disegni, alcuni produttori di sistema CAD hanno già sviluppato la necessaria integrazione fra i programmi di modellazione e quelli di disegno bidimensionale. Tutti gli strumenti informatici consentono di ridurre i tempi di esecuzione delle attività necessarie per lo sviluppo dei nuovi prodotti, ma non risolvono i problemi. Se non si è in grado di prendere decisioni, se gli obiettivi non sono precisi, se non si conoscono i vincoli a valle della progettazione se non si hanno le risorse necessarie, se non vi sono i livelli di conoscenza necessari, i problemi rimangono anche acquistando sofisticati sistemi informatici. Anzi spesso aumentano di complessità. Non è raro vedere dei giovani progettisti che, disponendo di sistemi CAD particolarmente flessibili e rapidi provano e riprovano a disegnare un particolare piuttosto che pensare a come realizzarlo. Questo tipo di progettazione è, peraltro, spesso diffuso e utilizzato anche quando la costruzione di prototipi è relativamente costosa. Piuttosto che analizzare, simulare e calcolare, si preferisce costruire e provare.

La nostra opinione è che prima convenga investire del tempo per capire i punti deboli del proprio processo per poi eliminarli. Solo dopo aver messo a punto il processo si possono introdurre gli strumenti che lo visualizzano. Non conviene farlo prima perché così facendo si rischia nei fatti di automatizzare un processo inefficiente. Il tempo reso disponibile dall'introduzione di questi strumenti deve essere impiegato nell'accumulo di nuove conoscenze in grado di creare dei vantaggi competitivi all'azienda. Non serve a nulla possedere il migliore sistema informativo disponibile se non si hanno le conoscenze tecniche e tecnologiche per realizzare i prodotti richiesti dal mercato.

4.8. ALCUNE TRAPPOLE DA EVITARE

Una delle vie per ridurre il tempo di introduzione sul mercato dei nuovi prodotti è quella di ridurre la quantità di attività di progettazione e di sperimentazione. Le aziende sono di solito spinte a rinnovare i loro prodotti dal mercato che richiede maggiori prestazioni o funzionalità, nuove estetiche, prezzi più bassi, e dai concorrenti che propongono prodotti con caratteristiche migliori. A ogni innovazione è associato un processo di apprendimento che implica studi e sperimentazioni. Occorre infatti generare delle idee e poi verificarle sulla carta, oppure verificarle con i prototipi, coinvolgendo i fornitori per capire quale possa essere il loro contributo. In molti casi le verifiche possono essere sviluppate in modo rapido. Altre volte occorre provare, sbagliare, capire perché si è sbagliato e riprovare. Il processo di innovazione è fondamentalmente un processo di apprendimento, e come tale richiede tempo. Se questo processo non viene attentamente gestito si perde il controllo sui tempi e il loro allungamento risulta inevitabile. È indispensabile, quindi, capire in anticipo quanto tempo di apprendimento richiede ogni elemento innovativo, e decidere quanta innovazione introdurre nel nuovo prodotto e quanta, invece, differire a un prodotto successivo. Per fare questo occorre soprattutto possedere del buon senso che permetta di evitare alcune trappole in cui cascano molte aziende.

Prima trappola: Il “megaprogetto” piace ai manager, attira l’attenzione di tutti, richiede grandi investimenti, promette grandi risultati. La nostra storia industriale è disseminata di “megainsuccessi” associati a “megaprogetti”, ciò nonostante molte aziende non si lasciano ancora attirare nella trappola dello “sviluppo di un prodotto completamente nuovo, con nuovi materiali e nuove tecnologie produttive”. È evidente che il processo di apprendimento sarà necessariamente lungo se gli elementi innovativi sono molti. Le difficoltà non crescono in modo semplicemente proporzionale agli elementi di innovazione che si vogliono introdurre; ogni nuovo elemento di solito interagisce con quelli preesistenti; le interrelazioni che vanno considerate e studiate, limitandosi solo a quelle semplici, aumentando in modo combinatorio. Per esempio, il passaggio da quattro a cinque funzionalità è associato a un incremento di quattro interrelazioni che costituiscono altrettante fonti di potenziali problemi da risolvere.

L'approccio seguito da molte aziende giapponesi nello sviluppo dei nuovi prodotti è, come tutta la loro strategia industriale, orientato al miglioramento continuo. Il rinnovamento del prodotto non viene affrontato nella sua globalità, ma suddiviso in parti, ognuna delle quali introduce una novità che differenzia il prodotto che la incorpora da quello precedente. Un esempio di questo modo di gestire l'innovazione è quello della Mitsubischi Electric riportato da G.Stalk e T.M. Hout nel libro "Competere contro il tempo". L'azienda ha completamente rivoluzionato un suo prodotto nell'arco di cinque anni introducendo ogni anno un'innovazione. Il primo anno ha introdotto un circuito integrato di controllo. Il secondo ha sostituito questo con un microprocessore. Il terzo ha sostituito il compressore alternativo con uno rotativo più efficiente. Il quarto ha migliorato il sistema di controllo aggiungendovi altri sensori e utilizzando in modo più completo le funzionalità offerte dal microprocessore introdotto il secondo anno. Il quinto anno ha introdotto un nuovo motore con l'aggiunta di un inverter collegato con il microprocessore precedentemente introdotto, consentendo un controllo automatico della velocità, quindi migliorando ulteriormente l'efficienza della pompa. In cinque anni il prodotto è stato, così, completamente ridisegnato ricorrendo a innovazioni coordinate e continue.

Seconda trappola: il prodotto onnicomprensivo. Quella del prodotto onnicomprensivo è una trappola allettante per le aziende che si trovano a dover recuperare la loro competitività. L'idea di questo prodotto nasce quando qualcuno, solitamente il marketing, analizza i cataloghi dei concorrenti e confronta tra loro i prodotti. Non si riesce a resistere alla tentazione di prendere il meglio di ogni prodotto concorrente e di inserirlo nel proprio. Sebbene appaia non realistico, il prodotto onnicomprensivo alletta tutti. Il progettista vi vede la sfida tecnica di realizzare un qualche cosa mai realizzato da altri. Il tecnologo, l'opportunità di provare nuove tecnologie. Il marketing e le vendite, l'opportunità di avere un prodotto che si venda da solo. Altra cosa è infatti avere un prodotto che poco si differenzia dagli altri, dall'aver uno che è migliore in ogni sua caratteristica e prestazione. La produzione stessa, che, in un contesto di miglioramento continuo del prodotto, è continuamente alle prese con le perturbazioni associate alla serie pilota e ai nuovi avviamenti, ben vede il prodotto onnicomprensivo che ingloba in una sola volta tutte le migliorie

possibili. La complessità del prodotto onnicomprensivo porta inevitabilmente al concepimento di un “megaprodotto” e all’allungamento indefinito del tempo di sviluppo. Lunghi tempi di sviluppo provocano tempi di sviluppo sempre più lunghi: associato alle scelte fatte nello sviluppo di un nuovo prodotto vi è solitamente un fattore di rischio. Questo aumenta significativamente con l’aumento della complessità del prodotto e del numero di innovazioni che si introducono. Un’azienda che ha tempi lunghi di progettazione e, di conseguenza, un rinnovo poco frequente dei propri prodotti, è portata a minimizzare il rischio di commettere errori. Essa infatti dovrà vivere a lungo con quel prodotto. Per ridurre questi rischi si introducono fasi di controllo e di ripensamento all’interno del ciclo di sviluppo. Per ridurre questi rischi si introducono fasi di controllo e di ripensamento all’interno del ciclo di sviluppo. Queste fasi, per poter essere eseguite, richiedono la stesura di relazioni tecniche e procedure di verifica. Inoltre, occorre che a ogni significativo punto decisionale venga coinvolto il management dell’azienda. Questi metodi raggiungono normalmente l’obiettivo della minimizzazione del rischio. Il pericolo che si corre è quello di burocratizzare eccessivamente il processo e allungare ulteriormente la scala temporale. Se il ciclo di sviluppo di un nuovo prodotto è troppo lungo, è inoltre possibile che durante il suo svolgimento qualcosa cambi sul mercato e debba essere rivista la specifica di prodotto. Spesso, inoltre, l’innovazione tecnologica offre nuove opportunità per migliorare il prodotto. In entrambi questi casi si innesca una spirale di revisioni e riprogettazioni che tende ad allungare in modo indefinito il tempo di sviluppo del prodotto. Imparare dai clienti: se le aziende conoscessero esattamente ciò che i clienti desiderano, probabilmente l’innovazione a piccoli passi non sarebbe necessaria. In realtà le aziende non conoscono a sufficienza le esigenze del cliente e forse neanche lui le conosce veramente. L’innovazione rapida a piccoli passi consente di presentare un prodotto non perfetto ma accettabile, e di verificarne rapidamente il livello di gradimento da parte dei clienti. Le successive rapide innovazioni altro non sono che dei miglioramenti introdotti sulla base delle esperienze fatte con i clienti. L’introduzione continua di innovazioni nel prodotto è senz’altro una necessità competitiva nel settore dei beni di largo consumo. Un cliente può essere sorpreso nel vedere che il modello di televisore da lui acquistato il mese precedente

contiene già alcune modifiche. Questa sorpresa, in genere, non influenzerà i suoi futuri acquisti. Per i beni strumentali il cliente industriale sarà spinto ad aggiornare spesso la macchina o l'impianto acquistato in precedenza e quindi potrebbe mal sopportare questo tipo di innovazione se essa è associata a sostanziali miglioramenti delle prestazioni.

5. CONCLUSIONI

In definitiva una volta costituito il gruppo di lavoro interfunzionale operante secondo le regole precedentemente descritte, la successiva fase è quella di iniziare, naturalmente, a sviluppare il nuovo progetto secondo le regole e gli schemi precedentemente stabiliti. Proprio in virtù di quanto studiato e messo a punto nel seguente lavoro, si è riusciti ad individuare anche una metodologia quanto più generica possibile per eseguire con il minor numero di errori e, soprattutto con il minor numero di tentativi, senza procedere a tentoni, una rapida applicazione degli strumenti a disposizione del progettista nelle diverse fasi della progettazione. Infatti nelle figure seguenti è reso evidente come il supporto di metodologie come il QFD, oltre ad essere il motore nel ciclo di miglioramento continuo che caratterizza il TQP è uno strumento indispensabile nella prima fase di definizione dei requisiti del cliente (figura 94).

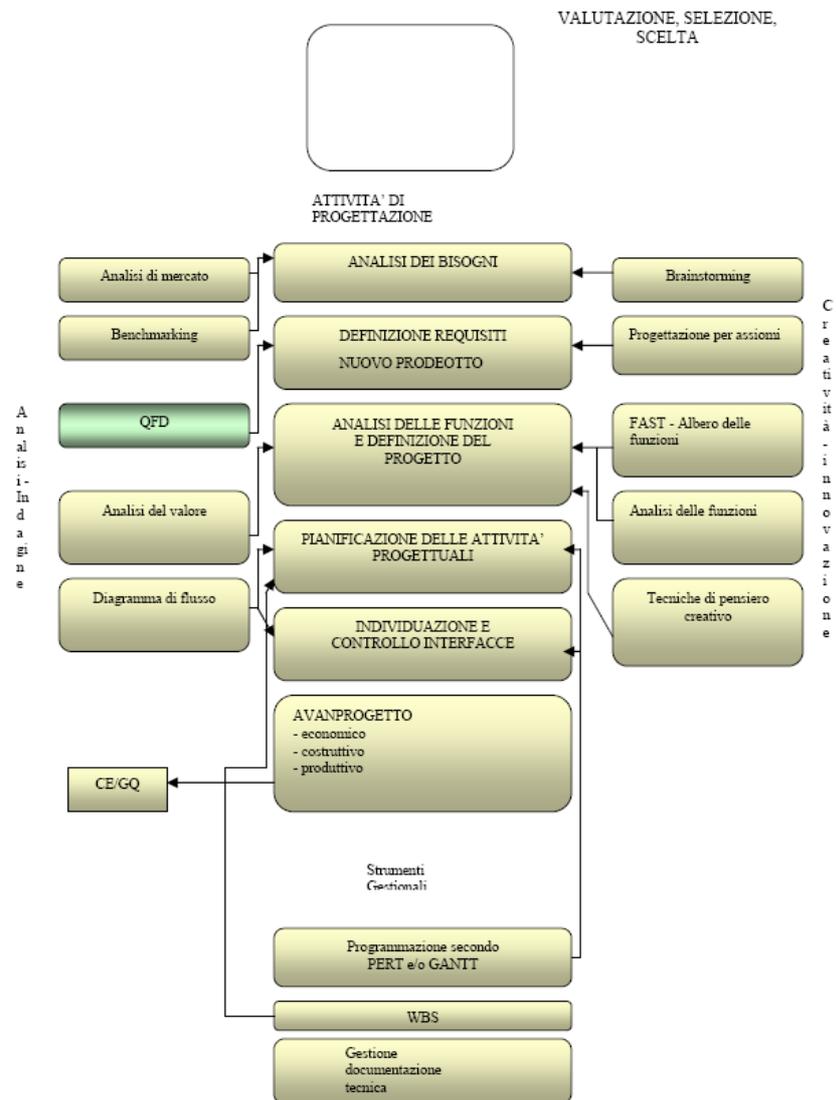


Figura 94 – Schema funzionale del TQP

Allo stesso modo dal nostro studio è emerso che l'applicazione delle metodologie di Taguchi, così come più in generale il *Robust Design* ed il *Design of Experiment*, sono strumenti di supporto essenziali in particolari fasi del

riesame del progetto (figura 95). Nella progettazione di dettaglio, nonché nella valutazione e verifica del progetto finale, l'impegno delle tecniche FMEA e FMECA, come descritto nei capitoli precedenti, applicate in tali fasi dello sviluppo del progetto realizzano una verifica sui possibili modi di guasto del prodotto prima ancora che lo stesso sia realizzato, chiudendo così un ciclo di miglioramento e controllo accuratamente gestito dal TQP (figure 96 e 97).

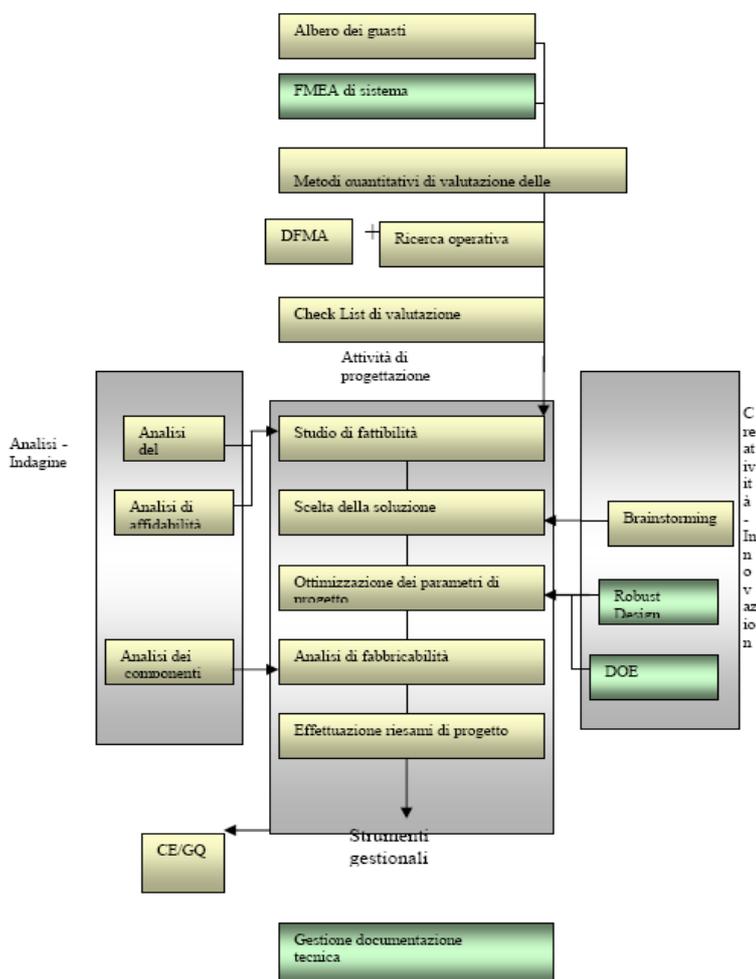


Figura 95 – Fasi di progettazione e strumenti correlati (riesame del progetto)

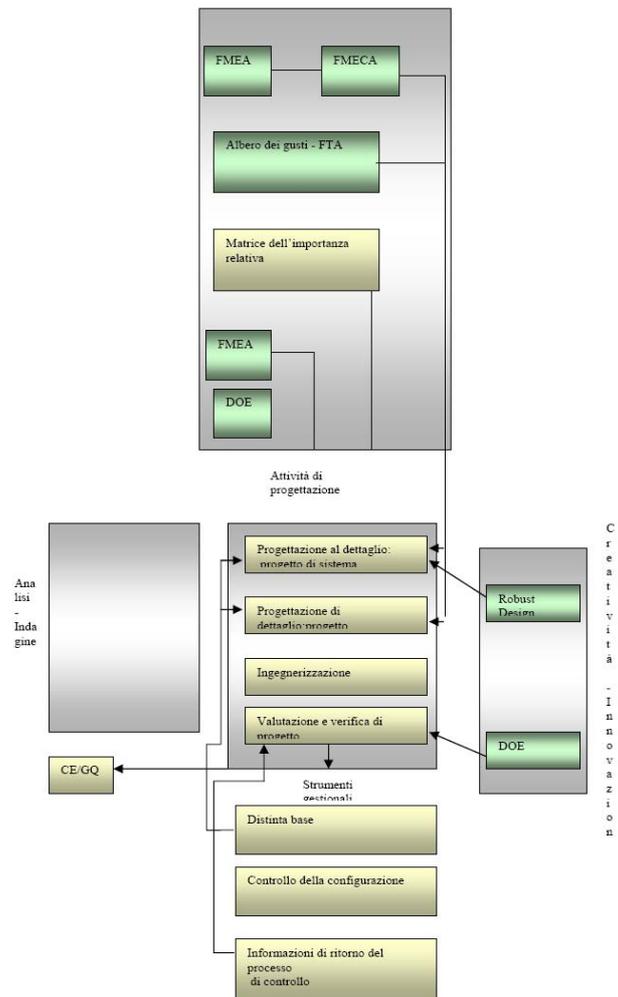


Figura 96 – Fasi di progettazione e strumenti correlati (tecniche FMEA e FMECA)

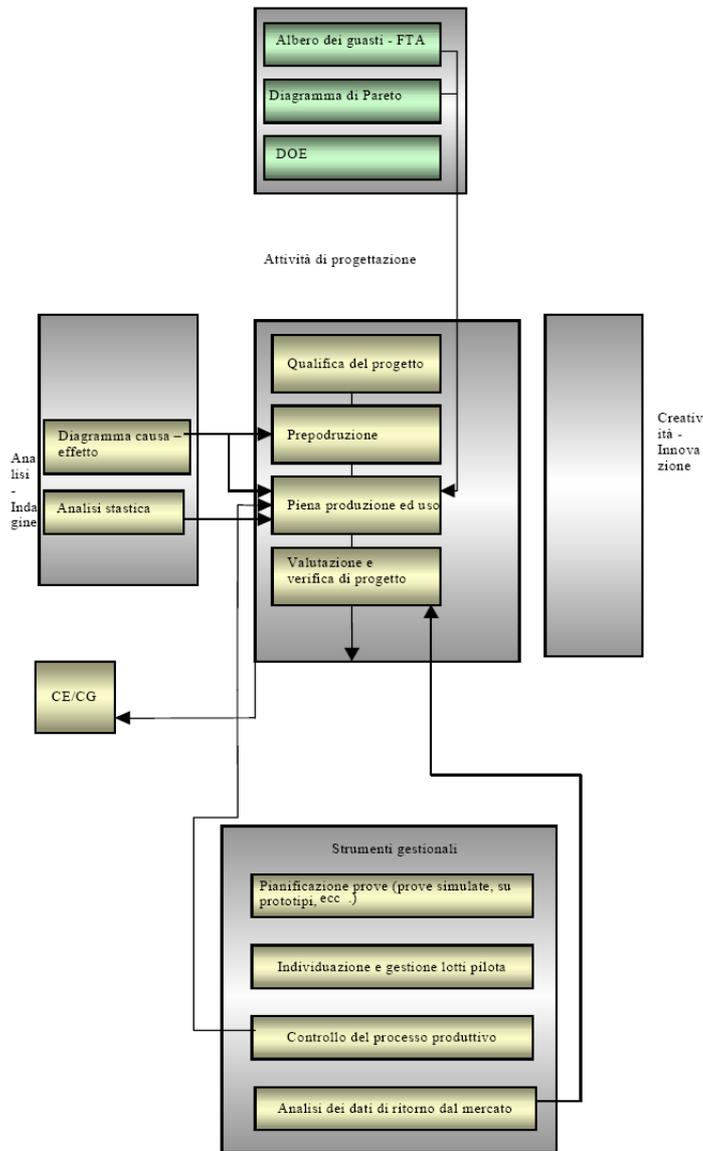


Figura 97 – Fasi di progettazione e strumenti correlati (FTA)

Gli schemi precedentemente proposti hanno mostrato, in definitiva, dopo un’attenta analisi di tutte le fasi che costituiscono il processo di progettazione, l’utilità dell’impiego dei vari strumenti di supporto alle diverse fasi di progetto.

La metodologia proposta dal TQP ha invece consentito di individuare con precisione per le diverse tipologie di intervento quale strumento far intervenire e in quale specifica fase del processo. Dall'applicazione della metodologia proposta numerosi sono i vantaggi emersi. Non poche sono state le difficoltà di implementazione, ma come visto nei paragrafi precedenti i benefici conseguiti con un approccio integrato del tipo TQP con la supervisione dello strumento QFD sono di gran lunga superiori ai sacrifici affrontati. Lo schema di dettaglio in quest'ultimo paragrafo ci ha guidato nel corso di tutta l'indagine nelle diverse esperienze maturate e, dal confronto con l'approccio tradizionale, che comunque abbiamo affrontato nel corso dei diversi casi, abbiamo constatato i seguenti benefici conseguiti dall'introduzione del *Total Quality Project* sintetizzabili nella possibilità di:

- definire le caratteristiche del prodotto che rispondono alle reali esigenze del cliente e non a quelle presupposte o preventivate;
- codificare su apposite matrici tutte le informazioni necessarie allo sviluppo di un nuovo prodotto (sfruttando nelle opportune fasi di sviluppo del progetto le tecniche del QFD);
- garantire coerenza tra le esigenze manifestate dal cliente e le caratteristiche misurabili del prodotto senza trascurare nessun punto di vista;
- rendere informati tutti i responsabili delle singole fasi del processo circa le relazioni tra la qualità dell'output d'ogni fase e la qualità del prodotto finale (dal momento che le diverse funzioni sono tutte rappresentate nel TQP);
- ridurre le necessità d'apportare modifiche e correzioni nelle fasi avanzate di sviluppo, avendo in mente fin dall'inizio tutti i fattori che possono influenzare l'evoluzione del progetto e dunque, in ultima analisi, del prodotto e delle sue caratteristiche;

- ridurre, per effetto di quanto sopra affermato, drasticamente i costi, dal momento che le modifiche maggiori verrebbero apportate al progetto nelle fasi precedenti la proto tipizzazione e/o la produzione;

- minimizzare i tempi d'iterazione con il cliente;

- aumentare la capacità di reazione dell'azienda, in quanto la progettazione, coerente alle esigenze del cliente, avviene in una fase preliminare e gli errori di cattiva interpretazione delle priorità e degli obiettivi sono minimizzati;

- auto-documentare il progetto nel corso della sua evoluzione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Galgano, I sette strumenti della qualità totale. Manuale operativo, Il Sole 24 Ore Libri, 1992.
- [2] A. Galgano, I sette strumenti della qualità totale. L'approccio qualitativo ai problemi, Il Sole 24 Ore Libri, 1994.
- [3] Baumgartner, Kuiszewski, Wieding, CIM, Considerazioni di base. Tecniche nuove, 1990.
- [4] Beckers H.J., Project Management. R.W.K Handbook, 1980.
- [5] Bergman B. Klefsjö; Quality from customer needs to customer satisfaction. McGraw-Hill, 1994.
- [6] Birolini, E. Carrada, S. Contini, "R.A.M.S. un Approccio Integrato", Convegno dell'Associazione Centro Insulare per la Qualità, Roma, 6 Giugno 1996.
- [7] Bombonato Claudio, L'esperienza è la chiave per ridisegnare l'azienda, L'Impresa, marzo 1994.
- [8] C. Paracone, F. Uberto, Le nuove frontiere della produttività: la flessibilità totale, Sipi editore, 1992.
- [9] Cerato, Paracone, Osella, Uberto, La fabbrica: camminando con l'innovazione, Sipi editore, 1987.
- [10] Claudia Piccardo, Roberto Grieco, La realizzazione dei progetti di Qualità Totale, Sviluppo & Organizzazione, n° 157 1996.
- [11] D. Falcone, Interventi per il miglioramento della qualità in un'industria elettromeccanica, ANIMP Capri 1995.
- [12] D. Falcone, F. De Felice, Processo di ottimizzazione del layout in una azienda produttrice di VDT- Conferenza Nazionale ANIMP -Venezia 1996.
- [13] D. Falcone, F. De Felice. "The qualification of a process in an electromechanical company through the employment of TQM techniques International conference on concurrent engineering", Erlangen (Germania), aprile 1997.
- [14] D. Falcone, F. De Felice, Control and optimization of the production process of company for electrical components, International conference on concurrent engineering, Cambridge Londra, Aprile 1996

- [15] D. Falcone, P.E. De Felice, L. Caroppo, D. Giorchino, G. Povolieri, A. Verdelli, Progettazione e realizzazione di un multimediale sulla qualità nel settore dell'impiantistica, ANIMP 1995
- [16] D. G. Raheja, "Assurance Technologies: Principles and Practices", McGraw-Hill, New York, 1991.
- [17] DATAMYTE, Guida pratica alla raccolta dei dati computerizzata per il controllo statistico di processo, Franco Angeli Editore, 1990.
- [18] De Falco, Masturzi, Cesarotti, Il modello *activity based value added breakdown* nelle aziende ad alta tecnologia. *Impiantistica italiana* n.4, aprile 1992.
- [19] [19] De Risi P., Progettare in Qualità. Metodi, tecniche e fasi di progettazione, sperimentazione ed analisi statistica dei dati, Il Sole 24 Ore Libri, 1996
- [20] Deid, "Risk Management and Cost-Benefit Analysis", Product Safety, Parigi 1983.
- [21] Donald J. Wheeler, D.S. Chambers, Il Controllo Statistico di Processo, Franco Angeli, Milano 1995.
- [22] E. J. Henley, H. Kumamoto, "Reliability Engineering and Risk Assessment", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981.
- [23] E. Masturzi, D. Falcone, L. Arcangeli, V. D'Amelio, S. Napolitano, La certificazione di Qualità, Guida per la Piccola Impresa, Ed. TECNOS s.c.r.l. 1995.
- [24] E. Tamburrano, Il controllo statistico di qualità, Franco Angeli Editore, 1989.
- [25] E. Masturzi- L'organizzazione e gestione della produzione industriale. Ed. Liguori, 1990.
- [26] E.W. Deming - L'impresa di qualità - ISEDI Torino, 1991.
- [27] Envrish, 83° International workshop, "Risk Assessment and Management in the Eighties", Pisa, Giugno 1983.
- [28] F. R. Carrubba e R. D. Gordon, "Product assurance principles", McGraw-Hill, New York 1975.
- [29] Ferraresi, Galgano, Montefusco, Guida alla preparazione del manuale della qualità totale nel settore legno, Il Sole 24ore libri, 1993.
- [30] G. Arcidiacono, R. Capitani, P. Citti, "F.M.E.C.A. Application to Evaluate the Safety in the Integrated Design of Mechanical System", International Conference on Design Tools and Methods in Industrial Engineering, Firenze, 17 - 19 Settembre 1997.
- [31] G. Mattona, "Qualità, affidabilità, certificazione", Franco Angeli, Milano 1986.
- [32] G. Taguchi, "Introduction to Quality Engineering", Asian Productivity Organization, Tokyo 1986.
- [33] G. Taguchi, Introduzione alle tecniche per la qualità. Progettare qualità nei prodotti e nei processi, Franco Angeli Editore, 1991.
- [34] Galgano A., Metodi statistici per il miglioramento dei processi produttivi, Il Sole 24 Ore Libri, 1990

- [35] Galletto F., Elementi strategici per la qualità, ATA- Ingegneria Automotoristica, giugno/luglio 1989.
- [36] Galletto F., “Metodi Taguchi: elementi di meditazione per gli studiosi di statistica, La professionalità dello statistico aziendale, 14-15 settembre 1989.
- [37] Gene Hall, Jim Rosenthal e Judy Wade, Tutte le condizioni per la riprogettazione , Havard Business Review July/Agust 1990 n°5.
- [38] Giorgio Deangeli, Strategie della qualità, Sviluppo & Organizzazione n°134 1992.
- [39] Gregory H. Watson, Il Benchmarking, Franco Angeli, Milano 1995.
- [40] H. Kume, Metodi statistici per il miglioramento della qualità, ISEDI 1993.
- [41] Ishikawa K., What is Total Quality Control? The Japanese Way. Prentice Hall, Engelwood Cliffs, N.J. 1985.
- [42] J.A.Brimson, Activity Accounting- J.Wiley & sons Inc.,1991.
- [43] Juran J. M., Quality Control Handbook. McGraw-Hill, 1989.
- [44] K. Ishikawa, Guida al controllo di qualità, Franco Angeli Editore, 1992.
- [45] Kume H., Statistical Methods for Quality Improvement. AOTS, 1985.
- [46] L. Thygerson Alton, “Safety”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1984, II ed.
- [47] Levi R. , “Elementi di statistica sperimentale”. Istituto per le ricerche di tecnologia meccanica, 1972.
- [48] Levi R. “Elementi di statistica sperimentale”. Istituto per le ricerche di tecnologia meccanica, 1972
- [49] M. S. Phadke, “Quality Engineering Using Robust Design”, Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1989.
- [50] Martorana, Masturzi, Cesarotti- La produzione snella - Università di Napoli – Elasis, 1992
- [51] Masaki Imai, KAIZEN: La strategia giapponese del miglioramento, Il Sole 24 Ore Libri, 1986,.
- [52] Massimo Aielli, Sabrina Cavenaghi, Il movimento della qualità, Sviluppo & Organizzazione, n° 141 1994.
- [53] M. Hammer, Reengineering work: don't automate, obliterate, Havard Business Review July/Agust n°4 1990.
- [54] N. E. Ryan, I Metodi di Taguchi ed il QFD, Franco Angeli Editore, 1990.
- [55] Nakane Chie- Tate Shakai (Vertical Society)
- [56] Oakland J.S. & Followell R.F.; Statistical Process Control. Butterworth-Heinemann, 1990.
- [57] P. B. Crosby, Obiettivo Qualità ,McGraw-Hill, 1996.
- [58] P. Citti, A. Mazzaranghi, “Quality and Safety in Mechanical Design”, International Seminar on Principles and Methods of Engineering Design, Napoli, 1-3 Ottobre 1997.

- [59] P.E. Vannetti, "Il ruolo del costruttore tra i fattori della sicurezza stradale", ATA Ingegneria Automobilistica, Marzo 1997, vol. 50, n. 3.
- [60] P.F. Bertino, G. Colombo, "L'analisi delle aspettative del cliente", ATA-Ingegneria Automobilistica, Agosto-Settembre 1992, vol. 45, n. 8-9.
- [61] Paola Varacca Capello- La valutazione dell'integrazione verticale - Economia e Management, vol.21, luglio 1991.
- [62] Parnaby - The Need for Fundamentals Changes in U.K. Manufacturing Systems Engineering - Proceedings of 4th European conference on Automated Manufacturing, May 1987.
- [63] R. Capitani, P. Citti, M. Fantacchiotti, M. Porta, M. Vianello, "Sviluppo ed applicazione della worst case analysis ad un componente automobilistico", ATA-Ingegneria Automobilistica, Aprile 1996, vol. 49, n.4.
- [64] R. Cianotti e A. Di Mambro, "Analisi dei rischi sui luoghi di lavoro", De Qualitate, Luglio 1995.
- [65] R. Fukuda - CEDAC: a Tool for Continuous Systematic Improvement - Productivity Press, Cambridge, 1989.
- [66] R. Klerx, Process Capability Study. SKF Engineering & Research Centre, 1995.
- [67] R. Delera, Punto, ecco la fabbrica rivoluzionaria dove nasce la nuova FIAT. Inserti di Epoca 1993.
- [68] Roberto Groppetti, Metodologie e tecniche di progettazione, Sviluppo & Organizzazione, 1996.
- [69] Ron Collard, La qualità totale, Franco Angeli Editore, 1991.
- [70] Roy L. Harmon Rinnovare la Fabbrica (la produzione snella dal modello alla realtà) Il Sole 24 Ore Libri ,1992.
- [71] Ruzie, Neil P. - The Automated Factory: a Dream Coming True? - Control Engineering, aprile 1978.
- [72] S. Ferry Ted, "Modern Accident Investigation and Analysis", John Wiley & Sons, Londra 1988.
- [73] S. Jacoponi, "Alleggerimento, miglioramento del prodotto, aumento della sicurezza e del comfort nei nuovi veicoli", ATA-Ingegneria Automobilistica, Giugno-Luglio 1994, vol. 47, n. 6/7.
- [74] S. Mizuno, Fare qualità. Guida operativa, ISEDI 1997.
- [75] S. Re Fiorentin, "Design of experiment" e "robust design" per il miglioramento di prestazioni e qualità di prodotti e processi, 1994.
- [76] W. H. Von Alven, "Reliability Engineering", Aring Research Corporation, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1964.
- [77] W.E: Eureka, N.E. Ryan, L'Azienda guidata dal cliente - Franco Angeli, 1989.
- [78] Womack, Jones, Roos : La macchina che ha cambiato il mondo. Rizzoli, 1991.