

# IL CONTROLLO DI QUALITÀ TRAMITE I DISEGNI SPERIMENTALI

Rossella BERNI\*

## Prefazione

Il presente lavoro vuole essere una breve e semplice presentazione del metodo del disegno degli esperimenti applicato al controllo statistico della qualità. Tale scritto non ha pertanto la pretesa di essere esaustivo, ma anzi, se ne sottolinea l'aspetto divulgativo, che talvolta penalizza la formalizzazione metodologica di questo scritto.

## 1. ANALISI DELLA VARIANZA: CONCETTI INTRODUTTIVI

Il problema fondamentale della ricerca sperimentale è verificare se al variare di certe condizioni (fattori sperimentali o trattamenti) si ha una variazione sui risultati sperimentali, misurati da una variabile di risposta.

In questo contesto, il disegno sperimentale e la pianificazione degli esperimenti hanno un ruolo fondamentale insieme alla analisi della varianza, metodo statistico che valuta l'apporto e l'influenza di ciascuna fonte di variabilità su una variabile dipendente assunta come "risposta" per il nostro studio.

Consideriamo inizialmente  $N$  risultati ottenuti effettuando un esperimento in cui le unità di osservazione sono randomizzate in  $K$  gruppi, o  $K$  livelli di un fattore; dove per fattore si intende una variabile indipendente che ha influenza sulla variabile di risposta, o variabile dipendente, assunta a misura dell'esperimento. In questo caso, la struttura sperimentale di base è la più semplice possibile e corrisponde all'analisi della varianza ad un unico criterio di classificazione; i  $K$  gruppi o livelli possono essere, per esempio, dosi di un farmaco, tipi di fertilizzante, tipi di prodotto.

Ciascuna distinta situazione sperimentale, connessa al singolo gruppo o livello, è detta combinazione sperimentale; ciascuna prova in corrispondenza di ogni combinazione sperimentale è detta osservazione sperimentale. Il nostro scopo iniziale è quello di capire se la variabilità complessiva dello studio effettuato, e misurata attraverso la variabile di risposta ( $Y$ ), può essere suddivisa in distinte fonti di variabilità. Una variabilità imputabile alla classificazione rispetto ai trattamenti (combinazioni sperimentali) e una variabilità dovuta agli effetti accidentali di fattori di perturbazione, che, al livello introduttivo di questa presentazione, non sono misurabili né tantomeno controllabili. A questa iniziale distinzione possiamo associare due componenti; la prima fonte di variabilità, di natura sistematica, deriva dalla pianificazione sperimentale effettuata e può essere identificata- in questa prima spiegazione- nella Devianza Tra Gruppi ( $D_B$ ), mentre la seconda fonte di variabilità riguarda la variabilità accidentale, parte della variabilità complessiva che risulta "non spiegata" e che viene valutata tramite la Devianza Entro Gruppi ( $D_w$ ). La somma di queste due componenti di variabilità è uguale alla Devianza Totale ( $D_T$ ) e la relazione ora illustrata è detta scomponibilità della devianza. La valutazione di  $D_w$  avviene introducendo il concetto di Replicazione; ovvero la possibilità di ripetere l'esperimento un numero finito di volte nelle medesime condizioni sperimentali. Il concetto di replicazione è molto importante nell'analisi della

---

\* **Rossella Berni**, Dipartimento di Statistica "G. Parenti", Viale Morgagni 59, 50134 Firenze, Italia.  
Tel. +39 0554237211; fax +39 0554223560; e-mail: [berni@disia.unifi.it](mailto:berni@disia.unifi.it).  
Web-site: <http://www.disia.unifi.it>; pagina personale: <http://local.disia.unifi.it/berni>.

varianza e nella strategia sperimentale. Si ipotizza, fondamentalmente, che la variabilità accidentale si manifesti implicitamente proprio tramite la combinazione sperimentale effettuata in condizioni sperimentali identiche. Allora, la differenziazione tra tali repliche, che sicuramente non daranno un identico risultato proprio perché le condizioni sperimentali sono solo ipoteticamente identiche, è imputabile agli effetti di quei fattori accidentali o di perturbazione “non spiegabili” (o, se si vuole, non misurabili né controllabili) e la replicazione risulta l'unico strumento di cui disponiamo per catturare questa componente.

Se questa distinzione iniziale tra fonte sistematica e fonte accidentale di variabilità è stimabile tramite la scomponibilità della devianza totale, va comunque sottolineato che  $D_B$  è una stima degli effetti sistematici se e solo se si può presupporre una perfetta additività tra le due componenti. Questa perfetta additività si ha se e solo se è ragionevole presupporre che l'effetto dei fattori di perturbazione si manifesti, nello stesso modo ed in ugual misura, sia tra i gruppi (tra livelli) che entro i gruppi (entro livelli). Quindi, in sostanza, sia tra le osservazioni appartenenti a gruppi diversi, sia tra le repliche entro lo stesso gruppo. Questa condizione è garantita dal concetto di Randomizzazione. Si ha randomizzazione quando si procede ad una associazione casuale tra unità sperimentali e trattamenti, ovvero, tra unità sperimentali e livelli del fattore; o tra unità sperimentale e combinazione sperimentale (trattamento) se nell'esperimento si hanno più fattori.

Pertanto, sintetizzando formalmente quanto finora esposto a livello introduttivo, si può ipotizzare che la generica osservazione sperimentale  $y_{ij}$  sia così esprimibile:

$$y_{ij} = \mu_i + e_{ij} \quad i=1, \dots, K; j=1, \dots, n_i \quad (1)$$

dove  $K$  sono i gruppi, o i livelli dell' unico fattore considerato  $A$ ,  $n_i$  indica la numerosità delle repliche entro il generico  $i$ -mo gruppo o livello ( $N = \sum_i^K n_i$ ). La componente  $\mu_i$  identifica la parte sistematica del modello di analisi della varianza (1), esprimibile anche come somma di:

$$\mu_i = \mu + \alpha_i \quad i=1, \dots, K \quad (2)$$

Dove  $\alpha_i$  rappresenta l'effetto sistematico del trattamento  $i$ -mo; la componente  $e_{ij}$  rappresenta la parte di variabilità accidentale imputabile alla  $j$ -ma replicazione entro lo  $i$ -mo gruppo, o livello. Pertanto, dalla schematizzazione fornita, si nota come la differenziazione tra le osservazioni sperimentali entro lo stesso gruppo dipenda unicamente dalla componente casuale. Per tale componente, sulla base del criterio di randomizzazione e del concetto di replicazione, possiamo ipotizzare che le componenti casuali siano Indipendenti e Identicamente Distribuite, (IID), secondo una distribuzione Normale con media nulla e varianza costante  $\sigma^2$ , quest'ultima detta anche condizione di omoschedasticità, ( $N(0, \sigma^2)$ ).

Per valutare se vi è un effetto significativo del fattore considerato nella pianificazione sperimentale, si ricorre ai test di ipotesi e al concetto di ipotesi nulla ( $H_0$ ) e di ipotesi alternativa ( $H_1$ ). Per il modello (1) l'ipotesi nulla  $H_0$  è data da:

$$H_0: \alpha_i = 0 \quad \forall i; \quad i=1, \dots, K$$

Mentre l'ipotesi alternativa ( $H_1$ ) è così esprimibile:

$H_1: \alpha_i \neq 0$  (per almeno un i-mo gruppo o livello).

Se si accetta l'ipotesi nulla, si suppone che l'effetto sistematico dovuto al fattore A (ed in generale ai trattamenti) sia nullo e quindi, per ogni i-mo gruppo o livello, l'osservazione sperimentale risulta come somma di due termini: media generale e componente casuale. Se si verifica questa situazione sperimentale, allora  $D_B$  è soltanto uno stimatore alternativo per la variabilità accidentale. Ricordiamo infatti brevemente che:

$$D_{w_i} = \sum_j (y_{ij} - \mu_i)^2 \quad (3)$$

Quindi  $D_w$ , per ciascun gruppo, può essere vista come somma di quadrati di  $n_i$  valori che, secondo le ipotesi espone in precedenza e standardizzati con  $\sigma^2$ , si distribuiscono secondo una distribuzione Chi-quadrato con  $n_i$  gradi di libertà; mentre il corrispondente stimatore si distribuisce secondo una Chi-quadrato con  $(n_i-1)$  gradi di libertà, con la media incognita  $\mu_i$  stimata tramite la media campionaria  $\bar{y}_i$ .

Parallelamente,  $D_B$  è calcolata come confronto tra la media generale e le medie per ogni i-mo livello:

$$D_B = \sum_i (\mu_i - \mu)^2 n_i \quad (4)$$

con corrispondente stimatore:

$$D_B = \sum_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (5)$$

dove  $\bar{y}_i$  ( $i=1, \dots, K$ ) sono  $K$  medie campionarie, calcolate su  $K$  campioni estratti da  $K$  popolazioni distribuite normalmente, e quindi anch' esse distribuite normalmente con  $E(\bar{y}_i) = \mu_i$ .

Supponiamo, per semplicità, che  $n_i = n$  per ogni i-mo livello, allora, riassumendo brevemente, si può dimostrare che anche  $D_B$  è esprimibile in  $(K-1)$  confronti indipendenti e ortogonali ai confronti di  $D_w$ . Pertanto  $D_B$  risulta una somma di  $(K-1)$  quadrati che, standardizzati con  $\sigma^2$ , danno luogo alla somma di  $(K-1)$  variabili casuali Normali standardizzate al quadrato che si distribuiscono secondo una Chi-quadrato con  $(K-1)$  gradi di libertà se vale l'ipotesi nulla prima formulata, ovvero se  $D_B$  risulta una stima alternativa alla componente accidentale. Se invece ciò non si verifica, la distribuzione delle  $(K-1)$  variabili casuali Normali standardizzate al quadrato segue una Chi-quadrato non centrale con  $(K-1)$  gradi di libertà, dove il parametro di non centralità è così espresso:

$$\frac{\sum_i (\mu_i - \mu)^2 n}{K-1} \quad (6)$$

Tale parametro di non centralità (6) dipende unicamente dall' effetto sistematico dei trattamenti  $\alpha_i$ . In questo caso  $D_B$  misura il reale effetto del fattore coinvolto nell' esperimento e il ricercatore rifiuta l'ipotesi nulla per accettare l'ipotesi alternativa ( $H_1$ ): almeno un valore  $\alpha_i$  risulta significativamente diverso da zero al livello di significatività  $\alpha$ .

Il test di riferimento è il test F di Fisher-Snedecor, con statistica test:

$$F = \frac{SS_B / (K-1)}{SS_W / (N-K)} \quad (7)$$

se vale  $H_0$ , la (7) si distribuisce secondo una Fisher-Snedecor centrale con  $(K-1; N-K)$  gradi di libertà:  $(F_{(K-1, N-K; \alpha)})$ ; ricordando che la Fisher-Snedecor è esprimibile come il rapporto tra due distribuzioni Chi-quadrato rispettivamente divise per i loro gradi di libertà.

## 2. PIANIFICAZIONE E DISEGNO SPERIMENTALE

Come abbiamo detto, i fondamenti dell'analisi della varianza precedentemente illustrati sono essenziali per sottolineare i concetti principali del disegno sperimentale e della strategia legata alla pianificazione sperimentale.

La relazione esistente tra strategia sperimentale, disegno sperimentale e analisi della varianza è esprimibile tramite lo scopo fondamentale e generale del disegno sperimentale, che è quello di ridurre quanto più possibile la variabilità accidentale (“non spiegata”) tramite una idonea pianificazione sperimentale che riesca ad individuare, per il fenomeno oggetto di studio, i fattori che influenzano la variabile di risposta e il ruolo che questi fattori hanno nell'analisi.

Nella programmazione sperimentale è infatti fondamentale procedere per fasi distinguendo essenzialmente tra l'identificazione della variabile di risposta (Y) quantitativa (o delle variabili di risposta) e dei fattori che la influenzano, siano essi di natura qualitativa e/o quantitativa, dei quali oltre al ruolo nell'analisi deve essere specificato anche il campo di variazione.

Inoltre, in generale ma anche e soprattutto nel controllo di qualità, è di notevole importanza la disponibilità di informazioni a priori, che possono essere di aiuto per la stessa pianificazione, permettendo l'utilizzazione di piani sperimentali con un ridotto numero di osservazioni.

Il diverso ruolo dei fattori coinvolti nell'esperimento conduce a scelte strategiche diverse nella pianificazione e quindi a diversi disegni sperimentali.

Una primaria distinzione si ha tra: 1) fattore sperimentale o di interesse; 2) fattore sub-sperimentale (ad esempio fattore blocco); 3) fattore di perturbazione (*noise*).

Per fattore sperimentale si intende quel fattore che si suppone influenzi direttamente la variabile di risposta (Y): un esempio classico è dato dal tipo di fertilizzante che influenza la crescita di una particolare specie di pianta. In questo esempio però non si considera la composizione del terreno, che può influenzare indirettamente la Y agendo direttamente sul tipo di fertilizzante. In questo caso la composizione del terreno è un fattore sub-sperimentale.

I due disegni sono riconducibili rispettivamente al disegno completamente casualizzato e al disegno a Blocchi Randomizzati Completi (BRC), mentre, se si considerano più fattori, tutti di interesse per lo sperimentatore, si può avere il disegno fattoriale completo, che permette anche lo studio della associazione tra fattori.

Nel seguito si illustra con un esempio il disegno completamente randomizzato e l'analisi della varianza ad un unico criterio di classificazione. Per maggiori dettagli sul disegno degli esperimenti e sul disegno degli esperimenti in ambito tecnologico si rimanda a: Cochran and Cox, 1957; Box, Hunter and Hunter, 1978; Logothetis and Wynn, 1989; Cox and Reid, 2000; Montgomery, 2001; Salvi, 2002.

L'esempio (dati fittizi) riguarda la coltivazione per la preservazione di una pianta usata in ambito alimentare: lo zafferano (per dettagli si veda: Delle Donne et al., 2008). In questo caso il genere è il *Crocus* e le coltivazioni sono situate in Toscana (provincia di Siena), in appezzamenti di terreno di circa 100  $\text{m}^2$ . Il fattore sperimentale è in questo caso costituito da una miscela di fertilizzante (persolfato e solfato ammonico potassico) con 4 livelli di miscelazione (A,B,C,D) con cui sono trattati gli appezzamenti secondo un disegno completamente randomizzato con  $N=16$  osservazioni sperimentali relative alla raccolta di stimmi freschi (Y) misurata in grammi su ciascun

appezzamento, suddiviso in 4 piccole aree di 25 m<sup>2</sup> adiacenti (e pertanto con caratteristiche di terreno molto simili se non identiche). Il disegno si dice completamente casualizzato in quanto l'associazione tra appezzamento di terreno e livello di composto-fertilizzante è completamente casuale ed infatti possiamo notare come, per esempio, il livello C compaia due volte per l'appezzamento 1 e non sia associato all'appezzamento 4 (Tabella 1).

Si sottolinea che il modello statistico corrispondente a questo disegno sperimentale è il modello di formula (1) con N=16 prove e 4 replicazioni per ciascun livello composto-fertilizzante; pertanto è un disegno bilanciato.

Tabella 1. Dati relativi al disegno completamente randomizzato  
(in parentesi gli stimmi freschi raccolti (Y) in grammi)

<b>Appezzamenti</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
	A (50)	C (8)	D (18)	A (56)
	B (44)	A (24)	C (4)	B (22)
	C (36)	B (6)	A (20)	D (40)
	C (44)	D (20)	B (10)	D (30)

In questo disegno, che possiamo considerare come la forma più semplice di piano sperimentale, si prescinde da valutazioni più approfondite della componente sistematica.

In relazione ai dati di Tabella 1 si hanno i risultati dell'analisi della varianza presentati in Tabella 2. Come si può notare, la fonte di variabilità "composto-fertilizzante" coincide esattamente con D<sub>B</sub>, in quanto il disegno include un unico fattore sperimentale. Tale fattore risulta non significativo confrontando il valore del test F uguale a 0.8 con il valore tabulato corrispondente: ( $F_{(K-1, N-K; \alpha)} = F_{(3,12, 0.05)} = 3.89$ ); pertanto, si accetta l'ipotesi nulla di non influenza della composizione del fertilizzante sulla crescita dello zafferano. Il modello di riferimento è in questo caso il modello espresso in formula (1) con  $n_i = n = 4$  e  $K = 4$ .

Tabella 2. Risultati analisi della varianza

<b>Fonte di variabilità</b>	<b>Devianza</b>	<b>gl</b>	<b>F-test</b>
Fertilizzante (D <sub>B</sub> )	674.0	3	0.8
Error (D <sub>w</sub> )	3366.0	12	-
Total (D <sub>T</sub> )	4040.0	15	-

Tuttavia, la conclusione che possiamo trarne non è così immediata e semplice. Infatti, se noi osserviamo attentamente i risultati di Tabella 2, è facile vedere che la componente di errore, cioè quella parte di variabilità "non spiegata", assorbe molta parte della variabilità totale. Questo risultato deve mettere in allarme lo sperimentatore; molto probabilmente, la componente erratica contiene una parte di variabilità sistematica imputabile a fattori/variabili non incluse nel piano sperimentale durante la pianificazione, e quindi non misurate oggettivamente durante l'effettuazione delle prove. E' infatti evidente che le replicazioni entro ciascun livello di "composto-fertilizzante" non misurano soltanto la variabilità accidentale ma includono anche la variabilità dovuta alla differente composizione del terreno, per i diversi appezzamenti sui quali lo zafferano è coltivato. L'appezzamento è in questo caso il fattore sub-sperimentale, più precisamente il fattore blocco, confuso qui con la componente erratica.

Pertanto, in questo caso, il piano sperimentale corretto può essere il disegno a blocchi randomizzati completi (BRC) in cui due sono i fattori considerati: 1) il fattore sperimentale (composto-

fertilizzante); 2) il fattore sub-sperimentale, fattore blocco, a 4 livelli (4 appezzamenti di terreno). Due osservazioni finali e riassuntive sul piano BRC e sull'esempio: a) l'allocazione casuale (randomizzazione) tra la prova sperimentale e l'unità sperimentale è in questo caso vincolata, ovvero l'associazione casuale è fatta entro ciascun appezzamento; b) dall'analisi tramite il disegno BRC ci dobbiamo aspettare che la componente di errore diminuisca in modo considerevole a favore di una variabilità sistematica imputabile alla composizione del terreno dei 4 appezzamenti, con conseguente significatività della miscela di fertilizzante (fattore sperimentale).

### 3. INTRODUZIONE AL CONTROLLO STATISTICO DI QUALITÀ

Come è noto dal 1920 ad oggi, il controllo statistico di qualità ha avuto un notevole sviluppo, (Kackar, 1985; Ryan, 1989; Farnum, 1994); in letteratura, ampi sviluppi si sono soprattutto verificati negli anni '80 e '90, quando il disegno sperimentale e i metodi statistici sono stati largamente applicati e proposti per il miglioramento delle tecniche di qualità applicate fino a quel momento, (Phadke et al., 1983; Magagnoli, 1992; Myers and Montgomery, 2002).

In particolare, gli interventi per fare "qualità" si sono spostati dalla fase di ispezione, durante la produzione vera e propria, alla fase di progettazione del prodotto o del processo produttivo. Si è quindi verificato un notevole cambiamento: mentre negli anni '20 il controllo di qualità si effettuava principalmente a livello *on-line*, cioè durante il ciclo di lavorazione, con il passare del tempo, il controllo di qualità *off-line* ha assunto il ruolo principale come insieme di metodi per "fare qualità" e per migliorarla durante la fase di progettazione del prodotto.

"I metodi di controllo di qualità *off-line* sono tecniche di intervento per il controllo dei costi e della qualità effettuate durante gli stadi di progettazione del prodotto o del processo produttivo. Lo scopo principale di tali metodi è quello di migliorare la fabbricazione del prodotto e la sua affidabilità e, al tempo stesso, di ridurre i costi di sviluppo e di manutenzione durante tutta la vita utile del prodotto" (Kackar, 1985).

Il merito di avere dato impulso al controllo di qualità *off-line* deve essere riconosciuto a Genichi Taguchi, ingegnere giapponese, il quale ha introdotto i suoi metodi prima in Giappone (anni '40 e '50) e successivamente negli Stati Uniti, collaborando presso i laboratori dell'AT&T Bell Laboratories (Phadke et al., 1983). Taguchi ha introdotto una metodologia di studio volta sia alla progettazione di prodotti in qualità, riducendo la variabilità interna al processo, sia al raggiungimento di processi produttivi più affidabili e stabili. Questi metodi sono introdotti in fase *off-line* proprio perché si è interessati ad un intervento in fase di progetto; questo tipo di controllo di qualità viene chiamato, più propriamente, miglioramento della qualità.

Ryan (1989) definisce questi strumenti *conversational-tools* invece che *listening-tools*: sia perché l'intervento avviene a-priori, sia perché si tratta di interventi operativi che tendono ad una vera soluzione e non solo ad una verifica oggettiva. Inoltre, l'intervento a-priori serve a migliorare il prodotto prima che entri in fase di lavorazione, riducendo al minimo il successivo ricorso alle tecniche *on-line*, e permette di evitare lo scarto del prodotto o un eventuale reclamo.

L'*American Society For Quality Control (ASQC)* definisce la qualità come "La totalità degli aspetti e delle caratteristiche di un prodotto o di un servizio che influiscono sulla sua capacità di soddisfare a determinate richieste". In questo senso il prodotto deve ovviamente soddisfare le richieste materiali e psicologiche del consumatore, ed è quindi interesse del produttore che il prodotto sia quanto più rispondente a tali richieste. Tanto più il prodotto si allontana dalle caratteristiche

desiderate quanto più causerà una perdita monetaria, perdita che per Taguchi colpisce la società nel suo complesso.

La definizione di Qualità di Taguchi si discosta notevolmente da quella classica, o comunque dalla definizione di Qualità data dalla ASQC. Per Taguchi: "La qualità è la perdita che il prodotto causa alla società dall'istante in cui esso lascia la fabbrica, fatta eccezione per le perdite dovute alle sue specifiche funzioni". Le differenziazioni rispetto alla precedente definizione sono innanzitutto dovute al fatto che la qualità è vista come una perdita. Quanto più il prodotto è lontano dalle caratteristiche ottimali richieste quanto più grande sarà la perdita. Inoltre, è necessario capire qual è il significato di perdita (nella qualità).

Prima di tutto, la qualità non è un valore, in quanto la valutazione del valore di un prodotto è una valutazione soggettiva, che compete ai settori di marketing e/o di pianificazione delle vendite, ma è essenzialmente un problema tecnico. In secondo luogo, la perdita nella qualità può essere sostanzialmente ricondotta a: 1) perdita dovuta a variabilità nel funzionamento; 2) perdita per effetti nocivi.

Pertanto, un oggetto di buona qualità deve avere piccoli effetti collaterali nocivi e avere minima variabilità nelle sue prestazioni tecniche. Il controllo di qualità deve appunto intervenire nella riduzione di questi due tipi di perdite, affinché il prodotto, una volta immesso sul mercato, causi meno perdite possibili alla società in senso lato.

Le caratteristiche di qualità di un prodotto sono costituite dalle caratteristiche finali che definiscono la prestazione del prodotto in modo da soddisfare i bisogni del consumatore. Per determinare qual è il grado di soddisfazione del consumatore rispetto ad una caratteristica di qualità è necessario determinare qual è il valore ideale, o target. Quanto più è ampio lo scostamento della variabile di risposta (in media) rispetto al target, quanto più diminuisce la qualità del prodotto e decresce la soddisfazione del consumatore.

Il controllo delle fonti di variabilità può avvenire a diversi stadi del ciclo di sviluppo di un prodotto. Sinteticamente possiamo suddividere il processo produttivo in tre stadi: progettazione del prodotto (*product design*), progettazione di processo (*process design*) e la fase di produzione vera e propria (*manufacturing*).

Tabella 3. Fasi del processo di produzione e possibili interventi

(# = possibile intervento; \* = intervento non possibile)

Fasi di produzione	Variabili ambientali	Usura	Variabilità tra singoli prodotti
Progettazione del prodotto	#	#	#
Progettazione di processo	*	*	#
Manufacturing	*	*	#

Come si vede in Tabella 3, la fase di produzione in cui è possibile intervenire per limitare tutti e tre i tipi di variabilità è la fase di progettazione del prodotto, che si attua fuori da ciclo di lavorazione, mentre gli altri due stadi (uno sempre in fase *off-line* e l'altro in fase *on-line*) danno possibilità di intervento solo per limitare la variabilità tra i singoli prodotti

Sempre considerando il contributo di Taguchi, lo studio della qualità nello stadio di disegno del prodotto è particolarmente importante perché, mentre la variabilità può essere ridotta anche durante le fasi di produzione (*manufacturing variations*), ciò non può avvenire per la deteriorabilità del

prodotto (*product deterioration*) o per motivi ambientali (*enviromental variations*). Tutti questi problemi di qualità, invece, possono essere affrontati negli stadi di progetto.

La variabilità è causata in generale da tre tipi di disturbi: esterni, interni e rumore, che sono contraddistinti da specifici fattori, dipendenti dal processo produttivo in esame.

I disturbi esterni (*outer noise factors*) costituiscono le variabili ambientali o le condizioni di uso che alterano la funzionalità del prodotto. Due tipici esempi sono la temperatura e l'umidità. I disturbi interni (*inner noise factors*) sono disturbi dovuti al deterioramento per l'uso del prodotto o per il lungo tempo di immagazzinamento. Infine, il cosiddetto rumore tra unità e unità costituisce la fonte di errore accidentale, che provoca la differenza tra i singoli prodotti, riducendone l'affidabilità e la qualità.

### 3.1 IL CONCETTO DI PROGETTAZIONE ROBUSTA

Considerando quanto detto finora nel paragrafo precedente, si vuole introdurre il concetto di progettazione robusta, ovvero, come progettare un prodotto in qualità considerando le fonti esterne di variabilità e come rendere tale prodotto robusto rispetto a questi disturbi. L'introduzione di questo concetto nell'ambito del controllo di qualità si deve a Taguchi con il metodo *Parameter Design* (Kackar, 1985), tuttavia, anche se l'idea iniziale è da imputarsi a Taguchi, l'effettivo sviluppo del concetto di progettazione robusta è avvenuto negli anni '80 e '90, quando l'ampio dibattito in letteratura ha suggerito metodi statistici alternativi alle proposte di Taguchi.

L'idea di base è quella di controllare quanto più possibile tutte le fonti di variabilità, che, a qualsiasi titolo, possono avere influenza sul prodotto o sul processo produttivo, generando un guasto che può ovviamente influenzare ed inficiare le caratteristiche di qualità del prodotto finale.

Uno dei principi fondanti è che durante la fase di pianificazione, si devono valutare tutte le fonti di variabilità che influenzeranno il prodotto anche durante la sua vita utile. Pertanto, se la robustezza è raggiunta, questa permette sia una alta prestazione in qualità ma anche una durata di vita utile soddisfacente.

Attualmente, il concetto di progettazione robusta si è sviluppato anche valutando le specifiche strutture dei disegni sperimentali, come lo split-plot con l'inserimento di effetti sia fissi che casuali (per dettagli si veda Box e Jones, 1992; Berni e Pallottini, 2006) e con l'ottimizzazione, applicando la metodologia delle superfici di risposta (Myers and Montgomery, 2002). Più precisamente, l'iniziale classificazione tra fattori sperimentali e sub-sperimentali è stata estesa includendo anche i fattori *noise* (paragrafo 3), che posso essere a livello fisso (come si è illustrato nel paragrafo 1) oppure, possono essere studiati come fattori casuali (ovvero considerando la loro variabilità); questa è una situazione usuale allorché siamo in presenza di fattori misurabili ma non controllabili; per esempio la temperatura di un laboratorio, l'umidità del suolo.

Al contrario, quando si considerano fattori di processo (sperimentali), essi sono solitamente posti a livello fisso poiché usualmente sono controllabili e misurabili. Tuttavia, esistono fattori che possono essere mantenuti al loro livello nominale, se vengono considerati non rilevanti al momento dello studio, pur essendo fattori di processo.

Un'altra importante e pratica distinzione riguarda i fattori di disturbo; se valutiamo un processo di produzione, l'immagazzinamento di una merce è interno alla azienda ma esterno al processo produttivo vero e proprio. Pertanto, se per esempio l'umidità è un fattore che può danneggiare il prodotto finito, il prodotto dovrà essere reso robusto rispetto all'umidità, in generale e anche pensando al periodo di sosta in magazzino.

Pertanto, quando si pianifica un esperimento è veramente difficile riuscire a considerare in modo costruttivo tutte le fonti di variabilità, identificando per ogni fonte la specifica variabile che può misurarla e le sue caratteristiche (misurabile e/o controllabile); infatti, si deve osservare che la scelta della variabile di risposta e delle variabili su di essa influenti implica una specifica scelta di disegno sperimentale, che può essere differente considerando: 1) il numero di combinazioni sperimentali; 2) se vi sono repliche e se sì, il loro numero; 3) la struttura del disegno sperimentale (per esempio un disegno fattoriale frazionale in confronto ad un disegno split-plot); 4) l'inclusione di fattori a livelli fissi ed, eventualmente, fattori casuali; 5) la formulazione del corrispondente modello statistico.

Inoltre, l'inclusione dei fattori di disturbo entro il disegno sperimentale permette di studiare l'associazione tra fattore sperimentale e *noise* attraverso la combinazione dei livelli. Studiando questa specifica associazione di effetti (detta interazione del I ordine) possiamo tarare i fattori sperimentali al livello desiderato sia per ottenere la qualità del prodotto sia per renderlo robusto al fattore *noise*. La fase finale consiste nella stima di un modello statistico e nella sua successiva ottimizzazione, al fine di minimizzare lo scarto tra la variabile di risposta (Y- misura di qualità) e il target (livello desiderato di qualità).

## REFERENCES

- Berni R., Pallottini A., 2006, *Split-plot e robust design*, Quaderni del Dipartimento di Statistica "G. Parenti", [http://local.disia.unifi.it/ricerca/pubblicazioni/quaderni/quaderni\\_doc/quaderno2006\\_02.pdf](http://local.disia.unifi.it/ricerca/pubblicazioni/quaderni/quaderni_doc/quaderno2006_02.pdf).
- Box G. E. P., Hunter W. G., Hunter S. J., 1978, "*Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building*", John Wiley & Sons, New York.
- Box G. E. P., Jones S., 1992, "*Split-plot designs for robust product experimentation*", *Journal of Applied Statistics*, Vol. 19, No. 1.
- Cochran W. G., Cox G. M., 1957, "*Experimental Designs*", (2<sup>nd</sup> edn), John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Delle Donne A., Romani A., Sciullo A., Vignolini P., 2008, "*Un filo di zafferano per un colore mediterraneo*", *Rivista Abruzzese, Supplemento al n.1-2008*, Lanciano (Italia).
- Cox D. R., Reid N., 2000, "*The Theory of the Design of Experiment*", Chapman e Hall/CRC, New York.
- Farnum N., 1994, "*Modern statistical quality control and improvement*", Wadsworth, Inc., California State University, Fullerton.
- Kacker R.N., 1985, Off-line quality control, parameter design and the Taguchi method, *Journal of Quality Technology*, vol.17.
- Logothetis N., Wynn H. P., 1989, "*Quality Through Design, experimental design, off-line quality control and Taguchi's contributions*", Clarendon Press, Oxford.
- Magagnoli U., 1992, "*Il controllo di qualità off-line: problemi statistici relativi a strategie decisionali ottimali*", *Quaderni di Statistica e Matematica Applicata alle Scienze Economiche e Sociali*, vol. 5.
- Myers R. H., Montgomery D. C., 2002, "*Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*", (2<sup>nd</sup> edn), John Wiley & Sons, New York.
- Montgomery D. C., 2001, "*Design and analysis of experiments*", (5<sup>th</sup> edn), Wiley, New York.

Phadke M.S., Kacker R.N., Speeney D.V., Grieco M.J, 1983, Off-line quality control in integrated circuit fabrication using experimental design, *The Bell System Technical Journal*, vol.62.

Ryan T.P., 1989, *Statistical Methods for quality improvements*, John Wiley & Sons.

Salvi F., 2002, "*Argomenti di metodologia statistica per la ricerca biologica*", Pitagora Editrice, Bologna.