

Metodologia di impiego
delle tecniche di Taguchi
nel Design Of Experiments
nel campo della
saldatura laser ad alta potenza

INDICE

1	Introduzione	3
2	L'applicazione del Metodo Taguchi	3
2.1	Formulazione del problema	4
2.2	Pianificazione degli esperimenti	4
2.3	Analisi dei risultati	4
2.4	Conferma del miglioramento	4
3	Formulazione del problema	5
3.1	Il campo sperimentale di applicazione	5
3.2	La tecnologia del processo	5
3.3	Definizione degli obiettivi	6
3.4	Definizione delle variabili caratteristiche da misurare	8
4	Pianificare l'esperimento	9
5	Condurre l'esperimento e raccogliere i dati	13
5.1	L'introduzione dei fattori esterni (noise) nella sperimentazione	13
6	Raccolta dati ed analisi dei risultati	15
6.1	Raccolta ed elaborazione dei dati	15
6.2	Elaborazione dei dati	16
6.3	Valutazione dei fattori esterni – analisi della varianza	18
6.3.1	Analisi mediante la deviazione standard	18
6.3.2	Analisi mediante il rapporto S/n	19
6.3.3	Previsione dell'ottimo delle prestazioni	20
7	Conclusioni	21

1 Introduzione

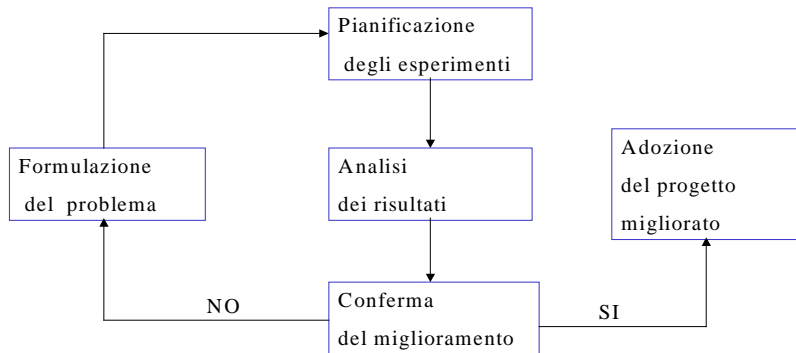
La progettazione degli esperimenti (Design Of Experiments, DOE) può essere un valido strumento nella ricerca di continui miglioramenti della qualità dei prodotti e dei processi: attraverso la sperimentazione si possono identificare i "fattori" che più influenzano la qualità e selezionare per essi dei valori "ottimizzati".

Il DOE consente, con l'applicazione di appropriate metodologie statistiche, di ricavare il massimo di informazioni dal minimo numero di prove sperimentali. Nei progetti di sviluppo di prodotto e nella messa a punto dei processi industriali, infatti, la realizzazione delle prove sperimentali rappresenta quasi sempre la principale fonte di costi, sia come impiego di tempo che di risorse umane e materiali. Studiare i parametri di progetto uno alla volta richiede generalmente tempi lunghi e costi notevoli, ed inoltre non è detto che conduca ad una soluzione ottimale. Il DOE usa semplici strumenti con lo scopo di indagare su un largo numero di parametri con un minimo numero di prove.

Mediante una ragionata applicazione delle tecniche del DOE, è possibile ridurre drasticamente i costi della realizzazione di prove sperimentali, e operando su prove pianificate correttamente è possibile ottenere risultati ricchi di informazioni, anche in considerazione delle semplici tecniche di analisi statistica applicate.

2 L'applicazione del Metodo Taguchi

In questo lavoro il Metodo Taguchi viene applicato sviluppando un ciclo del DOE al caso reale della ottimizzazione del processo industriale di saldatura laser ad alta energia (Co2) esplorando nel dettaglio l'applicazione delle diverse fasi di formulazione del problema, pianificazione degli esperimenti, analisi dei risultati e conferma/adozione del miglioramento cercato in termini di ottimizzazione dei parametri. La sperimentazione viene progettata tenendo in considerazione anche l'influsso dei fattori esterni, secondo i criteri del Robust Design, considerandoli alla stregua di disturbi e adottando la parametrizzazione del sistema più idonea e stabile rispetto alla loro variabilità. Essenzialmente viene seguita la classica procedura illustrata in figura:



2.1 Formulazione del problema

In questa fase viene analizzato il campo di applicazione del metodo, mettendo in evidenza le caratteristiche del processo preso in esame e la possibilità di identificarne tutti gli elementi critici: per far questo viene anche analizzata la tecnologia del processo, allo scopo di identificare sia gli obiettivi della sperimentazione, e quindi le grandezze e i metodi utili a definirne l'efficienza, sia i parametri in gioco che possono incidere sui risultati.

2.2 Pianificazione degli esperimenti

In questa fase, sulla base della funzione obiettivo costruita e dei fattori individuati per la sperimentazione, vengono costruite le matrici del DOE e viene pianificato l'esperimento, introducendo anche i parametri esterni come elemento di valutazione nell'ottica del Robust Design.

2.3 Analisi dei risultati

Vengono qui impostate le matrici di calcolo per la raccolta e l'elaborazione dei dati e per l'analisi dei risultati, che viene condotta sia rispetto ai valori ottenuti (Analisi delle medie) che alla loro variabilità (Analisi della varianza).

2.4 Conferma del miglioramento

In questa fase vengono descritti gli strumenti a disposizione e la loro applicabilità ai risultati ottenuti per verificare a posteriori la correttezza delle assunzioni fatte in fase di progettazione dell'esperimento e le modalità di prosecuzione delle indagini.

3 Formulazione del problema

3.1 Il campo sperimentale di applicazione

La tecnologia laser nel campo della saldatura si è affermata in questi anni in molti settori dell'industria allargando il suo campo di utilizzo, in origine limitato solo ad alcuni processi particolari. Infatti, dopo aver visto la sua introduzione limitatamente all'impiego di laser Ni:Yag di bassa potenza per la saldatura di piccoli componenti, già da diverso tempo negli impianti robotizzati delle grandi linee di produzione in serie sono previsti impianti laser ad alta potenza (CO₂) per la saldatura di organi di trasmissione e lamiere estese e di alto spessore (ad esempio, nel settore automotive, parti di carrozzeria; nel settore navale, parti dello scafo).

La diffusione di questa tecnologia è legata alla qualità della saldatura, che viene realizzata con un apporto termico molto basso e su zone più ristrette del materiale rispetto alle tecniche tradizionali, con distorsioni e conseguentemente tensioni residue ridotte, oltre ai vantaggi di una finitura di alta qualità, alla velocità di esecuzione e all'accuratezza del risultato, senza necessitare del contatto meccanico con il pezzo in lavorazione.

3.2 La tecnologia del processo

La saldatura laser è un processo ad alta densità di energia, che opera secondo due modalità differenti in base alle caratteristiche del fascio impiegato.

Nel caso di sorgenti a bassa potenza (Nd:Yag), l'energia viene trasferita sulle superfici da saldare e agisce trasportata all'interno del materiale per conduzione: questa modalità è utilizzabile per saldature con poca penetrazione e di dimensioni modeste.

In questo caso, il raggio laser focalizza in un piccolo spot di diametro stabilito, e fornisce l'energia per far fondere ed evaporare il metallo.

Nel caso di sorgenti ad alta potenza, la trasmissione del calore avviene attraverso del cosiddetto "key-hole", una cavità che si forma a causa della vaporizzazione istantanea del materiale in corrispondenza del raggio laser.

La presenza di questa cavità, di forma approssimativamente cilindrica, permette al raggio laser di cedere direttamente in profondità al materiale una buona parte della sua potenza incidente, sia direttamente, sia attraverso il mantenimento di vapori di metallo ad altissima temperatura, in grado di rimettere parte dell'energia assorbita verso le pareti del key-hole. Per sorgenti CO₂ ad elevata potenza, vengono utilizzati specchi focalizzanti raffreddati ad acqua al posto delle tradizionali lenti.

La saldatura che si ottiene da questo procedimento è caratterizzata da un buon rendimento, vista l'efficacia degli scambi termici descritti, e da un'elevata penetrazione, come si denota dai particolari rapporti di forma ottenibili nel cordone di saldatura prodotto.

Influisce invece negativamente sul rendimento il fenomeno del "pluming", ovvero la tendenza da parte del vapore che fuoriesce dal key-hole a trasformarsi in plasma, con conseguente diminuzione da parte del raggio della sua profondità di penetrazione. Inoltre, l'energia assorbita dal plasma tende ad essere riemessa in tutte le direzioni, con perdita di efficienza del processo.

Tra i parametri di controllo del processo, l'impiego dei gas di saldatura è fondamentale per il mantenimento del rendimento, dell'efficienza e della qualità della saldatura per i laser CO₂ di elevata potenza. In particolare, i gas di saldatura agiscono sia in termini di protezione della zona di saldatura che delle ottiche laser dai fumi e dalla contaminazione, sia nell'inibizione della formazione del plasma: la scelta delle miscele e dei gas, in funzione della tipologia di saldatura e dei materiali utilizzati è decisiva per il controllo di questo tipo di fenomeno, che, se si presenta in modo rilevante, può portare anche all'interruzione del processo di saldatura.

3.3 Definizione degli obiettivi

Gli obiettivi di miglioramento riguardano l'analisi dell'influenza dei diversi parametri di funzionamento rispetto alla qualità del prodotto di saldatura, per la quale si prendono in considerazione come grandezze di riferimento:

- il rapporto di forma della saldatura, definito come:

$$rf = \text{profondità del cordone} / \text{larghezza media} \quad [L^\circ]$$

- la durezza finale del campione, misurata in un intorno della zona interessata dalla saldatura e dalla deformazione locale residua
- la deformazione residua locale del campione, quale indice di valutazione delle tensioni residue, espressa in gradi Brinell.
- la caratteristica qualitativa del giunto, esprimibile come un indice di merito che tiene conto dell'aspetto, della regolarità del cordone, delle caratteristiche di finitura.

Le grandezze prese in considerazione dovranno essere combinate in un'unica funzione obiettivo che tenga conto anche del peso relativo di ciascuna rispetto a quello che viene considerato come risultato atteso ottimale. Ci troviamo quindi in questo caso nella condizione in cui la valutazione del risultato viene operata in base alla combinazione di quattro diverse grandezze osservabili come riportato in tabella:

Critero	Grandezza	U.M.	Minimo	Target	Massimo	QC	Peso relativo
cr1	Rapporto di forma	n.	0,51	0,75	0,97	StdiB	30%
cr2	Durezza finale del campione	° Brinell	112	125	125	BiB	20%
cr3	Deformazione residua locale	%	0,1%	0,1%	0,5%	SiB	20%
cr4	Caratteristica del giunto	n.	0	1	1	BiB	30%

Fig.1 – grandezze osservabili costituenti la funzione obiettivo

In questi casi, ricordiamo che la determinazione di un'unica funzione obiettivo dovrà soddisfare le seguenti condizioni:

1. Le funzioni componenti dovranno essere misurate in base alla stessa unità di misura, e nel caso di grandezze adimensionali comunque, ciascuna funzione viene espressa come frazione percentuale rispetto all'intervallo minimo - massimo preso in esame. Ad esempio, detto $r=120$ il valore della grandezza del $cr2$ rilevato, in base ai valori della tabella, ai fini del calcolo della funzione obiettivo il valore $cr2$ considerato sarà:

$$cr2 = \frac{r - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} = \frac{120 - 112}{125 - 112} = 0.61$$

2. La caratteristica di qualità (QC) deve essere per tutte o "il maggior valore (BiB)" oppure "il minor valore (SiB)". Qui viene adottato $CQ = \text{BigIsBetter (BIB)}$. Nel caso di grandezze per cui il miglior valore è quello nominale ($cr1$), si può ricondurre la QC al "maggior valore" considerando la differenza rispetto al valore target, rapportandola alla differenza massima registrata, e complementando ad 1. Nel caso specifico, la $cr1$ può essere quindi ricondotta alla $QC = \text{BiB}$ considerando che, se $r = 0.84$ è la misura del rapporto di forma rilevato in uno degli esperimenti, la $cr1$ calcolata per la funzione obiettivo sarà:

$$cr1 = 1 - \frac{d}{d_{\max}} = 1 - \frac{0.09}{0.24} = 0.625$$

Essendo:

$$d = r - r_{std} = 0.09$$

ed in questo caso:

$$d_{\max} = r_{std} - r_{\min} = 0.24$$

Nel caso invece della $cr3$ (SmallIsBetter), si può ricondurre la QC alla BigIsBetter considerando la funzione:

$$cr3 = \frac{r_{\max} - r}{r_{\max} - r_{\min}}$$

3. Ciascun criterio deve essere incluso con un peso appropriato, che tenga conto della sua importanza rispetto al risultato di miglioramento che si vuole ottenere. Da qui è stata valorizzata l'ultima colonna della tabella sopra esposta: la funzione obiettivo potrà quindi in questo caso essere così formulata:

$$Y = 0.3 * cr1 + 0.2 * cr2 + 0.2 * cr3 + 0.3 * cr4$$

3.4 Definizione delle variabili caratteristiche da misurare

L'idea centrale di Taguchi è che una variazione in una prestazione di un prodotto genera una perdita di qualità ed economica nel corso del ciclo di vita del prodotto.

Le sorgenti di queste variazioni possono essere classificate in parametri controllabili ed incontrollabili, cioè "rumore".

Parametri controllabili possono essere considerati le dimensioni geometriche, le variabili caratteristiche del processo, i materiali impiegati.

Parametri non controllabili (rumore, disturbi) possono considerarsi le variabili ambientali, il deterioramento del prodotto, le imperfezioni dei componenti di produzione.

Un settaggio appropriato dei parametri controllabili consente di minimizzare l'effetto del "rumore", piuttosto che agire sul suo controllo.

La progettazione di un esperimento implica quindi la determinazione iniziale di una serie di fattori oggetto dell'indagine.

Nella tabella che segue, vengono evidenziati una serie di fattori caratteristici del processo e del funzionamento del laser in oggetto.

Nell'ambito della progettazione dell'esperimento, occorrerà, per i fattori che si ipotizza abbiano diretta influenza nelle caratteristiche del processo sotto investigazione, determinarne la tipologia, in base al seguente criterio:

- Fattori continui, ai quali possiamo far assumere qualsiasi valore per i livelli che vogliamo prendere in considerazione
- Fattori discreti, per i quali si assumono valori noti per ciascun livello

Per livelli intendiamo i valori o le descrizioni che definiscono le condizioni dei fattori fissati per l'esecuzione di ciascun esperimento.

id.	Fattori	Grandezza/tipo	u.m.
P1	Diametro di spot	Lunghezza	mm.
P2	Frequenza	frequenza	Hz
P3	Energia di impulso	Energia	W
P4	Velocità di avanzamento	Velocità	mm/sec
P5	Inclinazione dello spot	Angolo di incidenza	°
P6	Geometria delle superfici di saldatura	Forma del profilo	A/B
P7	Miscela del gas di saldatura	2 tipologie di miscela	A/B
E1	Purezza del gas di saldatura	Concentrazione impurezze presenti nel gas	ppm
E2	Temperatura del campione	temperatura	°C
E3	Umidità dell'ambiente di saldatura	Umidità relativa	%

Tab. 2 – Fattori candidati che possono influenzare il fenomeno

- Con la notazione Px vengono identificati i fattori interni e controllabili che influenzano il fenomeno in esame (P1...P7): in generale a questo punto si può analizzare attraverso una campagna sperimentale se alcuni di questi risultino essere maggiormente importanti (diagramma di Pareto), e decidere quanti di questi si ritiene di dover includere nella sperimentazione: nel nostro caso, si assume la possibile rilevanza di tutti i fattori individuati.
- I fattori non controllabili (E1...E3): come per i fattori interni e controllabili, è molto importante individuare quei fattori esterni che possono influenzare la funzione obiettivo: va ricordato come l'obiettivo principale del Robust Design è di ridurre la sensibilità del processo alle sorgenti delle variazioni piuttosto che controllare tali sorgenti, e quindi è basilare l'analisi della sensibilità del processo ai fattori esterni. In questo ambito occorre inoltre verificare come sia possibile riprodurre nell'ambito dei nostri esperimenti le condizioni di esposizione ai fattori di disturbo individuati.
- I livelli di ciascun fattore da prendere in esame: la scelta riguarda sia i livelli da considerare in termini di settaggi delle singole grandezze, sia il numero dei livelli su cui distribuire la sperimentazione, tenendo conto che un maggior numero di livelli, pur aumentando l'affidabilità dei risultati, ne aumenta rapidamente il costo ed il numero delle prove.
- Le interazioni: tra i fattori prescelti, un esame di tipo ingegneristico può mettere in evidenza le possibili o probabili interazioni, ed occorre decidere se includere un'interazione oppure aggiungere un fattore addizionale.

4 Pianificare l'esperimento

Per studiare l'influenza di un fattore, occorre effettuare una serie di esperimenti con due o più livelli dello stesso fattore: ovviamente, due è il minor numero di livelli richiesto per poter effettuare un confronto di risultati per la funzione obiettivo, e su questa base determinarne l'influenza. Come detto in precedenza, occorre chiedersi quando la scelta di due soli livelli non possa essere considerata sufficiente. In generale, è possibile affermare che, dal momento che la scelta di due soli livelli ci consente di tracciare una linea tra due punti per quanto riguarda l'andamento della funzione obiettivo, in caso di linearità degli effetti del fattore in esame rispetto alla funzione stessa, l'adozione di più livelli può risultare non necessaria, mentre è necessaria laddove si sospetti (per ragioni fisiche o per la natura del processo) che l'andamento non sia lineare all'interno dell'intervallo di sperimentazione.

Per effettuare questa valutazione, riportiamo la tabella dei fattori interni con le relative ipotesi di settaggio dei parametri:

id.	Fattori	u.m.	P _{min=1}	P _{std}	P _{max=2}	l _{min}	l _{max}
P1	Diametro di spot	mm.	3	3	4	2	2
P2	Lunghezza d'onda	µm	10.0	10.6	15	0.7	7
P3	Densità di energia	W/cm ²	1x10 ⁶	1.1x10 ⁶	1.2x10 ⁶	0.1x10 ⁶	0.5x10 ⁶
P4	Velocità di avanzamento	mm/sec	12	13.3	15	4.2	3.4
P5	Inclinazione dello spot	°	90°	90°	95°	15°	15°
P6	Geometria delle superfici di saldatura	A/B	A	n.a.	B		
P7	Miscela del gas di saldatura	A/B	A	n.a.	B		

Per il processo in esame, potremmo considerare lineari gli effetti dei settaggi dei singoli parametri, tenendo però conto del posizionamento e dell'estensione del dominio di azione dei due valori prescelti, poiché i settaggi potrebbero interessare valori (ad esempio, per la densità di energia) dove viene a mancare o a modificarsi strutturalmente l'efficacia del fenomeno fisico. Per considerare questo, viene riportato in tabella per ciascuna riga un fattore λ , il cui significato è quello di individuare l'ampiezza massima di scelta dei settaggi in modo tale che:

$$P_{\max} - P_{std} = dP_{\max} < I_{\max}$$

$$P_{std} - P_{\min} = dP_{\min} < I_{\min}$$

Come si evince dai valori riportati, in tutti i fattori selezionati è possibile condurre la sperimentazione a due livelli in ambito di linearità:

- per i fattori P1-P5 essendo verificate le condizioni :

$$dP_{\min} < I_{\min}$$

$$dP_{\max} < I_{\max}$$

ed avendo ipotizzato in tutti i casi un andamento lineare degli effetti rispetto alle variabili prese in esame;

- per P6 e P7 poiché siamo nel caso di una scelta legata all'adozione di due differenti tipologie di geometria delle superfici nel primo caso, e di due diverse miscele di gas utilizzabili nel secondo, per cui abbiamo soltanto due settaggi discreti.

Essendo nel caso di più fattori che incidono simultaneamente, occorre in questa fase progettare la matrice dell'esperimento.

Le matrici DOE sono così costituite:

- ogni riga rappresenta una combinazione di livelli dei diversi fattori per la quale viene effettuato un esperimento;
- ogni colonna rappresenta la valorizzazione dei livelli di ciascun fattore nei singoli esperimenti.

Di seguito si riporta ad es. una tabella completa (sono presenti tutte le combinazioni di livelli per ciascun fattore), per il caso di 3 fattori con due livelli (1 e 2):

# Esperimento	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 3
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

Il totale delle n combinazioni possibili di un numero dato di fattori, per ognuno dei quali si vogliono due livelli di settaggio, è dato dalla seguente tabella:

Condizioni sperimentali		$n = l^p$	n
Fattori	Livelli		
3	2	$n = 2^3$	8
4	2	$n = 2^4$	16
7	2	$n = 2^7$	128

Come si può ben vedere, l'applicazione di una matrice completa comporta, al crescere dei fattori da analizzare, un numero eccessivo di esperimenti, e dall'esempio della tabella riportata relativa al caso di 3 fattori si intuisce come in presenza di condizioni di indipendenza e linearità dei fattori non tutte le combinazioni dei fattori siano significative ai fini della valutazione in atto.

Per la progettazione di esperimenti nel comune ambito industriale, Taguchi ha costruito un certo numero di matrici ortogonali, che consentono di affrontare la sperimentazione riducendo drasticamente il numero delle combinazioni previste dalle matrici complete.

Di seguito si riporta uno schema presente in letteratura che illustra la varietà delle matrici di Taguchi applicate a casi sperimentali con diverso numero di fattori e di livelli:

Orthogonal Array	Number of Rows	Maximum Number of Factors	Maximum Number of Columns at These Levels			
			2	3	4	5
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
L'16	16	5	-	-	5	-
L18	18	8	1	7	-	-
L25	25	6	-	-	-	6
L27	27	13	-	13	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L'32	32	10	1	-	9	-
L36	36	23	11	12	-	-
L'36	36	16	3	13	-	-
L50	50	12	1	-	-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	63	63	-	-	-
L'64	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

Nel nostro caso, prendendo in considerazione i sette fattori prescelti, con ciascuno due livelli di settaggio, la matrice da considerare viene definita come L8.

Una matrice L8 ha quindi, in base allo schema precedente, sette colonne che possono prevedere 2 livelli ciascuna. L'assegnazione dei fattori P1, P2, etc. alle colonne può avvenire arbitrariamente.

n.o esperimento	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	Risultato
1	1	1	1	1	1	1	1	Y1
2	1	1	1	2	2	2	2	Y2
3	1	2	2	1	1	2	2	Y3
4	1	2	2	2	2	1	1	Y4
5	2	1	2	1	2	1	2	Y5
6	2	1	2	2	1	2	1	Y6
7	2	2	1	1	2	2	1	Y7
8	2	2	1	2	1	1	2	Y8

Per la matrice L8 possono essere fatte le seguenti osservazioni e considerazioni:

1. I numeri riportati rappresentano i livelli dei fattori P_x
2. Ciascuna riga rappresenta una condizione sperimentale
3. Ciascuna colonna è ortogonale, ovvero in essa i diversi livelli sono presenti in egual numero: in questo caso sono stati dati ai livelli i valori di riferimento 1 e 2; per comodità di calcolo, nelle successive applicazioni potranno essere riportate le coppie di valori +1 e -1, in maniera tale da consentire l'applicazione semplificata del criterio di ortogonalità (banalmente: $\forall j_1^7 \Rightarrow \sum_{i=1}^8 l_{i,j} = 0$)
4. la prima riga riporta tutti i livelli = 1, ma non c'è necessariamente una riga con i livelli tutti = 2, come sarebbe in una matrice completa;
5. I livelli di ciascun fattore compaiono in egual numero
6. le combinazioni di fattori del tipo:

$$\{P_1 = 1P_2 = 1\}$$

$$\{P_1 = 2P_2 = 1\}$$

.....

$$\{P_1 = 1P_2 = 2\}$$

compaiono in egual numero, consentendo una valutazione pesata del contributo delle singole condizioni sperimentali sui risultati;

7. Gli effetti del fattore P₁ possono essere separati dagli effetti di P₂, P₃
8. I risultati della sperimentazione possono esser valutati sulla base dei valori medi registrati.
9. Come si vede, la matrice prevede solo 8 condizioni sperimentali invece delle 128 previste dalla matrice completa.
10. gli esperimenti così condotti (limitato numero di condizioni sperimentali, fattori e livelli ordinati, etc.) generano risultati più facilmente riproducibili
11. La condizione migliore che sarà verificabile dagli esperimenti, sarà una delle 128 possibili, ma non necessariamente una delle 8 descritte nella matrice ortogonale: questo perché le conclusioni tratte dagli esperimenti vengono estese come valide all'intero dominio sperimentale abbracciato dai parametri e dai loro valori.

5 Condurre l'esperimento e raccogliere i dati

5.1 L'introduzione dei fattori esterni (noise) nella sperimentazione

Come detto nella fase di definizione dei parametri da analizzare, questi si possono distinguere in parametri controllabili, identificabili nei fattori fin qui presi in considerazione per la creazione della matrice ortogonale, e parametri non controllabili, identificabili come rumore. La sperimentazione organizzata attraverso l'applicazione delle matrici che prendono in considerazione i soli fattori controllabili identifica sicuramente l'influenza dei singoli fattori sulla funzione obiettivo, ma occorre anche tener conto che in molte situazioni, come quella qui presa in considerazione, l'influenza dei parametri non controllabili non è a priori trascurabile nelle valutazioni di Robust Design.

In questo contesto, la strategia proposta da Taguchi prevede di minimizzare l'influenza dei parametri non controllabili ottimizzando i livelli dei fattori controllabili. In pratica, il progetto ottimizzato si ottiene non scegliendo le migliori prestazioni nelle condizioni ideali, ma piuttosto ricercando una condizione di prestazioni accettabili anche quando il sistema è esposto all'influenza di fattori non controllabili.

Volendo applicare al caso concreto questa strategia, occorrerà:

1. prevedere un set di run multipli per ogni condizione sperimentale prevista, costruendo una matrice esterna, che riporti differenti combinazioni dei parametri esterni a cui far riferimento per ciascuna sperimentazione;
2. sottoporre i risultati multipli ottenuti a criteri di analisi, come la deviazione standard e il rapporto S/n

Si tenga conto che in base a quanto Taguchi enuncia, il vero obiettivo è quello di ridurre le variazioni di performance intorno al valore target della funzione obiettivo per l'elemento progettato, ovvero, in altre parole, ridurre la variabilità senza pensare a rimuovere le cause della variabilità.

Nel nostro caso, la matrice includerà quindi sia fattori controllabili che fattori esterni (= non controllabili). Mentre la matrice interna definisce le condizioni di settaggio in cui avviene ciascun esperimento, i valori assegnati ai fattori esterni definiscono le condizioni di prova a cui il sistema verrà esposto durante l'esperimento.

								Matrice esterna L4-2				
								E1	-1	+1	+1	-1
								E2	-1	+1	-1	+1
								E3	-1	-1	+1	+1
		Matrice interna L8-2										
Esp.#	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇					
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	R11	R12	R13	R14	
2	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	R21	R22	R23	R24	
3	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	R31	R32	R33	R34	
4	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	R41	R42	R43	R44	
5	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	R51	R52	R53	R54	
6	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	R61	R62	R63	R64	
7	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	R71	R72	R73	R74	
8	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	R81	R82	R83	R84	

Tab.3 – matrice di esecuzione della sperimentazione

Complessivamente la sperimentazione comporterà $4 \times 8 = 32$ esperimenti, caratterizzati ciascuno da una combinazione di settaggi dei 7 fattori interni e da una delle 4 condizioni previste dalla matrice esterna per i fattori esterni.

Questa situazione comporta quindi un numero maggiormente elevato di prove, e quindi costi maggiori, con in più il beneficio di sottoporre la sperimentazione ad un'analisi ben strutturata ed organizzata rispetto all'influenza dei disturbi esterni. Questo approccio può essere in generale visto come quello di maggiore sofisticazione in una scala di interventi per la considerazione dei disturbi, in ordine di complessità decrescente, come riportato dalla seguente tabella:

1	Costruzione di una matrice esterna per i fattori di disturbo
2	Ripetizione degli esperimenti, applicando valori random per i fattori di disturbo
3	Ripetizione multipla delle prove
4	Effettuazione di un sola prova per ogni condizione sperimentale

Nella valutazione costi-benefici di questo approccio occorre tenere conto dei seguenti vantaggi:

- La condizione di ottimo risultante dall'adozione della matrice esterna risulta essere la meno sensibile all'effetto dei disturbi esterni non controllabili, e quindi è in linea con la filosofia di Robust Design;
- Il numero delle ripetizioni previste e le ipotesi relative ai valori dei fattori esterni possono essere stabiliti in base alla dimensione prevista della matrice esterna.
- L'influenza dei fattori esterni può essere calcolata facilmente, come vedremo in seguito, nello stesso modo dei fattori controllabili.
- L'interazione tra fattori controllabili e disturbi può essere successivamente valutata, qualora si ritenga necessario.

6 Raccolta dati ed analisi dei risultati

6.1 Raccolta ed elaborazione dei dati

La raccolta dei dati secondo l'impostazione operata degli esperimenti può portare alla seguente rappresentazione tabellare, che sviluppa l'impostazione della tab.3:

		E1							-1							-1							1							1														
		E2							-1							1							-1							1														
		E3							-1							1							1							-1														
Sez.A									cr1	cr2	cr3	cr4								cr1	cr2	cr3	cr4								cr1	cr2	cr3	cr4										
		>>							0,3	0,2	0,2	0,3								0,3	0,2	0,2	0,3								0,3	0,2	0,2	0,3										
Esp.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Y1							Y2							Y3							Y4							M								
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1,00	0,69	0,75	0,50	0,74	1,00	1,00	0,70	0,50	0,79	1,00	0,77	0,73	0,67	0,8	1,00	0,69	0,73	0,67	0,78	0,78																
2	-1	-1	1	-1	1	1	1	0,63	0,92	0,63	0,67	0,7	0,50	0,85	0,65	0,67	0,65	0,54	0,77	0,68	0,50	0,6	0,42	0,85	0,60	0,00	0,41	0,59																
3	-1	1	-1	1	-1	1	1	0,71	0,85	0,60	0,50	0,65	0,79	0,92	0,55	0,50	0,68	0,88	0,85	0,50	0,33	0,63	0,75	0,92	0,48	0,17	0,55	0,63																
4	-1	1	1	1	1	-1	-1	0,88	0,62	0,50	0,00	0,49	0,92	0,54	0,50	0,17	0,53	0,88	0,69	0,50	0,00	0,5	1,00	0,46	0,43	0,67	0,68	0,55																
5	1	-1	-1	1	1	-1	1	0,38	0,46	0,80	0,17	0,41	0,38	0,23	0,85	0,00	0,33	0,50	0,38	0,85	0,00	0,4	0,63	0,00	0,93	0,00	0,37	0,38																
6	1	-1	1	1	-1	1	-1	0,42	0,54	0,38	0,17	0,36	0,38	0,46	0,25	0,33	0,35	0,25	0,46	0,00	0,17	0,22	0,50	0,38	0,30	0,50	0,44	0,34																
7	1	1	-1	-1	1	1	-1	0,21	0,08	0,88	0,33	0,35	0,00	0,23	0,90	0,33	0,33	0,13	0,00	0,85	0,50	0,36	0,17	0,23	0,80	0,50	0,41	0,36																
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	0,79	0,69	1,00	0,00	0,58	0,92	0,54	0,93	0,17	0,62	0,88	0,54	0,95	0,17	0,61	0,83	0,46	0,98	0,00	0,54	0,59																
									cr1	cr2	cr3	cr4								cr1	cr2	cr3	cr4								cr1	cr2	cr3	cr4										
min								0,51	112	0,10	0,7								0,51	112	0,10	0,7								0,51	112	0,10	0,7											
std								0,75	125	0,10	1,0								0,75	125	0,10	1,0								0,75	125	0,10	1,0											
max								0,97	125	0,50	1,0								0,97	125	0,50	1,0								0,97	125	0,50	1,0											
Sez.B																																												
Esp.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7																																					
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,75	121	0,20	0,85								0,75	125	0,22	0,85								0,75	122	0,21	0,90								0,75	121	0,21	0,90
2	-1	-1	1	-1	1	1	1	0,84	124	0,25	0,90								0,87	123	0,24	0,90								0,86	122	0,23	0,85								0,89	123	0,26	0,70
3	-1	1	-1	1	-1	1	1	0,82	123	0,26	0,85								0,80	124	0,28	0,85								0,78	123	0,30	0,80								0,81	124	0,31	0,75
4	-1	1	1	1	1	-1	-1	0,78	120	0,30	0,70								0,77	119	0,30	0,75								0,78	121	0,30	0,70								0,75	118	0,33	0,90
5	1	-1	-1	1	1	-1	1	0,90	118	0,18	0,75								0,90	115	0,16	0,70								0,87	117	0,16	0,70								0,84	112	0,13	0,70
6	1	-1	1	1	-1	1	-1	0,61	119	0,35	0,75								0,60	118	0,40	0,80								0,57	118	0,50	0,75								0,63	117	0,38	0,85
7	1	1	-1	-1	1	1	-1	0,56	113	0,15	0,80								0,51	115	0,14	0,80								0,54	112	0,16	0,85								0,55	115	0,18	0,85
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	0,70	121	0,10	0,70								0,73	119	0,13	0,75								0,72	119	0,12	0,75								0,71	118	0,11	0,70

Nella sezione "B" vengono riportati, a fianco di ciascun esperimento, i valori delle grandezze r_1, r_2, r_3, r_4 costituenti la funzione obiettivo misurati sul campo; in base alla formulazione delle cr_x e al QC adottato, le cr_x calcolate vengono riportate quindi nella sezione "A", dove per ciascun esperimento viene calcolata la funzione obiettivo :

Avendo infatti considerato 4 diverse grandezze osservabili come componenti della funzione obiettivo, la tabella riporta il contributo di ciascuna cr_x alla funzione stessa:

$$Y = 0.3 * cr1 + 0.2 * cr2 + 0.2 * cr3 + 0,3 * cr4$$

per ciascuno dei 4 settaggi previsti dei fattori esterni, a comporre i valori della funzione obiettivo (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4), su cui viene calcolata per ciascun esperimento la media e la deviazione standard.

6.2 Elaborazione dei dati

La fase di rielaborazione dei dati ottenuti passa attraverso:

- l'analisi dei risultati e la loro interpretazione: in questo contesto, l'analisi della varianza viene condotta per identificare i fattori dominanti tra quelli interessati dalla sperimentazione, e ne viene analizzata l'interazione.
- la determinazione delle condizioni di ottimo: applicando i criteri sopra enunciati ad un ciclo di produzione completo, è possibile adottare le condizioni di ottimo e prevedere le % di difettosità attese.

La tabella riportata in figura esplicita l'elaborazione dei dati ottenuti con l'analisi delle medie:

esp.	M	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7
1	0,78	-0,78	-0,78	-0,78	-0,78	-0,78	-0,78	-0,78
2	0,59	-0,59	-0,59	0,59	-0,59	0,59	0,59	0,59
3	0,63	-0,63	0,63	-0,63	0,63	-0,63	0,63	0,63
4	0,55	-0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	-0,55	-0,55
5	0,38	0,38	-0,38	-0,38	0,38	0,38	-0,38	0,38
6	0,34	0,34	-0,34	0,34	0,34	-0,34	0,34	-0,34
7	0,36	0,36	0,36	-0,36	-0,36	0,36	0,36	-0,36
8	0,59	0,59	0,59	0,59	-0,59	-0,59	-0,59	0,59
S	"-"	0,64	0,52	0,54	0,58	0,58	0,57	0,51
S	"+"	0,42	0,53	0,52	0,47	0,47	0,48	0,55
	DELTA	-0,22	0,01	-0,02	-0,10	-0,11	-0,09	0,04
	scelta	-	+	-	-	-	-	+
		p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7

In ciascuna colonna viene indicata la valorizzazione del risultato relativo a ciascuna condizione di settaggio, in funzione del fatto che nell'esperienza il fattore è valorizzato al livello +1 oppure -1.

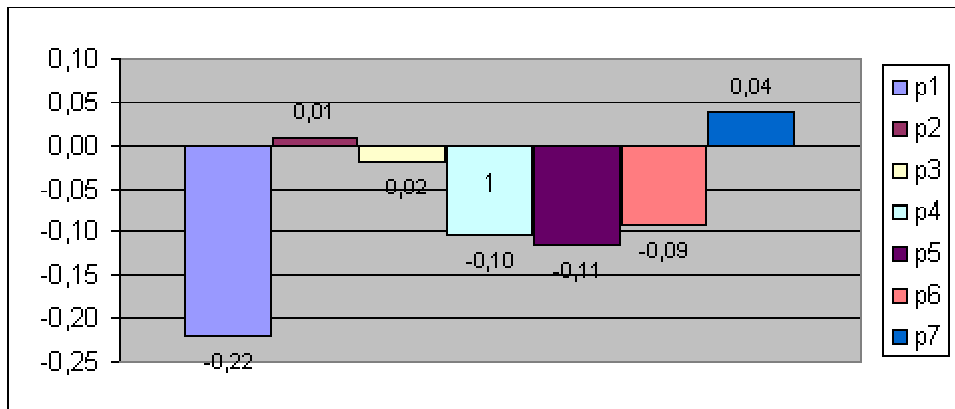
In questo modo, a consuntivo di ciascuna colonna, i valori di Σ riportano:

- il primo è la media dei valori della funzione obiettivo relativi agli esperimenti per i quali il livello del fattore era -1
- il secondo è la media dei corrispondenti valori con il livello del fattore a +1

Il confronto dei due valori (delta) consente di valutare:

- il livello del singolo fattore che dà il migliore risultato della funzione obiettivo, tenendo conto che in questo caso il modello adottato è "BigIsBetter";
- l'incidenza del settaggio rispetto al contributo che quel fattore fornisce al miglioramento della funzione obiettivo.

Per questo secondo aspetto, il grafico sottostante mette in evidenza quali tra i fattori forniscono il maggior contributo, e quindi possono essere considerati "effetti principali" nell'ambito della sperimentazione condotta.



Questa determinazione è importante per due motivi:

a) Nel caso in cui la sperimentazione si prefigga lo scopo di individuare i parametri salienti che influiscono sul processo, gli effetti principali possono essere posti sotto ulteriore osservazione, sia per un diverso ciclo sperimentale, che per una rivisitazione del processo stesso: ad esempio, è possibile applicare ai soli effetti principali un esperimento fattoriale completo: identificando 3 effetti principali (ep_x), l'applicazione di una matrice completa sarebbe:

# Esp.	ep 1	ep 2	ep 3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1

Con soli 8 esperimenti aggiuntivi diviene così possibile analizzare in modo compiuto, ad esempio, gli effetti delle interazioni presenti.

b) La ricerca delle condizioni di ottimo e di process improvement può essere focalizzata sui soli effetti principali, orientando in modo più efficace gli investimenti nelle prove sperimentali.

6.3 Valutazione dei fattori esterni – analisi della varianza

6.3.1 Analisi mediante la deviazione standard

L'analisi della varianza fin qui condotta ha considerato i risultati ottenibili nelle 4 condizioni ipotizzate di combinazione dei fattori esterni. Questi ultimi, quindi, incidono per il momento nelle considerazioni fatte solo solo come incidenza sulla media del fenomeno osservato.

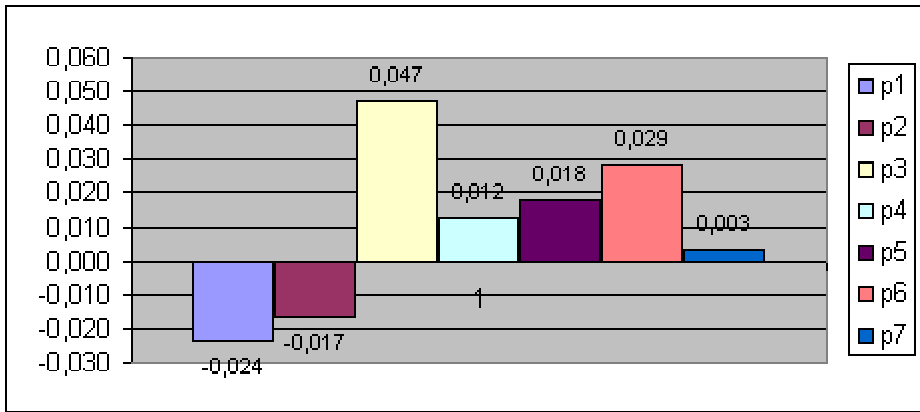
Diversamente, la tabella che segue ha lo scopo di evidenziarne l'effetto in termini di scostamento rispetto alla media. Ciascuna colonna riporta infatti la deviazione standard riferita alle 8 condizioni sperimentali, valorizzata nel segno in base al livello adottato da ciascun fattore riportato in colonna (+1 e -1). Il delta risultante per ciascuna colonna è la differenza tra la media delle deviazioni standard inerenti ai 4 casi con livello +1 e quella con livelli a -1, e misura quindi in termini di dispersione della deviazione, la sensibilità di ciascun fattore ai parametri esterni.

esp.	devstd	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7
1	0,027	-0,027	-0,027	-0,027	-0,027	-0,027	-0,027	-0,027
2	0,124	-0,124	-0,124	0,124	-0,124	0,124	0,124	0,124
3	0,054	-0,054	0,054	-0,054	0,054	-0,054	0,054	0,054
4	0,088	-0,088	0,088	0,088	0,088	0,088	-0,088	-0,088
5	0,037	0,037	-0,037	-0,037	0,037	0,037	-0,037	0,037
6	0,091	0,091	-0,091	0,091	0,091	-0,091	0,091	-0,091
7	0,033	0,033	0,033	-0,033	-0,033	0,033	0,033	-0,033
8	0,037	0,037	0,037	0,037	-0,037	-0,037	-0,037	0,037
	"-"	0,073	0,070	0,038	0,055	0,052	0,047	0,060
	"+"	0,050	0,053	0,085	0,068	0,071	0,076	0,063
	delta	-0,024	-0,017	0,047	0,012	0,018	0,029	0,003
		-0,024	-0,017	0,047	0,012	0,018	0,029	0,003
		+	+	-	-	-	-	-
		p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7

Si noti come questa sensibilità è del tutto indipendente dal fatto che ciascun fattore è o no un effetto principale: come si evince dai dati riportati, il fattore P3, pur non comportando una significativa variazione della funzione obiettivo in base al livello prescelto, appare essere fortemente influenzato dai fattori esterni: in termini quindi di ottimizzazione del processo, non sarà quindi utile operare sui livelli di P3 tanto per ottimizzare la funzione

obiettivo, quanto sarà significativo ridurre l'effetto di dispersione dei dati causata dai fattori esterni combinati con le condizioni dei fattori interni: ciò influirà quindi non tanto sul risultato intrinseco del processo quanto sulla sua stabilità.

I risultati dell'analisi sono evidenziati nel grafico seguente:



6.3.2 Analisi mediante il rapporto S/n

In alternativa alla deviazione standard, l'analisi della dispersione può essere condotta in base alla valutazione del rapporto segnale/disturbo, considerando come "segnale" il valore della funzione obiettivo (e delle sue medie) e come "disturbo" la stessa deviazione standard misurata per ciascun esperimento.

In questo caso, per il "segnale", il valore massimo atteso è pari a 1, e la miglior condizione di stabilità del risultato tende ovviamente a minimizzare il valore della deviazione, per cui la formula applicabile risulta essere:

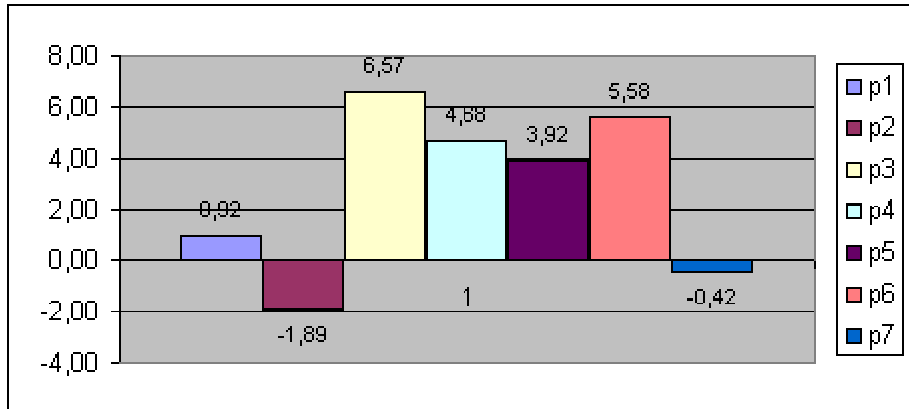
$$S/n = 10 \text{Log}_{10} \frac{Y^2}{s^2}$$

dove Y è la media delle funzioni obiettivo e s la deviazione standard corrispondente.

Applicando l'espressione ai dati precedentemente esposti, si ottiene la seguente tabella:

esp.	S/n	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7
1	-29,22	29,22	29,22	29,22	29,22	29,22	29,22	29,22
2	-13,57	13,57	13,57	-13,57	13,57	-13,57	-13,57	-13,57
3	-21,28	21,28	-21,28	21,28	-21,28	21,28	-21,28	-21,28
4	-15,94	15,94	-15,94	-15,94	-15,94	-15,94	15,94	15,94
5	-20,12	-20,12	20,12	20,12	-20,12	-20,12	20,12	-20,12
6	-11,47	-11,47	11,47	-11,47	-11,47	11,47	-11,47	11,47
7	-20,69	-20,69	-20,69	20,69	20,69	-20,69	-20,69	20,69
8	-24,03	-24,03	-24,03	-24,03	24,03	24,03	24,03	-24,03
	"-"	19,08	20,48	16,25	17,20	17,58	16,75	19,75
	"+"	20,00	18,59	22,83	21,88	21,50	22,33	19,33
		0,92	-1,89	6,57	4,68	3,92	5,58	-0,42
		0,92	-1,89	6,57	4,68	3,92	5,58	-0,42
		-	+	-	-	-	-	+
		p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7

Con il grafico:



Occorre precisare come l'analisi relativa alla deviazione standard risulti a volte (come in questo caso) più efficace del rapporto S/n nell'identificare l'entità dei contributi di ciascun fattore alla dispersione dei risultati.

6.3.3 Previsione dell'ottimo delle prestazioni

Come esposto in fase di progettazione della matrice dell'esperimento, la condizione ottimale per la funzione obiettivo in generale può riferirsi ad una combinazione di livelli dei fattori che non corrisponde ad alcuna delle condizioni dell'esperimento: questo è tanto più probabile quanto il numero degli esperimenti della matrice di Taguchi si discosta dal numero di righe della matrice completa (nel nostro caso: $8 \ll 128$).

Nel caso analizzato, trascurando i fattori p2,p3 che incidono poco sul risultato, possono essere considerati come effetti principali:

effetti principali	P1	P4	P5	P6	P7
livelli	-1	-1	-1	-1	+1

Ricordiamo in particolare come per poter estendere i risultati osservati nel numero limitato predefinito di esperimenti occorra adottare l'ipotesi di trovarsi di fronte a fattori additivi rispetto alla funzione obiettivo, secondo un principio di sovrapposizione che può essere così espresso:

$$Y(P_{1i}, P_{2j}, \dots) = \bar{Y} + p_{1i} + p_{2j} + \dots + e$$

dove:

- ∅ $Y(\dots)$ è la funzione obiettivo,
- ∅ p_{1i}, p_{2j}, \dots sono i contributi rispetto alla media dovuti all'effetto dei singoli parametri
- ∅ il valore e rappresenta l'errore

Applicando quindi l'espressione precedente, il valore atteso della funzione obiettivo può essere calcolato a partire dalla media, sommando gli incrementi rispetto alla media stessa dovuti all'adozione dei singoli livelli, essendo:

$$Y_{p1-} - \bar{Y} = p_{1i}$$

Ove Y_{p1-} è la media degli esperimenti in cui il valore $p1$ è al livello -1 , etc., e quindi:

$$Y_{opt.} = \bar{Y} + (Y_{p1-} - \bar{Y}) + (Y_{p4-} - \bar{Y}) + (Y_{p5-} - \bar{Y}) + (Y_{p6-} - \bar{Y}) + (Y_{p7+} - \bar{Y})$$

Nella tabella seguente si riassume l'elaborazione che porta ad un valore di $Y_{opt.} = 0,81$:

esp.	M	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	
1	0,78	-0,78	-0,78	-0,78	-0,78	-0,78	-0,78	-0,78	
2	0,59	-0,59	-0,59	0,59	-0,59	0,59	0,59	0,59	
3	0,63	-0,63	0,63	-0,63	0,63	-0,63	0,63	0,63	
4	0,55	-0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	-0,55	-0,55	
5	0,38	0,38	-0,38	-0,38	0,38	0,38	-0,38	0,38	
6	0,34	0,34	-0,34	0,34	0,34	-0,34	0,34	-0,34	
7	0,36	0,36	0,36	-0,36	-0,36	0,36	0,36	-0,36	
8	0,59	0,59	0,59	0,59	-0,59	-0,59	-0,59	0,59	
Σ	"."	0,64	0,52	0,54	0,58	0,58	0,57	0,51	
Σ	"+"	0,42	0,53	0,52	0,47	0,47	0,48	0,55	Opt.
δ	0,53	0,11			0,05	0,06	0,05	0,02	0,81

Come si vede, questo valore risulta molto vicino a quello risultante dall'esperimento 1 ($Y=0,78$), da cui differisce per il solo livello di $p7$ (lì a -1 , mentre a $+1$ nella condizione di ottimo), che è anche il fattore più debole da considerare come effetto principale.

7 Conclusioni

L'applicazione in campo sperimentale delle metodologie di Taguchi è sicuramente efficace nell'ottica di riduzione dei costi di sperimentazione, senza peraltro rinunciare ad avere risultati qualitativamente rilevanti nell'identificare i fattori che incidono maggiormente sul processo. La possibilità inoltre di analizzare gli effetti dei fattori esterni e di disturbo alla stessa stregua dei fattori interni porta ad una flessibilità di impiego molto efficace in un'ottica di Robust Design. Le informazioni deducibili che identificano gli effetti principali incidenti sul processo possono utilmente essere impiegate in analisi più approfondite e già più mirate, prendendo in considerazione gli aspetti più rilevanti del processo stesso.