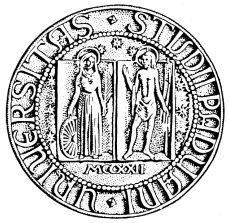


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE STATISTICHE

CORSO DI LAUREA IN STATISTICA E GESTIONE DELLE IMPRESE

TESI DI LAUREA TRIENNALE

IL SEI-SIGMA IN UN PROCESSO DI PRODUZIONE DI LAMPADINE

Relatore: Ch.ma Prof.ssa Giovanna Capizzi

Laureanda: Maela Bonetto

Matricola: 470794

ANNO ACCADEMICO 2003/2004

Indice

0. Introduzione 3

1. L'azienda 5

2. Il Sei Sigma 7

   - Controllo Statistico di Processo

   - La funzione di qualità di Taguchi

   - Il metodo Sei Sigma

3. L'Oggetto dell'analisi 19

4. Misurazione 23

   - Descrizione statistica dei dati

5. Analisi dei dati 35

   - Test statistici della media campionaria

   - Correlazione con la temperatura

   - Analisi dei campioni non centrati

6. Miglioramento e controllo 47

7. Obiettivi e conclusioni 49

8. Bibliografia 55

0. Introduzione

La presente relazione descrive il progetto svolto durante lo stage nello Stabilimento Osram di Treviso, all'interno dell'Ufficio di Controllo della Qualità.

A differenza delle industrie medio-piccole, tipiche del Nordest italiano, Osram è un'organizzazione internazionale, e questo caratterizza non poco lo svolgimento della relazione. Infatti, l'azienda ha una gestione "storica" della qualità, essendo certificata secondo ISO 9001 già dal 1995, e tutti gli strumenti del controllo statistico di processo sono implementati e applicati regolarmente.

Qui ho scoperto che gli strumenti classici di gestione della qualità non sono sufficienti in un ambiente sempre più competitivo, e che le grandi aziende cercano nuovi metodi più potenti per perfezionare il sistema e per soddisfare il cliente. L'obiettivo è "Zero difetti".

Il Sei Sigma è uno di questi metodi, ai quali Osram guarda con attenzione. Nel corso dello stage ho avuto il compito di analizzare uno dei processi di produzione secondo il metodo del Sei Sigma, per ottenere delle evidenze che guidino ad un eventuale miglioramento di processo.

Per effettuare l'analisi ho impiegato le conoscenze acquisite nel Corso di Controllo Statistico della Qualità, e gli strumenti studiati nei corsi di Statistica che ho seguito. Per le nuove tecniche di gestione della qualità mi sono invece rivolta alla documentazione presente in ufficio, tra cui le dispense per la formazione del personale che mi ha messo a disposizione il tutor aziendale, Carlo Stecca, e al grande archivio di internet. Grazie a questo materiale ho potuto approfondire anche altri aspetti della gestione della qualità, che non riguardano direttamente l'argomento dello stage ma che ritengo molto utili per una conoscenza completa della materia.

Nell'elaborazione dei dati ho usato il foglio di calcolo Microsoft Excel e il software statistico R. I grafici che riporto in questa relazione sono stati prodotti con i programmi già citati e con funzioni di Microsoft Word.

Nei prossimi due capitoli descriverò l'azienda in cui ho svolto lo stage e i principi del controllo statistico della qualità, che mi permettono di introdurre il metodo del Sei Sigma. Dal quarto capitolo inizierò a parlare dell'oggetto della tesi, poi riporterò le misurazioni, nel quinto, e le analisi che ho effettuato, nel sesto capitolo. Il settimo capitolo sarà una sintesi del lavoro svolto: scriverò qui gli obiettivi, alcuni importanti risultati e le conclusioni raggiunte.

Nell'ultima pagina citerò infine i libri e i siti internet che ho consultato e dai quali ho ricavato informazioni utili per lo svolgimento della relazione.

1. L'azienda

1.1. Osram International

Prima di trattare l'argomento di questa relazione, ritengo opportuna una breve descrizione dell'azienda in cui ho svolto lo stage: Osram Edison Clerici Spa, nello stabilimento di Treviso.

L'azienda ha una storia centenaria: il marchio Osram è stato registrato nel 1906. Il nome deriva da *osmio* e *volframio*, la cui lega è il tungsteno, il materiale che tuttora forma il filo metallico delle lampade ad incandescenza.

Partendo dalla produzione delle classiche lampadine, Osram si è sviluppato, diventando una compagnia ad alta tecnologia nel settore industriale dell'illuminazione. Ad oggi Osram International ha come sede centrale Monaco, e impiega più di 35.000 persone nel mondo, con 54 fabbriche dislocate in diciotto Paesi.

L'innovazione tecnologica svolge un ruolo fondamentale per il successo. L'attività di ricerca e sviluppo condotta da Osram nel campo delle sorgenti luminose e dei sistemi d'illuminazione si concentra soprattutto su:

- Efficienza - Misurata come quantità di luce generata per unità di potenza assorbita (lumen/Watt).
- Durata media - Ovvero le ore di funzionamento.
- Comfort - Tutti gli aspetti relativi alla stabilità e alla resa cromatica.
- Miniaturizzazione - Nell'intento di diminuire le dimensioni fisiche, relativamente alla specifica tecnologia della sorgente luminosa.
- Ecocompatibilità - L'impatto sull'ambiente in tutte le fasi di produzione, utilizzo e smaltimento.

1.2. Osram in Italia

Osram Italia ha sede a Milano, un Centro Logistico a San Giuliano Milanese, e due stabilimenti di produzione, a Treviso e a Bari. L'attività a Treviso è stata avviata nel 1966, con la produzione di lampade ad incandescenza per il settore automobilistico; si è poi ampliata agli altri modelli di illuminazione. Adesso conta più di 900 collaboratori, ed è uno dei maggiori insediamenti di produzione Osram in Europa.

La produzione attuale comprende:

- Lampade ausiliarie per autoveicoli
- Lampade per segnalazione di auto e moto
- Starter per l'accensione di lampade a fluorescenza
- Alimentatori elettronici per lampade alogene a scarica
- Piastrine elettroniche per lampade a risparmio energetico.

La produzione avviene su linee ad alta velocità, alcune completamente automatizzate, le restanti con un alto livello di meccanizzazione, con sofisticati dispositivi elettronici di controllo di qualità del prodotto che consentono di ridurre la quantità di prodotti non conformi a meno di 50 pezzi per milione di pezzi prodotti. Come tutti gli stabilimenti Osram, Treviso è certificato secondo le norme ISO 14000 e ISO 9000.

L'attenzione dell'azienda per la qualità è visibile anche camminando per i reparti di produzione: nelle bacheche sono appesi grafici e tabelle riassuntive della difettosità, strumenti che evidenziano dove si è arrivati e motivano il personale a contribuire al raggiungimento dell'obiettivo qualità; inoltre, in molte postazioni di lavoro sono presenti le carte di controllo, usate per riportare le misurazioni effettuate a campione, per capire l'andamento dei processi e ridurne la difettosità.

2. Sei Sigma

2.1. Qualità e Statistica

La qualità, in un'azienda, coincide con la piena soddisfazione del cliente, e quindi con il raggiungimento di tutte le sue aspettative, implicite ed esplicite.

La qualità nasce da tutti i processi dell'azienda. Non esistono momenti, persone o fasi di lavoro che non contribuiscano alla qualità. Controllare tutti i prodotti in ogni fase per evidenziare i difetti, però, è spesso impossibile, oltre che anti economico.

Il campionamento e l'utilizzo di strumenti statistici come gli intervalli di confidenza risolvono questo problema con un grado di approssimazione accettabile. Inoltre la Statistica fornisce gli strumenti per valutare i molti aspetti del processo e per prendere decisioni motivate riguardo al processo stesso.

Di seguito descrivo il percorso logico che dalle basi del controllo statistico conduce verso il metodo del Sei Sigma.

2.2. Differenza tra correggere e prevenire

Tradizionalmente, il controllo della qualità consisteva nell'ispezione del prodotto (o del pezzo) finito per trovare gli errori. Il tipo più semplice è il *controllo per parametri*, nel quale si verifica che siano presenti tutti i componenti (per esempio il filo di tungsteno nella lampadina), e che non ci siano difetti (come le macchie): si può effettuare senza strumenti di misura, e il risultato è solo un sì/no (oppure conforme/non conforme). Per le caratteristiche misurabili si usa invece il *controllo per variabili*, nel quale si confronta il valore misurato con un intervallo di valori ammessi. Questo consente, come il controllo per parametri, di valutare se un pezzo è conforme o non conforme.

Quella descritta sopra, però, è una strategia di sorveglianza, che genera sprechi, perché permette di investire tempo e materiali nella costruzione di prodotti che poi non sono sempre utilizzabili; inoltre né la correzione né lo smaltimento dei prodotti non conformi sono esenti da costi. Questi sono i costi generati dalla bassa qualità prodotta dal processo.

2.3. Controllo Statistico di Processo

Si ottengono risultati migliori evitando gli sprechi fin dall'inizio, scegliendo invece una strategia di prevenzione. Spesso questo è riassunto in slogan del tipo "Farlo bene la prima volta". Tuttavia gli slogan non sono sufficienti: è necessario conoscere il processo, capire quali elementi possono causare errori, e decidere quali azioni attuare per prevenirli.

A questo scopo interviene la Statistica, che elabora informazioni aggiuntive dai dati, soprattutto da quelli di tipo variabile. Esistono anche sistemi di controllo del processo che applicano tecniche non statistiche, ma qui tratteremo solo il Controllo Statistico di Processo (SPC), che utilizza tecniche a noi note, e che è il sistema utilizzato dall'azienda in esame.

Inoltre è importante usare la statistica, perché un processo non ha mai risultati uniformi, ma contiene sempre molte fonti di variabilità. I dati che si possono raccogliere hanno una distribuzione di frequenza, della quale ricordiamo le tre caratteristiche fondamentali:

a) la forma, che può essere simile alla Normale, o ad altre distribuzioni probabilistiche, oppure non regolare;
b) l'ampiezza, che dipende dalla variabilità del processo;
c) la posizione, cioè il valore centrale (media) attorno al quale si distribuiscono i dati.

Nel controllo "conforme/non conforme", la variazione è semplificata per mezzo dei requisiti minimi, che sono i limiti di tolleranza. Se tutte le caratteristiche di un prodotto si posizionano all'interno dei limiti, il prodotto è conforme; in caso contrario è da scartare. Questo è sufficiente per controllare il prodotto, ma non per controllare il processo; a tale scopo è necessario invece scoprire le cause di variazione.

La variazione è dovuta all'influenza di materiali, persone, mezzi, metodi e ambiente sul processo in esame e sulla sua misurazione. Si possono distinguere:

- Cause comuni: comportano oscillazioni casuali dei valori attorno al valore medio. Sono in genere un grande numero di cause accidentali di variazione, ciascuna delle quali agisce indipendentemente dalle altre e con un effetto molto piccolo in rapporto alla somma di tutti gli effetti. Se tutta la variazione di un processo è dovuta a cause comuni di variazione, il processo ha una distribuzione regolare che non cambia nel tempo.

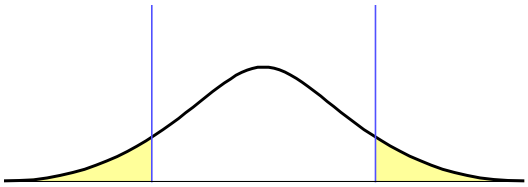
- Cause speciali: sono fattori di variazione che non sono sempre presenti nel processo e che hanno effetti evidenti. Le cause speciali provocano un cambiamento totale della distribuzione del processo, nella forma, nell'ampiezza e nella posizione. Se non vengono identificate tutte le cause speciali, e se non si compiono azioni adatte, esse continuano ad influenzare il processo in modo imprevedibile.

Un processo si definisce "in controllo statistico" quando tutta la variazione del processo è attribuibile a cause comuni. È quindi necessario, per portare il processo in controllo statistico, trovare le cause speciali e agire in modo appropriato su di esse, eliminandole quando hanno effetti negativi oppure rendendole stabili se hanno effetti positivi.

2.4. Capacità di processo

Un processo in controllo statistico può ancora produrre risultati al di fuori dei limiti di tolleranza.

Figura 2.1 **Distribuzione dei valori di un processo non capace.**



In giallo la parte della distribuzione che non è conforme, perché oltrepassa i limiti di tolleranza (in blu).

Questo accade perché il processo, anche se centrato nel valore di riferimento, può avere una variabilità molto alta e quindi avere le "code" della distribuzione che cadono oltre i limiti (Figura 2.1). Anche l'ampiezza eccessiva del processo è indice di bassa qualità.

Diminuire la variabilità del processo è necessario per ottenere sempre meno difetti nel processo. Solitamente, per questo tipo di analisi si calcolano gli indici di capacità e la deviazione standard del processo.

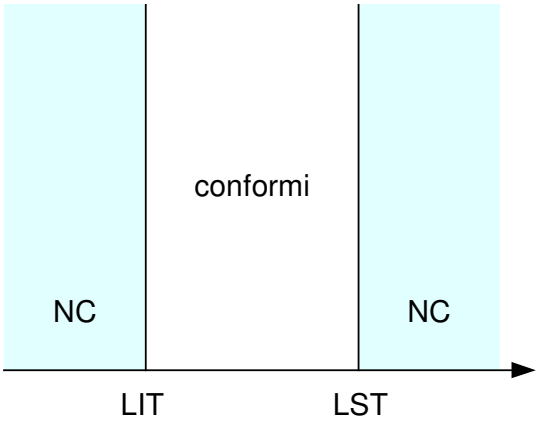
Quando il processo è in controllo e capace, i risultati del processo sono prevedibili, cioè la distribuzione dei valori è stabile, e pochi elementi cadono all'esterno dei limiti di tolleranza.

2.5. La funzione di qualità di Taguchi

Nei paragrafi precedenti abbiamo descritto la necessità che il processo sia contenuto nei limiti di tolleranza. È sufficiente?

Una rappresentazione grafica dei limiti di tolleranza è riportata in Figura 2.2. Questo consiste nell'individuare un intervallo di valori ammessi, al di fuori del quale stanno i valori non ammessi, per i quali la perdita dovuta alla bassa qualità (nella figura, in azzurro) è massima. Ma questo approccio spinge a considerare "buoni" allo stesso modo tutti gli elementi che cadono all'interno dei limiti di tolleranza: sia quelli centrati nel valore di riferimento, sia quelli posizionati vicini ai limiti.

Figura 2.2 **La difettosità secondo l'approccio tradizionale.**

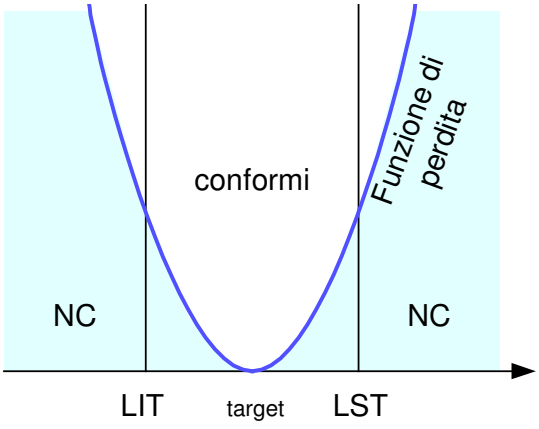


LIT significa *limite inferiore di tolleranza*, LST è *limite superiore di tolleranza*.

Nella realtà questo non è vero. Quando un elemento si allontana dal valore obiettivo, la qualità diminuisce ed aumenta la perdita, fino al punto in cui non è più ammissibile, e qui posizioniamo i limiti di tolleranza.

In Figura 2.3 abbiamo sovrapposto al grafico della figura precedente, che presenta gli intervalli *conforme* e *non conforme*, una curva che rappresenta la funzione di perdita, teorizzata per la prima volta da Genichi Taguchi (*Introduction to Quality Engineering*, 1986).

Figura 2.3 **La difettosità secondo la funzione di qualità di Taguchi.**



Taguchi definisce la bassa qualità come una perdita inflitta:

- al produttore, perché spreca risorse e tempo nel corso della produzione, e deve investire risorse nella correzione o nello smaltimento dei prodotti difettosi;
- al cliente, perché acquista prodotti che non lo soddisfano pienamente;
- nuovamente al produttore, perché perde la fiducia del cliente e a lungo termine perde quote di mercato.

Taguchi rappresenta questa perdita con una funzione quadratica, in cui il minimo è il valore obiettivo, il miglior valore possibile, e ogni scostamento dal valore obiettivo provoca una perdita (in azzurro) più che proporzionale. Applicando questa idea, quindi, si ha una perdita anche se il prodotto è all'interno delle specifiche di tolleranza.

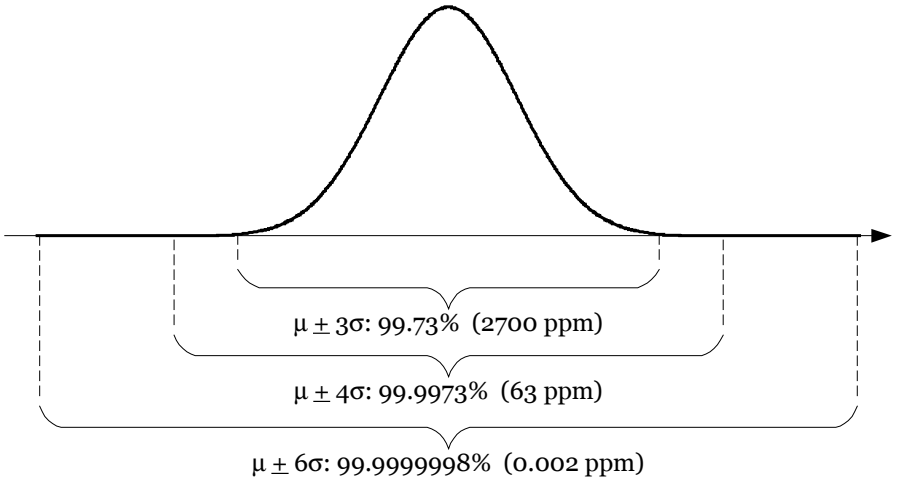
Il grafico mostra chiaramente che una riduzione della variabilità attorno al valore obiettivo comporta un aumento della qualità e quindi una riduzione dei costi di bassa qualità. È questo l'obiettivo a cui la funzione di perdita di Taguchi vuole far tendere.

2.6. Il metodo Sei Sigma

Non è dunque più sufficiente rientrare nei limiti di tolleranza; occorre rientrarci con la minima variabilità possibile.

Spesso i dati, raccolti sulla misura di una variabile, si dispongono con una distribuzione di tipo Normale, che è descritta totalmente da due parametri: la media μ e la varianza σ^2. È noto che l'intervallo $\mu \pm 3\sigma$ contiene il 99.73% della distribuzione Normale, e, se parliamo di produzione, lascia all'esterno 2700 ppm, cioè 2700 *pezzi* non conformi *per milione* di pezzi prodotti. In 0.4 raffiguriamo alcuni intervalli noti della distribuzione Normale.

Figura 2.4 **Percentuale dell'area contenuta sotto la distribuzione Normale.**



Da una visione di questo tipo è nata l'idea di considerare Sigma (la deviazione standard) come misura della conformità di un processo aziendale, teorizzata dallo statistico Mikel Harry (*The Vision of Six Sigma*, 1994), nel corso di un progetto di Miglioramento della Qualità per la statunitense Motorola.

Si nota dalla 0.5 che maggiore è il numero di volte in cui σ è compreso nella tolleranza, maggiore è la percentuale di prodotti conformi, e minore è la percentuale di difetti.

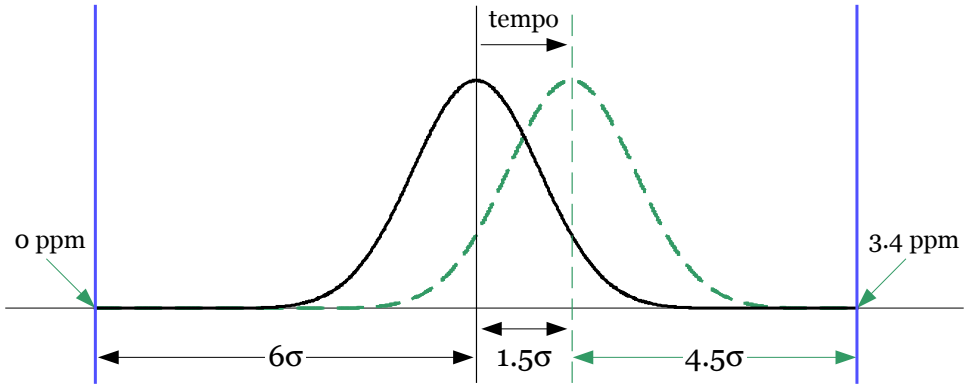
L'obiettivo del Sei Sigma, come definito da Harry, è di porre i limiti di tolleranza a $\mu \pm 6\sigma$; o meglio, dato che spesso i limiti di tolleranza sono specificati dal cliente, l'obiettivo è ridurre la variabilità di processo fino ad avere la deviazione standard pari a un dodicesimo della tolleranza.

Però è noto che ogni processo tende a modificarsi, nel tempo, per numerosi motivi: cambio di materiali, di persone, usura dei macchinari, e altro ancora. Se nel breve periodo σ è compreso 6 volte in metà tolleranza, cosa succederà nel lungo periodo?

Nella 0.6 rappresentiamo con la curva in linea continua il processo a breve termine, che raggiunge l'obiettivo del Sei Sigma. Qui entrambi i limiti di tolleranza (in blu) distano 6σ dalla media.

Nel lungo termine ci aspettiamo che il processo cambi, e assumiamo una variazione arbitraria della media di + 1.5σ. Il nuovo processo è rappresentato dalla curva tratteggiata in verde. La distanza del limite superiore di tolleranza dalla nuova media è di 4.5σ, e oltre questo limite cadono 3.4 ppm difettosi; più in basso del limite inferiore, invece, non cadono difetti (la distanza dalla media è di 7.5σ). Nonostante lo spostamento della media, il processo produce solo 3.4 ppm difettosi.

Figura 2.5 **Lo spostamento della media nel lungo periodo.**



Come apparirà ovvio, più ampio è lo spostamento della media, maggiore sarà la percentuale di difetti. Dall'altro lato, se non cambia la media ma aumenta la varianza, il ragionamento è analogo: un aumento di σ, che diventi 1.5 volte la deviazione standard iniziale, produrrà 3.4 ppm oltre ciascun limite di tolleranza, ed in totale 6.8 ppm difettosi.

Questo scostamento naturale può essere diverso in altri processi e in altre aziende, ma appare evidente che, raggiunto l'obiettivo del Sei Sigma, un processo è poco disperso, e può sopportare una deviazione non trascurabile dalla media, continuando però a produrre pochi difetti.

Per questi motivi il metodo Sei Sigma è stato implementato da numerose aziende nel mondo, tra cui, oltre alla Motorola, citiamo General Electric, ed è considerato ormai da molti una strategia vincente per la qualità.

2.6.1. DMAIC: le cinque fasi del Sei Sigma

Le fasi del Sei Sigma sono correntemente indicate con la sigla DMAIC (dall'inglese: *Define, Measure, Analyse, Improve and Control*). Vediamole in italiano con una breve spiegazione.

Definire

È la fase di descrizione del problema.

In questa fase è necessario identificare le caratteristiche da analizzare, per limitare il campo di indagine. Questo si può ottenere, da una parte, ascoltando la "Voce del Cliente", per riconoscere quali elementi sono considerati primari da chi poi utilizzerà il prodotto; dall'altra parte, soprattutto se il processo è molto difettoso, effettuando un'analisi del tipo "conforme/non conforme", per scoprire le caratteristiche più difettose.

Ad ogni caratteristica critica saranno poi associati uno o più parametri misurabili che ci permetteranno di condurre l'indagine.

Per completare la definizione del processo è utile conoscere anche le sue fasi e le influenze che agiscono sul processo stesso.

Misurare

In questa fase è possibile descrivere i risultati del processo sulla base dei dati.

Si esegue la raccolta dei dati relativi ai parametri individuati nella prima fase, e da essi si ricavano le prime informazioni:

- Indici: la media, la deviazione standard e gli indici di capacità sintetizzano i dati con la minima perdita di informazione.
- Grafici: istogrammi, boxplot, diagrammi di correlazione ed altri possono evidenziare visivamente alcune proprietà dei dati.
- Altri strumenti statistici forniscono ulteriori spunti per l'analisi successiva.

Prima della misurazione è importante anche dimostrare l'efficacia del sistema di misura, per ridurre la variabilità derivante dagli errori di misura. Questo comporta anche la taratura degli strumenti di misura, che dovrebbe avvenire periodicamente.

Analizzare Si fissano ora i valori target per le caratteristiche critiche, e si cercano le cause della variabilità esistente. Gli strumenti principali di questa fase sono i test statistici di verifica d'ipotesi.

Migliorare Un diagramma di Pareto può aiutare ad identificare le cause più importanti della deviazione; su di queste si concentreranno le azioni per eliminarle o ridurle.

Se è necessario al miglioramento del processo, a questo punto si possono programmare cambi di tecnologia o modifiche strutturali del processo stesso.

Si determinano quindi i limiti di controllo del processo che saranno utili nella fase successiva.

Controllare Un'ulteriore raccolta di dati e il calcolo della nuova capacità del processo sono necessari per verificare l'effettivo miglioramento.

Successivamente, si devono mantenere i livelli raggiunti; si introdurrà quindi un piano di controllo per monitorare il processo e controllare che i parametri vitali si mantengano all'interno dei limiti di controllo.

Nei prossimi capitoli applicherò le fasi qui descritte all'analisi di un caso concreto che ho seguito in azienda.

3. Definizione: l'oggetto di studio

3.1. Il prodotto

La linea D3 produce schede elettroniche per lampade a fluorescenza compatte di tipo Dulux (Figura 3.1); le schede vengono corredate degli elementi elettrici, saldate, e poi imballate per essere spedite alla fase successiva del montaggio, in Germania.

Figura 3.1 **Lampadina di tipo Dulux**

Il "cliente" del processo è un cliente interno, che completerà la lampadina e la venderà al cliente finale.

Le caratteristiche della scheda elettronica sono molteplici, e comprendono le parti fisiche assemblate alla scheda, le saldature, la conduzione di energia elettrica, la stampigliatura del codice del lotto di produzione ed altri ancora.

Molte di queste caratteristiche possono essere classificate semplicemente come presenza o assenza (per esempio la saldatura), altre possono essere espresse da numeri seguiti da unità di misura (come il diametro, misurato in millimetri).

Quali caratteristiche possiamo analizzare? Nel corso del processo di produzione si eseguono molti controlli automatici per espellere dalla catena i pezzi che non sono conformi. La maggior parte di questi controlli automatici, però, è di tipo qualitativo, perché il controllo avviene con un lettore ottico che verifica la presenza o l'assenza di un componente. Per l'analisi del Sei Sigma, invece, vogliamo

analizzare solo dati di tipo continuo. Inoltre, in questi controlli di tipo qualitativo spesso le parti espulse dalla macchina possono essere rilavorate, per esempio se manca un componente esso può essere aggiunto e saldato a mano.

Decidiamo allora di effettuare l'analisi sulle caratteristiche considerate più importanti dal cliente.

Ricordiamo nuovamente che il cliente del nostro processo è un cliente interno. Noi crediamo che al cliente non importi che un dato componente o una data saldatura siano presenti. Questi possono essere definiti come dati intermedi, che danno come risultato il corretto funzionamento della scheda elettrica. Il cliente non vorrebbe sprecare risorse, né per costruire una lampadina su una scheda che non funziona, né per controllare tutte le schede che arrivano in magazzino.

Perché la lampadina, una volta completata, si accenda, è necessario che la scheda conduca l'energia elettrica, con la potenza indicata nella progettazione. Quindi una caratteristica "vitale" del prodotto è la potenza dell'energia elettrica, ed è questa la caratteristica che analizzeremo.

3.2. Il problema

La potenza viene misurata verso la fine del processo di produzione, poco prima dell'imballaggio, in un controllo al 100%. Tutte le schede non conformi ai controlli precedenti sono già state allontanate dalla catena di produzione, ed eventualmente rilavorate e controllate di nuovo. Anche dopo questo controllo è presente un dispositivo che allontana le schede che hanno valori al di fuori delle specifiche.

A questo processo non è applicato il Controllo Statistico di Processo con l'uso di carte di controllo, come avviene per molti altri processi presenti in fabbrica, perché da analisi precedenti era risultato superfluo. Infatti, dopo un periodo di ap-

plicazione del controllo statistico, si era dimostrato che il processo aveva una variabilità molto bassa rispetto alle tolleranze, e che produceva un numero molto esiguo di difetti, quindi il costo del controllo non portava alcun vantaggio per il miglioramento.

Ancora oggi, all'altezza di questo punto di controllo, la macchina che esegue la misura rileva pochi difetti, e questo potrebbe rassicurarci che il processo sia tuttora in controllo. Non ci dice nulla, però, su come i valori si distribuiscano, all'interno dei limiti di tolleranza, né ci assicura che il processo non sia cambiato dall'ultima analisi e che non tenda a peggiorare in futuro.

Dopo un certo periodo diventa quindi necessario controllare nuovamente il processo. Applicheremo al processo l'analisi descritta al capitolo precedente, per scoprire se la situazione presente raggiunge l'obiettivo del Sei Sigma, per prevedere se continuerà allo stesso modo, e per programmare azioni preventive nel caso tendesse a sbagliare, in modo da correggere questa tendenza prima che sorgano i difetti.

4. Misurazione

4.1. Fonte dei dati

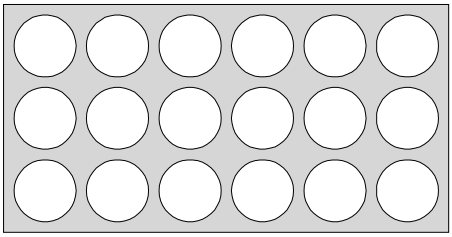
Nel capitolo precedente abbiamo scelto di controllare la potenza in ingresso dell'energia elettrica.

Il punto di controllo che effettua la misura è completamente automatizzato: la macchina misura la potenza dell'elettricità in ogni scheda, riporta su uno schermo i valori, e allontana dalla catena tutte le schede non conformi. Lo schermo associato allo strumento visualizza i valori misurati in Watt con due cifre decimali, e da qui li copieremo su un foglio per effettuare la raccolta dati.

Come informazioni aggiuntive, lo schermo riporta il tipo di prodotto, i limiti di tolleranza associati al prodotto, l'ora del rilevamento, e se la scheda è conforme oppure non conforme ai requisiti. Scopriamo qui che il limite inferiore di tolleranza è LIT = 9 W, e il limite superiore è LST = 12 W. Non è fornito il valore obiettivo, perché in genere si assume che sia il centro della tolleranza, e in questo caso è T = 10.5 W.

Scegliamo ora l'unità di campionamento. Sappiamo che le schede non percorrono la catena singolarmente, ma fanno parte di una scheda più grande che chiameremo "scheda madre" (Figura 4.1), ognuna delle quali contiene diciotto schede che vengono prodotte e poi controllate contemporaneamente.

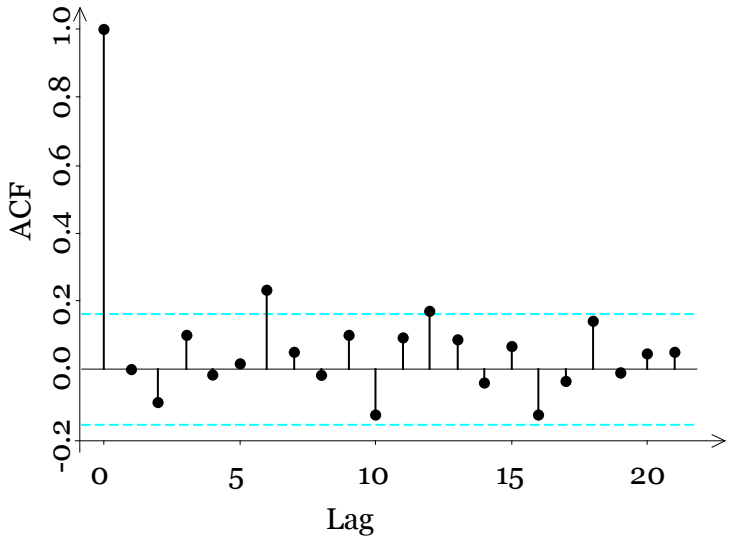
Figura 4.1 **Raffigurazione schematica di una scheda madre.**



La scheda madre (grigia) contiene 18 schede elettriche rotonde (bianche), che verranno poi montate in una lampada.

Raccogliamo quindi i dati di otto schede madri (144 schede elettriche) estratte casualmente nell'arco di venti minuti. In questo modo il campione conterrà elementi prodotti in condizioni simili. Si presenta però un problema, dovuto alla possibilità di autocorrelazione tra i pezzi prodotti in un arco di tempo così breve. Eseguiamo perciò un correlogramma per il primo campione raccolto; se esso dovesse presentare una forte autocorrelazione dovremo agire in modo diverso.

Figura 4.2 **Correlogramma dei dati relativi al primo campione**

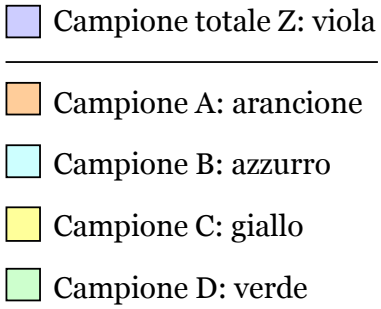


Il correlogramma è riportato in Figura 4.2. In azzurro sono rappresentate le bande di significatività, poste a ± 1.96, e le linee verticali rappresentano il livello di correlazione tra osservazioni vicine. Poche delle linee rappresentate sono significative, e per questo motivo affermiamo che l'autocorrelazione tra le osservazioni è trascurabile.

Ripetiamo il campionamento altre tre volte, dal 3 al 5 marzo 2004, per un totale di 576 schede. I campioni sono stati scelti in diversi momenti della giornata e in più turni di personale.

Non eseguiamo un'analisi del sistema di misura, perché la misurazione è automatica, senza l'intervento di personale, e la macchina è stata tarata recentemente.

Figura 4.3 **Legenda dei colori usati nei grafici**



Chiamiamo i quattro campioni con le lettere maiuscole A, B, C, D; la numerosità di ogni campione è di 144 unità. Chiamiamo inoltre l'unione dei campioni, cioè il campione totale di tutti i dati raccolti, con la lettera Z.

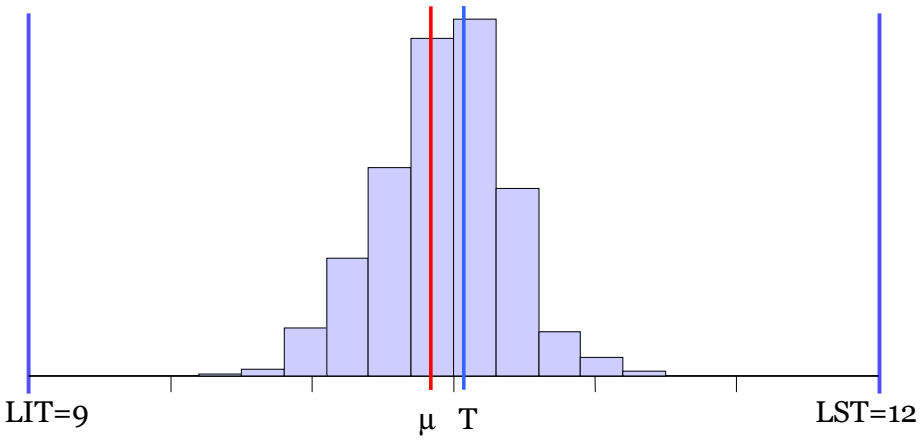
Infine, per facilitare l'interpretazione dei grafici, scegliamo i colori che verranno in seguito associati ai campioni, e riportiamo in Figura 4.3 la legenda.

4.2. Descrizione statistica dei dati

4.2.1. Rappresentazioni grafiche

Per iniziare la descrizione dei dati costruiamo l'istogramma di tutti i dati raccolti, cioè del campione Z, nella Figura 4.4, e rappresentiamo in blu i limiti e il centro della tolleranza; in rosso invece indichiamo la media del campione.

Figura 4.4 **Istogramma del campione totale Z.**

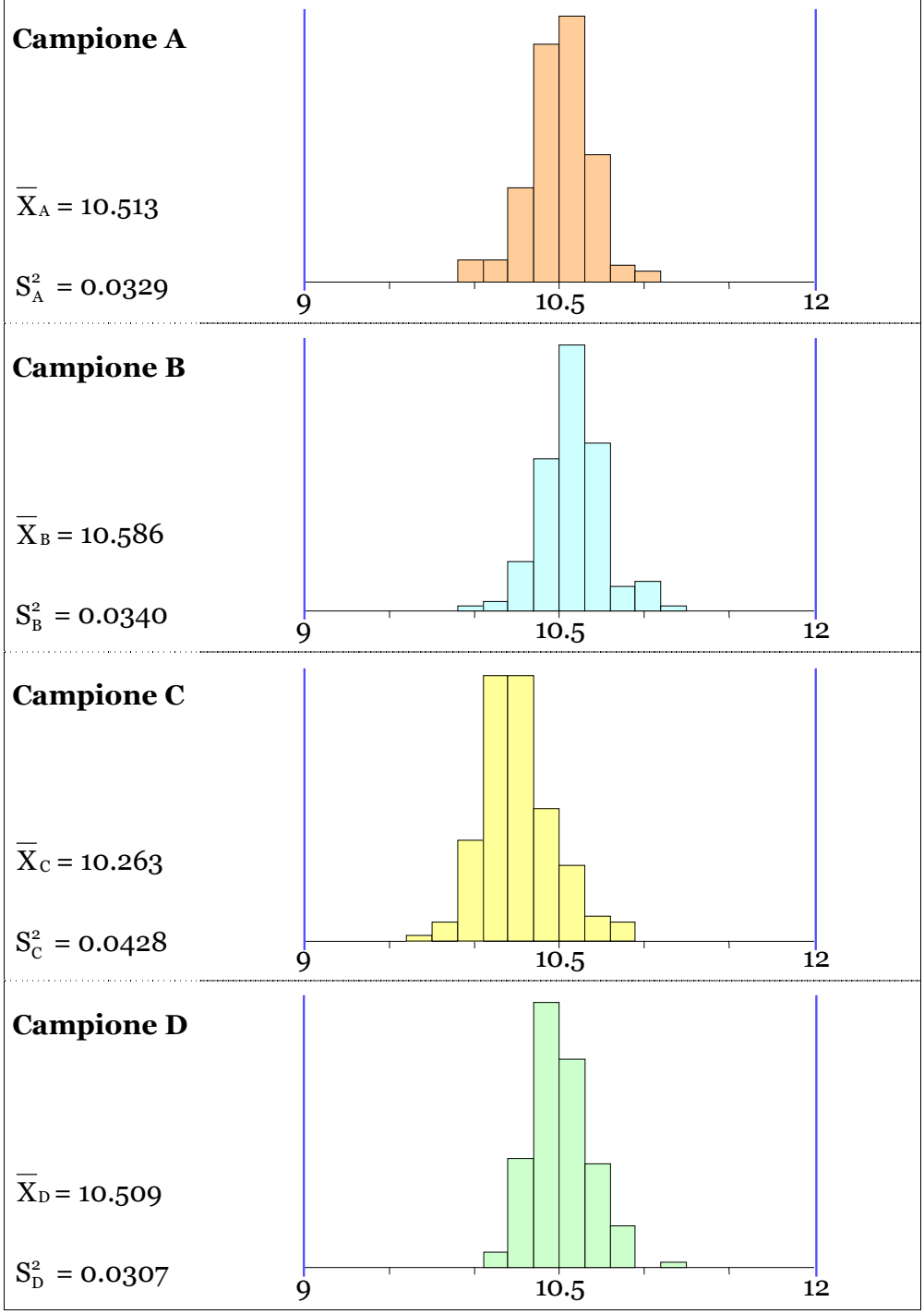


Notiamo subito che nessun valore cade oltre i limiti di tolleranza. Infatti, durante la raccolta dei dati non abbiamo visto alcuna scheda essere allontanata dalla catena, come invece accade a tutte le schede madri che hanno almeno un valore al di fuori delle specifiche.

La media dei dati è $\overline{X}_Z = 10.468$ W, e la varianza campionaria è $S_Z^2 = 0.0499$.

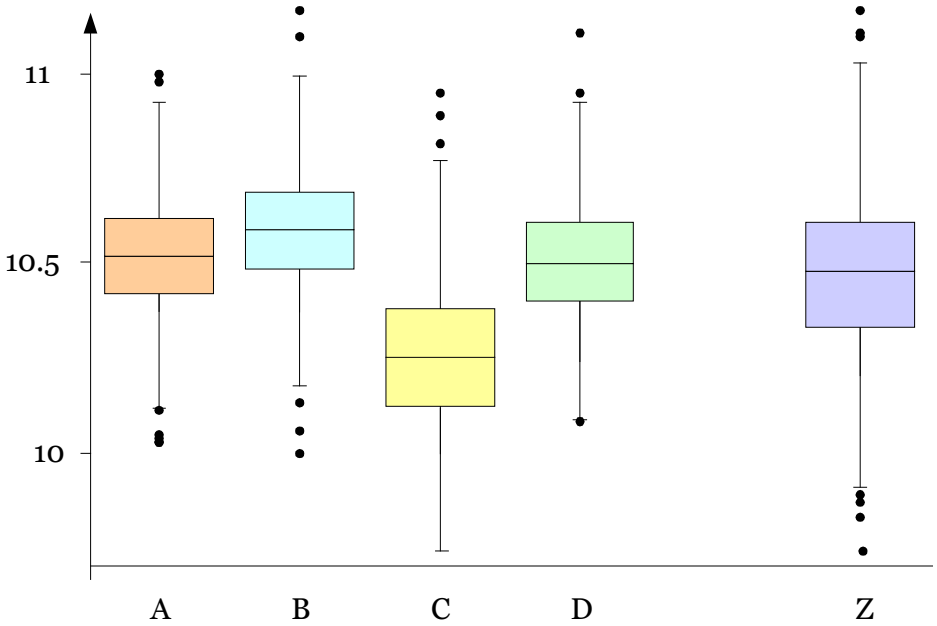
I quattro campioni, però, non mostrano la stessa distribuzione (Figura 4.5):

Figura 4.5 **Confronto degli istogrammi dei quattro campioni**



Il fatto che i campioni abbiano diverse distribuzioni appare evidente anche nella rappresentazione a Boxplot (Figura 4.6).

Figura 4.6 **Boxplot dei quattro campioni e del campione Z.**



Il campione C ha una media più bassa degli altri campioni, e sembra anche avere una variabilità più alta. Nel capitolo dedicato all'Analisi, proveremo a determinare se la differenza è significativa e da cosa è causata.

4.2.2. Forma della distribuzione

Negli istogrammi delle figure precedenti, è facile notare una forma a campana molto simile a quella della Distribuzione Normale. Vogliamo ora verificare l'approssimazione dei dati alla Normale, come segue.

- *Simmetria*. La curva Normale è simmetrica; perché anche il campione Z abbia una distribuzione simmetrica, devono essere verificati i seguenti punti:

1) Media e mediana coincidono

   $\overline{X}_Z = 10.467$

   $\tilde{X}_Z = 10.48$

   La differenza è pari al 0.119% del valore della media.

2) La media è a metà tra il valore massimo e il valore minimo

   $E(X_{MAX}, X_{MIN}) = 10.455$

   $\overline{X}_Z = 10.467$

   La differenza è pari al 0.12% del valore della media.

3) La media è a metà tra il primo quartile e il terzo quartile

   $E(Q_1, Q_3) = 10.47$

   $\overline{X}_Z = 10.467$

   La differenza è pari al 0.023% del valore della media.

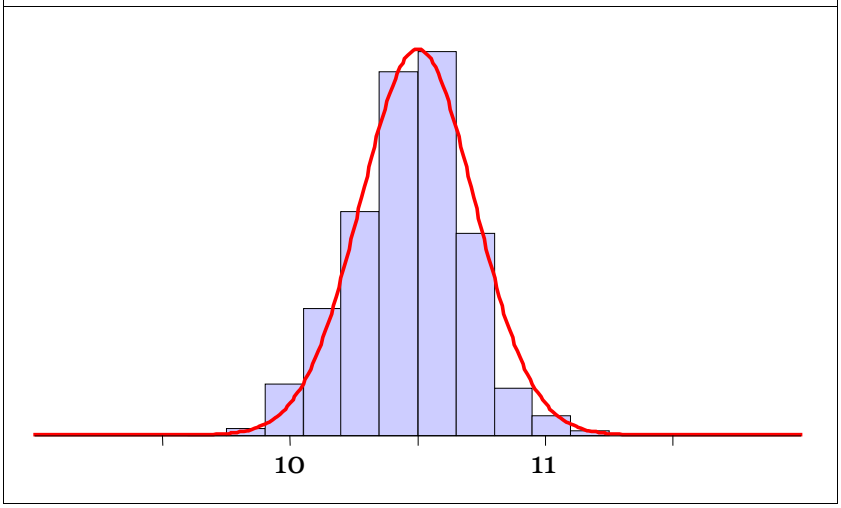
4) Il momento terzo dei dati è uguale a zero

   $$m_3 = \frac{\sum_i \left(x_i - \overline{X}\right)^3}{N} = 0.0014$$

I quattro punti sono verificati, perché gli scostamenti dagli obiettivi sono minimi, e si può quindi concludere che il campione ha una distribuzione simmetrica. La prima condizione è verificata.

- *Densità*. La densità di una distribuzione Normale, con la stessa media e la stessa varianza del campione, è quella riportata in rosso nella Figura 4.7, sovrapposta all'istogramma delle frequenze del campione Z. L'adattamento tra la curva teorica e la distribuzione dei dati conferma che la popolazione da cui abbiamo raccolto i dati è di tipo Normale.

Figura 4.7 **Confronto tra l'istogramma del campione Z e la curva Normale.**

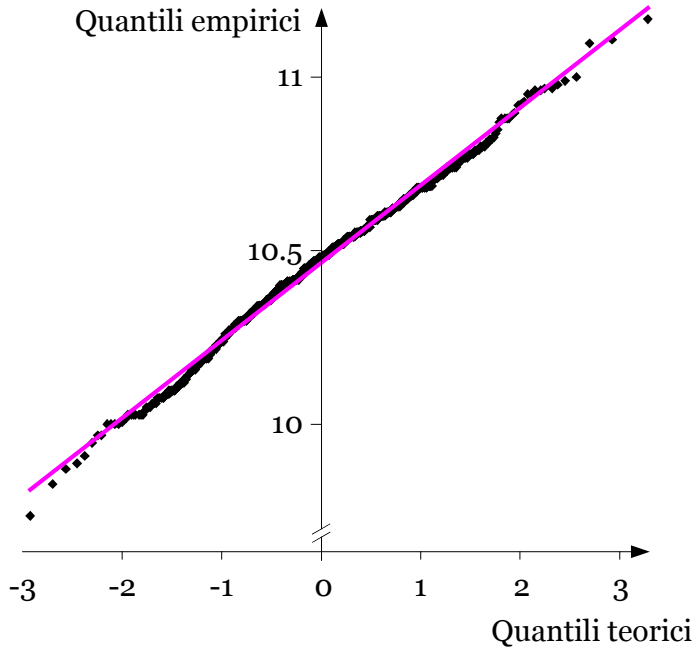


- *Funzione di ripartizione*. Uno strumento di R usato spesso per dimostrare la normalità della distribuzione è il *qqnorm*, che esegue una dispersione tra i quantili empirici dei dati e i quantili di una Normale standard (Figura 4.8). A questa dispersione aggiungiamo una retta (in viola) di equazione

  $$y = \overline{X}_Z + S_Z x$$

  Lungo questa linea si dovrebbero disporre i dati se veramente la distribuzione del campione Z fosse una Normale di media $\overline{X}_Z$ e varianza S_Z^2.

Figura 4.8 **Grafico quantile-quantile.**



Esiste una piccola discordanza, agli estremi, tra i punti e la retta, ma questo potrebbe essere causato solo dalla bassa numerosità dei valori al di sotto di 10 W e al di sopra di 11 W. Nel complesso si può dichiarare che il grafico quantile-quantile conferma l'ipotesi di normalità dei dati.

- *Test di conformità alla normale.* Sempre nel pacchetto statistico R, abbiamo a disposizione alcuni test statistici per verificare l'assunzione di normalità dei dati. Il test di *Shapiro-Wilk* confronta due stimatori alternativi della variabilità: al numeratore una combinazione lineare dei dati basata sulla normale, al denominatore la varianza campionaria.

$$W = \frac{\left(\sum_{i}^{n} a_i x_{(i)}\right)^2}{\bar{S}^2}$$ (con distribuzione tabulata dal programma)

W = 0.9956

Il test accetta l'ipotesi nulla con una confidenza maggiore a 0.05

I dati che abbiamo ottenuto confermano l'ipotesi di normalità del campione Z. Questo risultato ci consentirà di affrontare successivamente alcune analisi, per le quali la distribuzione normale è un requisito fondamentale.

4.2.3. Indici di capacità e deviazione standard

L'ultima informazione di cui abbiamo bisogno per descrivere il processo è la prestazione attuale del processo. Calcoliamo a questo scopo gli indici di capacità (Cp), di capacità posizionata (Cpk), e la deviazione standard (σ). Per calcolare questi indici stimiamo la deviazione standard della popolazione con la deviazione standard del campione Z.

L'indice di capacità Cp mostra quanto il processo è capace di soddisfare le specifiche di tolleranza. Si calcola dividendo l'intervallo di tolleranza per l'ampiezza del processo, rappresentata da 6σ. Un valore di Cp minore di 1 indica un processo non capace; più alto è il valore dell'indice, più il processo è capace.

$$Cp = \frac{LST - LIT}{6S_Z} = 2.24$$

Il Cp supera il valore di 2, quindi potremmo già dichiarare che raggiunge l'obiettivo del Sei Sigma: infatti, se i limiti di tolleranza fossero ad una distanza di 6σ dal centro, l'intervallo sarebbe ampio 12σ, che diviso per 6σ è 2.

Il punto debole del Cp è il fatto che raramente un processo è centrato sul valore obiettivo. Perciò, per ottenere una misura migliore della prestazione del processo, è necessario considerare dov'è posizionata la media del processo in relazione ai limiti di tolleranza. A questo scopo si calcola il Cpk.

L'indice di capacità posizionata Cpk divide per 3σ la distanza tra la media e il limite di tolleranza più vicino. Quando il processo è perfettamente centrato sul valore obiettivo, il Cpk assume lo stesso valore del Cp; in ogni altro caso il Cpk sarà inferiore, e valori più bassi segnalano un forte scostamento della media dal centro della tolleranza, e quindi un elevato numero di prodotti difettosi.

$$\text{Cpk} = \min\left\{\frac{\text{LST} - \overline{\text{X}}}{3\text{S}_\text{Z}}, \frac{\overline{\text{X}} - \text{LIT}}{3\text{S}_\text{Z}}\right\} = 2.188$$

Il Cpk è di poco inferiore al Cp perché, come abbiamo già notato, la media del processo non coincide con T = 10.5. Ma il Cpk ha un valore superiore a 2, quindi il processo, seppure spostato, supera l'obiettivo del Sei Sigma.

In altre parole, il processo ha una variabilità molto bassa (Cp>2) ed è sufficientemente centrato nel valore di riferimento (Cpk>2), ed in questo modo produce poche non conformità.

Verifichiamo infine che 6σ sia inferiore a metà intervallo di tolleranza. Quest'ultimo calcolo è già implicito negli indici precedenti, perché essi sono un rapporto tra i due valori; preferiamo tuttavia vederli esplicitamente.

$6\sigma = 1.34$

$$\frac{\text{LIT} - \text{LST}}{2} = 1.5$$

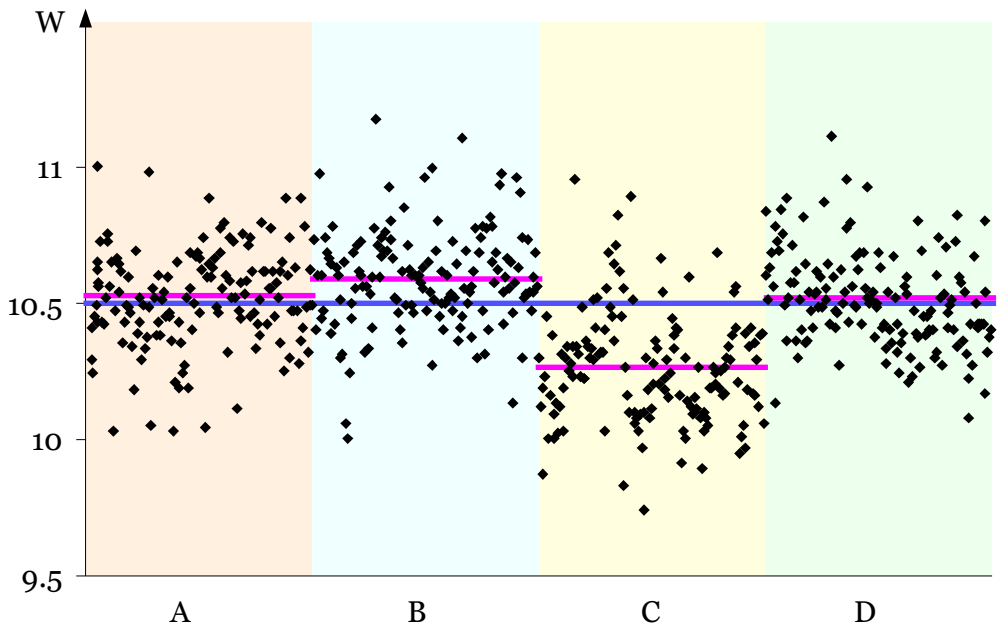
Questo dimostra definitivamente quello che emergeva dal calcolo del Cp e del Cpk. Infatti, come descritto nel capitolo dedicato al Sei Sigma, i limiti di tolleranza sono ad una distanza superiore a 6σ dal centro, e, almeno nel breve periodo, il processo produce meno di 2 non conformità per miliardo di pezzi prodotti.

5. Analisi dei dati

Negli istogrammi e nei boxplot del capitolo precedente abbiamo notato che i campioni potrebbero non avere la stessa media; in particolare, il campione C sembra essere spostato verso il basso. Analizziamo quindi l'andamento delle medie dei campioni per verificare quest'ipotesi.

In 0.1 possiamo vedere la distribuzione dei dati in relazione all'ordine di rilevamento. I valori dei dati sono rappresentati dai punti, mentre in blu raffiguriamo il valore di riferimento (T=10.5), e in viola le medie dei quattro campioni. Lo sfondo definisce i quattro campioni, con i colori già presentati all'inizio del quarto capitolo.

Figura 5.1 **Andamento dei dati e medie dei campioni.**



5.1. Test statistici della media campionaria

Eseguiamo il primo test per verificare l'ipotesi che il campione Z sia centrato nel valore obiettivo T = 10.5. Sotto l'ipotesi nulla la media del campione si distribuisce come una Normale di media T e varianza ignota $\frac{\sigma^2}{n_Z}$.

Stimiamo σ^2 con la varianza campionaria S_Z^2, perciò approssimiamo la Normale con una distribuzione t di Student con 575 gradi di libertà.

$$t_z = \frac{\overline{X}_Z - T}{\sqrt{\frac{S_Z^2}{n_Z}}} \sim t\,(n_z - 1)$$

$$t_z = -3.48$$

Il test rifiuta l'ipotesi nulla con una confidenza di 0.05. Questo significa che la media del campione Z è significativamente inferiore a T.

La causa di questo scostamento potrebbe essere una deviazione sistematica del processo, oppure un evento speciale che ha modificato la distribuzione di uno o più campioni. Per trovare la causa dobbiamo per prima cosa verificare se tutti i campioni hanno una media pari a T.

Eseguiamo il test t per ognuno dei quattro campioni, stimando nuovamente la varianza ignota con le rispettive varianze campionarie. Sotto H_0 la statistica test si distribuisce come una t di Student con 143 gradi di libertà.

$$t_i = \frac{\overline{X}_i - T}{\sqrt{\frac{S_i^2}{n_i}}} \sim t\,(n_i - 1)$$

$$t_A = 0.85$$

$$t_B = 5.598$$

$t_C = -13.757$

$t_D = 0.59$

Le statistiche test per A e D accettano l'ipotesi nulla con una confidenza di 0.05, mentre per i campioni B e C rifiutano. Concludiamo che solo il campione A e il campione D sono centrati in T.

5.2. Correlazione con la temperatura

Da dove provengono queste differenze? Il responsabile della macchina ci ha informato che campione B era composto di elementi prodotti il giorno precedente a quello in cui è avvenuto il controllo, e per questo avevano avuto la possibilità di raffreddarsi più degli altri pezzi, che normalmente sono controllati subito dopo la saldatura e un veloce raffreddamento.

I campioni A, C e D, invece, erano stati prodotti e poi controllati immediatamente, ma in orari diversi: i campioni A e D di mattina, e il campione C nel primo pomeriggio, perciò la temperatura ambientale doveva essere superiore per il campione C che per gli altri. La temperatura potrebbe quindi aver influenzato la misura.

I materiali conduttori, infatti, a temperature maggiori oppongono più resistenza al movimento degli elettroni; questo riduce l'intensità di corrente e quindi anche la potenza, che è ad essa proporzionale. Quando invece la temperatura è più bassa, la resistenza diminuisce e ci aspettiamo che in media la potenza sia più alta.

Nel corso della misurazione non è stata rilevata la temperatura superficiale di ogni scheda, perché non erano disponibili strumenti di misura; inoltre, per effettuare la misura sarebbe stato necessario fermare la catena di produzione. Possiamo però stimare la temperatura dell'ambiente al momento della misura, come risulta dalla 0.2.

Tabella 5.2 **Le temperature ambientali stimate per ogni campione**	
Campione A	$T_A = 15° C$
Campione B	$T_B = 16° C$
Campione C	$T_C = 18° C$
Campione D	$T_D = 14.5° C$

Non è però la temperatura ambientale il parametro di interesse. Possiamo immaginare che la temperatura superficiale di ogni scheda, al momento del controllo, sia proporzionale alla temperatura ambientale.

Infatti le schede che seguono la linea di produzione hanno un tempo di raffreddamento uguale, da quando avviene la saldatura al momento della misura; questo è stato progettato nel tentativo di portare tutti i pezzi a temperatura ambiente prima della misura, però è verosimile che i pezzi si raffreddino più velocemente se la temperatura esterna è più bassa. Per ogni campione considereremo quindi una temperatura pari alla temperatura ambientale, a meno di una costante.

Il campione B invece era formato di pezzi raffreddati per tutta la notte, quindi la temperatura superficiale di ogni scheda era molto bassa. All'interno della fabbrica la temperatura non scende di molto durante la notte, perché la produzione è a ciclo continuo, però le schede del campione B hanno avuto un tempo di raffreddamento più lungo, perciò stimiamo che la temperatura fosse proporzionale a 10° C, a meno di una costante.

Eseguiamo ora un'analisi per verificare l'entità dell'influenza della temperatura nella misura della potenza.

5.2.1. Analisi della varianza ad un fattore

Per tutte le osservazioni appartenenti ad un campione abbiamo una sola temperatura, stimata in base all'ora in cui è avvenuta la misura. La variabile *temperatura*, quindi, è costante all'interno del campione, ed esiste una relazione diretta tra temperatura e campione.

La prima analisi che effettuiamo è un'analisi della varianza ad un fattore, dove il fattore *campione* assume quattro valori: {A; B; C; D}. L'analisi della varianza stima un modello come quello proposto di seguito:

$$potenza = \beta_A + \beta_B x_B + \beta_C x_C + \beta_D x_D + errore$$

In questo modello x_B, x_C e x_D sono variabili dummy che assumono valore 1 per i dati appartenenti al campione indicato dal pedice e 0 per gli altri.

I coefficienti β_B, β_C, e β_D, da stimare, indicano il contributo alla media del campione in aggiunta all'effetto dell'intercetta β_A, che è stimata come media del campione A. Se tutti i campioni avessero la stessa media, i coefficienti β_B, β_C, e β_D sarebbero uguali e pari a zero; se invece due o più coefficienti avessero valori simili o proporzionali, e bassa varianza, si potrebbe assumere una relazione tra essi, e quindi semplificare l'analisi.

Riportiamo in Tabella 5.3 la stima dei coefficienti e i risultati di un test di uguaglianza a zero per ogni coefficiente.

Tabella 5.3 **Analisi della varianza ad un fattore**

		Stima	Dev. standard	Test t (uguaglianza a 0)	
(intercetta)	β_A	10.512847	0.015613	673.337	*Rifiuta*
Campione B	β_B	0.073194	0.022080	3.315	*Rifiuta*
Campione C	β_C	−0.250000	0.022080	−11.322	*Rifiuta*
Campione D	β_D	−0.004236	0.022080	−0.192	*Accetta*

Abbiamo ottenuto che β_B e β_C sono diversi da zero, quindi il campione B e il campione C hanno la media rispettivamente superiore ed inferiore alla media del campione A; invece il campione D ha la stessa media del campione A. Nel capitolo precedente avevamo calcolato alcuni test t, nei quali avevamo verificato che il campione A e D erano centrati in T = 10.5, mentre B e C erano significativamente diversi; i test della Tabella 5.3 confermano questo risultato.

Oltre a questi test t è di interesse anche un test F, nel quale si verifica l'ipotesi nulla che la media non cambi nei quattro campioni, cioè che i coefficienti (escluso β_A, l'intercetta) siano contemporaneamente uguali a zero. La statistica F calcola il rapporto della varianza tra i campioni con la varianza all'interno dei campioni, e rifiuta l'ipotesi nulla per valori elevati. Sotto l'ipotesi nulla, la statistica si distribuisce come una F di Snedecor con 3 e 572 gradi di libertà.

$$F = \frac{S_Z^2 - \sum_i S_i^2}{\sum_i S_i^2} = 81.61 \qquad \text{con } i \in \{A; B; C; D\}$$

Il test rifiuta l'ipotesi nulla con una confidenza di 0.05, e questo conferma che i campioni hanno medie diverse.

Dato che sappiamo che ogni campione ha una temperatura associata differente, stimiamo un modello di regressione lineare.

5.2.2. Regressione lineare semplice normale

La regressione lineare stima una relazione di tipo lineare tra la misura della potenza e la temperatura stimata, in un modello come quello che segue:

$$potenza = \alpha_1 + \alpha_2\, temperatura + errore \qquad [5.1]$$

In questo modello α_1 è l'intercetta, mentre α_2 è il coefficiente angolare della retta dei minimi quadrati, e stima quanto l'aumento della temperatura fa diminuire la potenza; dalla teoria ci aspettiamo, infatti, che α_2 abbia un valore negativo.

In Tabella 5.4 sono riportate le stime dei coefficienti α_i e i risultati della statistica test che verifica l'uguaglianza a zero dei coefficienti.

Tabella 5.4 **Regressione lineare della potenza sulla temperatura**

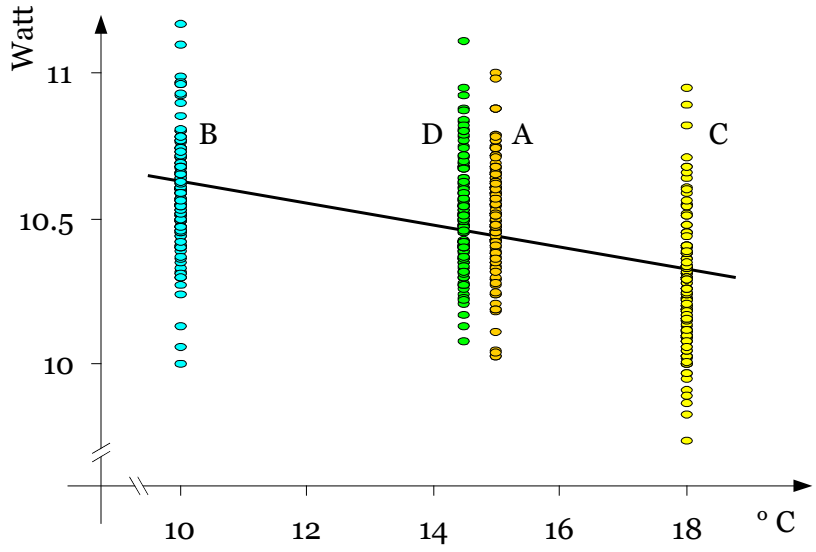
		Stima	Dev. standard	Test t (uguaglianza a zero)	
(intercetta)	α_1	11.007188	0.041861	262.95	*Rifiuta*
Temperatura	α_2	−0.037537	0.002856	−13.14	*Rifiuta*

Il coefficiente della temperatura ha un valore negativo, confermando la teoria, ed è significativo. La temperatura è quindi una fonte di variazione non trascurabile:

all'aumentare della temperatura, diminuiscono proporzionalmente i valori misurati per la potenza.

Questo appare più chiaramente se eseguiamo la dispersione tra i valori raccolti e le temperature, ed aggiungiamo al grafico (presentato in Figura 5.5) la linea avente l'intercetta α_1 e il coefficiente angolare α_2 indicati nella Tabella 5.4.

Figura 5.5 **Relazione lineare tra la temperatura e la potenza**



Abbiamo ottenuto che la relazione tra potenza e temperatura è di tipo lineare, come espresso nell'equazione [5.1]; possiamo quindi stimare il valore della temperatura necessaria perché la distribuzione abbia valori al di fuori delle specifiche.

Nel capitolo dedicato al Sei Sigma abbiamo visto che, quando la media è distante 4.5σ da un limite di tolleranza, il processo ha 3.4 ppm difettosi, e questo livello di difettosità è considerato accettabile. Calcoliamo ora quale temperatura sposterebbe la media a questa distanza dai limiti:

- Aggiungendo $4.5\sigma_Z$ al limite inferiore di tolleranza otteniamo 10 W, cui corrisponde una temperatura di 26.7° C.
- Sottraendo $4.5\sigma_Z$ al limite superiore otteniamo 11 W, che è causato da una temperatura di poco superiore a 0° C.

Ricordiamo che la temperatura che stiamo analizzando è la temperatura ambientale all'interno della fabbrica, dove non si raggiungono mai temperature troppo basse né troppo alte, perché in tali condizioni le persone e le macchine non possono lavorare. A questo scopo, la temperatura non supera mai i 25° C, nemmeno in estate, ed è mantenuta sopra i 13° C in inverno.

Possiamo quindi decidere che la distorsione dovuta alla temperatura non è così grave da portare i pezzi fuori dalle specifiche.

5.3. Analisi dei campioni non centrati

Effettuiamo ora un'ultima analisi sui due campioni che non sono centrati nel valore obiettivo T = 10.5, per verificare quanto grave è la distorsione.

Nel capitolo 4 abbiamo ottenuto i seguenti risultati:

- il campione B è in media più alto di T;
- il campione C è in media più basso di T, ed inoltre sembra avere la varianza più alta degli altri campioni.

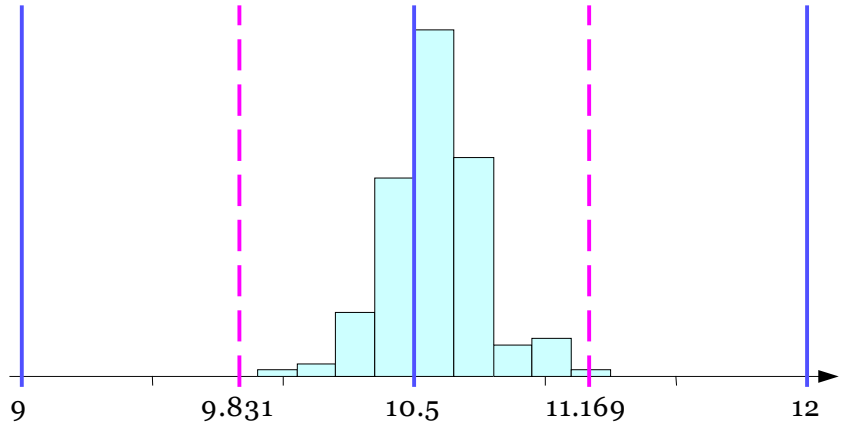
D'altra parte,

- nessuno dei valori raccolti è caduto oltre i limiti di tolleranza;
- il campione Z di tutti i valori raccolti ha gli indici di capacità molto alti.

Ci chiediamo quindi se i campioni B e C sono sufficientemente vicini alla media. Riportiamo nuovamente i grafici degli istogrammi, che avevamo già visto nel ca-

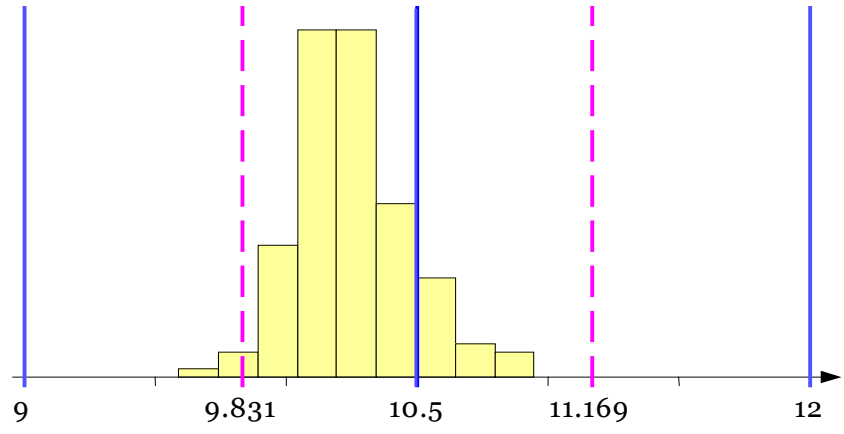
pitolo precedente, ai quali aggiungiamo, in viola, i limiti dell'intervallo $T \pm 3\sigma_Z$. Abbiamo scelto questo intervallo perché vogliamo sapere di quanto i campioni sono spostati rispetto al valore obiettivo T, e la deviazione standard del campione totale è una buona unità di misura.

Figura 5.6 **Istogramma del campione B**



L'istogramma del campione B, in Figura 5.6, ha la media molto vicina al valore di riferimento, e questo indica una distorsione non grave. Inoltre, la linea viola in corrispondenza di 11.169 taglia una barra di altezza 1, che contiene un solo valore, pari a 11.17 W.

Figura 5.7 **Istogramma del campione C**



Invece, nell'istogramma del campione C, in Figura 5.7, si nota che la media è molto spostata rispetto alla linea di T = 10.5, e oltre la linea viola corrispondente a 9.831 cadono due valori.

Calcoliamo allora gli indici di capacità per verificare se il campione C è sufficientemente capace e posizionato. Gli indici sono gli stessi presentati nel capitolo precedente:

$$Cp = \frac{LST - LIT}{6S_C} = 2.42$$

$$Cpk = \min\left\{\frac{LST - \overline{X}_C}{3S_C}, \frac{\overline{X}_C - LIT}{3S_C}\right\} = 2.035$$

Entrambi gli indici assumono valori superiori a 2, perciò, come già definito al capitolo 4, il processo da cui deriva il campione C è capace e posizionato correttamente all'interno dei limiti, e raggiunge un punteggio di 6 Sigma:

$6\sigma_c = 1.24$

Infatti $6\sigma_c$ è inferiore a metà intervallo di tolleranza, che misura 1.5.

Notiamo però che l'indice Cpk è inferiore all'indice Cp, perché la media del campione è spostata rispetto al valore obiettivo. Ma l'indice è superiore a 2, e significa che, nonostante lo scostamento della media, il campione è così poco disperso da essere ben contenuto all'interno dei limiti.

Arrivati a questo punto dell'analisi abbiamo la conferma che il processo presenta una distorsione non grave, quindi non dovremo prendere provvedimenti radicali.

Dovremo però intervenire, perché è nostro interesse che il processo sia centrato e stabile; parleremo di questo nel prossimo capitolo.

6. Miglioramento e controllo

Conclusa l'analisi dei dati raccolti, il metodo Sei Sigma prevede azioni di miglioramento sulle variabili che più influenzano le caratteristiche critiche per la qualità.

La caratteristica che abbiamo deciso di analizzare, e che è la più importante per il cliente, è la potenza di ingresso della corrente elettrica. La temperatura del metallo conduttore influenza la misurazione della potenza, ed abbiamo dimostrato che provoca una distorsione significativa.

La temperatura del metallo è assunta proporzionale alla temperatura ambientale, e questa è una fonte di variazione non facilmente controllabile.

È infatti impossibile mantenere una temperatura costante all'interno della fabbrica in ogni periodo dell'anno, sia per motivi di fattibilità che di costi. Il sistema di riscaldamento e di condizionamento mantiene la temperatura entro un intervallo confortevole, senza forti variazioni, ed abbiamo stimato che all'interno di quest'intervallo la distorsione della media non è tale da avere un'alta percentuale di non conformità, se non intervengono altre fonti speciali di variazione.

Inoltre, può succedere che, per motivi tecnici, le schede non siano controllate poco dopo la saldatura; quindi alcune schede si raffreddano molto di più, come è successo al campione che abbiamo chiamato B. "Motivi tecnici" sono solitamente problemi alle attrezzature che fanno parte della catena, per esempio un guasto alla macchina che controlla la potenza in ingresso, e questo costringe ad immagazzinare temporaneamente i pezzi che escono dalla catena finché non sarà possibile riprendere il processo. Per risolvere questo problema, è necessario un piano di manutenzione preventiva degli impianti.

L'azienda ha già programmato un piano di questo tipo, e lo esegue da qualche tempo; crediamo quindi che i guasti siano in diminuzione, e che presto la variazione dovuta ad un lungo periodo di raffreddamento potrà essere notevolmente ridotta.

Al termine dell'analisi possiamo decidere se dovremo introdurre un piano di controllo per la misurazione della potenza, con l'uso di carte di controllo e piccoli campionamenti ad intervalli regolari. Le informazioni che abbiamo ricavato indicano che non è necessario tenere costantemente sorvegliato il processo: la variabilità è molto bassa, e le fonti di variazione che abbiamo identificato non provocano gravi distorsioni e possono essere ridotte.

Riteniamo sufficiente programmare un futuro campionamento per verificare che lo stato attuale sia mantenuto.

7. Obiettivi e conclusioni

Nel corso dello stage abbiamo analizzato un processo di produzione secondo il metodo Sei Sigma con i seguenti obiettivi:

1) *Conoscere il processo*. Sapere se è centrato nel valore di riferimento, se produce valori all'esterno delle specifiche e se presenta situazioni anormali da riportare in controllo.

2) *Migliorare il processo*. Decidere se sono necessarie azioni correttive, oppure piani di controllo del processo, e se esistono margini di miglioramento.

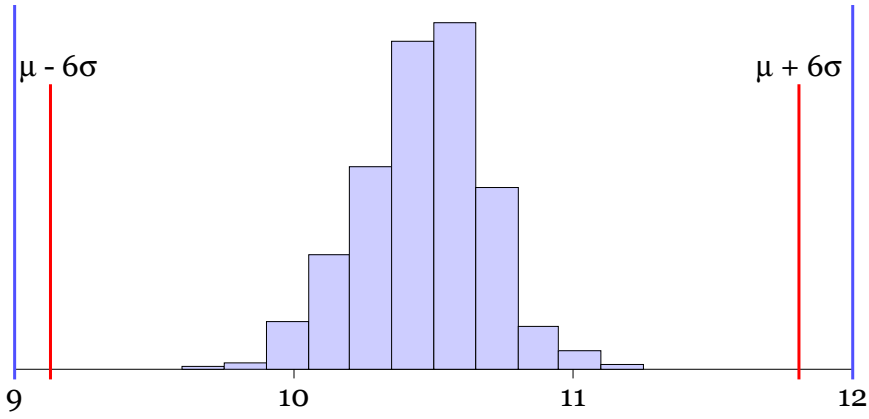
L'analisi è stata eseguita per mezzo di un campionamento di valori relativi alla potenza in ingresso di 576 schede elettriche. Per conoscere il processo, abbiamo calcolato la distribuzione dei dati raccolti, e abbiamo ottenuto i risultati che seguono:

- la media dei dati raccolti non coincide con il valore obiettivo;
- tutti i dati cadono all'interno delle specifiche;
- la distribuzione del campione ha una bassa variabilità;
- gli indici di capacità confermano che il campione è capace e posizionato.

7.1. Variabilità del processo

L'obiettivo del Sei Sigma, come definito al capitolo 2, è stato raggiunto: l'intervallo $\mu \pm 6\sigma$ è contenuto nell'intervallo di tolleranza. Questo si vede chiaramente in Figura 7.1, dove i limiti di tolleranza sono tracciati in blu, mentre i limiti dell'intervallo $\mu \pm 6\sigma$ sono in rappresentati in rosso.

Figura 7.1 **Istogramma dei dati**



Già prima di quest'analisi, infatti, la variabilità era stata ridotta notevolmente, probabilmente per merito dell'automazione e della standardizzazione. Analisi precedenti, sebbene non incentrate sul Sei Sigma, avevano dato risultati simili, e questo conferma che il processo è stabile.

7.2. La media del processo

7.2.1. L'influenza della temperatura

Il problema che emerge dall'analisi dei dati riguarda la media del processo. I dati raccolti non sono centrati sul valore di riferimento, e solo per due campioni, sui quattro raccolti, si può affermare che la media è uguale a tale valore. Nel cercare le cause di questo problema abbiamo scoperto l'influenza della temperatura sui valori misurati, e abbiamo dovuto decidere se questa distorsione di misura provoca gravi effetti sulla valutazione dei prodotti.

L'influenza della temperatura sulla misura della potenza è causata da un fenomeno fisico all'interno del metallo conduttore: all'aumentare della temperatura, la resistenza del metallo aumenta e fa diminuire l'intensità della corrente, e di conseguenza la potenza misurata è più bassa. Per eliminare quest'influenza sarebbe necessario misurare ogni scheda alla stessa temperatura, e questo non è realizzabile, perché:

- Ogni scheda viene misurata direttamente nella catena di produzione; aumentare il tempo di raffreddamento significherebbe rallentare tutta la catena. I tempi di raffreddamento sono stati ottimizzati proprio per bilanciare tra il raffreddamento e la produzione.

- La temperatura al momento della misurazione è condizionata dalla temperatura ambientale, e l'ambiente di produzione è troppo ampio per mantenere una temperatura costante all'interno; l'intervallo di temperatura è stato scelto per permettere di lavorare in modo confortevole, ma, se necessario, può essere cambiato.

Abbiamo allora calcolato quanto la temperatura può alterare la misura. È risultato che, nell'intervallo in cui è mantenuta la temperatura, la media non si sposta di

troppo dal centro, e quindi solo una piccola parte della distribuzione, stimata in 3.4 ppm, può cadere sotto il limite inferiore di tolleranza.

7.2.2. I due campioni non centrati nel valore obiettivo

Le medie di due campioni sono diverse dal valore di riferimento, ma nonostante ciò gli indici di capacità confermano che il processo è sufficientemente centrato all'interno delle specifiche. In altre parole, il processo ha una variabilità così bassa da rendere trascurabile anche una distorsione significativa della media, se tale distorsione è abbastanza piccola.

Il terzo campione aveva una media più bassa del valore obiettivo, e questo è spiegabile a causa della temperatura più alta.

Il secondo campione, invece, aveva la media più alta, e questo è dovuto ad una fonte speciale di variazione: le schede che lo componevano erano state raffreddate più a lungo a causa di un guasto nella catena di produzione. Anche per il campione B, quindi, la causa della variazione è la diversa temperatura, ma questa è dovuta ad una modifica del processo di produzione, e deve essere eliminata.

Per ridurre questo problema, l'azienda ha già programmato un piano di manutenzione, finalizzato a prevenire i guasti che provocano fermate alla linea. Perciò non è necessario prendere alcun altro provvedimento.

7.3. Conclusioni

I provvedimenti che prenderemo sul processo saranno solo marginali.

- Per la riduzione delle fermate della catena di produzione ci affidiamo al piano di manutenzione preventiva programmato dall'azienda.

- Riguardo l'influenza della temperatura, decidiamo che l'intervallo della temperatura regolato nella fabbrica non è abbastanza ampio da generare un aumento significativo della difettosità, e quindi non riteniamo utile cambiarlo.

- Decidiamo di programmare un successivo campionamento per verificare che la situazione attuale sia mantenuta.

Il processo analizzato si è dimostrato un "buon" processo anche secondo l'analisi del Sei Sigma, che è più esigente in termini di riduzione della variabilità rispetto alle analisi effettuate in precedenza.

8. Bibliografia

Chrysler, Ford and General Motors, Statistical Process Control (SPC) - Reference Manual, 1995

Kaoru Ishikawa, Guida al Controllo di Qualità, *Edizione italiana a cura del Centro Tecnologie dell'ELEA s.p.a., Olivetti Formazione/Consulenze*, Editore Franco Angeli Libri, Milano, 1988

8.1. Siti internet consultati

www.osram.it, *www.osram.com*, e intranet aziendale, per informazioni sull'azienda.

http://techreports.larc.nasa.gov/ltrs, archivio di documenti pubblicati dalla NASA, anno 1991.

www.aicq.it, sito della Associazione Italiana Cultura Qualità, sezione Tosco Ligure.

www.brunel.ac.uk/research/qi/quality/home.html, sito della Brunel University, West London.

www.dti.gov.uk, sito del Dipartimento di Industria e Commercio del Regno Unito, sezione di supporto alle imprese.

www.isixsigma.com, sito della iSixSigma, associazione americana di professionisti della Qualità.

Manuali in linea per il programma R (scaricabile dal sito *www.r-project.org*).