



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA
SETTORE MATERIALI**

**TESI DI LAUREA IN
INGEGNERIA DEI PROCESSI INDUSTRIALI E DEI MATERIALI**

(Laurea triennale DM 270/04 – indirizzo Materiali)

**STUDIO DELL'INFLUENZA DELLA TEMPERATURA E
DELL'UMIDITÀ SUL DECADIMENTO DELLA TENSIONE
ED ENERGIA DI SCARICA DI UN ACCENDITORE
PIEZOELETTRICO PER SCALDABAGNI AD ACCUMULO**

Relatore: Prof. ssa Giovanna Brusatin

Correlatore: Dott. Marco Croin

Laureanda: SOFIA MARCHESINI

ANNO ACCADEMICO 2010 – 2011

Indice

Nozioni Teoriche

INTRODUZIONE	1
 CAPITOLO 1 – L’ACCENDITORE PIEZOELETTRICO	
1.1 UNITÀ DI ACCENSIONE PIEZOELETTRICA	3
1.2 IL FENOMENO PIEZOELETTRICO	5
1.2.1 Ceramiche piezoelettriche.....	6
1.3 POLIOSSIMETILENE	8
 CAPITOLO 2 – STRUMENTAZIONE	
2.1 CELLA CLIMATICA	11
2.2 OSCILLOSCOPIO	12
2.3 SONDA	13
 CAPITOLO 3 – TECNICHE DI ANALISI	
3.1 PIANO FATTORIALE	15
3.2 TWO-SAMPLE-T-TEST.....	18
3.2.1 Intervallo di confidenza.....	18
3.2.2 Test d’ipotesi	19

Parte sperimentale

CAPITOLO 4 – PIANO FATTORIALE

4.1 TENSIONE: ANALISI DEL PIANO FATTORIALE	21
4.2 ENERGIA: ANALISI DEL PIANO FATTORIALE	25

CAPITOLO 5 – ANALISI DEL DECADIMENTO NEL TEMPO

5.1 LA TENSIONE: ANALISI DEL SUO ANDAMENTO NEL TEMPO.....	30
5.2 L'ENERGIA: ANALISI DEL SUO ANDAMENTO NEL TEMPO	35
5.2.1 Confronto tra le medie delle unità utilizzate per il piano fattoriale con quelle di questa prova	38
5.3 TENSIONE ED ENERGIA: RIPETENDO LE MISURE DOPO 16 GIORNI DAL TERMINE DELLA PROVA.....	39

CONCLUSIONE	41
--------------------------	----

BIBLIOGRAFIA	43
---------------------------	----

Introduzione

Ho svolto il mio tirocinio della durata di circa tre mesi presso il laboratorio di ricerca e sviluppo di Sit La Precisa nella sede di Padova. Quest'azienda è stata fondata nel 1953 ed è presente ora in più di 30 paesi, si occupa di sistemi di sicurezza, controllo e regolazione applicati in: caldaie murali e a basamento, generatori di aria calda, radiatori, stufe e caminetti, asciugatrici, scaldabagni istantanei e ad accumulo.

In particolare io mi sono occupata dello studio del decadimento di tensione ed energia in un accenditore piezoelettrico montato su una valvola per scaldabagni ad accumulo. Questa è un dispositivo di controllo multifunzionale con controllo della fiamma, dotato di regolazione di pressione, termostato on-off, manopola di regolazione della temperatura e pilota.



Figura 0.1: Valvola Delta nella quale viene montato l'accenditore piezoelettrico

L'accenditore piezoelettrico è costituito da una ceramica titanato zirconato di piombo ($\text{Pb} [\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}] \text{O}_3$ $0 \leq x \leq 1$), chiamato anche PZT, che è responsabile dell'effetto piezoelettrico; situata in un alloggiamento in plastica POM (poliossimetilene) che presenta le caratteristiche di stabilità termica e basso assorbimento d'umidità adatte all'applicazione.

Secondo le specifiche tecniche del prodotto, a tempo zero (prima di qualsiasi trattamento), l'accenditore piezoelettrico presenta una tensione di scarica maggiore di 14 KV con massimo 2 scariche su 10 ammesse sotto questo valore; mentre l'energia, misurata con 2 KOhm di resistenza, non deve mai scendere al di sotto dei 0,5 mJ.

Dopo i primi test di vita è risultato che dopo 1 mese a temperatura di 80°C e umidità dell'85% i valori della tensione e dell'energia di scarica scendevano al di sotto dei valori sopra indicati.

Proprio da questa premessa è mossa l'attività di tesi in questione, che si propone di stabilire:

1. quale fattore tra temperatura e umidità sia significativo a livello statistico nel danneggiare il funzionamento dell'accenditore piezoelettrico. A questo scopo è stato fatto un esperimento (DOE) del tipo piano fattoriale a due fattori, con un'ampiezza campionaria n=80 distribuiti in 2 celle e 2 forni (20 pezzi per ognuno).
2. tensione ed energia in funzione del tempo per ciascuna condizione di test per evidenziare se c'è un andamento caratteristico. Ad intervalli di circa una settimana vengono ripetute le misurazioni sulle unità sperimentali, in modo da ottenere una curva.

In entrambe le prove le unità sperimentali sono state suddivise nel modo seguente:

T=80°C (20pezzi)	RH=20%	T=80°C (20pezzi)	RH=85%
T=35°C (20 pezzi)	RH=20%	T=35°C (20 pezzi)	RH=85%

Tabella 0.1: Distribuzione delle unità sperimentali nelle due prove

La tesi si articola in due parti: la prima in cui vengono spiegate le nozioni teoriche che servono alla comprensione della parte successiva, la seconda nella quale viene descritto il lavoro sperimentale che è stato svolto. I capitoli trattati sono cinque:

Capitolo 1: riporta il principio di funzionamento di un accenditore piezoelettrico e descrive le sue proprietà

Capitolo 2: descrive la strumentazione impiegata

Capitolo 3: spiega le tecniche di analisi dei dati utilizzate, dando alcune nozioni di statistica

Capitolo 4: descrive la parte sperimentale riguardante il piano fattoriale e la determinazione dei fattori significativi

Capitolo 5: tratta l'analisi dell'andamento di tensione ed energia nel t

Capitolo 1

L'accenditore piezoelettrico

Negli anni sono stati sviluppati molti sistemi di accensione dei gas, molti di loro richiedono una batteria, un magnete permanente, un condensatore o un trasformatore; ma un sistema di accensione piezoelettrico è meno complicato. La parte elettrica di quest'ultimo consiste infatti solo di 1 o 2 cilindri di materiale piezoelettrico e l'alta tensione richiesta per l'accensione è generata sottoponendo il materiale ad uno stress meccanico.

Usando trasduttori piezoelettrici, inoltre, il volume del sistema di accensione è sostanzialmente ridotto.

1.1 Unità di accensione piezoelettrica

L'unità in esame consta di due cilindri di PXE, posti meccanicamente in serie ed elettricamente in parallelo, con le loro polarità in direzioni opposte. Questa particolare configurazione offre il vantaggio che l'energia della scintilla è doppia rispetto alla configurazione con un cilindro unico.

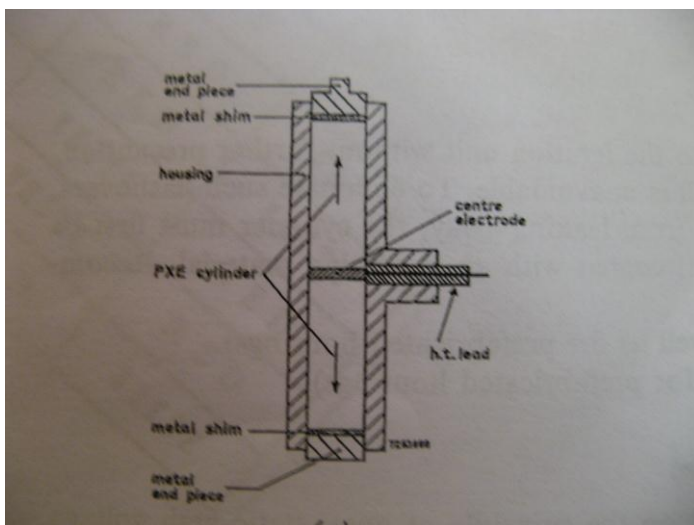


Figura 1.1. unità di accensione con due cilindri PXE

I pezzi di metallo che coprono le parti terminali del sistema sono messi a terra, mentre l'alta tensione è sfruttata nell'elettrodo centrale.

La vita utile di queste unità dipende dal grado di depolarizzazione causato dallo stress meccanico e dalle condizioni delle superfici dei cilindri in ceramica, che devono rimanere perfettamente paralleli e più lisce possibile.

L'elettrodo centrale è formato da un piatto metallico sottile, in acciaio, inserito tra i due cilindri di PXE.

Questo piatto è il terminale al quale può essere connesso il cavo ad alta tensione.

L'alloggiamento dei vari componenti in plastica deve rispettare dei prerequisiti:

- La sua tensione di rottura deve essere almeno doppia del picco massimo generato dall'unità di accensione;
- Deve essere impermeabile all'acqua;
- Deve avere proprietà meccaniche ed elettriche adeguate alla temperatura a cui opera.

A questo scopo è stato scelto in questo caso il Poliossimetilene.

L'accenditore piezoelettrico è poi costituito dal sistema battente formato da due molle e un martelletto per colpire la ceramica e generare la differenza di potenziale.

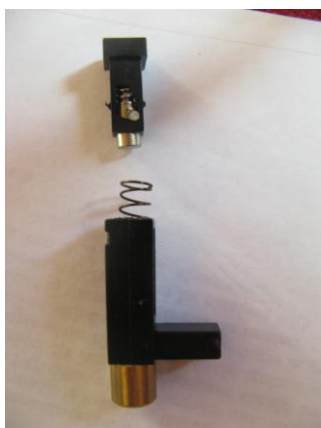


Figura 1.2. Accenditore piezoelettrico smontato

La caratteristica principale di questo sistema è il tempo relativamente lungo del carico meccanico applicato per l'accensione, che dura circa mezzo secondo (dipende anche dalla persona che opera in quel momento) e prima carica e poi scarica la ceramica. La tensione ci mette circa un quarto di secondo a raggiungere il suo picco massimo. La curva di scarica di questi accenditori piezoelettrici deve essere del tipo di quella indicata in Figura 1.3, poiché se così non fosse significa che sono avvenute delle scariche interne, generate probabilmente da un disallineamento delle ceramiche piezoelettriche.

Prima dell'assemblaggio del pulsante il sistema battente viene lubrificato con spray siliconico, infatti l'assenza della lubrificazione può causare l'inzeppamento della massa battente. Il lubrificante non deve però interpersi tra la massa battente e la ceramica.

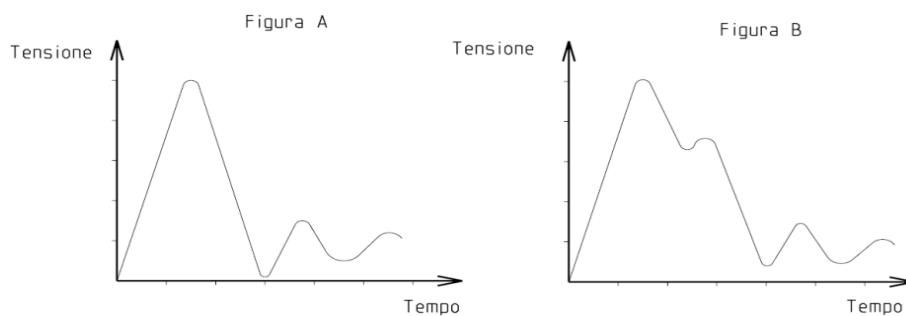


Figure 1.3. Immagine A: curva corretta, Immagine B: curva in caso di scariche interne

1.2 Il fenomeno piezoelettrico

L'effetto piezoelettrico è la capacità di un materiale di fornire una differenza di potenziale quando sollecitato meccanicamente (effetto diretto), o la capacità di deformarsi se sottoposto ad un campo elettrico (effetto inverso). La piezoelettricità fu osservata per la prima volta nel 1880 da Pierre e Jaques Curie nel quarzo e nei sali di Rochelle, ma si manifesta anche in altri solidi cristallini come per esempio il titanato di bario e la tormalina, in ceramiche ferroelectriche polarizzate e in particolari film di polimeri.

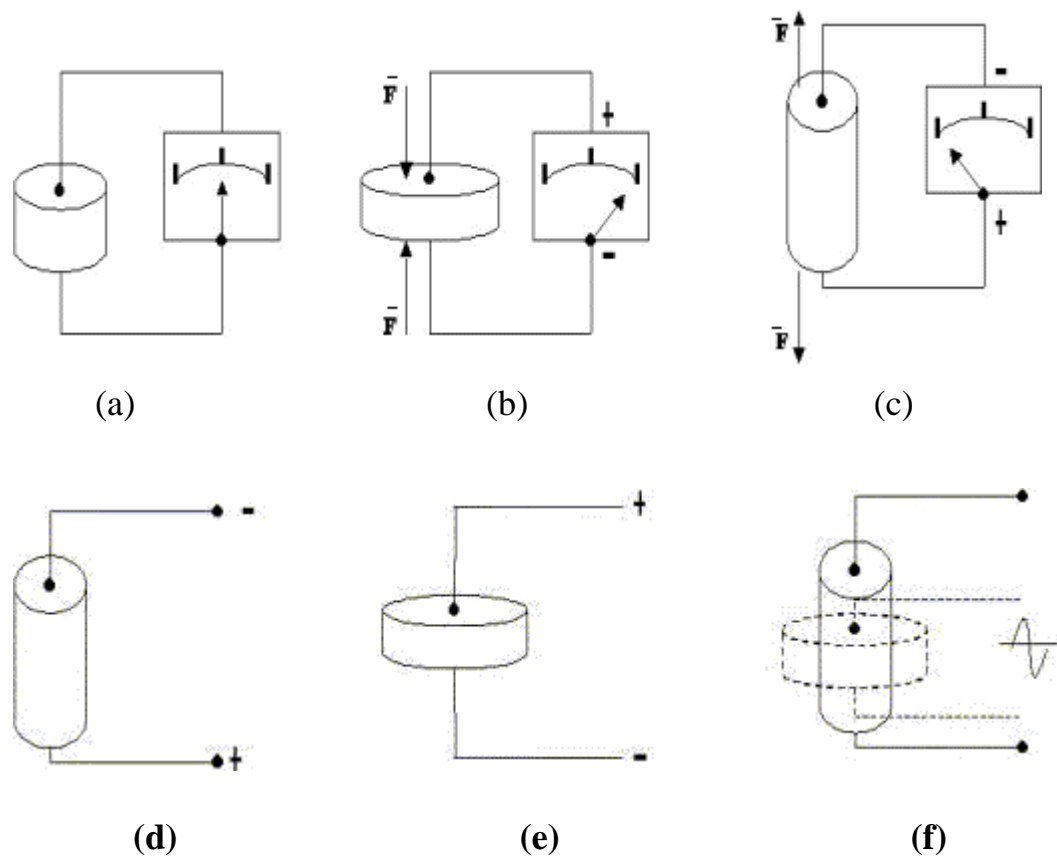


Figura 1.4. Cristallo piezoelettrico (a) a riposo; (b) sottoposto ad una compressione; (c) sottoposto ad una trazione; (d) sottoposto ad una tensione continua positiva; (e) sottoposto ad una tensione continua negativa; (f) sottoposto ad una tensione alternata

Questo effetto è possibile grazie alla particolare struttura microscopica dei cristalli, la cui cella unitaria non è simmetrica. L'asimmetria fa in modo che quando un cristallo di questo

tipo subisce una compressione o trazione meccanica, gli ioni che costituiscono i vertici di ogni cella si spostano dalla loro posizione di equilibrio, spostando anche il baricentro delle cariche positive dal baricentro delle cariche negative, ossia trasformando il cristallo in un dipolo elettrico. A livello macroscopico si può quindi osservare la comparsa di una distribuzione di carica superficiale sulle facce del cristallo e quindi una differenza di potenziale elettrico.

Nell'effetto inverso invece viene applicato un campo elettrico esterno che induce l'orientazione degli ioni delle celle elementari secondo la direzione del campo, producendo a livello macroscopico una deformazione del corpo (si parla di deformazioni su scala nanometrica)

1.2.1 Ceramiche piezoelettriche

Le ceramiche piezoelettriche sono materiali policristallini, ferroelettrici al di sotto della temperatura di Curie, che possono presentare caratteristiche piezoelettriche a seguito di una polarizzazione.

La ferroelettricità è la capacità di un cristallo polare di rovesciare il proprio dipolo elettrico sotto l'applicazione di un campo elettrico opportuno.

Oltre una certa temperatura, chiamata temperatura di Curie, la loro struttura cristallina ha un centro di simmetria e quindi non presenta un momento di dipolo elettrico, mentre al di sotto di questa temperatura subiscono un cambiamento di fase ad una struttura più complessa che non presenta un centro di simmetria. In questo caso il cristallo è dotato di un dipolo elettrico che può essere orientato in alcune direzioni consentite grazie all'applicazione di un campo elettrico sufficientemente elevato.

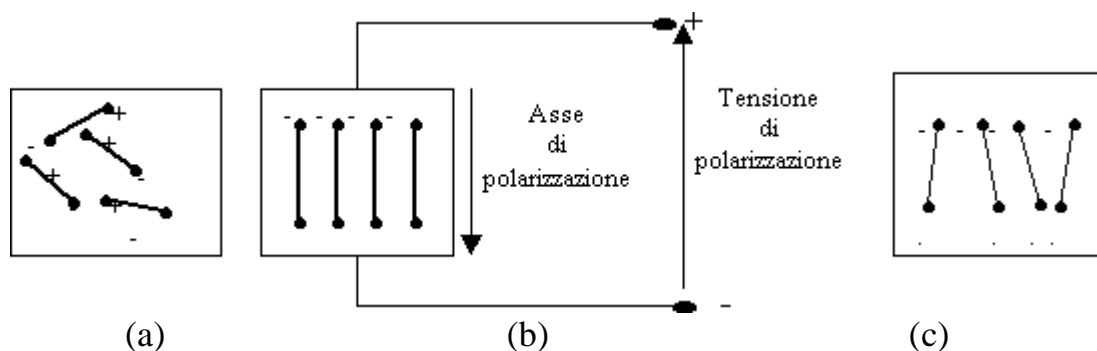


Figura 1.5. Momenti di dipolo elettrico e loro orientazione: (a) prima della polarizzazione; (b) durante la polarizzazione; (c) dopo la polarizzazione

Un singolo cristallo raffreddato al di sotto della temperatura di Curie in assenza di un campo elettrico, contiene molti “domini” in ciascuno dei quali il dipolo elettrico è allineato in una specifica direzione consentita. La somma totale dei dipoli di tutto il cristallo però è nulla.

Quando invece il cristallo viene raffreddato in presenza di campo elettrico, cioè viene polarizzato, i domini tendono ad allinearsi nella direzione permessa più simile a quella del campo elettrico, con il risultato che il cristallo mostra nel complesso un dipolo elettrico. Dopo la rimozione del campo esterno i dipoli non sono più in grado di tornare nell'originaria posizione casuale e risultano “congelati” in una direzione preferenziale. Se vengono sottoposti a trazione o compressione in grado di deformare il pezzo, si ottiene una variazione nel momento di dipolo, che induce una tensione tra gli elettrodi.

I piezoceramici presentano numerosi vantaggi come l'efficienza di trasformazione elettromeccanica, sono producibili in serie, si possono ottenere in numerose forme e hanno una buona lavorabilità.

Nonostante gli aspetti positivi se si lavora con questi materiali bisogna tenere bene a mente i seguenti punti:

- (a) la temperatura deve essere mantenuta bene al di sotto del punto di Curie;
- (b) il materiale non deve essere esposto a campi elettrici forti alternati o di direzione opposta a quella di polarizzazione;
- (c) lo sforzo meccanico a cui vengono sottoposti non deve eccedere specifici limiti.

Queste sopra elencate sono infatti le cause principali di depolarizzazione del materiale che causano un disallineamento dei dipoli elettrici che tornano a disporsi in maniera casuale.

Un altro aspetto a svantaggio dei piezoceramici è il tempo, infatti sono soggetti ad un fenomeno di invecchiamento che provoca un decadimento delle proprietà piezoelettriche allontanandoci dal momento in cui è avvenuta la polarizzazione.

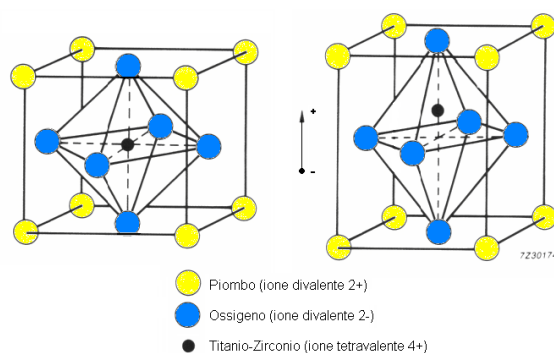


Figura 1.6. Zirconato Titanato di Piombo , a sinistra al di sopra della temperatura di Curie e a destra al di sotto della temperatura di Curie.

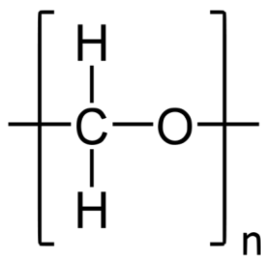
In particolare il ceramico utilizzato negli accenditori piezoelettrici in esame è un zirconato titanato di piombo con temperatura di Curie pari a 320°C, chiamato anche PZT.

I PZT sono composti da piombo, zirconio e il compound chimico titanato sinterizzati a temperature elevate.

Questi materiali sono caratterizzati da una struttura cubica per temperature al di sopra del punto di Curie. A temperature inferiori invece lo ione positivo si muove di circa 0.1 Å rispetto alla sua posizione di equilibrio e il reticolo elettricamente neutro diventa un dipolo (Figura 1.6).

1.3 Poliossimetilene

L'alloggiamento in plastica, nel quale sono contenuti la ceramica e gli altri elementi dell'accenditore piezoelettrico, è in poliossimetilene.



Questo polimero, conosciuto generalmente come acetale, fa parte della famiglia dei polieteri poiché possiede legami C-O-C. Il monomero di base è la Formaldeide come si può vedere in figura.

Si tratta di polimeri ingegneristici termoplastici con piccoli gruppi laterali, altissimo grado di cristallinità, elevata rigidità, basso attrito ed eccellente stabilità dimensionale.

Figura 1.7. poliossimetilene

Possono competere per molti aspetti con il Nylon, soprattutto per applicazioni in cui devono stare in contatto con acqua, anche se vengono molto meno utilizzati a causa della loro instabilità che causa difficoltà durante il processo.

Una proprietà fondamentale è il basso assorbimento di umidità, dovuto alla presenza del legame C-O, che è molto meno polare del legame C=O del Nylon, inoltre è inserito in catena e non è presente come gruppo laterale. Da ciò deriva la sua insensibilità per i solventi polari, come l'acqua, la bassa tendenza a legarsi con altri materiali e il basso coefficiente di frizione.

La massima temperatura di utilizzo di questa plastica è circa 100°C.

Un problema che però caratterizza il materiale è l'alta contrazione nello stampaggio ad iniezione che ne limita l'uso nel caso di parti che necessitano di dimensioni accurate.

Per limitare questo effetto negativo viene spesso caricato con vetro o schiumato.

Gli acetali più diffusi sono:

- Delrin: è un omopolimero sintetizzato attraverso la polimerizzazione della formaldeide. Il problema è che questo polimero si degrada termicamente molto facilmente, rilasciando la formaldeide che è un gas tossico e infiammabile. Per evitare questo problema viene aggiunto un composto chimico che reagisce con le estremità delle catene detto “end-capping”.
- Celcon e Hostaform: sono invece dei co-polimeri ottenuti dalla formaldeide e dall’etilene ossido. Possiedono anche dei legami C-C nella catena che riducono la degradazione e stabilizzano il polimero. Il copolimero ha il vantaggio quindi di essere termicamente più stabile, ma è anche più flessibile e ha un minore assorbimento d’acqua. Questo ovviamente a discapito delle proprietà meccaniche che sono ovviamente inferiori.

Capitolo 2

Strumentazione

La strumentazione utilizzata durante la prova consiste in: due celle climatiche e due forni, grazie ai quali è stato possibile simulare 4 diverse condizioni ambientali a diversi livelli di temperatura e umidità; un oscilloscopio e una sonda per le misure della tensione e dell'energia.

La tensione viene misurata direttamente, tenendo conto del picco massimo registrato dallo strumento, mentre l'energia deve essere misurata integrando il quadrato della forma d'onda della tensione acquisita con l'oscilloscopio e dividendola per il carico resistivo di 2 KOhm . La sonda utilizzata nel test deve avere impedenza $\geq 100\text{KOhm}$, secondo le specifiche tecniche.

2.1 Cella climatica

La cella climatica permette di condurre test ambientali, anche ciclici, a controllo di umidità e temperatura, tramite l'interfaccia con un PC.

Si può simulare il degrado causato da fenomeni ambientali e fare dei cicli di invecchiamento. Il sistema di umidificazione funziona con acqua deionizzata.



Figura 2.1. Cella climatica

2.2 Oscilloscopio

L'oscilloscopio è uno strumento di misura elettronico che consente di visualizzare in un grafico, l'andamento temporale dei segnali elettrici e consente di misurare tensioni, potenze, correnti ed energie elettriche. In pratica è un dispositivo che visualizza una qualunque

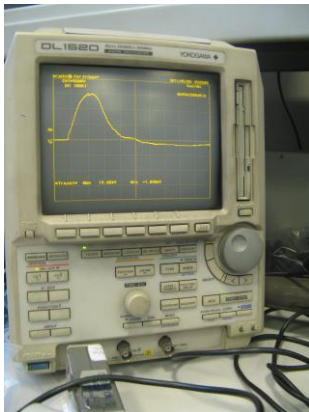


Figura 2.2.
Oscilloscopio

funzione tra due variabili, purché riconducibili a tensioni elettriche. Nell'asse delle ascisse viene rappresentato il tempo, nell'asse delle ordinate solitamente la tensione.

L'elemento essenziale dell'oscilloscopio è un tubo a raggi catodici (CRT Cathode - Ray - Tube), nel quale un fascio di elettroni emessi dal catodo, viene focalizzato e accelerato su uno schermo in modo da produrre su questo un punto luminoso. Il fosforo che riveste la parete interna del tubo produce un punto luminoso visibile.

L'oscillogramma è determinato deflettendo sia in orizzontale che in verticale il fascio di elettroni, attraverso delle coppie di placche di deflessione, che si trovano all'interno del collo del tubo e sono comandate da tensioni elettriche applicate ai loro capi.

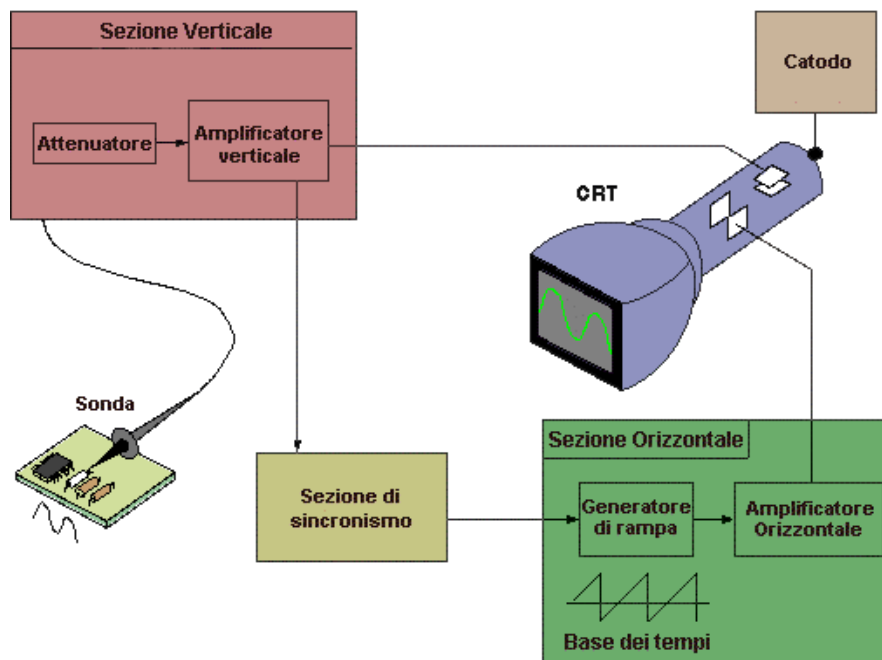


Figura 2.3. Schema di funzionamento oscilloscopio

La parte del CRT che accelera e focalizza il fascio di elettroni è denominata cannone elettronico, la parte che consente lo spostamento del punto luminoso sullo schermo viene chiamata invece sistema di deflessione. Il segnale da esaminare viene prelevato da un circuito esterno attraverso una sonda. Questo la attraversa e si dirige nella sezione verticale, che amplifica o attenua il segnale d'ingresso, a seconda di dove si trova il commutatore dell'amplificatore. All'uscita da questo blocco si dispone già di un segnale sufficiente che viene applicato alle placche in posizione orizzontale, che deflettono verticalmente il fascio di elettroni emessi dal catodo. Questi andranno a colpire lo strato fluorescente dello schermo, in senso verticale, dando origine alla traccia. Verso l'alto è rappresentata la tensione positiva, verso il basso quella negativa.

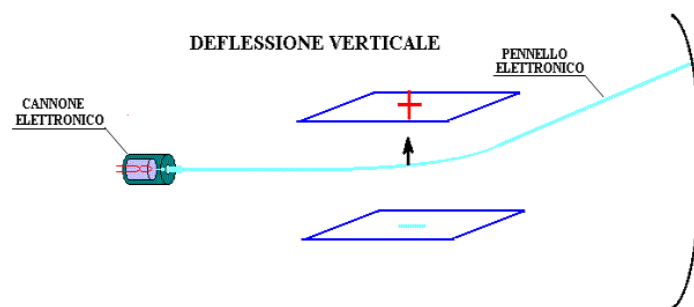


Figura 2.5. Sistema di deflessione verticale

Prima di raggiungere la sezione orizzontale il segnale attraversa anche la sezione di trigger, cioè di sincronismo interno. Il segnale infatti viene rappresentato in funzione del tempo, per questo motivo gli oscilloscopi hanno un generatore di segnali a dente di sega, che viene connesso al sistema di deflessione orizzontale, che simula il tempo. Il dente di sega fa procedere il pennello a velocità costante lungo l'asse orizzontale, da sinistra verso destra; nel mentre le variazioni del segnale fanno salire o scendere il pennello, che così disegna l'andamento del segnale in funzione del tempo. La deflessione verticale, unita al tracciato orizzontale, permettono di rappresentare graficamente il segnale sullo schermo.

2.3 Sonda

E' necessario che le sonde abbiano una buona qualità elettrica, in quanto servono a prelevare il segnale da esaminare per trasferirlo allo strumento. Devono infatti garantire affidabilità nelle misure e alterare il meno possibile il segnale che prelevano dall'esterno. Grazie alle

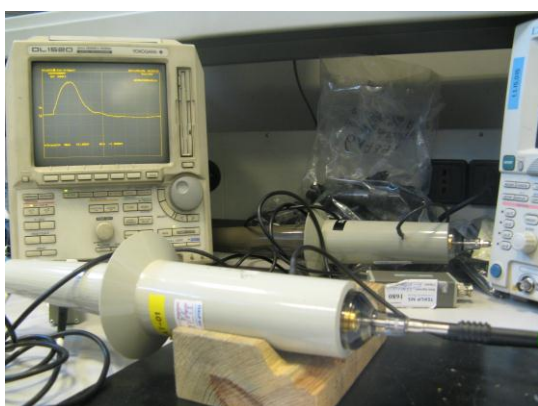


Figura 2.6 Oscilloscopio e Sonda

sonde è possibile misurare inoltre, anche tensioni superiori a quelle che può rilevare in ingresso lo strumento, grazie ad un fattore di attenuazione del segnale. La loro maggiore impedenza di ingresso inoltre è indispensabile per non caricare il circuito sotto misura.

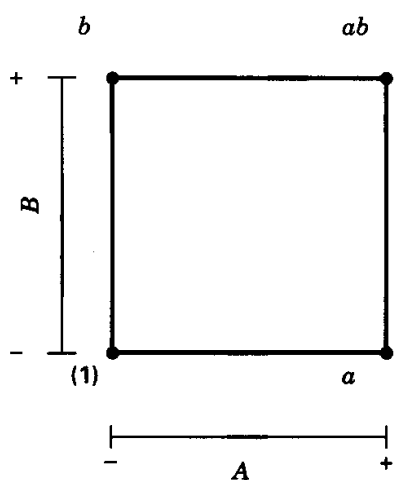
Capitolo 3

Tecniche di analisi

Il problema della sperimentazione stessa è essenziale per poter far ritenere attendibili le misurazioni effettuate e le conclusioni che da esse possiamo ricavare. È proprio per questo scopo che è sorto un settore della statistica denominato Disegni sperimentali o DOE (design of experiment). Esso consiste nel realizzare una serie di prove nelle quali le variabili in ingresso (fattori) vengono variate a vari valori, detti livelli. La prova viene condotta solo su un numero n di unità sperimentali estratte casualmente dall'intera popolazione. Vengono così osservati gli effetti dei fattori e le loro interazioni, che vengono interpretate mediante tecniche statistiche come l'ANOVA. L'approccio più corretto per condurre un esperimento a più fattori, consiste nel realizzare un esperimento fattoriale.

3.1 Piano fattoriale

Il piano fattoriale è considerato il metodo più corretto per condurre esperimenti in cui si tiene conto di più fattori, perché rispetto all'approccio di analisi un-fattore-alla-volta, permette di



valutare le interazioni che i fattori creano sulla risposta. Nel caso in esame siamo in presenza di due variabili in ingresso, o fattori, che sono A umidità e B temperatura, che vengono fatti variare secondo due livelli ciascuno. Questo particolare tipo di esperimento è chiamato piano fattoriale 2^2 , e consiste in quattro prove che costituiscono i vertici di un quadrato. Vengono esaminate tutte le possibili combinazioni di fattori e livelli. L'effetto di un fattore, chiamato anche effetto principale, è

Figura 3.1. Piano fattoriale 2^2

definito come la variazione della risposta, prodotta da una variazione di livello di un fattore. Per esempio l'effetto principale del fattore A = umidità, è la differenza tra la media delle risposte al livello alto di A e la loro media al livello basso di A. L'interazione AB tra i due fattori viene invece calcolata come la differenza media tra questi due effetti. La conoscenza dell'interazione AB è molto utile, perché molto spesso un'interazione significativa maschera la significatività degli effetti principali, portando a conclusioni fuorvianti. Per analizzare il piano fattoriale e l'interazione tra i due fattori si possono utilizzare vari metodi, come il modello di regressione o l'ANOVA. Il modello di regressione si può rappresentare in questo modo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (3.1)$$

Dove y è la risposta, β sono i parametri che devono essere determinati, x_1 è la variabile che rappresenta il fattore A, x_2 è la variabile che rappresenta il fattore B, ε è un termine di errore casuale. Le β si possono calcolare attraverso le medie aritmetiche delle risposte. Le stime dei parametri che si ottengono in questo modo sono le stime ai minimi quadrati. Dalla rappresentazione grafica di questo modello si ottiene un diagramma tridimensionale chiamato grafico della superficie di risposta, in cui si ritrova la superficie dei valori di y generata dalle varie combinazioni di x_1 e x_2 . La presenza di interazione sostanziale altera il piano della superficie di risposta, cioè inserisce una forma di curvatura.

Chiamiamo a il numero di livelli del fattore A e b il numero dei livelli del fattore B, per ogni singola prova ci sono n repliche. Il modello degli effetti descrive le osservazioni di un esperimento fattoriale:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (i=1,2,\dots,a; j=1,2,\dots,b; k=1,2,\dots,n) \quad (3.2)$$

Dove μ è l'effetto medio generale, τ_i è l'effetto dell'i-esimo livello del fattore A, β_j è l'effetto del j-esimo livello del fattore B, $(\tau\beta)_{ij}$ è l'effetto di interazione tra τ_i e β_j , ε_{ijk} è una componente di errore casuale. Entrambi i fattori sono assunti come fissi, cioè sono scelti dallo sperimentatore e non sono elementi di un campione casuale, e gli effetti dei trattamenti sono definiti come scarti dalla media generale; quindi $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$ e $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$. Lo stesso vale per gli effetti di interazione che sono definiti in modo che $\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$. Sul fattoriale a due fattori c'è interesse a fare un test d'ipotesi per vedere se gli effetti dei fattori A(τ_i), B(β_j) e

la loro interazione $AB((\tau\beta)_{ij})$ sono significativi (ipotesi H_1 alternativa), oppure se ci sia assenza di effetto del trattamento (ipotesi H_0 nulle).

Per verificare queste ipotesi sul seguente modello si esegue poi l'ANOVA (analysis of variance).

$$\begin{aligned}
 SS_A &= \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{4n} \\
 SS_B &= \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{4n} \\
 SS_{AB} &= \frac{[ab + (1) - b - a]^2}{4n} \\
 SS_T &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{4n} \\
 SS_E &= SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

SS_A è la somma dei quadrati dovuta al fattore A, SS_B è la somma dei quadrati dovuta al fattore B, SS_{AB} è la somma dei quadrati dovuta all'interazione AB, SS_E è la somma dei quadrati dovuta all'errore. Dividendo poi ciascuna somma dei quadrati per i propri gradi di libertà, si ottengono i quadrati medi (MS). Se gli effetti di riga, di colonna e di interazione sono significativi i valori attesi dei quadrati medi corrispondenti (MS_A , MS_B , MS_{AB}) saranno maggiori del valore atteso di MS_E . Per valutare la significatività dei fattori e della loro interazione, è sufficiente dividere il corrispondente quadrato medio, per il quadrato medio dell'errore, valori elevati di questo rapporto (F_0) indicano che i dati non confermano l'ipotesi nulla. L'ipotesi nulla implica assenza di effetti di trattamento di riga, di colonna e assenza d'interazione.

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
A treatments	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B treatments	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interaction	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SS_T	$abn - 1$		

Figura 3.2. Tabella ANOVA

Questa è la procedura che, a grandi linee, segue il software (Minitab) per calcolare gli effetti principali e le interazioni.

3.2 Two-sample-t-test

Il 2-Sample-t-test si utilizza per eseguire un test d'ipotesi e calcolare un intervallo di confidenza della differenza tra due popolazioni, quando la deviazione standard della popolazione è sconosciuta. La deviazione standard è la più comune misura di dispersione, maggiore è la deviazione standard maggiore è la dispersione dei dati.

3.2.1 Intervallo di confidenza

Un intervallo di confidenza è una gamma di valori, derivata da statistiche del campione, che può contenere un parametro sconosciuto della popolazione. A causa della loro natura casuale, è improbabile che due campioni provenienti da una determinata popolazione produrranno intervalli di confidenza identici. Ma se si utilizzano molti campioni, una certa percentuale degli intervalli di confidenza risultanti, conterrebbe il parametro ignoto della popolazione. Non è dato sapere se l'intervallo contiene il valore "vero" dello sconosciuto parametro della

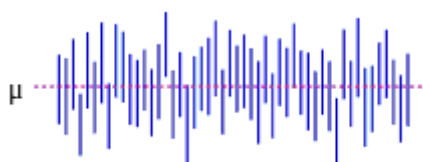


Figura 3.2. Intervalli di confidenza sulla media al 95%

popolazione. Ma l'intervallo di confidenza viene costruito in modo che ci sia una quantificabile fiducia che in esso sia contenuto il parametro ignoto.

Ad esempio se si fa un intervallo di confidenza sulla media con confidenza del 95%, 5 intervalli su 100 non dovrebbero contenere il valore "vero" della media,

mentre gli altri sì.

In particolare nel 2-Sample-t-test fatto da Minitab l'intervallo di confidenza viene fatto sulla differenza tra le medie di due popolazioni differenti. Se l'intervallo di confidenza contiene lo zero, questo fa supporre che non ci sia differenza statistica tra le due medie.

3.2.2 Test d'ipotesi

Un test d'ipotesi è un test statistico che prevede di formulare due assunzioni rispetto ad un qualche parametro statistico della popolazione: l'ipotesi nulla H_0 e l'ipotesi alternativa H_1 . In questo caso l'ipotesi nulla è $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ cioè implica che non ci sia differenza tra le medie. L'ipotesi alternativa, invece, è $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$. Se il p-value del test è inferiore al livello di significatività scelto (solitamente 0,05 %), si deve rifiutare l'ipotesi nulla, ciò implica che c'è differenza statistica tra le medie. Il p-value è il più piccolo livello di significatività al quale l'ipotesi nulla può essere rifiutata.

Il 2-sample-t-test utilizza per analizzare i dati la distribuzione t di Student, che usa S (varianza del campione), anziché σ (varianza della popolazione), essendo quest'ultima ignota. Questo cambiamento genera una maggiore incertezza e quindi una maggiore dispersione dei dati rispetto alla distribuzione normale, anche se per grandi ampiezze campionarie le due sono simili. L'intervallo di confidenza $100(1-\alpha)$ sulla media μ è dato da:

$$\bar{X} - t_{n-1; \alpha/2} \cdot S / \sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{n-1; \alpha/2} \cdot S / \sqrt{n} \quad (3.4)$$

dove $t_{n-1; \alpha/2}$ è il punto superiore della distribuzione t-Student con $n-1$ gradi di libertà e si trova tabulato.

Per fare un test d'ipotesi è necessario invece individuare la significatività α e i valori corrispondenti ai limiti critici. I livelli del 5 % (0.05) e dell'1 % (0.01) sono livelli accettati come limiti del tutto convenzionali per stabilire la significatività di uno scarto dall'ipotesi zero.

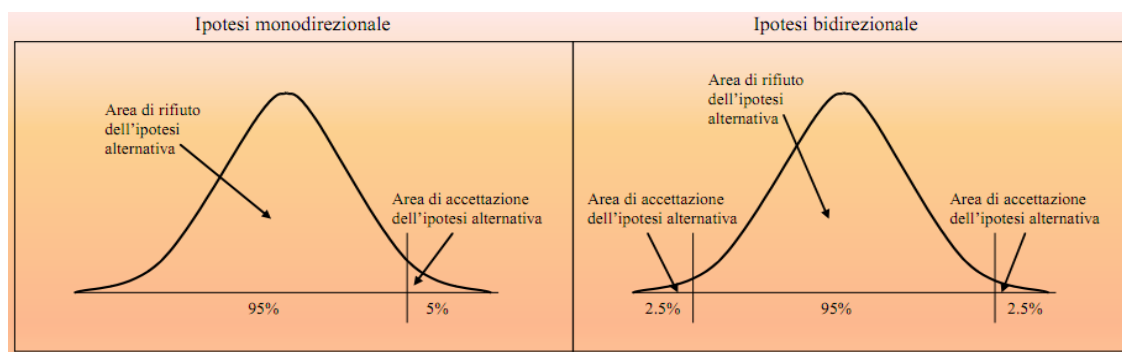
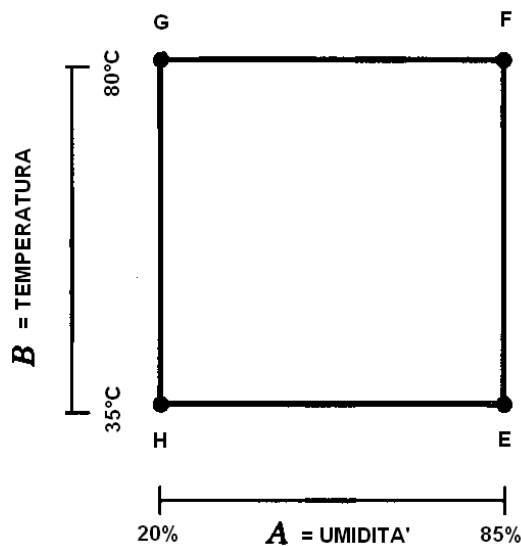


Figura 3.3. Distribuzioni t-Student

Capitolo 4

Piano fattoriale

La prova è stata eseguita su un numero di 80 unità sperimentali, scelte casualmente dall'intera



popolazione, delle quali sono state misurate tensione ed energia prima dell'inizio del test (a tempo zero). Le unità sono state suddivise in 4 gruppi, 20 pezzi ciascuno, E,F,G,H. Come si può vedere dal disegno per ogni gruppo sono state simulate delle particolari condizioni ambientali, variando i due fattori: temperatura e umidità secondo i loro due livelli. La prova è durata in totale un mese, durante il quale i provini hanno stazionato all'interno di due celle (punti E ed F) e due forni (punti G ed H). Al termine della prova sono state misurate nuovamente energia e tensione degli accenditori piezoelettrici in esame, dopo aver atteso 24 ore dalla loro estrazione dalla cella o

Figura 4.1. Piano fattoriale con 2 fattori: temperatura e umidità, entrambi con 2 livelli

forno. Per ogni singolo pezzo sono state fatte 10 repliche delle misure. Utilizzando Minitab si è fatto un piano fattoriale per la tensione e uno per l'energia, considerando come risposte i loro delta Δ =(valori finali-valori a tempo zero).

4.1 Tensione: analisi del piano fattoriale

Per una prima analisi il cube plot è utile per visualizzare la risposta media per ogni combinazione di livelli dei fattori.

Essendo la risposta un delta, più basso risulta il valore medio rappresentato nel cube plot, più la tensione si è abbassata a seguito del trattamento termico. Da questo diagramma quindi sembra chiaro che il punto F, con umidità e temperatura entrambe ai livelli alti, sia quello nel quale si registra il più alto calo di tensione. L'effetto della sola temperatura invece, punto G, sembra provocare sempre un calo dei valori registrati con l'oscilloscopio, ma minore rispetto all'azione combinata di temperatura e umidità. Ma per poter trarre delle conclusioni corrette è necessaria un'analisi statistica più approfondita.

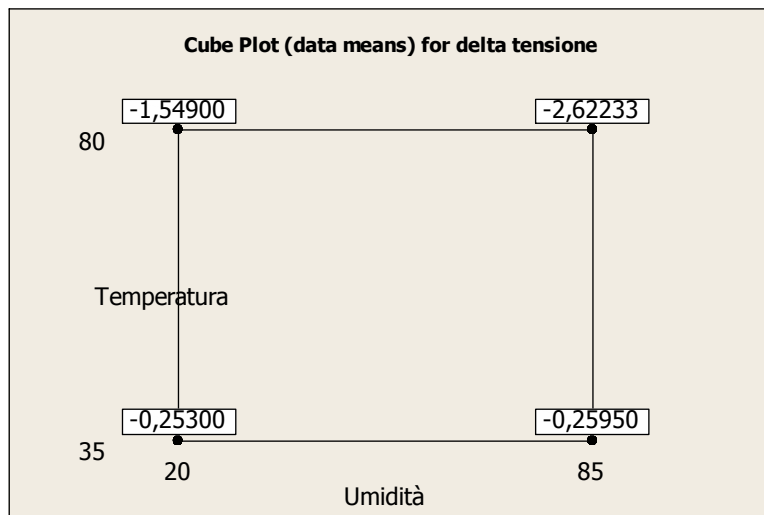


Figura 4.2.
Cube Plot

Il diagramma di Pareto degli effetti mostra quali termini contribuiscono alla variabilità della risposta. I termini sono messi in ordine di importanza dall'alto in basso.

Si può vedere inoltre come tutti gli effetti sono significativi ad un livello Alpha = 0,05, poiché tutti gli effetti oltrepassano la linea rossa.

Il diagramma mostra in poche parole, le grandezze degli effetti. In questo caso la temperatura (B) è molto più influente rispetto a umidità (A) e all'interazione tra le due (AB), nonostante tutti e tre siano significativi.

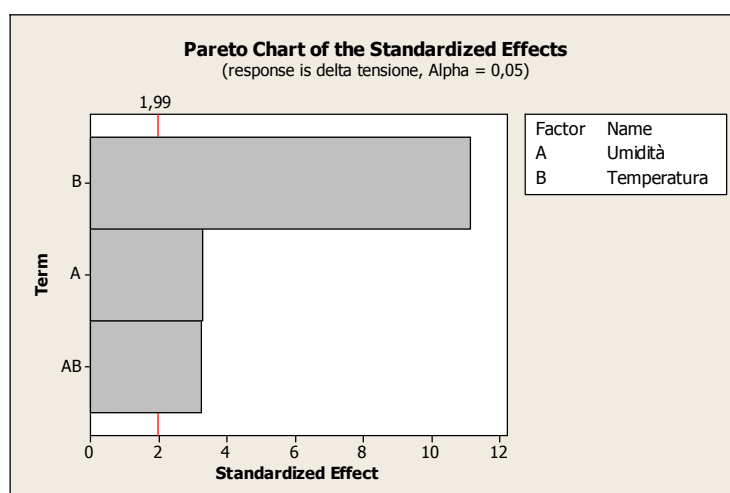


Figura 4.3.
Diagramma di Pareto

Il diagramma degli effetti principali definisce l'effetto di una variabile mediato su tutti i livelli dell'altra (o delle altre) variabili.

Questo mostra come entrambi i fattori hanno un effetto negativo, nonostante questo la temperatura ha un effetto molto più pronunciato, essendo il segmento più pendente.

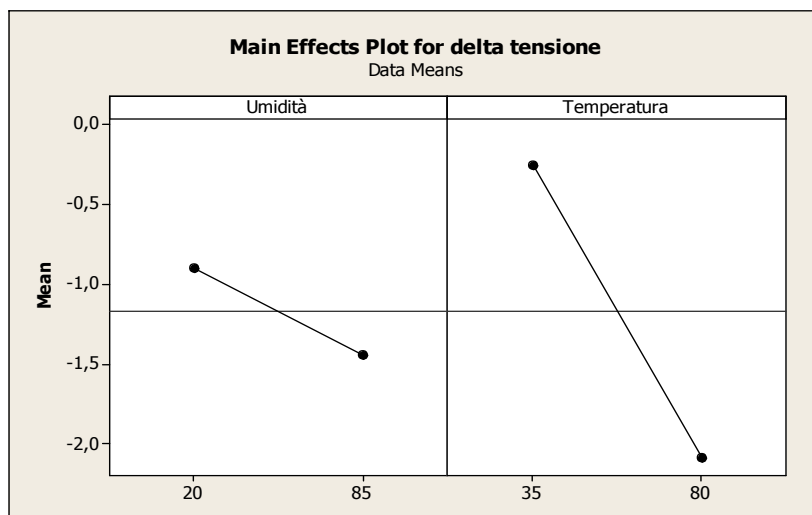


Figura 4.4.
Diagramma degli effetti principali

L'interpretazione degli effetti principali però può risultare fuorviante, soprattutto se siamo in presenza di interazione significativa, come in questo caso. Secondo alcuni autori sarebbe opportuno rinunciare ad interpretare gli effetti principali in presenza d'interazione, secondo altri gli effetti principali si possono prendere in considerazione anche in presenza di interazione molto debole.

L'interazione tra due variabili esiste quando l'effetto di una di queste dipende dal livello dell'altra, ovvero quando l'effetto dell'una non è il medesimo per tutti i livelli dell'altra.

Dal grafico di interazione si può affermare che c'è interazione significativa tra A e B, come avevamo già osservato dal diagramma di Pareto, in quanto i segmenti non sono paralleli.

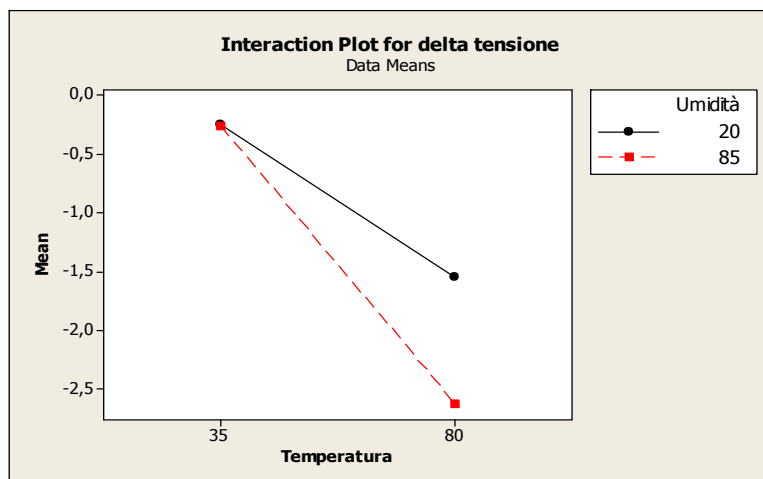


Figura 4.5.
Diagramma di interazione

Dall'analisi della varianza fatta con Minitab si può concludere che c'è interazione significativa:

Analysis of Variance for delta tensione (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	72,766	72,7655	36,3828	67,52	0,000
2-Way Interactions	1	5,691	5,6907	5,6907	10,56	0,002
Residual Error	76	40,953	40,9533	0,5389		
Pure Error	76	40,953	40,9533	0,5389		
Total	79	119,409				

Tabella 4.1. ANOVA fatta da Minitab

Siamo in presenza di effetti di riga, di colonna e di interazione significativi, in quanto i corrispondenti quadrati medi sono maggiori dei quadrati medi dell'errore.

Prima di accettare le conclusioni all'analisi bisogna controllare la distribuzione dei residui, dalla quale si conferma l'adeguatezza del modello. Il tracciamento del grafico dei residui nell'ordine temporale della raccolta dei dati è utile per individuare una eventuale correlazione tra i residui.

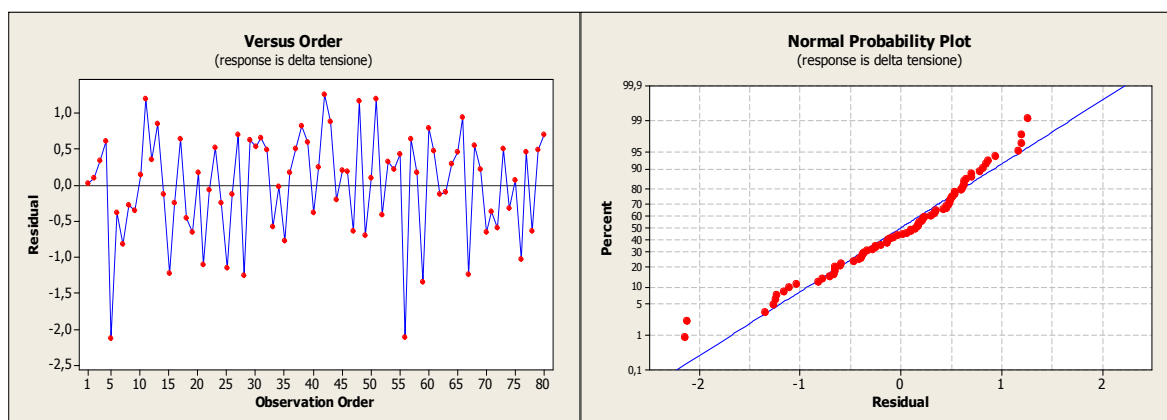


Figure 4.6. Analisi dei residui

Dall'analisi di regressione si ottiene invece un grafico chiamato superficie di risposta, in cui si ritrova la superficie dei valori di y generata dalle varie combinazioni di x_1 e x_2 .

Questo piano mostra tridimensionalmente come variano le risposte cambiando i livelli dei due fattori. Si può osservare come a temperatura bassa non ci sia praticamente quasi alcun effetto, mentre alzando la temperatura il piano si inclina verso il basso ma non in maniera omogenea con l'umidità. Ad umidità bassa infatti l'effetto della temperatura è meno pronunciato rispetto al punto dove temperatura ed umidità sono entrambe elevate.

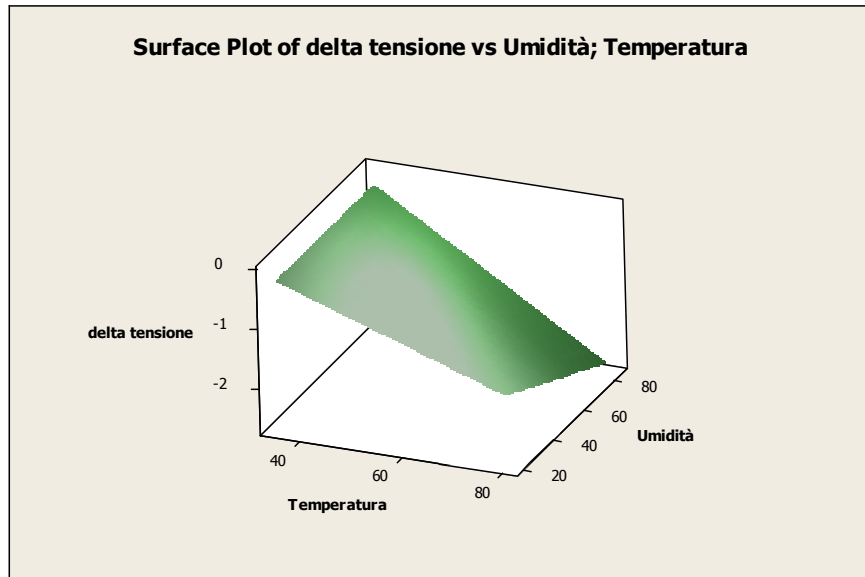


Figura 4.7. Diagramma della superficie di risposta

La curvatura del piano conferma che esiste una forma di interazione significativa.

4.2 Energia: analisi del piano fattoriale

Anche in questo caso analizziamo per primo il cube plot per vedere le risposte medie ai vari livelli dei due fattori. In questo caso la risposta media non assume solo valori negativi, il che fa supporre che ai punti E ed H (a temperatura bassa) l'effetto ambientale abbia dei risvolti positivi sul funzionamento del piezo, per quanto riguarda l'energia. Il punto F a temperatura e umidità entrambe ai livelli elevati è, anche stavolta, quello che presenta un maggior calo dell'energia media.

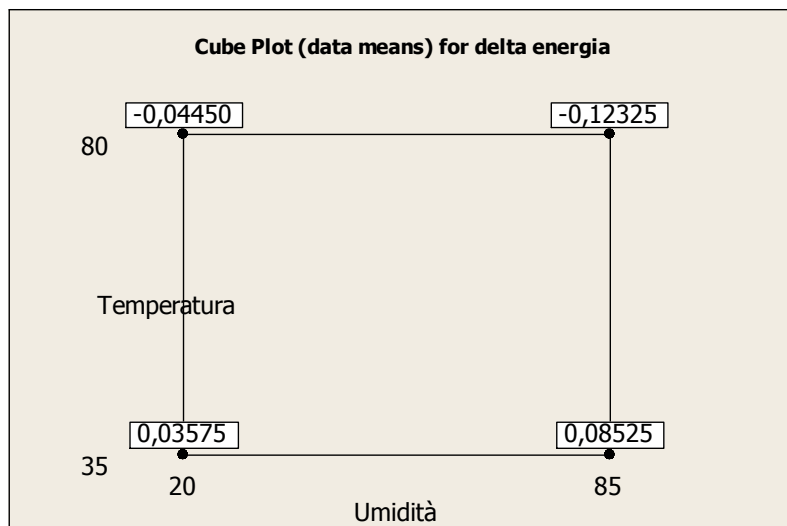


Figura 4.8. Cube plot con risposta il delta dell'energia

Il diagramma di Pareto mostra che l'umidità è un fattore non statisticamente significativo. Si trova infatti al di sotto della linea limite (in rosso). L'interazione tra i due fattori AB è al secondo posto in ordine di significatività dopo la temperatura. La temperatura rimane comunque il fattore più rilevante sulla risposta.

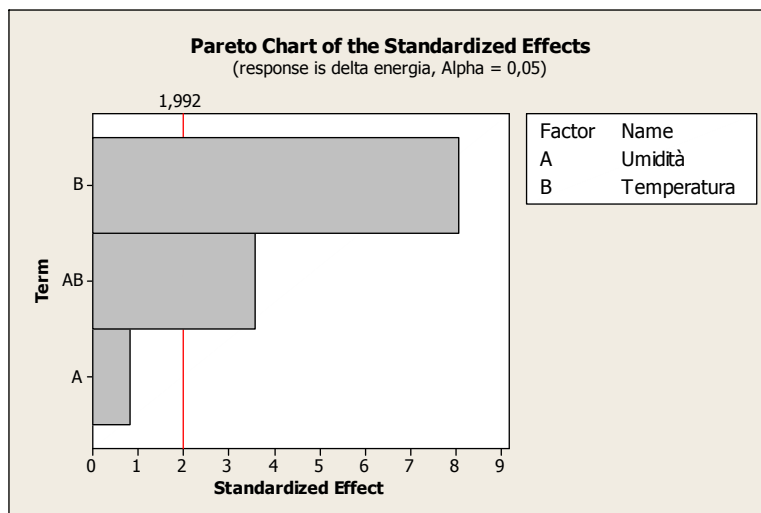


Figura 4.9. Diagramma di Pareto degli effetti per l'energia

Analizzando i diagrammi degli effetti principali si ha un'ulteriore conferma al fatto che l'umidità ha, in questo caso, un effetto molto lieve sulla risposta, quindi sulla variazione di energia. La pendenza della retta è infatti molto lieve.

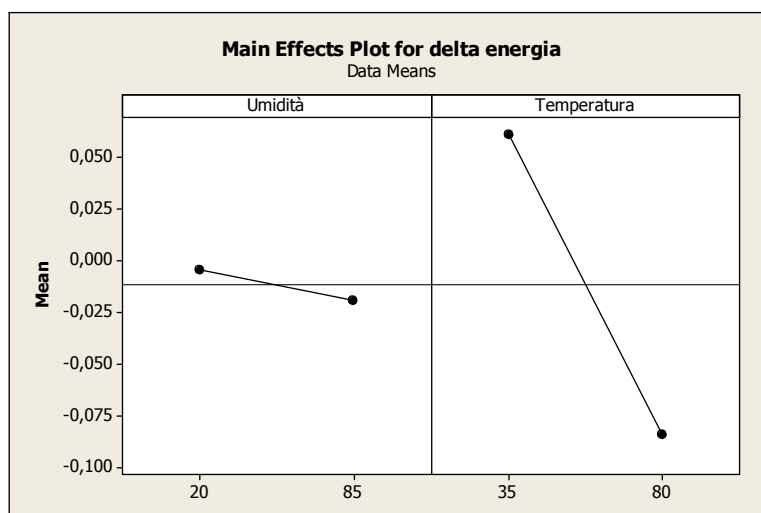


Figura 4.10. Diagramma degli effetti principali

C'è da dire però che essendo l'interazione significativa non è del tutto corretto dare un'interpretazione osservando questo tipo di diagrammi perché potrebbe portare a delle conclusioni fuorvianti.

Il diagramma mostra che c'è interazione significativa di tipo antagonista, in quanto le linee sul grafico si incrociano.

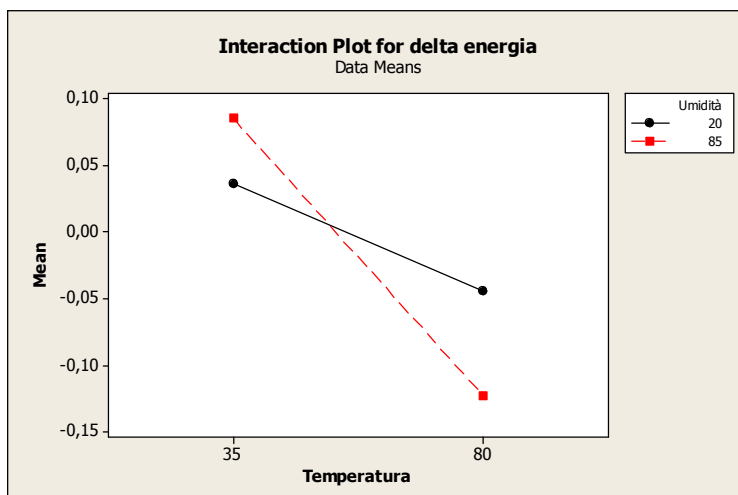


Figura 4.11. Diagramma di interazione per l'energia

Analysis of Variance for delta energia (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	2	0,421161	0,421161	0,210580	32,95	0,000
2-Way Interactions	1	0,082240	0,082240	0,082240	12,87	0,001
Residual Error	76	0,485696	0,485696	0,006391		
Pure Error	76	0,485696	0,485696	0,006391		
Total	79	0,989097				

Tabella 4.2. ANOVA per l'energia eseguito da Minitab

Il quadrato medio dell'effetto di interazione è maggiore al quadrato medio dell'errore, questo conferma che esiste un'interazione significativa. Analizzando gli effetti principali uno alla volta invece si vede come l'umidità non è un fattore significativo, in quanto il quadrato medio è minore di quello dell'errore.

One-way ANOVA: delta energia versus Umidità

Source	DF	SS	MS	F	P
Umidità	1	0,0043	0,0043	0,34	0,562
Error	78	0,9848	0,0126		
Total	79	0,9891			

One-way ANOVA: delta energia versus Temperatura

Source	DF	SS	MS	F	P
Temperatura	1	0,41688	0,41688	56,83	0,000
Error	78	0,57221	0,00734		
Total	79	0,98910			

Tabelle 4.3 - 4.4. ANOVA eseguita analizzando un fattore alla volta

Analizzando i grafici dei residui si può affermare che il modello di regressione è valido.

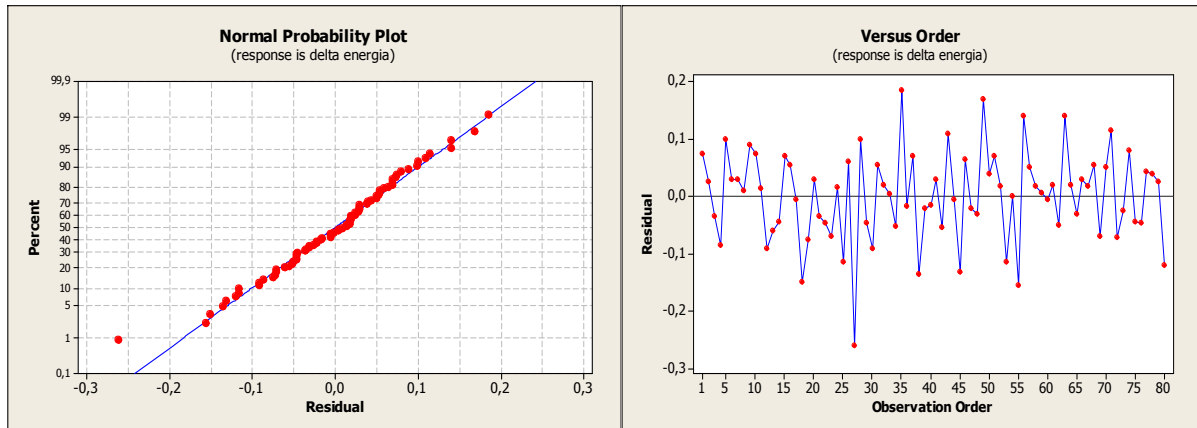


Figure 4.12. Analisi dei residui

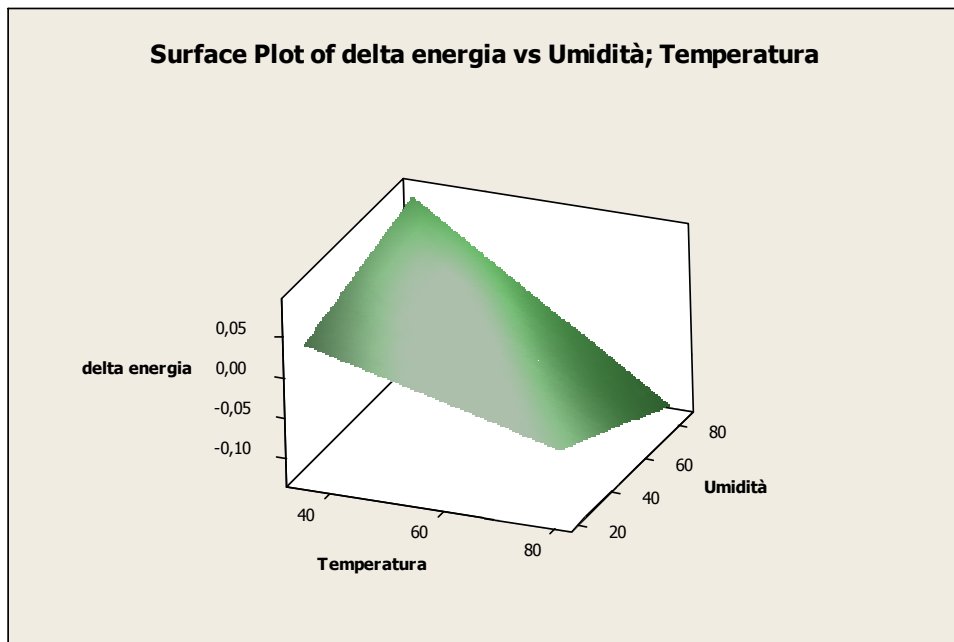


Figura 4.13. Diagramma della superficie di risposta

Capitolo 5

Analisi del decadimento nel tempo

Oltre a determinare attraverso il piano fattoriale quali fattori sono significativi, vogliamo capire come si usurano gli accenditori piezoelettrici nel tempo, e capire se seguono un andamento caratteristico, monitorando il loro calo di tensione ed energia attraverso un secondo tipo di prova.

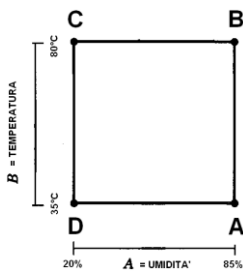


Figura 5.1.
Suddivisione
unità
sperimentali

Questa prova consiste sempre di 80 unità sperimentali, che non sono le stesse dell'esperimento precedente, ma vengono distribuite sempre in 4 celle e forni come fatto per il piano fattoriale. Ad intervalli di circa una settimana le unità sperimentali vengono estratte dal loro ambiente ad umidità e temperatura controllata e dopo aver atteso 24 ore vengono misurate energia e tensione con l'oscilloscopio. Anche in questo caso le misure vengono ripetute 10 volte per ogni singolo pezzo, e si tiene conto, ai fini dell'analisi, della media aritmetica di queste. Per un'analisi veloce dell'andamento dei valori nel tempo sono stati fatti dei grafici con Excel

nei quali si rappresentano: in ordinata le medie totali di tensione o energia per tutte le 20 unità di una determinata cella o forno, ad un preciso periodo di tempo dall'inizio della prova, e in ascissa il tempo. Per affermare con certezza tra quali intervalli di tempo avviene calo effettivo, invece, sono stati fatti dei confronti incrociati tra le medie con Minitab utilizzando un 2-Sample-t-test.

5.1 La tensione: analisi del suo andamento nel tempo

- PUNTO A: 35°C, 85% RH

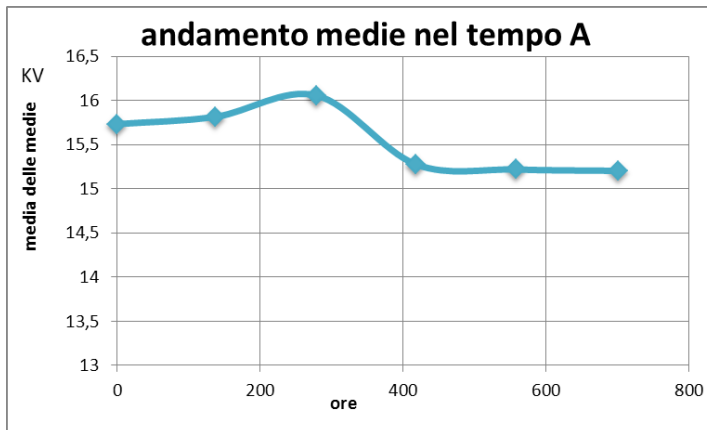


Figura 5.3. Andamento medie nel tempo punto A

Osservando la curva delle medie totali nel tempo si osserva un iniziale aumento delle medie tra circa le 200 e 300 ore, per poi vedere un calo tra le 300 e le 400 ore. Dopo le 400 ore le medie sembrano essersi stabilizzate ad un valore più basso rispetto al valore iniziale.

Confronti tra le medie A	DOPO 138 ORE	DOPO 278,5 ORE	DOPO 418,5 ORE	DOPO 558 ORE	FINE PROVA 702 ORE
TEMPO ZERO	no diff. tra le medie	no diff. tra le medie	calo effettivo	calo effettivo	calo effettivo
DOPO 138 ORE		no diff. tra le medie			
DOPO 278,5 ORE			calo effettivo		
DOPO 418,5 ORE				no diff. tra le medie	no diff. tra le medie
DOPO 558 ORE					no diff. tra le medie

Tabella 5.1. Confronti tra le medie punto A

Per confermare quanto visto graficamente e approssimativamente con Excel, occorre fare dei confronti tra le medie con un 2-Sample-t-test utilizzando Minitab.

Ciò che emerge da questi test è riassunto nella tabella 5.1.

Dai confronti statistici tra le medie emerge un effettivo calo della media tra le 278,5 e le 418,5 ore. La crescita iniziale, che si vedeva dal grafico precedente, sembra invece non essere

statisticamente significativa. Le medie risultano essersi stabilizzate dopo le 418,5 ore, non registrando più alcun calo significativo.

L'effetto finale sulla tensione è un calo effettivo molto modesto. Le medie rimangono comunque ben al di sopra del limite minimo di 14KV previsto dalle specifiche tecniche.

- PUNTO B: 80°C, 85% RH

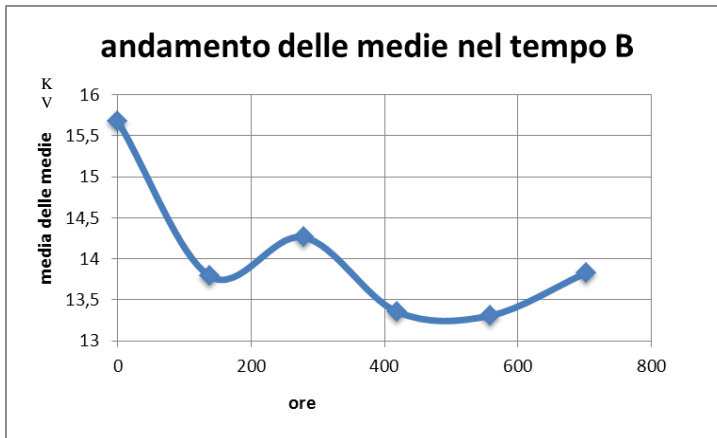


Figura 5.4. Andamento medie nel tempo punto B

Questo secondo caso rappresenta le condizioni più critiche, ed è possibile osservare già da questa curva come le medie subiscano un calo molto brusco già nelle prime 100 ore di stazionamento in cella. Già dopo le prime ore le medie scendono al di sotto del limite minimo di 14 KV.

Circa tra 200 e 300 ore si vede un aumento delle medie sempre dal grafico, che risulterà però non essere statisticamente significativo.

Confronti tra le medie B	DOPO 138 ORE	DOPO 278,5 ORE	DOPO 418,5 ORE	DOPO 558 ORE	FINE PROVA 702 ORE
TEMPO ZERO	calo effettivo	calo effettivo	calo effettivo	calo effettivo	calo effettivo
DOPO 138 ORE		no diff. tra le medie			
DOPO 278,5 ORE			calo effettivo		
DOPO 418,5 ORE				no diff. tra le medie	no diff. tra le medie
DOPO 558 ORE					no diff. tra le medie

Tabella 5.2. Andamento delle medie nel tempo punto B

Dai confronti statistici tra le medie emerge che il calo totale avviene quasi tutto nelle prime 138 ore, dopo di che avviene un secondo calo significativo tra le 278,5 e le 418,5 ore. Da quanto si vede dai dati sembra che non fosse necessario far durare la prova un mese, in quanto già dopo la prima settimana le unità sperimentali hanno registrato il calo finale.

Questa condizione di prova, oltre ad abbassare il picco massimo di tensione al di sotto del limite minimo previsto, ha permesso di registrare delle curve con l'oscilloscopio che fanno supporre che siano avvenute scariche interne non ammesse.

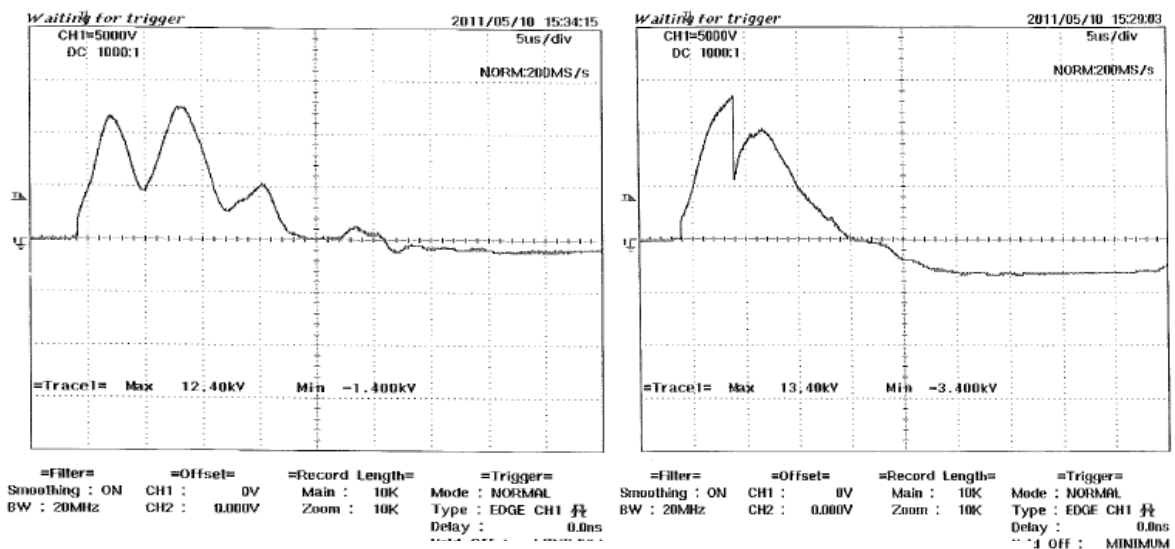


Figura 5.5. Curve di scarica registrate dall'oscilloscopio nel caso B

Nel complesso la combinazione di umidità e temperature elevate ha provocato un calo effettivo molto significativo.

Per renderci conto della gravità del danno subito dagli accenditori piezoelettrici merita osservare la process capability delle medie finali di B, dopo 702 ore. Questa curva normale mostra come si è spostata la campana, rispetto al limite inferiore (LSL) di 14 KV.

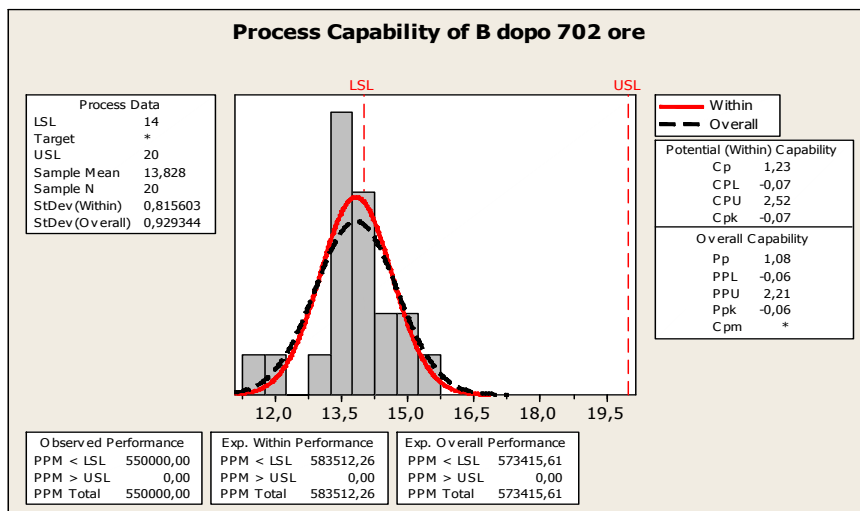


Figura 5.6. Process Capability

- PUNTO C: 80°C, 20% RH

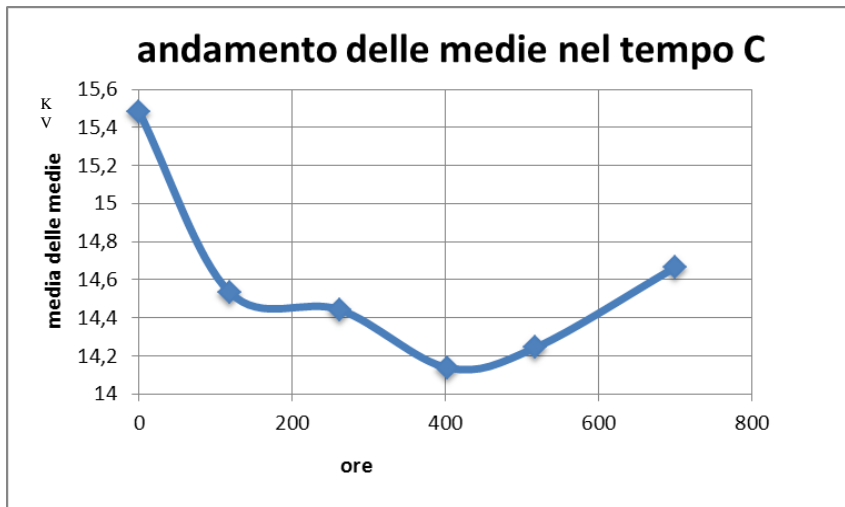


Figura 5.7. Andamento delle medie nel tempo C

Anche al punto C, nel quale si ha temperatura elevata e umidità al livello basso, si registra un calo iniziale molto rilevante, dopo di che la media sembra essersi più o meno stabilizzata. Questa volta però osservando

i valori sembra che le medie totali non scendano mai al di sotto dei 14 KV .

Osservando le medie da un punto di vista statistico con dei 2-Sample-t-test si ha conferma di quanto già visto dal grafico di Excel.

Confronti tra le medie C	DOPO 118 ORE	DOPO 262 ORE	DOPO 403 ORE	DOPO 517,5 ORE	FINE PROVA 700 ORE
TEMPO ZERO	calo effettivo	calo effettivo	calo effettivo	calo effettivo	calo effettivo
DOPO 118 ORE		no diff. tra le medie			no diff. tra le medie
DOPO 262 ORE			no diff. tra le medie		
DOPO 403 ORE				no diff. tra le medie	
DOPO 517,5 ORE					no diff. tra le medie

Tabella 5.3. Confronto medie punto C

Si vede infatti come il calo effettivo che si registra alla fine della prova è concentrato solo nelle prime 118 ore. Dopo la prima settimana circa non si registra più alcun calo significativo. Nel complesso possiamo vedere come ci sia un calo effettivo delle medie, rispetto a quelle iniziali.

5.1.1 Confronto tra due diverse condizioni di prova: B (umidità e temperatura elevate) e C (solo temperatura al livello elevato)

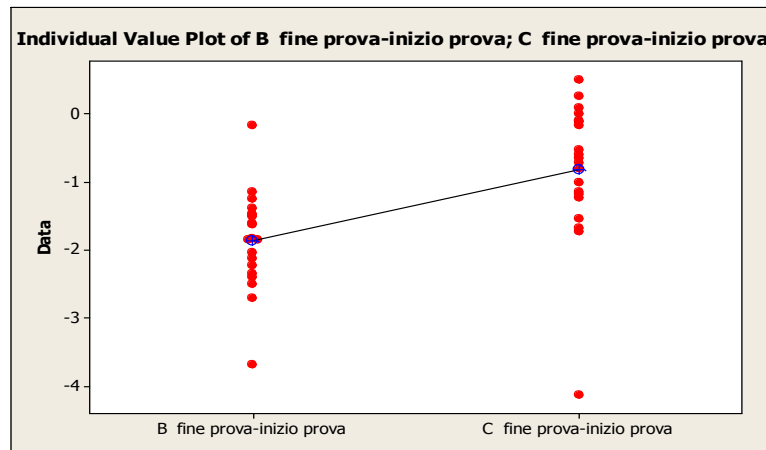


Figura 5.8. Individual Plot tra ΔB e ΔC

Come si vede dal grafico, il calo che avviene nelle medie in condizioni di temperatura e umidità entrambe elevate (punto B) è molto più drastico rispetto all'effetto della sola temperatura elevata (punto C). Questo lo si era già visto anche considerando che nel piano fattoriale l'interazione temperatura-umidità era risultata significativa.

- PUNTO D: 35°C, 20% RH

Nel caso D le unità di prova sono rimaste per un mese praticamente a riposo, essendo i due fattori entrambi ai livelli bassi. Le conclusioni tratte da questi campioni sono molto interessanti, in quanto si nota che le medie sono in aumento. Si è supposto che ciò sia dovuto alla lubrificazione, che probabilmente nei primi cicli non permetteva ancora al

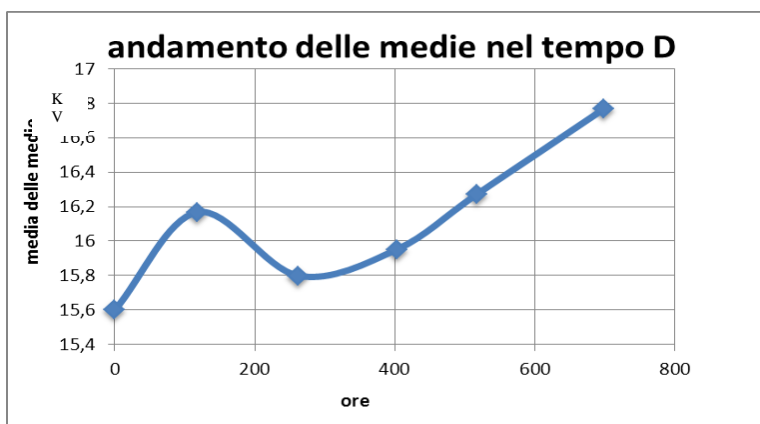


Figura 5.9. andamento delle medie nel tempo D

martelletto di colpire con sufficiente forza la ceramica piezoelettrica.

Il 2-Sample-t conferma ciò che si vedeva già dal grafico iniziale:

Confronti tra le medie D	DOPO 118 ORE	DOPO 262 ORE	DOPO 403 ORE	DOPO 517,5 ORE	FINE PROVA 700 ORE
TEMPO ZERO	aumento effettivo	no diff. tra le medie	aumento effettivo	aumento effettivo	aumento effettivo
DOPO118 ORE		calo effettivo			
DOPO 262 ORE			no diff. tra le medie		aumento effettivo
DOPO 403 ORE				no diff. tra le medie	
DOPO 517,5 ORE					aumento effettivo

Tabella 5.4. Confronti tra le medie punto D

L'effetto generale che si nota subito è un aumento effettivo delle tensioni. L'aumento avviene quasi esclusivamente nelle prime ore di prova, dopo di che si registra addirittura un lieve calo, ma l'effetto finale è comunque un aumento effettivo. A conclusione dell'analisi di questa prima risposta, si può dunque affermare che non era necessario far durare la prova un mese, in quanto i cali o gli aumenti che si registrano a fine prova, sono già rilevabili dopo le prime settimane dall'inizio del test. Questa indicazione è di fondamentale importanza qualora si voglia modificare l'accenditore piezoelettrico e testare anche il nuovo, poiché permette un grosso risparmio di tempo.

5.2 L'energia: analisi del suo andamento nel tempo

- PUNTO A: 35°C, 85% RH

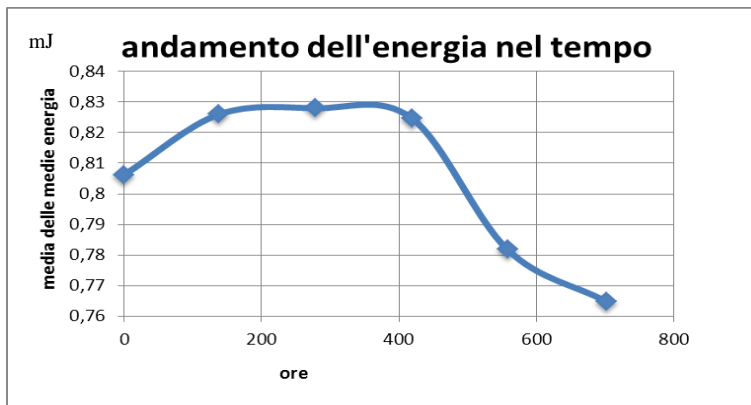


Figura 5.10. andamento medie nel tempo energia A

Osservando il primo grafico sembra ci sia un iniziale aumento delle medie, per poi osservare un calo. Se si guardano però le scale dei valori si vede come l'energia si aggiri attorno ai 0,8 mJ , quindi queste oscillazioni potrebbero non essere

statisticamente significative.

Per scoprirlo osserviamo la tabella fatta dai confronti tra le energie fatti con il 2-Sample-t-test:

Confronti tra le medie A	DOPO 138 ORE	DOPO 278,5 ORE	DOPO 418,5 ORE	DOPO 558 ORE	FINE PROVA 702 ORE
TEMPO ZERO	no diff. tra le medie	no diff. tra le medie	no diff. tra le medie	no diff. tra le medie	no diff. tra le medie
DOPO 138 ORE		no diff. tra le medie			
DOPO 278,5 ORE			no diff. tra le medie		
DOPO 418,5 ORE				no diff. tra le medie	
DOPO 558 ORE					no diff. tra le medie

Tabella 5.5. Confronti tra le medie energia punto A

Dalla tabella si nota a colpo d’occhio che non ci sono differenze statistiche tra le medie. Il che significa che l’umidità alta, nel caso dell’energia, sembra non avere alcun effetto rilevante.

D’altra parte già nel piano fattoriale si era visto come l’umidità non era un fattore significativo.

- PUNTO B: 80°C, 85% RH

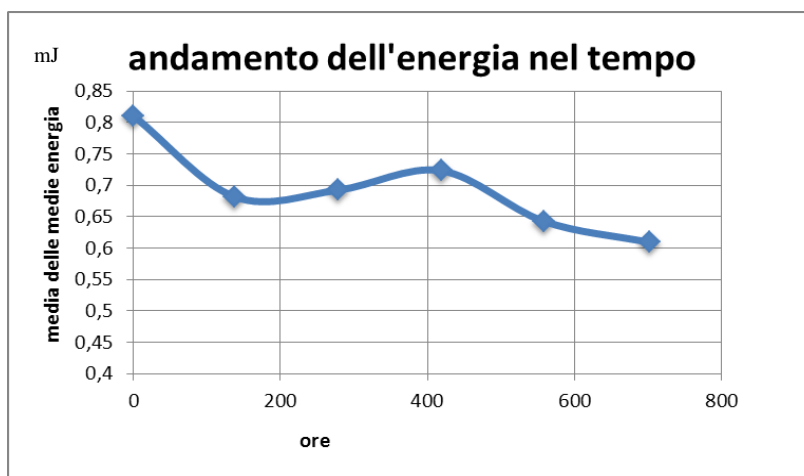


Figura 5.11 Andamento medie nel tempo energia punto B

Nel caso ad umidità e temperatura entrambe elevate si nota un calo iniziale abbastanza brusco, poi una leggera crescita delle medie, che ritornano poi a calare tra le 400 ore e fine prova. In ogni caso i valori sembrano rimanere al di

sopra del limite minimo di 0,5 mJ stabilito dalla specifica. C'è da dire però che durante le misure dell'energia fatte con l'oscilloscopio, alcune volte lo strumento aveva difficoltà a rilevare la misura. I valori registrati sono dunque probabilmente più alti di quelli reali.

Confronti tra le medie B	DOPO 138 ORE	DOPO 278,5 ORE	DOPO 418,5 ORE	DOPO 558 ORE	FINE PROVA 702 ORE
TEMPO ZERO	calo effettivo	calo effettivo	calo effettivo	calo effettivo	calo effettivo
DOPO 138 ORE		no diff. tra le medie			
DOPO 278,5 ORE			no diff. tra le medie		
DOPO 418,5 ORE				calo effettivo	
DOPO 558 ORE					calo effettivo

Tabella 5.6 Confronto tra le medie energia punto B

Anche dal confronto statistico tra le medie emerge che c'è un calo effettivo che si verifica nella prima settimana e anche tra le 418,5 ore e fine prova. L'effetto finale è un calo rilevante tra le medie.

- PUNTO C: 80°C, 20% RH

I risultati che abbiamo ricavato nel caso di temperatura elevata sono contrastanti rispetto

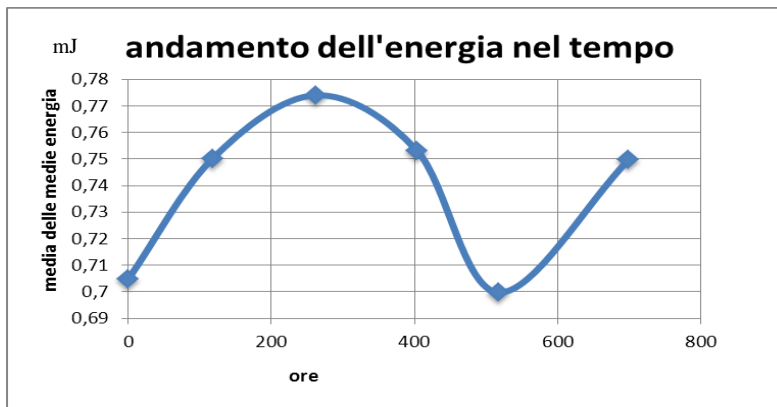


Figura 5.12 Andamento dell'energia nel tempo punto C

alle conclusioni a cui si era giunti nella prova del piano fattoriale. In questo caso infatti come si vede dal grafico le medie si alzano e si abbassano oscillando comunque attorno ad un valore. Non sembrano quindi subire cali

significativi e questo è confermato dall'analisi statistica.

Come si vede anche da questa tabella avvengono cali, aumenti delle medie, ma non c'è alcun effetto finale significativo registrato. Confrontando infatti le energie di inizio prova con quelle di fine prova si vede che non c'è differenza statistica significativa tra le medie.

Confronti tra le medie C	DOPO 118 ORE	DOPO 262 ORE	DOPO 403 ORE	DOPO 517,5 ORE	FINE PROVA 700 ORE
TEMPO ZERO	no diff. tra le medie	aumento effettivo	no diff. tra le medie	no diff. tra le medie	no diff. tra le medie
DOPO118 ORE		no diff. tra le medie			
DOPO 262 ORE			no diff. tra le medie		
DOPO 403 ORE				calo effettivo	
DOPO 517,5 ORE					aumento effettivo

Tabella 5.7 Confronto tra le medie punto C

5.2.1. Confronto tra le medie delle energie delle unita' utilizzate per il piano fattoriale con quelle di questa prova

Da notare che le unita' sperimentali utilizzate nel piano fattoriale hanno stazionato un mese all'interno del forno, mentre quelle di questa prova sono state estratte ogni settimana e poi rimesse in forno, sicché hanno subito dei cicli termici di riscaldamento e raffreddamento continui, che sembra però aver avuto un effetto benefico sulle medie finali. Un altro fattore che li differenzia è il numero di azionamenti, che in questo caso è sicuramente maggiore.

Anche il confronto statistico conferma il fatto che le medie di questa prova sono più alte rispetto a quelle rilevate con il piano fattoriale.

Quelle delle unita' che hanno stazionato per un mese in forno rilevano addirittura un calo effettivo rispetto alle medie iniziali.

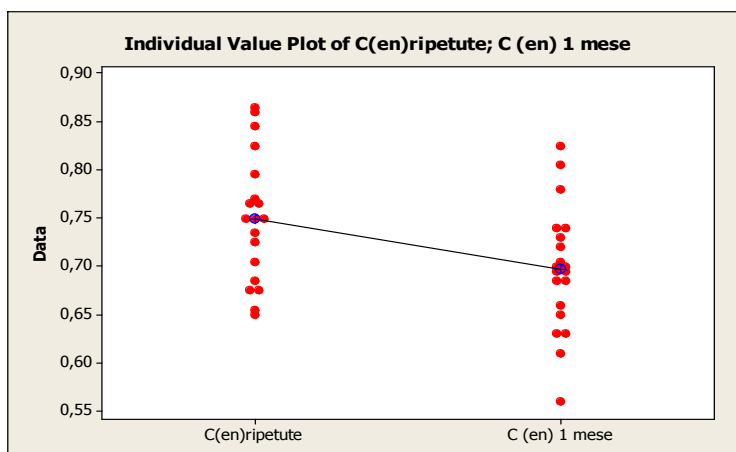


Figura 5.13 Individual Plot

- PUNTO D: 35°C, 20% RH

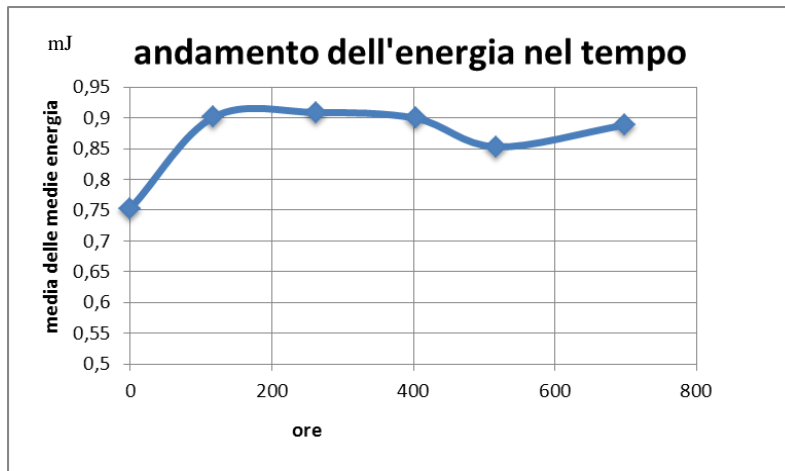


Figura 5.14 andamento dell'energia nel tempo punto D

Anche nel caso dell'energia in condizioni di temperatura e umidità entrambe ai livelli bassi, abbiamo un aumento delle medie. Anche in questo caso l'effetto dei continui test sulle unità sperimentali ha quindi un effetto positivo sulla

risposta.

Confronti tra le medie D	DOPO 118 ORE	DOPO 262 ORE	DOPO 403 ORE	DOPO 517,5 ORE	FINE PROVA 700 ORE
TEMPO ZERO	aumento effettivo	aumento effettivo	aumento effettivo	aumento effettivo	aumento effettivo
DOPO 118 ORE		no diff. tra le medie			no diff. tra le medie
DOPO 262 ORE			no diff. tra le medie		
DOPO 403 ORE				no diff. tra le medie	
DOPO 517,5 ORE					no diff. tra le medie

Tabella 5.8 Confronti tra le medie punto D energia

5.3. Tensione ed energia: ripetendo le misure dopo 16 giorni dal termine della prova

Un'ulteriore analisi fatta sugli accenditori piezoelettrici dopo 16 giorni dal termine della prova, mostra un effettivo innalzamento delle medie sia per quanto riguarda l'energia che la tensione. Nonostante il recupero statisticamente significativo, le medie non ritornano comunque ai valori iniziali registrati a tempo zero.

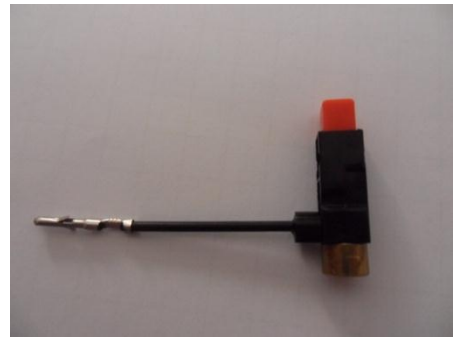
Conclusioni

A conclusione di questa attività di tesi si può vedere che gli obiettivi sono stati in parte raggiunti, sebbene i risultati ottenuti abbiano portato alla decisione di apportare delle modifiche all'accenditore piezoelettrico esaminato. Questo esito è sicuramente il più importante, infatti a causa dell'azione di temperatura ed umidità sul pezzo, sia tensione che energia sono scese ben al di sotto dei limiti minimi che erano stati fissati nella scheda tecnica del prodotto. Per quanto riguarda il piano fattoriale è risultato che tutti i fattori contribuiscono in maniera significativa al calo di tensione, prima tra tutti la temperatura; considerando l'energia invece l'umidità si è dimostrata essere un fattore non statisticamente significativo. Il secondo obiettivo da raggiungere invece consisteva nel determinare se esiste un andamento caratteristico nel tempo di tensione ed energia. Questa prova ha portato però a delle conclusioni diverse rispetto al piano fattoriale. Questo è realisticamente imputabile al fatto che il numero di azionamenti dell'accenditore in questo tipo di prova è stato molto numeroso, maggiore ai 120 per singolo pezzo. Ai fini pratici la prova quindi non è molto utile, in quanto non rispecchia il numero reale di accensioni. Detto questo si può comunque vedere che il calo di tensione, così come quello di energia, avvengono già nelle prime settimane di prova. Questa conclusione è molto importante per i test che verranno fatti sul futuro accenditore piezoelettrico, in quanto permette un enorme risparmio di tempo, e quindi di denaro.

Per quanto riguarda le cause del decadimento osservato, queste sono ipoteticamente imputabili ad un rammollimento dell'alloggiamento in poliossimetilene, che provoca un disallineamento delle ceramiche piezoelettriche e quindi un calo di tensione ed energia. Per ora non si è ancora valutata però una possibile alternativa al materiale utilizzato. Il nuovo accenditore piezoelettrico è molto simile al primo, ma la sezione dell'alloggiamento in plastica, così come della ceramica, sono stati aumentati al fine di aumentare il picco massimo di tensione e l'energia registrati a tempo zero. Questo ha permesso di avere un margine di

decadimento più ampio rispetto a prima, e quindi, nonostante tutto, di rimanere comunque al di sopra dei limiti minimi indicati dalla specifica.

Figura 6.1
accenditore
piezoelettrico nuovo



Riferimenti bibliografici

Everardo Gola, Dispense di Metodi statistici e probabilistici per l'industria di processo

Giovanna Brusatin, Dispense di Scienza e tecnologia dei materiali polimerici

Douglas C. Montgomery, Progettazione e analisi degli esperimenti

Materiale fornito dall'azienda su: Ignition Processes e Piezoelectric Ceramics

Materiale online