

POLITECNICO DI BARI

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Matematica e

Management

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TEMA D’ANNO IN PROGETTAZIONE MECCANICA II

**Ricerca e sviluppo di un sensore piezoelettrico TRAMITE MANIFATTURA additiva**

*Docenti:* *Studenti:*

Prof. Ing. Umberto Galietti Alessandra Miracapillo

Prof.ssa Ing. Francesca Di Carolo Vincenzo Morano

*Referenti Aziendali:* Pierpaolo Palombella

Ing. Volkan Yavuz

Ing. Elia Cucit

Indice

[1. DEFINIZIONE DEL PRODOTTO E CONTESTO D’USO 1](#_Toc207026941)

[1.1 Product Brief 1](#_Toc207026942)

[1.1.1 Obiettivo Del Prodotto 1](#_Toc207026943)

[1.1.2 Documentare L’ambiente 1](#_Toc207026944)

[1.1.3 Vincoli E Assunzioni Iniziali 2](#_Toc207026945)

[2. ANALISI DI MERCATO E DEI BISOGNI 3](#_Toc207026946)

[2.1 Requisiti Di Misura 5](#_Toc207026947)

[2.2 Settore Applicativo 5](#_Toc207026948)

[2.3 Tecnologia Produttiva 6](#_Toc207026949)

[2.3.1 Confronto Tra Le Tecnologie Di Flussometri Piezoelettrici 6](#_Toc207026950)

[3. CASI STUDIO E BENCHMARK APPLICATIVI 8](#_Toc207026951)

[3.1 Esteem®: Impianto Uditivo Piezoelettrico Ad Alta Integrazione 8](#_Toc207026952)

[3.2 Piastre Dinamometriche Kistler: Misure Tridimensionali Di Forza Ad Alta Precisione 9](#_Toc207026953)

[3.3 Sensore Piezoelettrico Kistler Type 6124A: Prestazioni Elevate In Ambienti Estremi 10](#_Toc207026954)

[3.4 Plantari Intelligenti Piezoelettrici: Monitoraggio Avanzato Della Pressione Plantare 12](#_Toc207026955)

[3.5 Sensore Piezoelettrico PCB 2223D: Accelerometro Ultracompatto Ad Alta Precisione 12](#_Toc207026956)

[3.6 TE Connectivity LDT0-028K — Sensore Piezoelettrico Flessibile In Film PVDF 14](#_Toc207026957)

[4. ANALISI DEI COMPETITOR 16](#_Toc207026958)

[4.1 TE Connectivity – Piezoelectric Vibration Sensors 16](#_Toc207026959)

[4.2 PCB Piezotronics (MTS Systems Corp.) 16](#_Toc207026960)

[4.3 Honeywell – Vibration & Piezoelectric Sensors 17](#_Toc207026961)

[4.4 Sensonics 17](#_Toc207026962)

[4.5 Piezo.Com (By Mide Technology) 17](#_Toc207026963)

[4.6 Metis Motion – Sensori Integrati Con Stampa 3D 18](#_Toc207026964)

[4.7 Analisi Comparativa Dei Sensori Piezoelettrici Dei Competitor 18](#_Toc207026965)

[5. Analisi strategico-tecnologica 22](#_Toc207026966)

[5.1 Analisi Tecnica: Matrice Di Henderson E Clark 22](#_Toc207026967)

[5.2 Analisi Strategica: Matrice Di Ansoff 23](#_Toc207026968)

[5.3 Analisi Sistemica: Matrice Di Abernathy E Clark 24](#_Toc207026969)

[5.4 Valutazione Numerica Integrata Delle Matrici 25](#_Toc207026970)

[5.4.1 Matrice Di Henderson E Clark (Analisi Tecnica) 26](#_Toc207026971)

[5.4.2 Matrice Di Ansoff (Analisi Strategica) 26](#_Toc207026972)

[5.4.3 Matrice Di Abernathy E Clark (Analisi Sistemica) 26](#_Toc207026973)

[5.4.4 Sintesi Finale 26](#_Toc207026974)

[5.4.5 Conclusione Quantitativa 26](#_Toc207026975)

[5.5 Conclusioni 27](#_Toc207026976)

[6. REQUISITI E SPECIFICA TECNICA 28](#_Toc207026977)

[6.1 Requisiti Tecnici Principali 28](#_Toc207026978)

[6.2 Specifica Tecnica 28](#_Toc207026979)

[7. ANALISI DEI MATERIALI 33](#_Toc207026980)

[7.1 Panoramica Sui Materiali Piezoelettrici 33](#_Toc207026981)

[7.2 Tabella Sinottica Dei Coefficienti Piezoelettrici 33](#_Toc207026982)

[7.3 Piezoelettrici Naturali 34](#_Toc207026983)

[7.4 Piezoelettrici Ceramici 35](#_Toc207026984)

[7.5 Polimeri Piezoelettrici 36](#_Toc207026985)

[7.6 Principali Materiali Piezoelettrici E Le Loro Caratteristiche 37](#_Toc207026986)

[7.7 Compatibilità Con Stampa 3D 38](#_Toc207026987)

[7.8 Criteri Di Selezione 39](#_Toc207026988)

[8. TECNOLOGIE DI PRODUZIONE 41](#_Toc207026989)

[8.1 PVDF-Trfe – Stampa FDM (Fused Deposition Modeling) 41](#_Toc207026990)

[8.2 PZT – Stampa SLA/DLP Con Resine Composite 41](#_Toc207026991)

[8.3 PZT – Stampa FDM Con Filamenti Caricati 42](#_Toc207026992)

[8.4 Confronto 43](#_Toc207026993)

[8.5 Materiali Raccomandati Per Gli Altri Componenti 43](#_Toc207026994)

[8.5.1 Tecnologie Produttive Compatibili 43](#_Toc207026995)

[9. Strategie Progettuali e Decisione Finale 44](#_Toc207026996)

[9.1 Strategie Progettuali E Valutazioni 44](#_Toc207026997)

[9.2 Analisi Delle Opzioni 45](#_Toc207026998)

[9.2.1 Opzione 1 – Acquisto Di Sensore Piezoelettrico Commerciale 45](#_Toc207026999)

[9.2.2 Opzione 2 – Sviluppo Interno Completo Del Sensore 45](#_Toc207027000)

[9.2.3 Opzione 3 – Sviluppo Interno Del Sensore Ma Produzione Affidata Ad Un’azienda Terza 46](#_Toc207027001)

[9.3 Confronto Delle Strategie 46](#_Toc207027002)

[9.3.1 Osservazioni 47](#_Toc207027003)

[9.4 Conclusione E Raccomandazione Finale 47](#_Toc207027004)

[9.5 Possibili Partner Commerciali 48](#_Toc207027005)

[10. PROTOTIPAZIONE E VALIDAZIONE 52](#_Toc207027006)

[10.1 Introduzione 52](#_Toc207027007)

[10.2 Definizione Dei Requisiti Tecnici 52](#_Toc207027008)

[10.3 Scelta Dei Materiali E Tecnologie 52](#_Toc207027009)

[10.4 Preparazione Del Filamento Di PVDF 53](#_Toc207027010)

[10.5 Selezione E Collaborazione Con Aziende Per La Stampa 3d 53](#_Toc207027011)

[10.6 Progettazione CAD E Stampa 3D 53](#_Toc207027012)

[10.7 Realizzazione Del Prototipo E Trattamenti Post-Stampa 54](#_Toc207027013)

[10.8 Campagna Di Test 57](#_Toc207027014)

[10.9 Analisi Dei Risultati E Report Finale 58](#_Toc207027015)

[10.10 Passi Successivi E Iterazioni 58](#_Toc207027016)

[11. ANALISI DEI COSTI-BENEFICI 59](#_Toc207027017)

[11.1 Obiettivo 59](#_Toc207027018)

[11.2 Caratteristiche Tecniche Del Sensore 59](#_Toc207027019)

[11.3 Materiale Impiegato: PVDF 59](#_Toc207027020)

[11.4 Aziende Analizzate 59](#_Toc207027021)

[11.5 Modello Di Costo Di Realizzazione 60](#_Toc207027022)

[11.6 Stima Costi Per Lotto 61](#_Toc207027023)

[11.7 Esempio Completo – Lotto Da 100 Pezzi 63](#_Toc207027024)

[11.8 Prossimi Passi 63](#_Toc207027025)

[11.9 Conclusioni 64](#_Toc207027026)

# Definizione del Prodotto e Contesto d’Uso

## Product Brief

### Obiettivo del Prodotto

Sviluppare un sensore di vibrazioni piezoelettrico, realizzato tramite tecniche di produzione additiva, progettato per rilevare e trasmettere in tempo reale le vibrazioni generate dal flusso di fluidi all’interno di condotti, con particolare attenzione alla miniaturizzazione, adattabilità e integrazione in spazi ristretti o complessi.

### Documentare l’ambiente

(cioè il contesto di impiego del prodotto)

* **Chi? Chi usa il prodotto?**

Progettisti di sistemi e tecnici industriali per uso interno aziendale. Sono coloro che devono monitorare, ottimizzare o diagnosticare condizioni anomale nei sistemi a flusso (fluidi/gas).

* **Cosa? Quale è l’uso?**

Un sensore piezoelettrico stampato in 3D per il monitoraggio delle vibrazioni generate dal flusso. Viene usato per rilevare frequenze, intensità o anomalie che segnalano problemi o variazioni nel sistema.

* **Dove? Dove è usato?**

Installato in condotte, misuratori di portata o altre strutture dove avviene il passaggio di fluidi o gas. Può essere integrato in spazi e volumi ristretti o componenti con geometrie non standard.

* **Quando? Quando viene usato?**

Durante il funzionamento attivo del sistema, ovvero in tempo reale, per abilitare il monitoraggio continuo, la diagnostica predittiva, l’analisi di performance.

* **Perché? Perché è usato?**

Perché i sensori tradizionali spesso non si adattano a spazi e volumi complessi, richiedono modifiche invasive, non forniscono flessibilità o personalizzazione.

* **Come? Come viene usato?**

Viene installato sulla superficie a contatto con il flusso (fluido/gas). Genera un segnale elettrico proporzionale alla vibrazione indotta dal flusso. Il segnale è trasmesso in tempo reale a un sistema di acquisizione per la visualizzazione e le analisi.

### Vincoli e assunzioni iniziali

* Il progetto valorizza la personalizzazione tramite stampa 3D, riducendo tempi e costi rispetto a sensori tradizionali.
* L'uso di materiali piezoelettrici stampabili richiede test approfonditi per garantire la stabilità del segnale.
* L'interfaccia elettronica sarà progettata in modo modulare per facilitare l'integrazione con sistemi esistenti.

# Analisi Di Mercato E Dei Bisogni

Il **mercato globale** **dei sensori piezoelettrici** sta vivendo una fase di forte espansione, sostenuta dall'innovazione tecnologica e dalla crescente richiesta di dispositivi di rilevamento affidabili e ad alte prestazioni in numerosi settori. L’aumento della richiesta di monitoraggio predittivo, l’automazione industriale e le esigenze di controllo qualità nei processi produttivi spingono la crescita di questo settore. In particolare, la diffusione di dispositivi per la misura e il controllo (come i flussometri) richiede sensori sempre più integrabili, affidabili e personalizzabili.

Secondo recenti rapporti di settore, si prevede che il valore del mercato dei sensori piezoelettrici crescerà in modo significativo nei prossimi anni, con un tasso di crescita annuo composto (CAGR) elevato.

I principali **fattori di crescita** sono:

* **Automazione e Industria 4.0:** L'adozione diffusa di soluzioni per l'automazione nei settori manifatturiero, automotive e dell'energia sta spingendo la domanda di sensori piezoelettrici, grazie alla loro capacità di fornire misure precise di vibrazione, pressione e forza in tempo reale, migliorando così l'efficienza e la sicurezza dei processi produttivi.
* **Elettronica di consumo e dispositivi medicali:** La miniaturizzazione e la versatilità dei sensori piezoelettrici li rendono sempre più utilizzati in dispositivi wearable, smartphone, apparecchi acustici e sistemi biomedicali avanzati, dove sono richieste sensibilità elevata e basso consumo energetico.
* **Innovazione tecnologica e manifattura additiva:** L'introduzione di nuove tecniche di produzione, come la stampa 3D di materiali piezoelettrici, consente di realizzare sensori personalizzati, più leggeri e integrabili in componenti complessi, ampliando le possibilità applicative in settori come l'aerospazio, la robotica e le infrastrutture intelligenti.
* **Integrazione con sistemi IoT e manutenzione predittiva:** L'integrazione dei sensori piezoelettrici con reti IoT permette il monitoraggio continuo di macchinari, strutture e impianti, abilitando strategie di manutenzione predittiva e una gestione più efficiente delle risorse.

Le **grandezze** rilevabili:

* **Pressione:** Il sensore rileva una forza applicata perpendicolarmente alla sua superficie. Genera una tensione proporzionale alla pressione esercitata. Usato in bilance, tastiere sensibili, sensori di pressione negli pneumatici.
* **Vibrazione:** rilevare le oscillazioni meccaniche di una struttura o di un oggetto. Utilissimo per il monitoraggio di macchinari (manutenzione predittiva), oppure per rilevare terremoti o rumori strutturali.
* **Impatto:** Rileva urti o colpi improvvisati. Viene utilizzato per sistemi di sicurezza, diagnostica di danni strutturali o nei crash test.
* **Ultrasuoni:** Gli ultrasuoni sono onde acustiche ad alta frequenza. I sensori piezoelettrici possono sia generare che ricevere queste onde. Sono usati nei flussometri, nei dispositivi ad ultrasuoni per pulizia o in ecografia medica.
* **Accelerazione:** Misurare l'accelerazione lineare o angolare di un oggetto. Sono la base degli accelerometri piezoelettrici impiegati in smartphone, airbag, dispositivi di navigazione, ecc.

In generale, i sensori piezoelettrici **sfruttano la proprietà di alcuni materiali di generare una tensione elettrica** quando vengono sottoposti a una sollecitazione. Questo fenomeno, detto effetto piezoelettrico diretto, permette di trasformare una grandezza fisica meccanica in un segnale elettrico proporzionale.

La tecnologia piezoelettrica permette, quindi, la realizzazione di sensori estremamente compatti, sensibili e privi di parti mobili.

Nel dettaglio, l’oggetto del nostro studio sono i sensori piezoelettrici impiegati come misuratori di flusso (flussometri).

Nei flussometri, i sensori piezoelettrici vengono impiegati principalmente per misurare la portata di un fluido (liquido o gas) all'interno di un tubo. La loro applicazione più diffusa è nei cosiddetti “flussometri ultrasonici” o “flussometri a tempo di transito”, ma possono essere utilizzati anche per rilevare vibrazioni indotte dal passaggio del fluido (ad esempio per la misura di portata in tubi metallici senza contatto diretto).

La **struttura** della base di un sensore piezoelettrico è costituita come segue:

* **Elemento sensibile:** è il nucleo funzionale del sensore, di solito costituito da un disco, una lamina o un film di materiale piezoelettrico (come PVDF o ceramiche). Trasforma una sollecitazione meccanica (pressione, vibrazione, deformazione) in un segnale elettrico. Un involucro protettivo lo preserva da agenti esterni, urti e umidità, garantendo affidabilità nel tempo.
* **Elettrodi:** Sono sottili strati di materiale conduttivo (ad esempio argento o oro) applicati sulle superfici dell'elemento sensibile. Hanno il compito di raccogliere la carica elettrica generata e trasmetterla verso il circuito di lettura. La qualità e la disposizione degli elettrodi influenzano direttamente la sensibilità e la precisione del sensore.
* **Condizionamento del segnale:** Poiché il segnale prodotto dal materiale piezoelettrico è spesso molto debole e sensibile al rumore, è necessario un circuito elettronico che lo amplifichi e lo filtri. Questa fase rende il segnale utilizzabile per le successive elaborazioni e garantisce una misura affidabile anche in presenza di disturbi esterni.
* **Supporto strutturale:** serve a sostenere e proteggere l'intero sensore, assicurandone la stabilità e facilitando l'installazione. Può essere progettato su misura, ad esempio tramite stampa 3D, per un'integrazione ottimale nel sistema di misura e per adattarsi alla geometria o ai requisiti specifici dell'applicazione

Il **mercato dei sensori piezoelettrici** può essere segmentato secondo diversi criteri fondamentali:

Ad esempio, in base alla **forma fisica** del sensore:

* **Disco:** Un piccolo cilindro o disco piatto di materiale piezoelettrico (ad esempio ceramica PZT o quarzo). Viene spesso usato per generare o ricevere onde acustiche e ultrasoniche. È comune nei trasduttori ultrasonici e nei buzzer.
* **Lamina:** Una sottile “lastra” di materiale piezoelettrico. Può essere in ceramica, quarzo oppure un polimero come il PVDF. Le lamine sono più flessibili dei dischi e vengono usate dove servire piegarsi o adattarsi a superfici curve (ad esempio nei sensori di vibrazione su superfici strutturali).
* **Film:** Strato molto sottile e flessibile, spesso in polimero piezoelettrico (PVDF). Queste pellicole sono molto leggere, si possono tagliare su misura e applicare direttamente su oggetti o superfici, anche con tecniche di stampa 3D. Sono ideali per applicazioni su superfici non piane, in spazi ristretti o come sensori indossabili.
* **Sensori integrati in dispositivi MEMS:** Sono chip che integrano microstrutture meccaniche e sensori piezoelettrici su scala micrometrica, spesso insieme all'elettronica di lettura, portando numerosi vantaggi tra cui: Dimensioni estremamente ridotte (microscopiche), Possibilità di integrare più funzioni sullo stesso chip, Ideali per dispositivi portatili/indossabili.

## Requisiti di misura

La progettazione accurata dell'elemento sensibile è essenziale per i seguenti motivi:

* **Sensibilità e precisione:** La geometria e la qualità del materiale determinano la capacità del sensore di fornire misure affidabili anche a stimoli molto deboli.
* **Risposta in frequenza:** Dimensioni e materiali scelti influenzano le frequenze operative ottimali, aspetto cruciale nelle applicazioni come i flussometri ultrasonici.
* **Robustezza:** Un design attento, anche nell'incapsulamento, rende il sensore più resistente a urti, vibrazioni, agenti chimici e temperatura variabile, garantendo affidabilità nel tempo.
* **Riduzione del rumore:** Forma, rivestimento e fissaggio corretto minimizzando il rumore di fondo e le interferenze, migliorando la qualità del segnale.
* **Adattabilità:** Una progettazione su misura permette di ottimizzare le prestazioni del sensore in base alle specifiche esigenze applicative, come dimensioni ridotte o ambienti difficili.

## Settore applicativo

Grazie alla loro capacità di convertire sollecitazioni meccaniche in impulsi elettrici (effetto piezoelettrico diretto) e viceversa (effetto inverso), i sensori piezoelettrici hanno assunto un ruolo centrale in numerosi settori applicativi. Originariamente confinati alla meccanica di alta precisione, all’automazione industriale e all’ingegneria aerospaziale, queste tecnologie stanno oggi guadagnando terreno in ambiti emergenti come la biomeccanica clinica, i dispositivi wearable e il monitoraggio strutturale avanzato.

* **Industriale**: monitoraggio vibrazioni e macchinari, automazione, manutenzione predittiva
* **Biomedicale**: diagnostica, dispositivi indossabili, monitoraggio fisiologico
* **Automotive**: sensori di pressione, rilevamento urti, sistemi di sicurezza
* **Energia**: monitoraggio di impianti, controllo turbine, sensori per smart grid
* **Infrastrutture**: controllo strutturale di ponti, edifici, gallerie, rilevamento danni
* **Elettronica di consumo**: microfoni, touch, dispositivi smart
* **Altri settori emergenti:** robotica, IoT, agricoltura di precisione

## Tecnologia produttiva

* **Tecnologie tradizionali:** Lavorazioni meccaniche, assemblaggio e incapsulamento convenzionali, tipiche della produzione di grandi volumi standardizzati.
* **Manifattura additiva:** Utilizzo di stampa 3D e tecniche avanzate per realizzare sensori su misura, con geometrie complesse, maggiore integrazione e possibilità di personalizzazione spinta.

L’integrazione della stampa 3D nella fabbricazione di sensori piezoelettrici, mediante materiali ingegnerizzati e geometrie personalizzate, apre scenari promettenti in mercati ad alto potenziale, favorendo soluzioni flessibili, miniaturizzabili e altamente funzionali. L’adozione della manifattura additiva, quindi, consente oggi di produrre sensori su misura dove le tecnologie tradizionali risultano difficili da applicare.

* **Personalizzazione**: la stampa 3D permette di realizzare sensori con forme perfettamente adattate al tubo o all'ambiente di installazione, anche con geometrie complesse o spazi ristretti.
* **Integrazione**: è possibile incorporare il sensore direttamente nella struttura del flussometro, migliorando la robustezza e riducendo l'ingombro.
* **Prototipazione rapida**: si possono testare rapidamente vari design per ottimizzare la sensibilità e la risposta del sensore.

### Confronto tra le tecnologie di flussometri piezoelettrici

Nel seguito si propone un confronto tra le principali tecnologie di flussometri piezoelettrici attualmente disponibili, evidenziando per ciascuna il principio di funzionamento, i principali vantaggi, svantaggi e ambiti applicativi.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Tecnologia** | **Principio di Funzionamento** | **Vantaggi** | **Svantaggi** | **Applicazioni Tipiche** |
| **Transit-Time (ultrasonico)** | Misura la differenza di tempo di transito tra impulsi ultrasonici bidirezionali | Elevata precisione con liquidi puliti, installazione “clamp-on”, nessuna parte mobile | Necessita buon accoppiamento acustico, sensibile a bolle/impurità | Acqua potabile, contatori intelligenti, retrofit |
| **Doppler (ultrasonico)** | Riflessione dell’onda ultrasonica da particelle/bolle; analisi della variazione di frequenza | Funziona con fluidi contenenti particelle, installazione “clamp-on” | Bassa precisione con liquidi puliti, richiede particolato | Acque reflue, fluidi industriali |
| **Vortex (effetto di vibrazione)** | Vortici generati da ostacolo; vibrazioni rilevate da sensore piezoelettrico | Struttura robusta, compatibile con liquidi e gas | Sensibilità ridotta a bassi flussi, geometria interna vincolata | Chimica, condutture industriali |
| **Pressione differenziale con membrana** | Misura della differenza di pressione tramite membrana piezoelettrica | Elevata sensibilità, possibilità di miniaturizzazione | Installazione invasiva, sensibile all’accumulo di sporco | Laboratori, strumenti di precisione |
| **MEMS ultrasonici** | Microtrasduttori piezoelettrici su chip generano onde Doppler/transit-time | Compatti, basso consumo, integrazione elettronica | Costo elevato, installazione complessa, compatibilità limitata con tubi domestici | Biomedicale, domotica, micro-dosaggio |

In sintesi, ciascuna tecnologia presenta specificità funzionali e applicative: la scelta della soluzione più adatta dipende da molteplici fattori, tra cui la tipologia di fluido, la presenza di impurità, le condizioni di installazione, i requisiti di precisione ei vincoli economici o strutturali.

Nel caso in esame ci si concentrerà sulla **tecnologia VORTEX** di sensore piezoelettrico, già utilizzata dall’azienda “AB industrietechnik”, per una serie di motivazioni come:

* fluido non sempre pulito
* presenza di bolle d’aria nel flusso
* maggiore facilità di manutenzione

Si vorrà quindi a progettare un elemento piezoelettrico che svolga la stessa funzione di quello attualmente utilizzato dall’azienda, ma sfruttando la tecnologia produttiva di “additive manufacturing” ovvero stampa 3D.

# Casi Studio e Benchmark Applicativi

## Esteem®: Impianto Uditivo Piezoelettrico ad Alta Integrazione

L’**Esteem®**, sviluppato da *Envoy Medical (USA)*, rappresenta un’avanzata innovazione nella riabilitazione uditiva tramite tecnologia piezoelettrica. È il **primo e unico impianto attivo completamente impiantabile** per l’orecchio medio (FI-AMEI), autorizzato dalla FDA dal 2010, per pazienti affetti da **ipoacusia neurosensoriale da moderata a severa**.

Approccio Innovativo

A differenza dei dispositivi acustici tradizionali, che amplificano i suoni tramite microfoni e speaker esterni, Esteem® sfrutta le strutture biomeccaniche naturali dell’orecchio medio, offrendo:

* Un ascolto più naturale e fisiologico
* Totale invisibilità esterna
* Maggiore discrezione e comfort d’uso

Struttura del Dispositivo e Funzionamento

L’impianto Esteem® è composto da tre moduli integrati:

* Sensore piezoelettrico Collocato sull’incudine, rileva le micro-vibrazioni del timpano (200–6000 Hz), trasformandole in segnali elettrici grazie all’effetto piezoelettrico diretto.
* Processore e batteria Alloggiati in una struttura in titanio impiantata retroauricolarmente. Il processore effettua l’elaborazione digitale del segnale (filtraggio, adattamento e amplificazione). Alimentazione autonoma tramite batteria sigillata con durata media di 4–9 anni.
* Driver piezoelettrico Installato sulla staffa, converte il segnale elettrico amplificato in vibrazioni meccaniche dirette alla coclea, ristabilendo il flusso acustico in modo fisiologicamente analogico.

Materiali Piezoelettrici: Prestazioni e Selezione

I materiali impiegati devono garantire:

* Alta efficienza elettromeccanica
* Biocompatibilità a lungo termine
* Flessibilità geometrica
* Compatibilità con processi di stampa e impianto

Tipologie Principali

1. Polimeri (PVDF, PVDF-TrFE) Leggeri, flessibili, stampabili in 3D • *Sensibilità (d₃₃)*: ~21 pC/N • Ideali per laminati impiantabili e superfici curve • Biocompatibili per impianti cutanei o transdermici
2. Ceramiche (PZT, BaTiO₃, KNN) • *PZT*: d₃₃ fino a 600 pC/N – prestazioni elevate ma rigidità e presenza di piombo • *BaTiO₃*: fino a 290 pC/N – alternativa piombo-free • *KNN*: 200–400 pC/N – buona sensibilità, bio-safe
3. Compositi Ibridi (polimero + ceramica) • Miscele di PVDF con nanoparticelle ceramiche (BaTiO₃, KNN) • *d₃₃*: >200 pC/N • Ottimo compromesso tra flessibilità, prestazioni e stampabilità • Idonei per robotica morbida e superfici bio-integrate

Sintesi Comparativa dei Materiali

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Materiale | Sensibilità (D₃₃) | Flessibilità | Biocompatibilità | Stampabilità | Criticità |
| Pvdf / Pvdf-Trfe | ~21 pC/N | Alta | Ottima | Elevata | Sensibilità Limitata |
| Pzt | Fino A 600 pC/N | Bassa | Medio-Bassa | Scarsa | Rigidità, Contenuto Di Piombo |
| Batio₃ | Fino A 290 pC/N | Media | Buona | Discreta | Stabilità Termica Variabile |
| Knn | 200–400 pC/N | Buona | Ottima | Discreta | Maturità Tecnologica In Evoluzione |
| Compositi Pvdf+X | >200 pC/N | Alta | Buona | Elevata | Complessità Di Dispersione Uniforme |

Prospettive Future e Applicazioni Emergenti:

* Eliminazione del piombo: essenziale per la diffusione clinica a lungo termine.
* Stampa 3D funzionale: applicazioni su cerotti intelligenti e protesi customizzate.
* Nanocompositi avanzati: per sensori conformabili e ad alta risposta.
* Autonomia energetica: generazione di micro-energia per dispositivi wireless autoalimentati.
* Ambiti Applicativi in Evoluzione
* Wearables avanzati per l’udito e il monitoraggio biometrico
* Dispositivi biomedicali impiantabili a risposta adattiva
* Robotica soft e superfici sensorizzate interattive

## Piastre Dinamometriche Kistler: Misure Tridimensionali di Forza ad Alta Precisione

Kistler è un leader globale nella produzione di piattaforme dinamometriche ad alta sensibilità, progettate per la rilevazione precisa delle forze tridimensionali generate dal contatto tra corpo e superficie.

Ambiti di Applicazione

* Analisi del cammino: rilevazione di forza, simmetria, tempo di contatto e baricentro passo per passo
* Riabilitazione clinica: confronto dinamico tra arto sano e arto leso
* Performance sportiva: misurazione di sprint, salti e stabilità durante cambi di direzione
* Robotica medicale: feedback meccanico in esoscheletri e ortesi intelligenti

Struttura Tecnologica e Funzionamento

Al cuore delle pedane Kistler vi sono sensori piezoelettrici collocati tra due piastre rigide. Questi, realizzati in quarzo naturale o in PiezoStar® (materiale brevettato), sfruttano l’effetto piezoelettrico diretto per convertire le sollecitazioni meccaniche in cariche elettriche.

Componenti Principali

* Superficie superiore: area di contatto resistente per uso umano o animale
* Sensori piezoelettrici: 3 o 4 unità, disposti in configurazione triangolare o quadrata
* Strati isolanti: filtraggio di interferenze termiche e meccaniche
* Amplificatori digitali: conversione della carica generata in segnali di tensione leggibili

Fasi del Processo di Misura

* Deformazione del cristallo → generazione di carica elettrica
* Amplificazione del segnale tramite elettronica integrata (*es. modelli 9260BA*)
* Campionamento ad alta frequenza per analisi dinamiche
* Elaborazione del dato: calcolo delle forze nel tempo, centro di pressione (COP), asimmetrie e postura

Materiali Piezoelettrici: Proprietà e Prestazioni

La selezione del materiale è cruciale per garantire sensibilità, stabilità termica e durabilità nel tempo.

Confronto dei Materiali:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Materiale | Sensibilità (D₃₃) | Vantaggi Tecnici | Criticità |
| Quarzo | ~2–3 pC/N | Estrema Linearità, Alta Ripetibilità, Stabilità Termica Da –40 °C A +120 °C | Sensibilità Relativamente Bassa |
| Piezostar® | Superiore Al Quarzo | Stabilità Fino A 700 °C, Comportamento Lineare E Privo Di Isteresi, Alta Affidabilità | Materiale Proprietario, Costo Elevato |

## Sensore Piezoelettrico Kistler Type 6124A: Prestazioni Elevate in Ambienti Estremi

Il Kistler 6124A è un sensore piezoelettrico ad altissima robustezza e precisione, progettato per la misura dinamica della pressione all’interno di camere di combustione motore. Basato sulla tecnologia proprietaria PiezoStar®, il dispositivo garantisce elevata reattività, resistenza termica, e affidabilità operativa, anche su propulsori a benzina, diesel, gas naturale o idrogeno.

Produttore

Kistler Group è un’azienda svizzera fondata nel 1959 a Winterthur, oggi leader internazionale nella sensoristica piezoelettrica.

* Oltre 2000 dipendenti
* Più di 60 sedi nel mondo
* Circa 9% del fatturato dedicato a ricerca e sviluppo
* Applicazioni in automotive, aerospazio, biomedicale e manifattura avanzata

Principio di Funzionamento

* Le variazioni di pressione generate dalla combustione agiscono sul cristallo PiezoStar®
* L’effetto piezoelettrico diretto converte la forza meccanica in carica elettrica proporzionale
* Il segnale è trasmesso tramite cavo coassiale a bassa capacità, riducendo perdite e interferenze
* La frequenza naturale ≥ 65 kHz consente la rilevazione di fenomeni transitori di elevata intensità e brevissima durata

Materiali e Struttura

* PiezoStar®: ceramica piezoelettrica brevettata con prestazioni superiori a quarzo e PZT
* Sensibilità: ~–30 pC/bar
* Stabilità termica: fino a 350 °C operativi, 400 °C in regime transitorio
* Alta resistenza meccanica e minima deriva termica
* Corpo sensore: acciaio speciale o leghe ad alta resistenza
* Connessione: cavo schermato per ambienti vibranti e ad alta temperatura
* Compatibilità: foratura standard da 6,35 mm per motori industriali e automotive

Parametri Tecnici

|  |  |
| --- | --- |
| Caratteristica | Valore Tipico |
| Campo Di Misura | Fino A 300 Bar (Modelli 100–250 Bar) |
| Linearità | ≤ ±0,3 % FSO |
| Stabilità Termica | Errore ≤ 1 % Fino A 350 °C |
| Frequenza Naturale | ≥ 65 Khz |

Prospettive Tecnologiche

* Cristalli PiezoStar® evoluti: maggiore stabilità e riduzione ulteriore della deriva
* Interfacce intelligenti: diagnostica avanzata e riconoscimento automatico via PiezoSmart®
* Estensione della gamma operativa

## Plantari Intelligenti Piezoelettrici: Monitoraggio Avanzato della Pressione Plantare

Nel contesto della riabilitazione motoria, geriatria e prevenzione delle cadute, stanno emergendo soluzioni sensoristiche avanzate basate su plantari piezoelettrici, capaci di rilevare la distribuzione della pressione durante la deambulazione in tempo reale.

Tecnologia Integrata

* Sensori piezoelettrici flessibili: integrati su supporti polimerici stampabili in 3D
* Materiali attivi: BaTiO₃ e PVDF-TrFE, con sensibilità tipica di ~2,35 mV/kPa
* Struttura conformabile: ottimizzata per superfici anatomiche e dinamiche
* Interfaccia digitale: connettività wireless tramite protocollo BLE/ZigBee

Ambiti di Applicazione

* Neuropatie periferiche
* Sarcopenia e instabilità posturale
* Riabilitazione ortopedica e neurologica
* Supporto biomeccanico per pazienti cronici e atleti professionisti
* vantaggi Clinici e Tecnologici
* Rilevamento precoce di asimmetrie e compensazioni posturali
* Integrazione con protocolli terapeutici personalizzati
* Monitoraggio remoto e continuo via dispositivi smart
* Feedback immediato per ottimizzare la performance atletica o il recupero motorio

Potenziali Mercati e Partner Strategici

|  |  |
| --- | --- |
| Target | Interesse Principale |
| Centri Universitari E Ospedali | Ricerca Clinica, Validazione Biomeccanica E Riabilitazione |
| Aziende Wearable Medicali (Orpyx, Moticon) | Sviluppo E Distribuzione Di Plantari Sensorizzati |
| Startup Sport-Tech | Valutazione Di Postura, Sprint, Salti E Analisi Dinamica |

## Sensore Piezoelettrico PCB 2223D: Accelerometro Ultracompatto ad Alta Precisione

Il modello Endevco 2223D prodotto dal gruppo PCB Piezotronics, è un accelerometro piezoelettrico a uscita in carica (charge mode). L’elemento attivo in Piezite® P-8 genera una carica proporzionale all’accelerazione (~1,4 pC/g), che viene convertita in tensione tramite amplificatore esterno. Questo approccio, privo di elettronica integrata, garantisce maggiore robustezza termica e stabilità a lungo termine

Principio di Funzionamento

* Effetto piezoelettrico diretto: Una massa interna soggetta ad accelerazione esercita una forza tangenziale sul cristallo Piezite® P-8, generando una carica elettrica proporzionale.
* Design a taglio radiale (Radial Shear): La sollecitazione laterale del cristallo migliora la risposta dinamica e riduce gli effetti delle sollecitazioni assiali.
* Uscita in carica: Il segnale in picocoulomb/g può essere convertito in tensione analogica tramite amplificatori di carica esterno, rendendo il sensore compatibile con una vasta gamma di sistemi di acquisizione.

Materiali e Struttura

* Cristallo piezoelettrico: *Piezite® P-8* (PZT-8 modificato)
* Elevata stabilità meccanica e termica
* Bassa perdita dielettrica
* Durabilità e precisione nel tempo
* Massa sismica in acciaio inox
* Ottima rigidità e resistenza agli urti
* Isolamento elettrico
* Configurazione a terra flottante per ridurre interferenze ambientali

Specifiche Tecniche

|  |  |
| --- | --- |
| Parametro | Valore Tipico |
| Sensibilità | ~ 12 pC/g |
| Intervallo Accelerazioni | ± 2000 g |
| Risposta In Frequenza | 14 kHz – 28kHz |
| Temperatura Operativa | –55 °C → +177 °C |
| Massa (Senza Cavo) | ~ 0,5 g |
| Isolamento Elettrico | Terra Isolata |

Evoluzioni Tecnologiche

Sensori triassiali miniaturizzati: sviluppo della serie PCB 2223D per misure simultanee su tre assi, con ingombri estremamente ridotti.

Materiali avanzati : Ampliamento della banda passante oltre i 12 kHz, e compatibilità con ambienti critici:

* alte temperature
* atmosfere corrosive
* radiazioni

## TE Connectivity LDT0-028K — Sensore Piezoelettrico Flessibile in Film PVDF

Il LDT0-028K, realizzato da TE Connectivity, è un sensore piezoelettrico a film sottile basato su PVDF, progettato per rilevare vibrazioni, urti e deformazioni meccaniche di lieve intensità. Tale sensore presenta una struttura flessibile e capacità di generare segnali autonomi senza alimentazione esterna, grazie a queste caratteristiche è una soluzione smart e low-power per applicazioni IoT, wearable, robotica morbida e sistemi portatili.

Principio di Funzionamento

* Effetto piezoelettrico diretto: Il PVDF genera una tensione proporzionale alla deformazione meccanica.
* Configurazione a cantilever: un’estremità fissa, l’altra libera, ottimizza l'oscillazione e la sensibilità.
* Personalizzazione dinamica: aggiunta di massa sull’estremità libera determina riduzione della frequenza di risonanza per rilevazione di vibrazioni lente.
* Output elettrico: presenta una sensibilità di 50 mV/g, compatibile con circuiti CMOS/MOSFET → funzionamento senza alimentazione esterna.

Struttura e Materiali

* Elemento attivo: film PVDF da 28 µm
* Substrato: poliestere flessibile da 125 µm
* Elettrodi: stampati in inchiostro d’argento su entrambi i lati, per massimizzare la raccolta del segnale
* Capacità: ~500 pF (stima)
* Robustezza: resiste a sollecitazioni cicliche, urti e vibrazioni prolungate

Parametri Tecnici

|  |  |
| --- | --- |
| Caratteristica | Valore Tipico |
| Sensibilità | ~50 mV/G |
| Frequenza Di Risonanza | ~180 Hz (Senza Massa) |
| Temperatura Operativa | 0 – 85 °C (*Fino A 125 °C*) |
| Capacità Elettrica | ~500 pF |
| Spessore Pvdf | 28 µm |
| Substrato Poliestere | 125 µm |

Applicazioni Principali

* Interruttori intelligenti a basso consumo per dispositivi portatili
* Sensori anti-intrusione e allarmi vibrazionali per ambienti e automotive
* Monitoraggio meccanico in macchinari, elettrodomestici e ambienti industriali
* Robotica flessibile e dispositivi indossabili
* Smart textiles e superfici attive con rilevamento distribuito

# Analisi dei competitor

Di seguito si presenta una panoramica delle aziende leader nel settore della produzione di sensori piezoelettrici, con focus su soluzioni per la rilevazione di vibrazioni, applicazioni meccaniche e fluidodinamiche. Per ciascuna azienda vengono evidenziati il principio di funzionamento, i tratti distintivi e le principali caratteristiche tecniche.

## TE Connectivity – Piezoelectric Vibration Sensors

TE Connectivity propone un ampio portafoglio di sensori per la rilevazione di vibrazioni, pensati per installazioni anche su superfici curve o in spazi ristretti. Questi dispositivi trovano applicazione nel monitoraggio strutturale, nel controllo di fluidi in tubazioni, pompe e in contesti industriali complessi.

**Tecnologia**: piezoelettrica classica (PZT, quarzo, ceramiche)

**Caratteristiche**:

* Formati miniaturizzati e robusti
* Elevata resistenza ad agenti esterni (urti, umidità, vibrazioni continue)
* Non basati su stampa 3D, ma progettati con criteri di massima compattezza

**Dati tecnici**:

* Range: fino a ±500 g
* Frequenza operativa: fino a 10–15 kHz
* Sensibilità: da 10 a oltre 100 mV/g
* Materiali: acciaio inox, ceramica
* Protezione ambientale: IP67–IP68

## PCB Piezotronics (MTS Systems Corp.)

Azienda altamente specializzata in sensori piezoelettrici ad elevate prestazioni, offre soluzioni custom e standard per il monitoraggio avanzato delle vibrazioni su condotti, turbine e impianti industriali.

**Tecnologia**: ICP® (Integrated Circuit Piezoelectric)

**Caratteristiche**:

* Ampia banda passante e alta precisione
* Configurazioni custom per esigenze operative specifiche
* Struttura meccanica adatta ad ambienti industriali critici

**Dati tecnici**:

* Range: ±500 g
* Frequenza: fino a 30 kHz
* Sensibilità: 10–500 mV/g
* Materiali: acciaio inox, titanio
* Protezione: IP68

## Honeywell – Vibration & Piezoelectric Sensors

Honeywell sviluppa sensori piezoelettrici adatti ad ambienti industriali ad alta severità, con particolare applicazione su impianti fluidodinamici (compressori, pompe, pipeline).

**Tecnologia**: piezoelettrica a compressione/taglio (con elettronica integrata in alcuni modelli)

**Caratteristiche**:

* Robuste soluzioni per ambienti gravosi
* Versioni miniaturizzate e facilmente integrabili
* Configurabilità versatile e strutture rugged

**Dati tecnici**:

* Range: ±50 g ÷ ±500 g
* Frequenza: fino a 15–20 kHz
* Sensibilità: da 10 a >100 mV/g
* Protezione: IP65–IP68

## Sensonics

Sensonics è specializzata in sensori per la sorveglianza continua delle vibrazioni meccaniche in sistemi rotanti e macchinari industriali. Le soluzioni offerte presentano elevata stabilità e longevità.

**Tecnologia**: accelerometri e velocimetri piezoelettrici (con o senza elettronica integrata)

**Caratteristiche**:

* Ottimizzati per il monitoraggio continuo in turbine e pompe
* Struttura robusta e certificazioni ATEX per ambienti a rischio
* Elevata affidabilità operativa nel tempo

**Dati tecnici**:

* Range: ±80 g
* Frequenza: fino a 10 kHz
* Sensibilità: 100 mV/g
* Protezione: IP68, ATEX Zone 1

## Piezo.com (by Mide Technology)

Piezo.com sviluppa sensori piezoelettrici personalizzabili, con focus sui film piezoelettrici ultrasottili, particolarmente adatti per superfici curve e strutture leggere. Alcuni modelli sono compatibili con tecniche di fabbricazione additiva.

**Tecnologia**: film piezoelettrici (PVDF), piezo compositi flessibili

**Caratteristiche**:

* Sensori sottili, incollabili e leggeri
* Perfetti per monitoraggio dinamico su superfici non planari
* Possibile integrazione in strutture stampate 3D

**Dati tecnici**:

* Range: da basse vibrazioni a impatti
* Frequenza: fino a 40 kHz
* Sensibilità: variabile in base al formato (film, patch, strip)
* Peso: <1 grammo
* Materiali: PVDF, piezoceramici flessibili

## Metis Motion – Sensori integrati con stampa 3D

Metis Motion si distingue per l’impiego avanzato della produzione additiva nella realizzazione di sensori embedded. Sebbene non specificamente piezoelettrici, la loro ricerca contribuisce alla tendenza verso l’integrazione funzionale della sensoristica nei componenti meccanici.

**Tecnologia**: sensori embedded fabbricati via stampa 3D polimerica/metallica

**Caratteristiche**:

* Sensoristica integrata direttamente in attuatori, giunti e strutture
* Geometrie complesse non ottenibili con tecniche convenzionali
* Riduzione di cablaggi e ingombro, aumento dell’affidabilità

**Dati tecnici**:

* Variabili in funzione del tipo di sensore integrato (strain gauge, forza, posizione, vibrazione)
* Range e risoluzione personalizzabili su base progettuale

## Analisi Comparativa dei Sensori Piezoelettrici dei competitor

**Obiettivi dell’Analisi**

* Identificare i principali competitor nel mercato della sensoristica piezoelettrica
* Analizzare i principi di funzionamento utilizzati
* Confrontare parametri tecnici e prestazionali
* Evidenziare potenziali soluzioni per il progetto in esame

**Tabella Comparativa: Principio e Caratteristiche**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Azienda | Principio Di Funzionamento | Caratteristiche Distintive |
| Te Connectivity | Piezoelettrico Tradizionale (Pzt, Quarzo, Ceramiche) | Sensori Miniaturizzati E Robusti, Elevata Resistenza Ambientale. Non Compatibili Con Stampa 3d |
| Pcb Piezotronics | Icp® (Integrated Circuit Piezoelectric) | Alta Precisione E Banda Larga, Configurazioni Personalizzabili |
| Honeywell | Piezoelettrico A Compressione O A Taglio | Sensori Robusti Per Ambienti Gravosi, Montaggio Flessibile |
| Sensonics | Accelerometri E Velocimetri Piezoelettrici (Passivi/Attivi) | Ottimizzati Per Il Monitoraggio Continuo, Certificazioni Atex |
| Piezo.Com (Mide) | Film Piezoelettrici In Pvdf E Compositi Flessibili | Leggeri, Incollabili, Ideali Per Superfici Curve E Strutture Stampate |
| Metis Motion | Sensori Integrati Via Stampa 3d (Non Solo Piezoelettrici) | Miniaturizzati, Integrati Direttamente Nei Componenti. Geometrie Complesse E Senza Cablaggi |

**Tabella Tecnica: Parametri Prestazionali**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Azienda | Range | Frequenza | Sensibilità | Protezione | Materiali | Note Economiche |
| Te Connectivity | ±500 G | 10–15 Khz | 10–100 Mv/G | Ip67–Ip68 | Acciaio Inox, Ceramica Piezoelettrica | Costo Medio-Alto, Alta Affidabilità |
| Pcb Piezotronics | ±500 G | Fino A 30 Khz | 10–500 Mv/G | Fino A Ip68 | Titanio, Ceramiche | Costo Elevato, Prestazioni Di Fascia Alta |
| Honeywell | ±50 G – ±500 G | 15–20 Khz | 10–100 Mv/G | Ip65–Ip68 | Ceramiche Industriali | Costo Medio, Ottimo Per Ambienti Difficili |
| Sensonics | ±80 G | Fino A 10 Khz | ~100 Mv/G | Ip68 + Atex | Titanio, Ceramiche | Costo Medio-Alto, Per Uso Industriale |
| Piezo.Com | ±0.1 G – ±500 G | Fino A 40 Khz | Variabile (Formato) | N/A | Pvdf, Compositi | Basso-Medio, Ideale Per Prototipazione |
| Metis Motion | Variabile (Progetto) | Variabile | Variabile | Integrato | Metalli E Polimeri Stampabili | Medio-Alto, Compensato Da Efficienza |

 **Conclusioni Tecnologiche**

Le tecnologie piezoelettriche tradizionali, basate su materiali ceramici come il PZT, continuano a rappresentare lo standard di riferimento per l’industria grazie alla loro comprovata robustezza, affidabilità e precisione nelle misurazioni. Tuttavia, l’evoluzione tecnologica sta aprendo nuove prospettive operative.

L’introduzione di soluzioni a film flessibile, come il PVDF, e l’impiego crescente di tecniche di produzione additiva (stampa 3D) stanno ampliando in modo significativo il panorama applicativo. Queste tecnologie consentono la realizzazione di sensori più leggeri, flessibili e facilmente integrabili in superfici curve o ambienti complessi, dove i sensori tradizionali risulterebbero ingombranti o difficili da installare.

La scelta della tecnologia più adatta dipende da un’attenta analisi dei requisiti specifici dell’applicazione: frequenza operativa, sensibilità richiesta, geometria del supporto, condizioni ambientali (temperatura, umidità, vibrazioni). In contesti ad alta variabilità progettuale, le tecnologie flessibili e additive offrono vantaggi determinanti in termini di personalizzazione e rapidità di sviluppo.

Le tendenze emergenti nel settore evidenziano un progressivo orientamento verso soluzioni che favoriscono l’integrazione strutturale del sensore, riducendo le necessità di montaggio, cablaggio o interfacciamento meccanico. In particolare, la stampa 3D multimateriale si sta affermando come leva strategica per semplificare l’assemblaggio e per creare dispositivi “embedded-ready”, già conformi alle superfici su cui devono operare.

1. **Analisi strategico-tecnologica**

Nel presente capitolo si analizza nel dettaglio l’innovazione rappresentata dallo sviluppo di un sensore piezoelettrico avanzato tramite produzione additiva (stampa 3D). Questo progetto prevede l’impiego di materiali piezoelettrici innovativi, come il PVDF, e l’integrazione del sensore su superfici curve o complesse, con un’elevata personalizzazione geometrica.

Al fine di comprendere a fondo la natura, le implicazioni e le opportunità strategiche di tale innovazione, vengono utilizzati tre modelli teorici ampiamente riconosciuti: la matrice di Henderson e Clark, la matrice di Ansoff e la matrice di Abernathy e Clark.

Questi strumenti permettono di valutare l’innovazione sotto tre punti di vista: tecnico-progettuale, strategico-commerciale e sistemico-industriale.

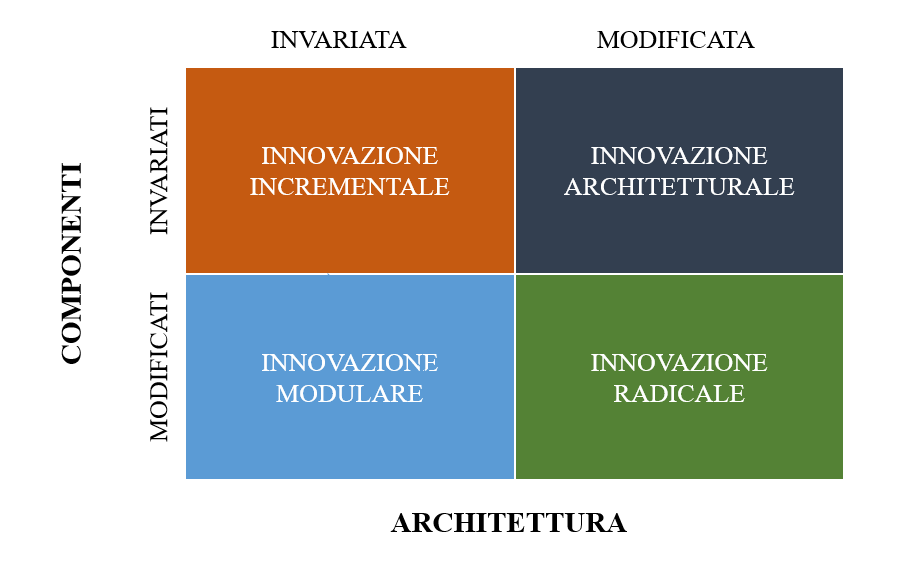
* 1. **Analisi tecnica: Matrice di Henderson e Clark**

La matrice di Henderson e Clark permette di classificare le innovazioni tecnologiche in base a due parametri fondamentali: i cambiamenti nei componenti (cioè le tecnologie o moduli che compongono un prodotto) e le modifiche apportate all’architettura (cioè il modo in cui tali componenti sono integrati tra loro). Questa matrice distingue quattro categorie di innovazione: incrementale, modulare, architetturale e radicale.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Architettura invariata | Architettura modificata |
| Componenti invariati | Innovazione incrementale | Innovazione architetturale |
| Componenti modificati | Innovazione modulare | Innovazione radicale |

Nel nostro progetto si osserva una chiara modifica dei componenti, in quanto viene sostituito il materiale piezoelettrico tradizionale con nuovi materiali più flessibili e adatti alla stampa 3D, come il PVDF. Inoltre, in alcuni casi, cambia anche l’architettura del sensore: ad esempio, quando viene stampato direttamente su una parete curva di un condotto.

In presenza di sole modifiche ai materiali ma con architettura invariata (stessi elettrodi, forma, collegamenti), si parla di innovazione modulare. Quando invece anche la disposizione spaziale e l’interconnessione dei componenti cambia, si rientra nell’innovazione radicale.

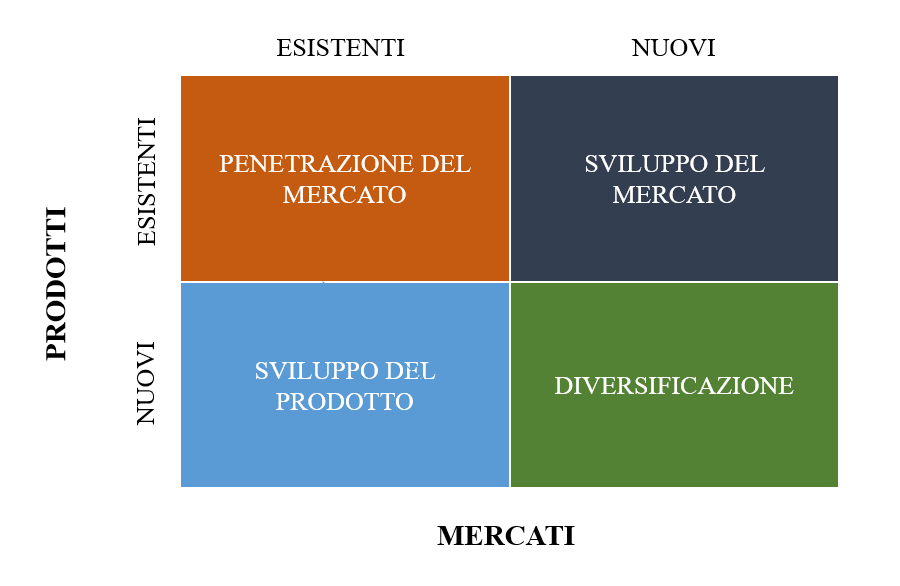


*Figura 5‑1 MATRICE DI HENDERSON E CLARK*

* 1. **Analisi strategica: Matrice di Ansoff**

La matrice di Ansoff è uno strumento classico di pianificazione strategica che aiuta a identificare le opportunità di crescita basate sull’incrocio tra mercati (esistenti o nuovi) e prodotti (esistenti o nuovi). Questo approccio consente di valutare il livello di rischio e le azioni necessarie per espandersi.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Mercati esistenti | Mercati nuovi |
| Prodotti esistenti | Penetrazione del mercato | Sviluppo del mercato |
| Prodotti nuovi | Sviluppo del prodotto | Diversificazione |

Per il nostro progetto può essere interpretato in più quadranti della matrice di Ansoff. Da un lato, ottimizzare sensori esistenti tramite materiali migliori rientra nella penetrazione del mercato. Dall’altro, l’adozione di geometrie avanzate e nuove funzionalità porta allo sviluppo del prodotto.   
Allo stesso tempo, se si esplorano nuovi mercati applicativi, come il biomedicale o l’agricoltura di precisione, si entra nello sviluppo del mercato. Infine, progettare dispositivi completamente nuovi, come tessuti intelligenti o sistemi per harvesting energetico, corrisponde alla diversificazione.  


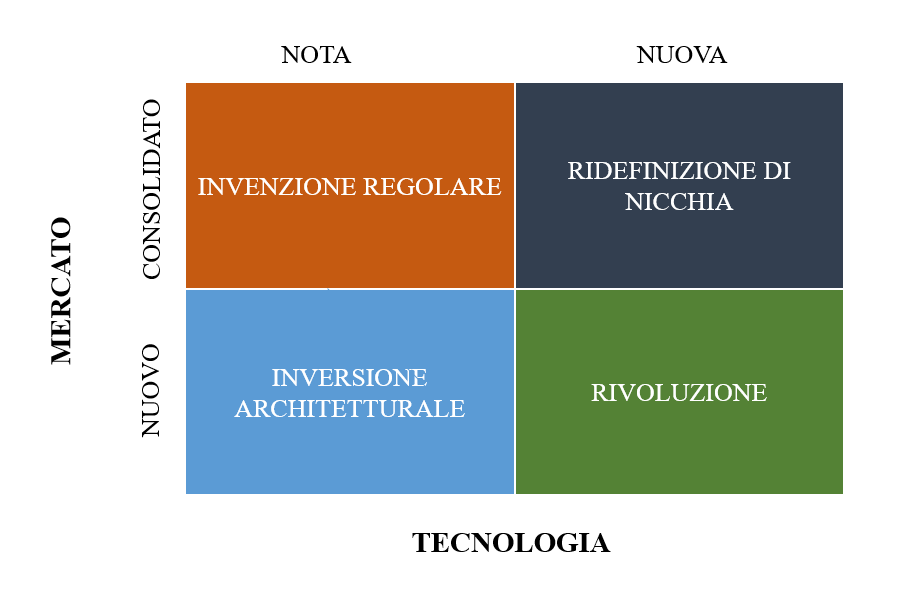
*Figura 5‑2 MATRICE DI ANSOFF*

* 1. **Analisi sistemica: Matrice di Abernathy e Clark**

La matrice di Abernathy e Clark classifica le innovazioni secondo il grado di novità nella conoscenza tecnologica e di mercato. Questa classificazione aiuta a comprendere se l’innovazione rafforza l’attuale paradigma industriale o lo rompe, creando nuovi ecosistemi.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tipo di Innovazione | Tecnologia | Mercato | Descrizione |
| Invenzione regolare | Nota | Consolidato | Miglioramento incrementale |
| Ridefinizione di nicchia | Nota | Nuovo | Nuove applicazioni di tecnologie esistenti |
| Inversione architetturale | Nuova | Consolidato | Nuove tecnologie in mercati tradizionali |
| Rivoluzione | Nuova | Nuovo | Nuovi ecosistemi tecnologici e di mercato |

Nel nostro progetto, l’adozione della stampa 3D per la produzione di sensori piezoelettrici flessibili in materiali avanzati non è solo un passo avanti: è una vera rivoluzione, come definito dal modello di Abernathy e Clark. Non ci limitiamo a migliorare la tecnologia esistente: la stiamo sovvertendo, superando i limiti dei processi tradizionali e aprendo l’accesso a mercati finora inesplorati. Questa scelta apre la strada a nuove applicazioni, nuovi modelli di prodotto e a un modo completamente diverso di concepire la sensoristica.



*Figura 5‑3 MATRICE DI ABERNATHY E CLARK*

* 1. **Valutazione numerica integrata delle matrici**

I punteggi utilizzati:

* **1** = impatto minimo o tradizionale
* **3** = innovazione intermedia o evolutiva
* **5** = innovazione massima o dirompente
  + 1. **Matrice di Henderson e Clark (Analisi tecnica)**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Tipo di innovazione** | **Punteggio** | **Motivazione** |
| Modulare | 3 | Nuovi materiali, architettura invariata |
| Radicale | 5 | Nuovi materiali + nuova architettura |
| **Media ponderata** | **4** | Il progetto oscilla tra modulare e radicale |

* + 1. **Matrice di Ansoff (Analisi strategica)**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Strategia** | **Punteggio** | **Motivazione** |
| Penetrazione del mercato | 2 | Ottimizzazione di sensori esistenti |
| Sviluppo del prodotto | 4 | Nuove geometrie e funzionalità |
| Sviluppo del mercato | 4 | Applicazioni in settori nuovi |
| Diversificazione | 5 | Nuovi dispositivi e mercati |
| **Media ponderata** | **3.75** | Strategia distribuita su più quadranti |

* + 1. **Matrice di Abernathy e Clark (Analisi sistemica)**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Tipo di innovazione** | **Punteggio** | **Motivazione** |
| Rivoluzione | 5 | Nuova tecnologia + nuovi mercati |
| **Valutazione finale** | **5** | Cambiamento profondo del paradigma |

* + 1. **Sintesi finale**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Prospettiva** | **Punteggio (1–5)** | **Interpretazione** |
| Tecnico-progettuale | 4 | Innovazione profonda nei materiali e design |
| Strategico-commerciale | 3.75 | Espansione su più fronti di mercato e prodotto |
| Sistemico-industriale | 5 | Rottura del paradigma e creazione di nuovi ecosistemi |

* + 1. **Conclusione quantitativa**

Il progetto del sensore piezoelettrico tramite stampa 3D mostra un **profilo di innovazione ad alto impatto**, con punteggi elevati in tutte le dimensioni analizzate.

* 1. **Conclusioni**

L’analisi integrata delle tre matrici mostra chiaramente che il progetto in esame rappresenta un’innovazione tecnologica e strategica ad alto impatto. A livello tecnico, l’innovazione si colloca tra il modulare e il radicale (Henderson e Clark). Strategicamente, si posiziona tra lo sviluppo del prodotto e la diversificazione (Ansoff), mentre sul piano sistemico-industriale configura una vera e propria rivoluzione (Abernathy e Clark).

# Requisiti e Specifica Tecnica

## Requisiti Tecnici Principali

* **Miniaturizzazione** del dispositivo per applicazioni compatte
* **Adattabilità** a superfici curve e geometrie complesse
* **Compatibilità** con tecnologie di stampa 3D avanzate
* **Rilevamento in tempo reale** di vibrazioni generate da flussi
* **Resistenza ambientale**, con tolleranza a umidità e alte temperature

## Specifica Tecnica

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Politecnico di Bari | Specifica Tecnica | Data: 23/07/2025 |
| Dipartimento di Meccanica, Matematica e Management | **SENSORE PIEZOELETTRICO PER FLUSSOMETRI VORTEX MEDIANTE PRODUZIONE ADDITIVA** |
| Committente:  Prof. Ing. Umberto Galietti  AB Industrietechnik |
| Progettisti:  Alessandra Miracapillo  Vincenzo Morano  Pierpaolo Palombella |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **1. Introduzione** | **1.1 Descrizione generale** | Sensore piezoelettrico flessibile, realizzato mediante stampa 3D, progettato per rilevare le vibrazioni generate dal flusso di fluidi all’interno di condotti idraulici o pneumatici. La struttura compatta consente l’integrazione diretta nei flussometri VORTEX, anche in presenza di geometrie complesse. |
| **1.2 Ambiente operativo** | Applicazioni in impianti industriali, sistemi HVAC e apparati di misura fluidodinamica, anche in condizioni gravose con presenza di bolle, particolato o variazioni termiche. |
| **1.3 Utenti finali** | Tecnici manutentori, progettisti di sistemi di monitoraggio, produttori di flussometri e di condotte intelligenti. |

|  |  |
| --- | --- |
| **2. Glossario** | **FDM**: Fused Deposition Modeling  tecnologia di stampa 3D a deposizione fusa |
| **d₃₃**: coefficiente piezoelettrico in pC/N |
| **Poling**: processo di orientamento molecolare mediante  campo elettrico per attivare le proprietà piezoelettriche.  (direzione poling → forza applicata) |
| **Elettrodizzazione:** deposizione di elettrodi d’argento (Ag)  sulla superficie del film di PVDF. |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **3. Prestazioni** | **Parametro** | **Valore minimo** | **Valore desiderato** |
| Coefficiente piezoelettrico d₃₃ [pC/N] | ≥ 20 | 20 - 50 |
| Gamma di frequenze [Hz] | 10 – 5000 | 20 – 8000 |
| Risoluzione vibrazionale [µm] | ≤ 5 | ≤ 2 |
| Tempo di risposta [ms] | ≤ 10 | ≤ 2 |
| Intervallo di temperatura [°C] | –20 ÷ 80 | –20 ÷ 120 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **4. Requisiti fisici e dimensionali** | **4.1 Peso e ingombri** | **Parametro** | **Valore massimo** | **Valore desiderato** |
| Spessore sensore [mm] | ≤ 1.0 | ≤ 0.6 |
| Larghezza sensore [mm] | ≤ 2.0 | ≤ 1.6 |
| Altezza sensore [mm] | ≤ 15 | ≤ 13 |
| Superficie attiva [mm²] | ≤ 30 | ≤ 20.8 |
| Peso [g] | ≤ 5 | ≤ 3 |
|  |  | | |
| **4.2 Alimentazione** | **Parametro** | **Minimo** | **Desiderato** |
| Tensione di uscita [mV/g] | ≥ 30 | ≥ 50 |
| Potenza assorbita | Nessuna | Nessuna (passivo) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **5. Tecnologia e produzione** | **Parametro** | **Valore** |
| Tecnologia di produzione | FDM (materiale: PVDF-TrFE) |
| Post-processing | Poling (50–100 MV/m), elettrodizzazione con Ag |
| Tipo di elettrodi | Serigrafia argento / sputtering |
| Substrato meccanico | PA12, PEEK o ULTEM stampati con SLS o FDM |
| Interfaccia elettrica | PCB flessibile, contatti stampati, BLE opzionale |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **6. Installazione** | **Parametro** | **Valore massimo** | **Valore desiderato** |
| Modalità di montaggio | Incollaggio diretto o integrazione nel condotto |  |
| Numero sensori per condotto | ≤ 3 | ≤ 2 |
| Tempo di installazione [min] | ≤ 10 | ≤ 5 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **7. Manutenzione** | **Parametro** | **Valore** |
| Frequenza ispezione visiva | Ogni 12 mesi |
| Vita utile meccanica [cicli] | ≥ 10⁶ (minimo), ≥ 2·10⁶ (ottimale) |
| Ricalibrazione | Ogni 24 mesi (opzionale) |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **8. Sicurezza** | **Parametro** | **Valore minimo** | **Valore desiderato** |
| Isolamento elettrico [V] | ≥ 500 | ≥ 1000 |
| Grado di protezione IP | IP54 | IP67 |
| Schermatura EMI | Opzionale | Sì |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **9. Durabilità e stabilità operativa** | **Parametro** | **Valore minimo** | **Valore desiderato** |
| Durata operativa | ≥ 5 anni | ≥ 8 anni |
| Stabilità segnale (drift annuo) | ≤ 5% | ≤ 2% |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **10. Conformità normativa e validazioni previste** | **Marcatura CE** | |
| **Direttiva 2011/65/UE (RoHS)** | |
| **Direttiva 2014/30/UE (EMC)** | |
| **Norme EN 61000-6-2 / EN 61000-6-3** | |
| **REACH compliance** (assenza di piombo nelle versioni con BaTiO₃) | |
| **Validazioni interne previste** | Test vibrazionali dinamici |
| Prove termiche a cicli estesi |
| Calibrazione dinamica |

# Analisi dei Materiali

## Panoramica sui Materiali Piezoelettrici

La peculiarità dei materiali piezoelettrici risiede nella loro capacità bidirezionale di convertire un’azione meccanica in carica elettrica (*effetto piezoelettrico diretto*) e, viceversa, di trasformare un campo elettrico in deformazione meccanica (*effetto piezoelettrico inverso*). L’input meccanico può essere espresso come sforzo X o deformazione x, mentre la risposta elettrica si quantifica mediante spostamento elettrico D, campo elettrico E o tensione V. Poiché il fenomeno è transitorio, i parametri descrittivi devono essere analizzati nel dominio del tempo.

## Tabella Sinottica dei Coefficienti Piezoelettrici

La seguente tabella riassume i principali coefficienti piezoelettrici, la loro unità di misura e il significato pratico ai fini della progettazione di sensori e attuatori piezoelettrici.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Simbolo** | **Nome** | **Unità di Misura** | **Ruolo Pratico** |
| **d** | Costante di carica (o di deformazione) | C/N, m/V | Indica quanto segnale elettrico si ottiene da uno stress meccanico: più alto è il d₃₃, più sensibile è il sensore. |
| **g** | Costante di tensione | V·m/N | Relaziona il segnale elettrico allo stress: utile nella progettazione di sensori ad alta tensione. |
| **k\_eff** | Fattore di accoppiamento elettromeccanico | Adimensionale | Misura l'efficienza nella conversione energia meccanica ↔ elettrica. Valori alti indicano materiali ideali per attuatori. |
| **E** | Costante di elasticità piezoelettrica | Y(N/m2) | Importante nella progettazione di trasduttori ad alta potenza; lega stress e campo elettrico. |
| **h** | Costante piezoelettrico inverso | V/m | Utilizzato per stimare la risposta in condizioni di carico libero; utile per sensori di precisione. |

## Piezoelettrici naturali

In natura troviamo diversi materiali dotati di proprietà piezoelettriche, come il quarzo, la tormalina e il sale di Rochelle, oltre a tessuti biologici quali pelle e ossa. Poiché però il loro rendimento di conversione è piuttosto basso, questi materiali vengono raramente impiegati in applicazioni pratiche, che si affidano invece soprattutto a piezoceramici e polimeri piezoelettrici. Il quarzo, un cristallo di biossido di silicio (SiO₂), è il materiale naturale più utilizzato, poiché mostra sia l’effetto piezoelettrico diretto sia quello inverso e offre eccellenti proprietà meccaniche, notevole durata e buona stabilità termica. Mentre il sale di Rochelle, pur mostrando elevata risposta piezoelettrica, è poco usato per la sua forte igroscopicità. Di seguito osserviamo le diverse caratteristiche dei materiali sopra citati:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Materiale** | **d-coefficiente tipico** | **Limiti e punti di forza** |
| **Quarzo (SiO₂)** | d₁₁ ≈ 2 – 3 pC/N | d₁₁ molto basso ⇒ bassa sensibilità si osserva però eccellente stabilità chimico-meccanica, bassissima espansione termica, altissimo fattore di qualità (Q ≈ 10⁵); ideale per filtri RF e cristalli oscillatori, ma coefficiente piezoelettrico modesto. |
| **Tourmalina** | d₁₁ ≈ 7 – 10 pC/N | Maggiore risposta piezoelettrica del quarzo, ma comunque < 10 pC N⁻¹ ; proprietà termo-stabili fino a ~220 °C; |
| **Tessuti biologici (osso, collagene, pelle)** | d ≈ 0.1 – 1 pC/N | Piezoelettricità intrinseca dovuta all’orientamento delle fibrille di collagene; segnali troppo bassi per la maggior parte dei trasduttori, ma utili nella rigenerazione tissutale. |
|  |  |  |

## Piezoelettrici ceramici

Sebbene quarzo, tourmalina, sale di Rochelle e tessuti biologici continuino a offrire spunti per la ricerca (harvesting geologico, scaffold bioattivi, sensori eco-compatibili), l’industria opta per ceramici ferroelettrici. I piezoelettrici ceramici sono materiali inorganici non metallici, ottenuti per sintesi chimica e appartenenti al gruppo dei materiali ferroelettrici.

La motivazione di tale preferenza è di seguito spiegata:

1. Prestazioni elettromeccaniche molto superiori: i coefficienti piezoelettrici delle ceramiche ferroelettriche (PZT, BaTiO₃, ecc.) sono fino a due ordini di grandezza più alti di quelli dei cristalli naturali. Un tipico quarzo ha d₃₃ ≈ 2-3 pC N⁻¹, mentre un PZT commerciale raggiunge 200-600 pC N⁻¹. Ciò si traduce in sensori più sensibili e attuatori in grado di sviluppare deformazioni o forze molto maggiori a parità di tensione.
2. Ferroelettricità e possibilità di poling: le ceramiche sono ferroelettriche: i loro domini possono essere orientati con un forte campo elettrico (poling), ottimizzando direzione e intensità della polarizzazione. Il quarzo, invece, non è ferroelettrico; la sua polarizzazione è “bloccata” nella struttura cristallina e non può essere re-indirizzata, limitando la libertà di progetto e la massima risposta ottenibile.
3. Flessibilità geometrica e facilità di processamento: le polveri ceramiche si sinterizzano in forme quasi qualunque (dischi, anelli, barre, sottili pellicole, stack multi-strato). La produzione avviene a bassi costi su scala industriale, mentre far crescere e tagliare grandi monocristalli di quarzo o di altri minerali è più lento, costoso e vincolato a pochi orientamenti cristallografici

I materiali ceramici inoltre presentano le seguenti caratteristiche:

* alta resistività elettrica e inerzia chimica,
* ottima resistenza alla corrosione,
* notevole durezza e modulo elastico,
* molto fragili e bassa tenacia

I principali materiali ceramici sono BaTiO3 e PZT:

Il BaTiO3 (titanato di bario) fu il primo piezoceramico, elevata costante dielettrica e alta resistenza alla depolarizzazione. Il titanato di bario è stato ampiamente impiegato subito dopo la seconda guerra mondiale per la generazione di vibrazioni acustiche ed ultrasuoni e per gli attuatori, ma oggi è stato sostituito dal titanato zirconato di piombo (PZT) per le sue superiori proprietà piezoelettriche e più alte temperature di funzionamento.

Il PZT è costituito da cristalli misti di zirconato di piombo (PbZrO3) e titanato di piombo (PbTiO3).

La possibilità di generare una grande varietà di composizioni variando il rapporto tra titanio e zirconio, permette la flessibilità delle caratteristiche elettriche e meccaniche di questi materiali piezoceramici, sebbene questo a causa delle implicazioni ambientali e normative.

L’assenza di piombo rende BaTiO₃ automaticamente conforme alle direttive RoHS/REACH; ciò spiega perché sia il candidato d’elezione quando si progettano sensori “green” o dispositivi per uso biomedicale.

Il PZT gode ancora di esenzioni specifiche (per esempio nell’elettronica di potenza o nell’ecografia medicale), ma l’incertezza sulle future restrizioni sta spingendo la ricerca verso materiali *lead-free* che replichino, finora senza eguagliarlo, il livello prestazionale di PZT.

## Polimeri piezoelettrici

I polimeri piezoelettrici offrono una serie di vantaggi che li rendono spesso preferibili alle ceramiche tradizionali. Grazie alla loro elevata flessibilità e alla buona stabilità meccanica, possono essere lavorati e integrati in dispositivi anche a basse temperature, senza rischiare fratture o delaminazioni.

Un ulteriore punto di forza dei polimeri piezoelettrici, come il PVDF, è l’elevata resistività e l’eccezionale capacità di sostenere campi elettrici molto intensi durante il poling, senza incorrere in fenomeni di breakdown dielettrico. Questo consente di applicare campi di poling molto più elevati in sicurezza, favorendo un’orientazione più efficace dei dipoli e una maggior polarizzazione residua nel materiale.

Sul fronte economico ed ambientale, i polimeri come il PVDF sono di solito meno costosi, e dato che sono materiali piezoelettrici privi di piombo sono generalmente considerati biocompatibili, e questo li rende adatti ad applicazioni biomedicali e indossabili. Tuttavia, essendo fluoropolimeri, non possono essere definiti completamente “green” dal punto di vista ambientale. Al contrario, il BaTiO₃, grazie alla sua natura lead-free e alla maggiore sostenibilità, rappresenta un materiale effettivamente più eco-compatibile e in linea con le direttive ambientale.

Il meccanismo piezoelettrico diretto nei polimeri si manifesta quando, sotto uno sforzo meccanico, le catene del materiale si deformano: le distanze tra di esse cambiano e il dipolo complessivo varia, generando così una carica elettrica. Non basta però la sola deformazione: è soprattutto la fase cristallina a fare la differenza. Nel PVDF, ad esempio, la fase β garantisce la risposta piezoelettrica più efficace, mentre la fase γ contribuisce in modo più limitato. In pratica, quindi, la piezoelettricità dei polimeri dipende sia dalla deformazione delle catene, sia dalla quantità e dal giusto orientamento delle fasi cristalline presenti.

Tuttavia, queste qualità si accompagnano a una risposta elettromeccanica più contenuta rispetto alle ceramiche: i valori di d₃₃ e l’accoppiamento energetico restano inferiori, limitando le applicazioni ai settori in cui la flessibilità, la leggerezza o l’ecocompatibilità siano prioritari.

Tra i polimeri, il più performante è il polivinilidenfluoruro (PVdF) assieme ai suoi copolimeri, che rappresentano oggi il punto di riferimento per realizzare per sensori e attuatori flessibili.

Infatti è uno dei materiali polimerici più studiati per applicazioni piezoelettriche, insieme al suo copolimero con trifluoroetilene, noto come PVdF–TrFE. Entrambi questi materiali sono in grado di generare una risposta elettrica quando sottoposti a sollecitazioni meccaniche, caratteristica alla base del fenomeno della piezoelettricità.

Il PVdF è un polimero semicristallino disponibile in commercio in diverse forme: polvere, pellet o film sottili semitrasparenti. Mostra una buona flessibilità e resistenza meccanica a temperatura ambiente, grazie a una temperatura di fusione di circa 170 °C e a una temperatura di transizione vetrosa di circa -40 °C. Queste proprietà lo rendono adatto a numerose applicazioni in campo elettronico, biomedicale e sensoristico.

Il PVdF-TrFE conserva la maggior parte delle proprietà meccaniche e chimiche del PVdF, come flessibilità, stabilità termica e resistenza chimica, ma ha anche un comportamento ferroelettrico stabile, ovvero la capacità di mantenere una polarizzazione anche in assenza di un campo elettrico esterno. Questo è possibile grazie alla temperatura di Curie (Tc) del copolimero, che è inferiore alla sua temperatura di fusione. Di conseguenza, la fase ferroelettrica può essere raggiunta prima che il materiale fonda, semplificando la lavorazione e migliorando l’efficienza funzionale nei dispositivi sebbene i materiali polimerici piezoelettrici, come il PVdF-TrFE (polivinilidenfluoruro-trifluoroetilene), presentino un coefficiente piezoelettrico d₃₃ generalmente inferiore rispetto ai materiali ceramici tradizionali. (d₃₃ per PVDF −20 ÷ −30 pC/N, PVDF-TrFE ~30 pC/N, PZT 200–600 pC/N).

## Principali materiali piezoelettrici e le loro caratteristiche

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Tipo | Materiale | Forma comune | Pro | Contro |
| Ceramico | PZT (Piombo zirconato titanato) | Dischi, anelli, bulk, film sottili su substrato | Alta sensibilità (d₃₃ ~ **290–630 pC/N** a seconda della famiglia) , stabilità termica moderata | Fragile, non flessibile |
| Polimerico | PVDF (Polivinilidene fluoruro) | Film, fibre, compositi | Flessibile, leggero, compatibile con 3D | Minor sensibilità  **|d₃₃| ~ 20–30 pC/N** (PVDF), **~30–40 pC/N** (PVDF-TrFE) |
| Cristalli singoli | Quarzo, Tantalato di litio | Cristalli naturali | Alta stabilità | Non stampabile, difficile da modellare, fragile, e sensibilità bassa-media |
| Compositi | PVDF + PZT o nanotubi/carbonio | Paste, inchiostri | Personalizzabili, stampabili, **d₃₃** superiore al PVDF (tipicamente **~30–80 pC/N)** | Complesse da formulare |

## Compatibilità con stampa 3D

PVDF & derivati (PVDF-TrFE):

* Termoplastico semicristallino, piezoelettrico dopo poling.
* Stampabile tramite FDM o elettrofilatura.
* Richiede polarizzazione elettrica post-processo.

Compositi stampabili (PZT + resina fotopolimerica):

* Miscele PZT in matrici polimeriche (es. resina epossidica).
* Stampabili via SLA/DLP o estrusione a bassa temperatura.
* Buon compromesso tra rigidità e lavorabilità.

Inchiostri funzionali per inkjet o serigrafia:

* Nanoparticelle di PZT o ZnO disperse in veicoli a base polimerica.
* Compatibili con tecniche additive ibride (post-stampa 3D).

## Criteri di selezione

* Flessibilità: di livello medio-alto, preferibili materiali come PVDF o compositi.
* Facilità di stampa: elevata, indicati filamenti in PVDF o paste stampabili.
* Risposta in frequenza: il PZT ottimale per trasduttori risonanti ad alte frequenze (UHF, fino a centinaia di MHz), il PVDF invece èideale per applicazioni a larga banda e buon accoppiamento acustico; utilizzabile da basse fino ad alte frequenze (MHz – decine di MHz).
* Sensibilità piezoelettrica: buona, su un livello medio-basso.
* Adattabilità a spazi ristretti: la flessibilità e la stampabilità favoriscono l’adattabilità in design complessi.
* Compatibilità elettrica: facilmente interfacciabile con microcontrollori.

Nel panorama della stampa 3D di materiali piezoelettrici, i **compositi polimerici** rappresentano una soluzione strategica per ottimizzare le prestazioni del sensore e adattarlo a specifiche esigenze applicative.

Un esempio di particolare rilievo è il **PVDF-TrFE (copolimero di polivinilidenfluoruro e trifluoroetilene)**, che unisce la flessibilità del PVDF alla stabilità e alla maggiore risposta piezoelettrica conferita dal componente TrFE.

**Vantaggi:**

* Flessibilità: Il PVDF-TrFE si presta particolarmente alla realizzazione di film o lamine sottili, anche su superfici curve, mantenendo buone proprietà meccaniche dopo la stampa.
* Compatibilità di processo: Può essere lavorato tramite estrusione (FDM) e successivamente sottoposto a poling (orientamento dei dipoli tramite campo elettrico) per massimizzare la risposta piezoelettrica.

**Sfida:**

* Necessità degli elettrodi: dopo la stampa, è fondamentale applicare gli elettrodi su entrambe le facce della lamina per poter raccogliere il segnale elettrico generato.
* Orientamento polare: Per ottenere le migliori prestazioni, è necessario un processo di poling post-stampa, che richiede attrezzature specifiche.

Un altro approccio consiste nell'utilizzo di compositi a base di resina e nanoparticelle ceramiche come il PZT (titanato di piombo-zirconato):

**Vantaggi:**

* Elevata sensibilità: il PZT, grazie ai suoi elevati coefficienti piezoelettrici, consente di ottenere sensori con risposta superiore rispetto ai polimeri puri.
* Buon compromesso rigidità/integrabilità: la matrice resinosa conferisce stabilità meccanica e facilita l'integrazione in strutture complesse.

**Sfida:**

* Formulazione e validazione: la preparazione del composito richiede un'accurata dispersione delle nanoparticelle nella resina e la validazione delle proprietà reologiche per garantire la stampabilità e l'omogeneità del materiale.

Infine, l'impiego di ZnO (ossido di zinco) sotto forma di nanoparticelle rappresenta un'alternativa interessante per la stampa di film sottili piezoelettrici:

**Vantaggi:**

* Stampabilità: le nanoparticelle di ZnO possono essere disperse in un mezzo polimerico e stampate in film anche di pochi micron di spessore.
* Buona piezoelettricità a basse frequenze: ideale per applicazioni che prevedono sollecitazioni lente o vibrazioni di bassa intensità.

**Limiti:**

* Sensibilità inferiore: rispetto ai compositi a base PZT, la risposta piezoelettrica di ZnO è generalmente minore, pur rimanendo sufficiente per molte applicazioni di rilevamento.

In conclusione, la scelta tra materiali e tecnologie di stampa dipenderà dal bilanciamento tra le prestazioni richieste dal sensore, la complessità della geometria da realizzare, la disponibilità dei materiali e le risorse.

# Tecnologie di Produzione

La scelta della tecnologia di fabbricazione incide direttamente sulla sensibilità, sull’affidabilità e sull’integrabilità dei sensori piezoelettrici in sistemi meccanici avanzati.

Di seguito si analizzano i principali metodi di produzione per due materiali strategici: **PVDF-TrFE** e **PZT**.

## PVDF-TrFE – Stampa FDM (Fused Deposition Modeling)

**Tecnica di riferimento:** la stampa a filamento fuso (FDM) rappresenta la metodologia prevalente per la fabbricazione di lamine piezoelettriche in **PVDF-TrFE**, grazie alla sua versatilità geometrica e accessibilità.

**Vantaggi:**

* Elevata **flessibilità progettuale**, con adattamento a superfici curve
* Processo **rapido e iterabile**, ideale per prototipazione
* Compatibilità con tecnologie CAD e slicing avanzate

**Criticità:**

* La formazione della **fase β piezoelettrica** dipende da parametri di stampa e raffreddamento
* Necessita di **trattamenti post-stampa** (poling ed elettrodizzazione)

**Processo produttivo:**

* **Preparazione del filamento**: il PVDF-TrFE viene verificato e essiccato per evitare difetti causati da umidità.
* **Configurazione stampante 3D**: parametri tipici: estrusione a 220–260 °C, piatto riscaldato 80–110 °C; slicing orientato in funzione delle sollecitazioni meccaniche previste.
* **Deposizione strato per strato**: monitoraggio della deposizione per garantire adesione e uniformità.
* **Raffreddamento controllato e rimozione**: si evita stress termico o deformazioni.
* **Post-processing**:
* **Poling**: applicazione di campo elettrico 50–100 MV/m a 60–100 °C per l’orientamento molecolare.
* **Elettrodizzazione**: mediante tecniche come serigrafia d’argento, sputtering o film adesivi.
* **Verifica finale**: controllo della continuità degli elettrodi e misure preliminari della risposta piezoelettrica.

## PZT – Stampa SLA/DLP con resine composite

**Tecnica di riferimento:** per materiali ceramici come il **PZT**, le tecnologie **SLA (Stereolithography)** e **DLP (Digital Light Processing)** offrono massima precisione e aderenza alle microgeometrie.

**Vantaggi:**

* Elevata **risoluzione** e definizione delle superfici
* Possibilità di strutture **multistrato complesse**
* Adatti a sensori in **sistemi meccanici integrati**
* **Criticità:**
* Controllo della **viscosità** della resina per evitare difetti
* Limitata disponibilità di **resine fotopolimeriche piezoelettriche**

**Processo produttivo:**

* **Preparazione della resina composita**: miscelazione omogenea tra resina liquida e nanoparticelle di PZT (tramite ultrasuoni o agitazione magnetica).
* **Setup stampante SLA/DLP**: impostazione della geometria CAD e dei parametri di esposizione luminosa.
* **Stampa additiva strato per strato**: fotopolimerizzazione controllata con laser (SLA) o proiettore UV (DLP).
* **Post-processing**:
* Lavaggio con solvente (es. isopropanolo)
* Seconda esposizione UV per polimerizzazione completa
* **Poling ed elettrodizzazione**: simile al PVDF, con orientamento dipolare e metallizzazione superficiale.
* **Collaudo finale**: test piezoelettrico e verifica meccanica.

## PZT – Stampa FDM con filamenti caricati

**Alternativa accessibile:** se disponibili, i **filamenti termoplastici caricati con nanoparticelle di PZT** consentono l’uso della tecnica FDM anche per materiali ceramici.

**Vantaggi:**

* Facilità di stampa e gestione
* Buona **scalabilità produttiva**, ideale per laboratori e prototipazione

**Criticità:**

* Limitata **percentuale di carico ceramico** → minore risposta piezoelettrica
* Rischio di **ostruzioni dell’ugello** e difetti morfologici

**Processo produttivo:**

* **Essiccazione del filamento PZT** e caricamento nella stampante FDM
* **Stampa parametrizzata** con temperature simili al PVDF-TrFE
* **Monitoraggio** costante della deposizione per evitare blocchi e difetti
* **Poling ed elettrodizzazione** secondo le modalità standard
* **Valutazione della qualità** geometrica e della risposta sensoriale

## Confronto

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Materiale** | **Tecnica consigliata** | **Precisione** | **Flessibilità geometrica** | **Sensibilità piezoelettrica** | **Scalabilità** |
| PVDF-TrFE | FDM | Media | Alta | Buona | Alta |
| PZT (resina) | SLA / DLP | Alta | Alta | Ottima | Media |
| PZT (filamento) | FDM | Bassa | Media | Limitata | Alta |

La scelta della tecnica deve essere guidata dalle **prestazioni attese**, dalla **complessità geometrica richiesta**, e dalla **compatibilità con il sistema finale** in cui il sensore sarà integrato.

## Materiali Raccomandati per gli altri componenti

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Componente | Materiale | Motivazione Tecnica |
| Elemento piezoelettrico | Polivinilidenfluoruro (PVDF) | Flessibilità, spessore ridotto, stampabilità, idonei per superfici irregolari |
| Struttura e supporto | Polimeri tenaci (Nylon PA12, PEEK, ULTEM) o resine rinforzate | Elevata resistenza meccanica, chimica e termica; piena compatibilità con stampa 3D |
| Schermatura esterna | Metalli stampabili (acciaio inox, titanio) o polimeri conduttivi compatibili con processi additivi | Protezione da interferenze elettromagnetiche, vibrazioni e agenti atmosferici |
| Elettronica integrata | PCB flessibili, inchiostri conduttivi stampabili (substrati stampabili) | Facilità di integrazione e adattabilità a forme complesse |

### Tecnologie Produttive Compatibili

Stampa 3D Polimerica:

* *SLS*: ideale per Nylon PA12
* *SLA*: adatta a resine tecniche
* *FDM*: compatibile con PEEK e ULTEM

Stampa Metallica:

* *SLM/DMLS*: per componenti strutturali e schermature metalliche

Stampa Funzionale:

* *Inkjet*: per deposizione di inchiostri conduttivi e piezoelettrici basati su PVDF

Soluzioni Ibride:

* Applicazione diretta di film piezoelettrici su componenti stampati in 3D

1. **Strategie Progettuali e Decisione Finale**

## Strategie progettuali e valutazioni

Nel contesto attuale, AB Industrietechnik ha espresso l’interesse nel valutare differenti strategie per l’approvvigionamento o la produzione del sensore, con l’obiettivo di:

* Ottimizzare il costo totale di produzione
* Ridurre il time-to-market
* Garantire un elevato livello di qualità tecnica e affidabilità operativa
* Eventualmente internalizzare competenze strategiche ad alto valore aggiunto

La valutazione ha preso in considerazione tre possibili approcci alternativi:

* Acquisto di un sensore piezoelettrico commerciale
* Ricorso a soluzioni “off-the-shelf” presenti sul mercato, da fornitori di componenti elettronici/sensoristici.
* Sviluppo interno integrale del sensore
* Progettazione e produzione del sensore (elemento sensibile + supporto + interfacciamento elettrico) a cura dell’azienda, internamente o in collaborazione con laboratori e centri di ricerca.
* Sviluppo interno del sensore ma produzione affidata ad un’azienda terza

**Modello "co-design & build-to-spec":** l’azienda mantiene la responsabilità del progetto e delle specifiche funzionali, mentre un partner esterno si occupa della realizzazione fisica dell’elemento sensibile.

L’analisi ha considerato i seguenti criteri tecnico-economici:

|  |  |
| --- | --- |
| **Parametro** | **Descrizione** |
| **Costi diretti e indiretti** | Costo unitario, attrezzaggio, progettazione, approvvigionamento, logistica |
| **Tempi di realizzazione** | Tempo di sviluppo, testing, approvvigionamento |
| **Qualità tecnica e prestazionale** | Sensibilità, risposta in frequenza, stabilità, robustezza |
| **Controllo su design e materiali** | Capacità di adattare il sensore alle condizioni operative specifiche |
| **Innovazione e proprietà intellettuale** | Possibilità di brevettazione, know-how interno, libertà da vincoli commerciali |
| **Rischio tecnologico e produttivo** | Complessità di sviluppo, possibilità di failure in fase industriale |
| **Flessibilità e scalabilità produttiva** | Adattabilità a diversi formati/progetti, produzione su scala medio-grande |

## Analisi delle opzioni

* + 1. **Opzione 1 – Acquisto di sensore piezoelettrico commerciale**

**Vantaggi:**

* Rapidità di implementazione: sensori standard sono immediatamente disponibili sul mercato.
* Nessun investimento R&D (ricerca e sviluppo) richiesto a breve termine.
* Elevata compatibilità con sistemi elettronici commerciali.

**Svantaggi:**

* Scarsa adattabilità funzionale: i sensori standard non sono ottimizzati per condizioni critiche di vibrazione/rumore come nei flussometri VORTEX.
* Limitato controllo qualitativo: non è possibile intervenire su materiali, geometrie o frequenza di risonanza.
* Dipendenza da fornitori esterni: sia per il supporto tecnico che per le forniture future.
* Costo unitario costante nel tempo, poco ottimizzabile con volumi di produzione crescenti.

**Conclusione:** approccio utile solo in fase prototipale o per test di laboratorio. Inadatto per un prodotto di serie ad alta specializzazione.

* + 1. **Opzione 2 – Sviluppo interno completo del sensore**

**Vantaggi:**

* Controllo totale su ogni aspetto funzionale: geometria, supporto meccanico, interfacce elettriche, risposta dinamica.
* Possibilità di adottare materiali innovativi (es. PVDF per flessibilità, PZT per sensibilità, compositi stampabili).
* Ottimizzazione strutturale avanzata (FEM, CFD) per integrare il sensore nel corpo del flussometro.
* Valorizzazione interna del know-how tecnico e possibile brevettazione del design.

**Svantaggi:**

* Alti costi iniziali: richiede competenze multidisciplinari (materiali, microelettronica, stampa 3D, meccanica delle vibrazioni).
* Tempi di sviluppo medio-lunghi (6–12 mesi), con incertezza sugli esiti sperimentali.
* Necessità di certificazioni tecniche per il sensore, con costi annessi.

**Conclusione:** soluzione valida in ottica di lungo termine e consolidamento industriale, ma poco efficiente per una prima industrializzazione, se non si dispone già di una struttura avanzata di R&D interna.

* + 1. **Opzione 3 – Sviluppo interno del sensore ma produzione affidata ad un’azienda terza**

**Vantaggi:**

* Compromesso ideale tra controllo e flessibilità: l’azienda mantiene la definizione delle specifiche tecniche, seleziona i materiali piezoelettrici e gestisce le interfacce.
* Tempi contenuti: 2–4 mesi per validazione e prototipazione industriale.
* Personalizzazione garantita: il sensore viene progettato per risuonare in una banda di frequenza specifica, con materiali e geometrie compatibili con il corpo flussometrico.
* Possibilità di utilizzare tecniche di manifattura additiva (stampa 3D, coating su supporti flessibili, film serigrafici) tramite terzisti con esperienza certificata.
* Riduzione del rischio tecnico e ottimizzazione dei costi nel medio termine.
* Mantenimento del know-how proprietario attraverso NDA (accordo di riservatezza) e clausole di proprietà intellettuale contrattuale.

**Svantaggi:**

* Richiede un partner affidabile e specializzato in sensoristica custom.
* Meno indipendenza produttiva rispetto alla produzione in-house.
* Possibili vincoli contrattuali di esclusiva o royalties.

**Conclusione**: in ogni caso, risulta essere l’opzione più equilibrata in fase di prima industrializzazione, soprattutto se il sensore deve rispondere a specifici requisiti funzionali e strutturali. Ideale per il lancio del prodotto sul mercato con prestazioni ottimali e costi controllati.

## Confronto delle strategie

Tabella con dei **numeri assegnati a ciascun criterio**, per facilitare un confronto quantitativo tra le tre strategie: Acquisto (A), Sviluppo interno (B) e Produzione terzi (C). I punteggi vanno da **1 (scarso)** a **5 (eccellente)**.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Criterio | Acquisto (A) | Sviluppo interno (B) | Produzione terzi (C) |
| Costi iniziali | 5 (bassi) | 1 (elevati) | 3 (medi) |
| Tempo sviluppo | 5 (minimo) | 1 (lungo) | 3 (medio) |
| Qualità personalizzata | 1 (no) | 5 (totale) | 5 (totale) |
| Controllo su design | 1 (nessuno) | 5 (totale) | 4 (elevato) |
| Proprietà intellettuale | 1 (nessuna) | 5 (totale) | 3 (parziale) |
| Scalabilità | 5 (alta) | 2 (bassa) | 5 (alta) |
| Rischio tecnico | 5 (basso) | 1 (alto) | 3 (moderato) |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| * + 1. **Osservazioni** * **Produzione terzi (C)** ha il punteggio più alto, suggerendo un buon equilibrio tra controllo, qualità e scalabilità. * **Acquisto (A)** è vantaggioso per costi e tempi, ma sacrifica controllo e proprietà. * **Sviluppo interno (B)** offre il massimo controllo e qualità, ma è costoso e rischioso.  |  |  | | --- | --- | | Strategia | Punteggio Totale | | Acquisto (A) | 23 | | Sviluppo interno (B) | 20 | | Produzione terzi (C) | 26 | |

## Conclusione e raccomandazione finale

Dall’analisi tecnica, economica e strategica condotta, si evidenzia che la terza opzione (sviluppo interno del sensore ma produzione affidata ad un’azienda terza) risulta la strategia più efficiente e sostenibile, in particolare per la fase di industrializzazione iniziale del prodotto.

Consente di:

* Ottenere un sensore su misura per condizioni operative complesse (turbolenze, contaminazioni, vibrazioni)
* Sfruttare la stampa 3D o tecniche ibride di fabbricazione per realizzare un corpo integrato con funzionalità ottimizzate
* Mantenere un buon livello di controllo sul design, sui materiali e sulla qualità
* Minimizzare i tempi e i costi iniziali rispetto allo sviluppo interno
* Poter, in futuro, internalizzare la produzione nel caso in cui i volumi lo giustifichino

## Possibili partner commerciali

https://www.3ditaly.it/azienda/   
**Chi è 3DiTALY?**

* Centro di riferimento in Italia per la stampa 3D di qualità industriale.
* Offre servizi sia a aziende che a enti pubblici.
* Propone una vasta gamma di soluzioni: stampa 3D su commissione, vendita di stampanti 3D professionali, filamenti e altri materiali tecnici.
* Seleziona e distribuisce le migliori tecnologie di stampa 3D sviluppate a livello internazionale.

**Cosa offre?**

* **Service di stampa 3D professionale**: stampa di prototipi personalizzati, pezzi funzionali e componenti in serie.
* **Consulenza e progettazione**: supporto nella fase di progettazione CAD e ottimizzazione per la stampa 3D.
* **Vendita macchinari**: stampanti 3D professionali per uso aziendale, anche con materiali avanzati.
* **Materiali**: filamenti, resine e polveri anche per applicazioni industriali e settori specializzati.
* **Formazione**: corsi e workshop per aziende e professionisti che desiderano approfondire le tecniche della stampa 3D.

**Sedi:**

**Roma ( RM )**

Circonvallazione Casilina, 137/139 - 00176

**Bollate (MI)**

Via IV Novembre 92 - Edificio M - 20021

**Torino (TO)**

Via Giovanni Napione, 20/c - 10124

**Padova (PD)**

Via Guido Reni 77/f - 35134

**Ragusa (RG)**

Zona Industriale I Fase, Viale 7, n.8

**Reggio Calabria (RC)**

Via Locri, 8 - 89128

**Immagine che contiene Carattere, Elementi grafici, logo, Blu elettrico

Il contenuto generato dall'IA potrebbe non essere corretto.** https://www.fastparts.it/

**Chi è FastParts?**

* Azienda italiana specializzata nella progettazione e produzione tramite stampa 3D, pensata per l’industria moderna e la transizione verso l’Industria 5.0.
* Offre servizi che vanno dalla progettazione CAD al reverse engineering, dalla modellazione 3D alla stampa 3D, fino all’ottimizzazione topologica.
* Il team di FastParts guida i clienti nella scelta delle soluzioni più adatte e convenienti per ogni settore.

**Cosa offre?**

* **Servizi di stampa 3D professionale**: produzione di prototipi, parti funzionali, piccole serie e componenti personalizzati su richiesta.
* **Consulenza**: supporto nella progettazione e ottimizzazione dei modelli per la stampa 3D.
* **Post-processing**: finitura e lavorazioni successive alla stampa per ottenere il massimo dalla parte prodotta.
* **Formazione**: corsi specifici sulla stampa 3D e sulle tecnologie additive.
* **Reverse engineering**: digitalizzazione e riprogettazione di componenti esistenti.

**Sede:**

**Ruvo di Puglia (BA)**

Via Guido Rossa, 21 - 70037

https://pmfactory.it/

**Chi è PM Factory?**

* È una realtà italiana specializzata in servizi di stampa 3D e produzione additiva, rivolta principalmente all’industria e alla prototipazione avanzata.
* Offre soluzioni complete dalla progettazione alla produzione, supportando aziende nella realizzazione di prototipi e parti funzionali.
* Si distingue per l’utilizzo di tecnologie innovative e materiali avanzati, adatti anche alle esigenze di settori specialistici.

**Cosa offre?**

* **Service di stampa 3D professionale**: produzione di prototipi, componenti personalizzati, piccole serie e parti funzionali.
* **Consulenza tecnica**: supporto nella progettazione CAD, ottimizzazione dei modelli per la stampa 3D e scelta del materiale più idoneo.
* **Post-processing**: servizi di finitura e lavorazioni successive alla stampa.
* **Sviluppo prodotto**: affiancamento nella fase di industrializzazione e validazione dei pezzi stampati.
* **Formazione**: corsi e aggiornamenti per aziende e professionisti sulla stampa 3D e sull’adozione delle tecnologie additive.

**Sede:**

**Bologna (BO)**

Viale Alcide De Gasperi, 26 - 40132

https://www.arkema.com/

**Chi è Arkema?**

* È un’azienda chimica globale, leader nella produzione di materiali avanzati e specialità chimiche, tra cui polimeri ad alte prestazioni utilizzati in stampa 3D.
* Riconosciuta per l’innovazione nella chimica dei materiali, in particolare nei polimeri fluorurati e tecnopolimeri.
* È tra i principali produttori di **PVDF (Kynar®)**, utilizzato per applicazioni industriali, piezoelettriche e nella stampa 3D.

**Cosa offre?**

* **Materiali avanzati per stampa 3D**: PVDF (Kynar®), PA, PEKK, resine speciali e altri polimeri ad alte prestazioni per tecnologie FDM, SLS, SLA e altre.
* **Soluzioni per l’industria**: materiali per automotive, elettronica, medicale, aerospaziale, sensoristica e applicazioni piezoelettriche.
* **Supporto tecnico**: consulenza per la scelta del materiale, sviluppo di applicazioni su misura, collaborazione con stampatori e service di stampa 3D.
* **Ricerca e sviluppo**: focus su nuovi materiali e innovazione per additive manufacturing e settori specializzati.

**Sede:**

**Milano (MI)**

Via Caldera, 21 - 20153

**Immagine che contiene Carattere, Elementi grafici, testo, grafica

Il contenuto generato dall'IA potrebbe non essere corretto.** https://visionminer.com/

**Chi è Vision Miner?**

* È un’azienda statunitense specializzata nella stampa 3D professionale con materiali ad alte prestazioni, pensata per applicazioni industriali, ingegneristiche e di ricerca.
* Fornisce soluzioni hardware (stampanti 3D professionali), materiali tecnici e servizi di consulenza per aziende e laboratori.

**Cosa offre?**

* **Stampanti 3D industriali**: hardware specifico per la stampa di materiali come PEEK, PEI (Ultem), PPSU, PVDF e altri polimeri ad alte prestazioni.
* **Materiali tecnici**: filamenti certificati per applicazioni in campo aerospaziale, medicale, automotive e industriale, tra cui anche PVDF per stampa 3D FDM.
* **Consulenza e supporto**: assistenza nella selezione di stampanti, parametri di stampa, scelta dei materiali e ottimizzazione del processo produttivo.
* **Risorse e formazione**: tutorial, guide e assistenza tecnica per aziende che vogliono implementare la stampa 3D con materiali high-performance.

**Sede:**

**Santa Ana (CA)**

3401 W MacArthur – 92704

# Prototipazione e validazione

## Introduzione

Nel presente capitolo si descrive in modo integrato tutte le fasi necessarie per progettare, produrre, testare e ottimizzare un sensore piezoelettrico flessibile basato su PVDF.

Il documento copre i seguenti aspetti: definizione dei requisiti, scelta dei materiali e delle tecnologie, progettazione CAD, preparazione dei materiali, stampa 3D, assemblaggio, campagna di test, analisi dei dati e iterazioni successive.

## Definizione dei requisiti tecnici

La prima fase per la realizzazione del prototipo riguarda l’individuazione delle prestazioni richieste:

* **Intervallo di frequenze**: da 10 a 5000 Hz
* **Spessore**: 0.60 mm +/- 0.05mm
* **Area sensibile**: adattabile al diametro dei condotti di misura
* **Temperatura operativa**: da –20 °C a +80 °C
* **Pressione**: fino a 2 bar
* **Compatibilità fluidi**: aria, acqua e gas non corrosivi

## Scelta dei materiali e tecnologie

La scelta del materiale è una delle fasi più determinanti per il successo:

* **PVDF ad elevata purezza** (≥99%), PVDF ad elevata purezza (≥99%), fornito in filamento ottimizzato per stampa. La fase β non è garantita a monte ( richiede trattamenti specifici come stretching meccanico, annealing o poling ) e va verificata tramite analisi FTIR/XRD; in alternativa, il copolimero P(VDF-TrFE) offre una frazione elettroattiva già intrinseca.
* **Possibilità di blend**: nanocompositi PVDF + BaTiO₃/ZnO/CNT o uso del copolimero P(VDF-TrFE).
* **Tracciabilità**: scegliere fornitori affidabili, richiedere sempre schede tecniche, dati di cristallinità (da FTIR/XRD) e certificati di conformità.

Come supporto e rivestimento sono scelti polimeri tecnici come ULTEM o Nylon PA12, caratterizzati da elevata resistenza meccanica, termica e chimica.

## Preparazione del filamento di PVDF

|  |  |
| --- | --- |
| **Fase** | **Attività** |
| **Selezione filamento** | diametro 1,75 mm o 2,85 mm, tolleranza ±0,05 mm, bobine 250–1000 g |
| **Essiccazione** | forno ventilato a 100-120 °C per 8–12 ore, per ridurre umidità <0,05% e prevenire bolle in estrusione. |
| **Conservazione** | contenitore ermetico con gel di silice |
| **Controllo qualità** | verifica visiva, misurazione diametro con calibro digitale, e prove FTIR/XRD per verificare cristallinità e frazione β |

Questa procedura riduce i difetti di estrusione e garantisce stabilità dimensionale del filamento. La formazione di fase β non dipende dalla sola essiccazione, ma da successivi trattamenti (stiro, annealing mirato, poling)

## Selezione e collaborazione con aziende per la stampa 3d

La stampa di PVDF non è comune e richiede attrezzature molto specifiche. Il processo di scouting del partner industriale deve essere metodico.

## Progettazione CAD e stampa 3D

La progettazione CAD non è solo la realizzazione di un modello geometrico: serve a definire la zona piezoelettrica, lo spessore, la posizione e la geometria degli elettrodi, la direzione delle tensioni di lavoro, l’alloggiamento e la compatibilità con i vincoli di stampa e assemblaggio. In questa fase si devono già considerare:

* **Vincoli meccanici** (flessibilità, robustezza, dimensioni massime/minime)
* **Vincoli elettrici** (distanza tra elettrodi, aree attive/passive)
* **Compatibilità con i processi post-stampa** (poling, deposizione elettrodi, incapsulamento)

Il file viene esportato in STEP e STL e stampato con le seguenti impostazioni:

* **Temperatura di estrusione**: 240–265°C. Deve essere ottimizzata per evitare degradazione termica, che avviene a temperature maggiori di 350°C. (monitorare odore e colore del filamento).
* **Letto riscaldato**: 100–120°C. Evita distacchi e warping.
* **Diametro ugello: ≥** 0,4 mm
* **Spessore layer:** 0,1-0.2 mm
* **Camera chiusa e riscaldata**: 50–80°C. Previene shock termici.
* **Velocità di stampa**: 20–40 mm/s.
* **Altezza del layer**: 0.1–0.2 mm. Layer più sottili migliorano la densità e l’uniformità microstrutturale.
* **Direzione di stampa**: la risposta meccanica è massima lungo la direzione di allineamento dei layer. La progettazione CAD deve tenerne conto.

Il primo lotto di 5–10 prototipi serve per la verifica dimensionale.

Controlli di qualità post-stampa:

* **Ispezione visiva e ottica**: cerca bolle, delaminazioni, warping, cavità.
* **Analisi microstrutturale:** verifica la frazione di fase β e la coesione tra i layer.
* **Prove meccaniche**: test di resistenza a trazione, flessione e compressione su campioni di test (secondo ISO/ASTM).

## Realizzazione del prototipo e trattamenti post-stampa

Dopo stampa si procede con:

1. Definizione della zona attiva piezoelettrica
2. Deposizione elettrodi in oro o argento (50–100 nm) tramite sputtering, serigrafia o stampa inkjet;
3. Trattamenti termoelettrici: poling a 7–12 kV a 100 μm, 90–100 °C per 30–60 min. In seguito effettuo annealing a temperature > 90 °C per 1–2 h;
4. Assemblaggio: saldatura di fili da 50–100 μm e coating protettivo;
5. Controllo qualità: esame microscopico, verifica di continuità e analisi SEM o FTIR.

I trattamenti termoelettrici includono:

* **Polarizzazione del PVDF (poling)**

Il poling è la fase chiave per rendere il materiale realmente piezoelettrico. Si tratta di un processo fisico-chimico che orienta i dipoli all’interno del PVDF:

**Setup tipico**:

* Sensore posizionato tra elettrodi metallici.
* Inserimento in forno controllato a 90–100°C.
* Applicazione di campo elettrico 70–120 MV/m (es. 7–12 kV per 100 µm di spessore).
* Durata: 30–60 minuti (può aumentare per spessori maggiori o blend additivati).
* Raffreddamento lento sottocampo per fissare l’orientamento.

**Sicurezza**:

* + Si utilizza strumenti HV con interlock, guanti dielettrici, barriere di protezione.
  + Si isola l’area di lavoro e si monitora la corrente di perdita (che deve essere bassa e stabile).

**Verifica post-poling**:

* Si misura la costante piezoelettrica d33 tramite piezometro .
* Si eseguono test di isteresi e stabilità del segnale a distanza di giorni/settimane.
* **Annealing**: a temperature > 90 °C per 1–2 ore

Annealing è un trattamento termico, dove il PVDF‑TrFE stampato in FDM, viene riscaldato a una temperatura inferiore al suo punto di fusione e mantenuto per un certo tempo. Questo permette alle catene polimeriche di riorientarsi, di rilassare tensioni interne e di formare cristalliti più ordinati, migliorando proprietà meccaniche ed elettriche.

**Intervallo termico ottimale**  
L’annealing deve avvenire tra la temperatura di Curie (Tc ≃ 90 °C) e il punto di fusione (150–154 °C), per massimizzare la formazione della fase β senza far sciogliere il materiale

**Setup e condizioni operative**

* + **Supporto isolante:** campione fissato su supporto ceramico o altro materiale non conduttivo per garantire isolamento elettrico e termico.
  + **Forno termostatico:** impostato su 90–120 °C (±2 °C), ovvero leggermente sopra Tc ma ben sotto Tm.
  + **Rampa termica:** riscaldamento e raffreddamento a 2–5 °C/min, per evitare shock termici e favorire una cristallizzazione uniforme.

**Procedure di sicurezza**

* + **Dispositivi di protezione:** guanti resistenti al calore, occhiali protettivi.
  + **Controlli forno:** termocoppie di sicurezza e over‑temperature cut‑off.
  + **Ambiente di lavoro:** area ben ventilata, senza materiali infiammabili nelle vicinanze.

**Verifiche post‑annealing**

* + **DSC:** confronto dell’entalpia di fusione (ΔH) prima/dopo, per valutare l’aumento della cristallinità totale.
  + **XRD:** crescita del picco β intorno a 2θ ≃ 19.9° conferma l’incremento della fase β polare.
  + **d₃₃:** misura con piezometro → attesi valori da ~20 pC/N fino a ~50 pC/N o più, a seconda dello spessore e del blend.
  + **Stabilità:** ripetere d₃₃ e test di isteresi dopo giorni o settimane per controllare eventuale rilassamento del segnale.
* **Deposizione degli elettrodi**

La performance del sensore dipende anche dalla qualità degli elettrodi e dalla loro adesione al PVDF.

**Metodi di deposizione**:

* + **Vernici/paste conduttive**: applicazione manuale, adatta a prototipi e piccole geometrie. Resistenza elevata, ma ottima flessibilità.
  + **Evaporazione/sputtering**: per grandi superfici, alta uniformità, bassa resistenza. Permette pattern precisi (anche <200 nm di spessore).
  + **Serigrafia**: ideale per pattern complessi o lotti di piccola/media scala.

**Preparazione del substrato**:

* + Pulizia con plasma O₂ o solventi per migliorare l’adesione.
  + Mascheratura con stencil/pellicola per pattern complessi (es. elettrodi inter-digitati).

**Pattern degli elettrodi**:

* + Geometrie a sandwich (piani opposti) per sollecitazione normale.
  + Pattern interdigitati per risposta a flessione o per aumentare la superficie attiva.
  + Patch multipli per sensori multi-asse o distribuiti.

NOTA: La scelta del pattern deve essere guidata anche da simulazioni FEM per massimizzare la sensibilità e ridurre dispersioni del campo elettrico.

**Assemblaggio:**

L’assemblaggio finale di un sensore piezoelettrico in PVDF‑TrFE integra il film polimerico già polarizzato con tutti gli elementi funzionali e protettivi necessari per trasformarlo in un dispositivo utilizzabile: si procede al collegamento dei fili conduttori ultrafini, all’applicazione di un rivestimento isolante per proteggere il componente da agenti esterni e a una serie di controlli qualitativi (visivi, elettrici e microscopici) per garantire l’integrità strutturale, la continuità dei contatti e la stabilità delle prestazioni nel tempo. Consiste nei seguenti passaggi:

**1. Connessioni elettriche:** Collegare i fili con colla conduttiva (silver epoxy) o con strisce metalliche sottili. Non saldare mai direttamente sul film: se serve saldare, farlo su un cavetto o su un piccolo PCB collegato al sensore.

**2. Coating protettivo:** sottile strato isolante (es. parylene C 3–10 µm o resina flessibile) per protezione da umidità e abrasione, mantenendo la flessibilità.

**3. Controllo qualità**

* **Esame microscopico ottico** (×50–×200): prima verifica di eventuali micro-fratture nel film, uniformità del coating e corretto posizionamento dei fili.
* **Prova di continuità elettrica**: La prova di continuità elettrica consiste nel misurare la resistenza di contatto tra filo ed elettrodo e verificarne la stabilità (<±5% di variazione) anche dopo sollecitazioni meccaniche e termiche.
* **Spettroscopia FTIR**: L’analisi FTIR post-assemblaggio serve a confermare l’integrità del P(VDF-TrFE), verificando i picchi caratteristici della fase β (840 cm⁻¹) e l’assenza di bande anomale dovute a contaminazioni da resine o solventi.

## Campagna di test

L’infrastruttura di laboratorio deve includere:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Strumentazione** | **Specifica** | |
| **Banco vibrazioni** | 1–5000 Hz | |
| **Banco di flusso** | condotto Ø20–40 mm, pompa e regolatore | |
| **Oscilloscopio** | >100 MHz >12 bit | |
| **Amplificatore di carica** | compatibile con PVDF | |
| **Convertitore A/D** | acquisizione con Python o LabVIEW | |
| **Camera climatica** | temperatura e umidità controllate | |
| **Termocamera** | monitoraggio hot-spot termici | |
|  | |

I test principali sono:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Test** | **Parametri** | **Strumentazione** | **Criteri di successo** |
| **Funzionalità di base** | 10–50 Hz, ampiezza 0,1–0,5 g | Shaker + oscilloscopio | Output ≥ 5 mV senza distorsioni |
| **Calibrazione sensibilità** | 10–500 Hz step 50 Hz, 0,05–1 g | Shaker + accelerometro di riferimento | Linearità ±10% |
| **Rumore di fondo** | nessuna vibrazione | Oscilloscopio (FFT) | Rumore < 1 mV RMS |
| **Test termico** | –20 → +80 °C (step 20 °C, 30 min per step) | Camera climatica | Variazione sensibilità <15% |
| **Test umidità** | 85% RH per 72 h a 40 °C | Camera climatica | Nessuna delaminazione; output ±10% |
| **Durabilità ciclica** | 100 Hz, 0,5 g, 1·10^6 cicli | Shaker + data logger | Degrado sensibilità ≤10% |
| **Compatibilità con flusso reale** | 0,5–5 m/s aria/acqua su condotto Ø20–40 mm | Banco di flusso + flussometro di riferimento | Correlazione >90% con sensore di riferimento |

Durante ogni test si registrano:

* Output elettrico (mV) in funzione di frequenza, ampiezza e temperatura;
* Sensibilità (mV/g) e stabilità termica (% variazione);
* Rapporto segnale‑rumore (SNR) e rumore di fondo;
* Eventuali difetti visivi (delaminazioni, crepe).

## Analisi dei risultati e report finale

I dati vengono elaborati in grafici tensione vs frequenza e tensione vs temperatura, e analizzati per calcolare il rapporto segnale‑rumore e confrontati con i requisiti iniziali e la letteratura.

## Passi successivi e iterazioni

In base ai risultati si procederà con:

1. revisione dei gap tra risultati e requisiti
2. ottimizzazione geometrica e parametri di stampa
3. sperimentazione di blend come PVDF-TrFE
4. validazione in condizioni operative reali
5. preparazione della documentazione per certificazione IEC 60068 e ISO 10993

# Analisi dei Costi-Benefici

## Obiettivo

In questo capitolo si intende procedere con l’analisi dei costi relativi al sensore piezoelettrico in PVDF stampato in 3D FDM. L’analisi si propone di quantificare i costi per ogni singola componente: stampa e materiali, logistica, e progettazione interna. Mediante l’uso di fornitori nazionali ed esteri, si utilizzerà un modello di costo modulare per calcolare il costo unitario in funzione della grandezza del lotto e le condizioni di fornitura. Questo modello permette di stimare costi di fornitura, approvvigionamento e spesa.

## **Caratteristiche tecniche del sensore**

Dimensioni nominali

* Lunghezza: 13,0 mm ± 0,1 mm
* Larghezza: 1,60 mm con tolleranza 0 / –0,10 mm
* Spessore totale: 0,60 mm ± 0,05 mm

Grandezze derivate

* Volume: 13 × 1,60 × 0,60 = 12,48 mm³ = 0,01248 cm³
* Densità PVDF: 1,78–1,80 g/cm³
* Massa pezzo: 0,01248 × 1,78 ≈ 0,022 g

Il sensore, avendo una massa di circa 0.022 g, ha un costo di produzione ridotto, e di conseguenza sul prezzo finale unitario.

## Materiale impiegato: PVDF

Costo materiale

* Prezzo filamento: 100–160 € per bobina da 500 g (0,20–0,32 €/g).
* Costo per pezzo: 0,022 g × 0,23 €/g ≈ 0,005 € (+30% scarto = 0,0065 €).

Il costo del materiale PVDF per singolo sensore è trascurabile (<0,01 €). Anche includendo un margine di scarto del 30 %, il contributo rimane inferiore al 1 % del costo totale unitario. Questo rende sostenibile l’impiego di un polimero avanzato come il PVDF senza incidere rilevanti sul budget complessivo.

## Aziende analizzate

**Confronto aziende**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Azienda** | **Sede** | **Modalità preventivo** | **Note PVDF** | **Spedizione (Bressanone, ≤1 kg)** |
| **3DiTALY** | Roma + rete in Italia | Richiedi preventivo | Verificare disponibilità e compatibilità PVDF | ~9,99 € |
| **FastParts** | Ruvo di Puglia (BA) | Richiedi preventivo | Verificare disponibilità e compatibilità PVDF | ~9,99 € |
| **PMFACTORY** | Bologna | Richiedi preventivo | Verificare disponibilità e compatibilità PVDF | ~9,99 € |
| **Arkema/Easy3D** | Francia + partner UE | Richiedi preventivo | Specialisti PVDF (Kynar) | ~34,99 € |
| **Vision Miner** | California (USA) | Richiedi preventivo | Verificare disponibilità e compatibilità PVDF | ~49,99€+ IVA/dazi |

Nota: i costi sono stime su tariffe pubbliche.

## Modello di costo di realizzazione

**Formule base**

1. **Materiale (C\_mat)** = N × m × P\_g × (1 + scarto)
2. **Stampa (C\_stampa)** = max(C\_min, t\_mac × P\_h\_service)
3. **Trasporto (C\_trasp)** = n\_sped × P\_sped
4. **Progettazione (C\_proj)** = h\_proj × P\_h\_interno
5. **Extra (C\_extra)** = test, certificazioni, imballaggi (se presenti)

**Legenda delle variabili utilizzate:**

* **N**: Numero di pezzi nel lotto.
* **m**: Massa del singolo pezzo (in grammi), calcolata in base al volume e alla densità del materiale (PVDF).
* **P\_g**: Prezzo del materiale per grammo (€/g), determinato dal costo al kg del filamento.
* **scarto**: Percentuale extra considerata per compensare eventuali sprechi dovuti a brim, supporti, fallimenti di stampa o calibrazioni.
* **C\_min**: Costo minimo d’ordine imposto dal service per coprire setup macchina, slicing, e gestione ordine.
* **t\_mac**: Tempo complessivo di stampa (in ore) per il lotto.
* **P\_h\_service**: Tariffa oraria del service di stampa (€/h).
* **n\_sped**: Numero di spedizioni previste (tipicamente una, se il materiale viene fornito dal service).
* **P\_sped**: Costo per ciascuna spedizione, comprensivo di imballo, assicurazione ed eventuali dazi se extra-UE.
* **h\_proj**: Ore interne impiegate per progettazione, modellazione CAD, preparazione file e documentazione.
* **P\_h\_interno**: Costo orario del personale tecnico interno (€/h)
* **C\_extra**: Voce opzionale per spese aggiuntive come test di laboratorio, certificazioni, o packaging speciali.

**Costi unitari**

* **Totale lotto:** C\_tot = C\_mat + C\_stampa + C\_trasp + C\_proj [+ C\_extra]
* **Costo unitario:** C\_unit = C\_tot / N

**Parametri adottati**

* m = 0,022 g
* P\_g = 0,23 €/g
* Scarto = 30%
* P\_h\_service (Italia) = 20 €/h
* C\_min = 30–50 €
* P\_sped ITA = 9,99 € / FRA = 34,99 € / USA = 49,99 € + IVA/dazi
* h\_proj = 6 h
* P\_h\_interno = 30,9 €/h

## Stima costi per lotto

**Service italiani**

Si osserva che nei fornitori italiani (come 3DiTALY, FastParts o PMFACTORY), l'incidenza dei costi fissi diventa molto rilevante nei lotti di piccole dimensioni, rendendo poco competitivo l'acquisto di un singolo pezzo. Tuttavia, all'aumentare del numero di unità prodotte, si osserva un notevole abbattimento del costo unitario grazie all'effetto scala.

Nel caso di un singolo pezzo, i costi di setup macchina e gestione ordine (costo minimo d'ordine) rappresentano quasi la totalità del prezzo finale. Con un lotto da 100 pezzi, tali costi vengono suddivisi, riducendo drasticamente il costo per unità. Se si arriva a 1.000 unità, il costo unitario può risultare fino a 200 volte inferiore rispetto alla produzione singola, rendendo l'opzione estremamente più efficiente.

La seguente tabella sintetizza i costi stimati per 1, 100 e 1.000 pezzi:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Pezzi** | **C\_mat** | **C\_stampa** | **C\_trasp** | **Totale** | **€/pezzo** |
| 1 | 0,01 | 35,00 | 9,99 | 45,00 | 45,00 |
| 100 | 0,65 | 35,00 | 9,99 | 45,64 | 0,46 |
| 1000 | 6,50 | 190,00 | 9,99 | 206,49 | 0,21 |

nota: I loro siti non indicano un **costo minimo di ordine** specifico, mentre molte aziende simili impongono un minimo tra 30 e 40 euro. Le stime di costo stampa si basano su un tempo medio di 10–12 ore per 1 000 pezzi. Se i tempi effettivi fossero più alti (es. 25 h per lo stesso lotto, considerando setup, scarti e gestione pezzi), il costo stampa raddoppierebbe da 190 € a 500 €. In tal caso, il costo unitario dei service italiani salirebbe da 0,21 €/pezzo a circa 0,30 €/pezzo.

**Arkema – Easy3D**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Pezzi** | **C\_mat** | **C\_stampa** | **C\_trasp** | **Totale** | **€/pezzo** |
| 1 | 0,01 | 40,00 | 34,99 | 75,00 | 75,00 |
| 100 | 0,65 | 40,00 | 34,99 | 75,64 | 0,76 |
| 1000 | 6,50 | 190,00 | 34,99 | 231,49 | 0,23 |

**Vision Miner (USA)**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Pezzi** | **C\_mat** | **C\_stampa** | **Trasporto+dazi** | **Totale** | **€/pezzo** |
| 1 | 0,01 | 128,00 | 80,00 | 208,01 | 208,01 |
| 100 | 0,65 | 128,00 | 80,00 | 208,65 | 2,09 |
| 1000 | 6,50 | 250,00 | 80,00 | 336,50 | 0,34 |

**Due opzioni possibili per Vision Miner:**

* **Pacchetto R&D Basic**: 3.499 $ (~2.978 €) – include supporto ingegneristico, prove di stampa, consulenza tecnica. È un'opzione fuori scala per un singolo micro-pezzo, ma potrebbe essere utile nel caso in cui si voglia avviare uno sviluppo applicativo avanzato. Il costo risulta sproporzionato rispetto all'obiettivo attuale (produrre un micro-sensore):
  + **Rapporto costo/valore**: il pacchetto implica migliaia di euro per servizi accessori che non servono nel caso di un semplice lotto iniziale.
  + **Confronto numerico**: un service italiano stampa 1 pezzo con un minimo d’ordine di circa 30–50 €; qui il pacchetto minimo è di circa 3.000 €, oltre 60 volte più caro.
  + **Quando conviene**: solo se servono attività di ricerca e sviluppo (R&D) su materiali ad alte prestazioni, come il PVDF caricato o polimeri ad alta temperatura. Il pacchetto R&D Basic di Vision Miner include tipicamente: supporto tecnico dedicato nella selezione e ottimizzazione dei parametri di stampa, test funzionali e meccanici su campioni, consulenze ingegneristiche su geometrie complesse, caratterizzazione dettagliata della risposta piezoelettrica, studio del comportamento termico e rilascio di documentazione tecnica avanzata. È indicato in caso di sviluppo applicativo iterativo, prototipazione avanzata o necessità di certificazioni prestazionali.
* **Solo stampa pezzo (ipotesi realistica)**: stampa singola stimata a 150 $ (~128 €) + 42,29 € per la spedizione internazionale. Vanno aggiunti dazi e IVA (~40 € su valore ridotto), portando il totale per 1 pezzo a circa 208 €.

## Esempio completo – Lotto da 100 pezzi

**3DiTALY (Italia)**

* C\_mat = 0,65 €
* C\_stampa = 35,00 €
* C\_trasp = 9,99 €
* C\_proj = 185,40 €
* Totale = 231,04 €
* €/pezzo = 2,31 €

**Arkema – Easy3D**

* Totale = 261,04 €
* €/pezzo = 2,61 €

**Vision Miner**

* Totale = 394,05 €
* €/pezzo = 3,94 €

## Prossimi passi

1. Preparare file definitivo con tolleranze, orientamento e layer height.
2. Inviare preventivo a tutte le aziende: materiale PVDF, quantità, Bressanone, poling.
3. Confrontare offerte su prezzo, tempi, qualità, test.
4. Definire lotto iniziale (consigliato ≥100 pezzi).
5. Organizzare poling e misura coefficiente d33 (interno o esterno).
6. Validare i campioni; se conformi, pianificare lotto più ampio.

## Conclusioni

Dall’analisi emerge chiaramente che 3DiTALY, FastParts e PMFACTORY rappresentano la scelta più efficiente in termini di costo unitario fino a 1 000 pezzi. In particolare, per un lotto da 100 pezzi il prezzo di 2,31 €/pezzo di 3DiTALY è inferiore del 12 % rispetto agli stessi 2,61 €/pezzo di Arkema/Easy3D e del 41 % rispetto ai 3,94 €/pezzo di Vision Miner. Questo gap si mantiene stabile anche per quantitativi maggiori, grazie a setup macchina (35 €/lotto) e spedizioni (9,99 €) fra i più competitivi sul mercato italiano.

Il PVDF Kynar garantito Arkema/Easy3D comporta pure costi di setu e logistica superiori (+5 €/lotto in stampa, +2 5 € in trasporto) che risultano in un prezzo unitario più alto; anche se esso è indicato per lavori che esigono grande tenuta di caratteri di stampa ed uniformità di materiale.

Vision Miner diventa competitivo solo su lotti superiori a 1 000 pezzi, dove il prezzo scende a 0,34 €/pezzo, ma resta comunque più caro di circa il 60 % rispetto ai service italiani a pari quantità. L’opzione di pacchetto R&D (3 499 $) è giustificata esclusivamente in contesti di sviluppo avanzato (test funzionali, caratterizzazione dettagliata, certificazioni), non per produzioni standard.