

# Macchine e meccanismi in fisica e in matematica

Giancarlo Artiano<sup>1,2</sup>, Emilio Balzano<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli, giancarlo.artiano@unicampania.it

<sup>2</sup> Università degli Studi Suor Orsola Benincasa, giancarlo.artiano@unisob.na.it

<sup>3</sup> Università degli Studi di Napoli Federico II, emilio.balzano@unisob.na.it

*Abstract:* Identification and characterization of the interacting systems in the analysis of physical phenomena is a teaching strategy that facilitates: the examination of the significant variables in the evolution of a phenomenon; the distinction between state and interaction variables; the recognition of cause-and-effect relationships. We present educational activities that we have been experimenting with for years at school and university based on the use and design of machines and mechanisms. The activities are framed in a didactic strategy that aims to recognize mathematical and physical principles. Analysis of geometric and motion transformations (i.e. linear vs circular) and transduction processes constitute an opportunity for students to master key concepts of mathematics and physics and to develop, at the same time, articulated technological skills. In mathematics, mechanical drawing machines are useful tools for the study of remarkable curves such as conic sections. In physics, the analysis of the internal working of machines and measurement devices is a great opportunity to clarify the relationship between theoretical entities and measurement processes. In the modeling process, familiarity with machines (old and contemporary) and transducers has a great cognitive value: the mechanical metaphor lies at the heart of every cause-and-effect reasoning and is of the highest importance in physics.

*Keywords:* Transduction, Physics, Mechanism

## 1. Introduzione

Il termine *meccanica*, sia in senso comune, sia in senso teorico-scientifico che pratico-applicativo, ha come referente diretto la *macchina*, in particolare il tipo di operazione univocamente determinata che essa compie (Micheli 1995). L'origine della macchina è certamente empirica e nasce dalle esigenze della vita pratica di facilitare il soddisfacimento dei bisogni e della curiosità degli esseri umani.

Un'espressione con riferimento diretto alla macchina si trova anche in matematica. Nella geometria greca, il termine "meccanico" era usato per riferirsi a un processo particolare che faceva uso di strumenti per la costruzione di figure e la soluzione di problemi. Nel corso della storia, le macchine si sono evolute di pari passo con la tecnologia e la creatività umana. Che si tratti di sollevare un peso con una leva, di misurare la distanza da un corpo invisibile alla nostra vista o di eseguire un gran numero di calcoli in pochissimo tempo, in tutti i casi una macchina è progettata per rendere possibile qualcosa che altrimenti ci sarebbe stato impossibile. La tecnologia, quindi, aumenta le nostre percezioni, il che ci spinge alla ricerca di macchine capaci di arricchire sempre più la nostra esperienza empirica. Le macchine funzionano trasformando *qualcosa in qualcos'altro* attraverso un processo di *trasduzione*. Comprendere questo processo, cioè l'interazione dinamica della macchina con l'utente, i suoi componenti e il modo in cui sono assemblati, significa in generale farne un modello: discretizzare aspetti, parti, funzioni, collegamenti, quindi ricostruire cognitivamente correlazioni e cause di ciò che accade (Arcà & Guidoni 1987). In questo lavoro presentiamo delle proposte didattiche che sperimentiamo da anni a scuola e all'università e che si inquadrano in una strategia didattica che mira al riconoscimento di principi matematici e fisici basati sull'uso e la progettazione di macchine e meccanismi. Siamo interessati, come

attività di ricerca, a comprendere in che misura l'insegnamento dei principi di funzionamento di base di una macchina, recuperandone anche l'evoluzione storica, favorisca un uso critico e non alienante della tecnologia. Pensiamo che l'importanza di approfondire lo studio del meccanismo di una macchina possa facilitare l'accesso a concetti fisici e matematici trasversali come ad esempio le trasformazioni, le relazioni tra grandezze e i processi di linearizzazione.

### **1.1 Pensare con gli oggetti**

Un aspetto essenziale del rapporto tra lo sviluppo scientifico e l'impiego di macchine (cioè tra tecnologia e strumenti di misura) è la sua bidirezionalità. Se, da un lato, la progettazione consapevole di nuove macchine deve basarsi su un modello teorico, dall'altro la storia della scienza mostra come molto spesso le rappresentazioni dei modelli teorici che descrivono i fenomeni naturali siano derivate dalla tecnica. In altre parole, l'uomo sembra avere una naturale tendenza a descrivere il mondo nei termini della propria tecnologia, in un sottile capovolgimento che, nel corso della storia, ha assunto forme di volta in volta diverse: nel Settecento era comune la metafora del *Dio orologiaio*, associata al meccanismo newtoniano. Nell'Ottocento, gli studi di termodinamica legati alla prima rivoluzione industriale si concentrarono sui concetti di lavoro e di scambio di energia. Nel XX secolo, gli studi di informatica e di cibernetica hanno reso la teoria dell'informazione un nuovo linguaggio unificante.

La nostra domanda è capire come, in chiave didattica, lo studio di macchine e i loro relativi meccanismi possa migliorare la comprensione dei concetti scientifici di base. Ricerche nel campo delle scienze cognitive (Ackerman 2004) confermano che la manipolazione di oggetti (meccanici o elettronici, analogici o digitali) è un importante aiuto nel processo di modellazione, sia nei bambini che negli adulti. Leggere la natura attraverso la lente della tecnologia, che si è sviluppata parallelamente allo studio della natura stessa, sembra essere un ottimo stimolo nel supportare i processi cognitivi. In altre parole, le macchine servono sistematicamente come modelli generativi di metafore per comprendere i fenomeni naturali. Pensare a cosa dovrebbe fare un oggetto significa giocare al *come se*, cioè il modo in cui da bambini pensiamo di fare scienza con il nostro corpo e la nostra mente (Papert 1986). Secondo il costruzionismo di Papert, il processo di apprendimento è facilitato se ci concentriamo sul legame affettivo che il discente può stabilire nell'esperienza di costruire, giocare ed esplorare un meccanismo.

Non avevo ancora due anni che ero già affascinato dalle automobili. Nel mio primo vocabolario presero un posto importante i nomi dei pezzi delle macchine: il sistema di trasmissione, il cambio, e ancora di più, il differenziale [...] Credo che l'aver tanto giocato con i differenziali sia stato più efficace per la mia comprensione della matematica di tutto quello che mi è stato insegnato alla scuola elementare. Gli ingranaggi, servendomi da modelli, hanno fatto entrare nella mia mente idee che altrimenti sarebbero rimaste astratte. [...] Sono convinto che queste assimilazioni hanno contribuito, per me, a dotare la matematica di una carica affettiva positiva che può essere rintracciata nelle mie esperienze infantili con le automobili. [...] Si può "essere l'ingranaggio", si può capire come funziona un motore "mettendosi al suo posto" e immaginare di girare insieme" (Papert 1986, pp. 10-12).

## **2. Lo studio dei meccanismi di trasduzione e il processo di misura**

Non è un'esagerazione se pensiamo alla scienza, in particolare alla fisica, come a una disciplina basata sul concetto di trasduzione e sul processo di misura. La prima interfaccia tra noi e la realtà sono i nostri sensi, le parti sensibili ai segnali provenienti dall'ambiente circostante. Questi segnali vengono trasdotti dagli organi di senso (ad esempio, le onde di pressione nell'aria fanno vibrare gli ossicini nelle nostre orecchie, la radiazione luminosa passa attraverso il sistema di cristalli nel nostro occhio e si concentra sulla retina, ecc.) in segnali elettrici e trasmessi attraverso canali speciali (i nervi) a un computer centrale (il cervello). Il computer manipola ulteriormente il segnale, lo rende percepibile (cioè lo porta alla coscienza in una certa forma) e, se necessario, lo immagazzina in memoria sotto forma di dati che sono

successivamente accessibili (la memoria). Attraverso i sensi, tuttavia, il massimo che possiamo sperare di fare è confrontare aspetti di realtà che appaiono diversi in contesti diversi. Ad esempio, possiamo confrontare direttamente la lunghezza di un tavolo e di una matita con i nostri occhi, il peso di un'arancia e di una nocciolina con le nostre mani, la nitidezza del suono emesso da un trombone e da un violino, e così via. Ci sono, naturalmente, molti casi in cui possiamo essere interessati a confronti che non sono immediatamente praticabili, ad esempio tra l'altezza di un edificio e la lunghezza dei nostri piedi, o altri casi in cui certe osservazioni sono completamente precluse alla nostra percezione diretta. In tutte queste situazioni, siamo costretti ad utilizzare strumenti e procedure che fungono da *intermediari* e, attraverso una misura, ci permettono di stabilire rapporti di ordine ed equivalenza tra le diverse variabili considerate. In generale, quindi, misurare significa assegnare numeri alle variabili attraverso procedure sperimentali ben definite. Quando un certo aspetto di un fenomeno è stato associato in modo univoco a una variabile per mezzo di un certo protocollo di misura, si dice che la quantità fisica corrispondente è stata *definita operativamente*. Una variabile di un sistema che non può essere misurata da operazioni di confronto basate sull'equivalenza tra il sistema in esame e un numero intero di unità di sistema prese ripetutamente è detta *intensiva*. Per assegnare numeri (interi o razionali) a variabili intensive, è necessario ricorrere a processi di trasduzione mediante i quali le variazioni di una variabile intensiva (ad esempio la temperatura di un sistema) corrispondono sistematicamente alle variazioni di una particolare variabile estensiva (ad esempio il volume di liquido racchiuso in un termometro all'equilibrio termico con il sistema studiato). Le misurazioni delle variabili intensive con sistemi di trasduzione sono onnipresenti nella tecnologia che utilizziamo quotidianamente. Ogni scambio, ogni connessione tra sistemi e parti di sistemi avviene attraverso strutture specifiche (macchine e meccanismi), atte a realizzare selettivamente quell'interazione. Queste macchine, semplici o complesse che siano, possono essere schematizzate secondo un modello molto generale di *strutture di interfaccia*: qualcosa, cioè, che si colloca funzionalmente tra due diverse realtà in interazione. Le interfacce svolgono la funzione di connessione (unidirezionale o bidirezionale) in quanto sono in grado di trasformare l'informazione (segnale o stimolo), relativa ad uno stato o ad un cambiamento di un sistema, in informazione atta a determinare o modificare lo stato di un altro sistema. Ogni interfaccia è quindi particolarmente sensibile alla modifica di una variabile mentre ogni trasformazione è quindi mediata da specifiche strutture di interfaccia (macchine), caratterizzate da operazioni proprie che si trovano a diversi livelli nel corso di un processo, contemporaneamente o in successione nel tempo. Concentrarsi, dal punto di vista delle pratiche d'insegnamento, sul meccanismo di trasduzione implicato in qualsiasi misura fisica equivale, più in generale, ad adottare un punto di vista operativo sui concetti, in linea con un approccio caratteristico della fisica (Bridgman & Somenzi 1977).

## 2.1 Macchine e Meccanismi

Di seguito, presentiamo due esempi di attività didattiche documentate in dettaglio nel nostro sito web [www.les.unina.it](http://www.les.unina.it). Nello sperimentare le attività non adottiamo una sequenza rigida predeterminata bensì cerchiamo di farle aderire il più possibile al contesto specifico nel quale operiamo. Tuttavia, la struttura che generalmente adottiamo è la seguente:

1. Presentiamo i fenomeni con video, disegni, e testi che qualitativamente li descrivono;
2. Riproduciamo esperienze in aula che coinvolgono direttamente gli studenti, sia nella modellizzazione dei fenomeni oggetto di studio che nella pratica laboratoriale;
3. Condividiamo resoconti e materiali di approfondimento sulle esperienze vissute;
4. Coinvolgiamo gli studenti nello svolgimento di attività a casa condividendo materiali sul sito web del progetto LES.

### 2.1.1 Esempi di attività didattiche

Nelle nostre attività, diamo molta importanza allo studio di dispositivi, sia analogici che digitali. In matematica, ad esempio, le macchine da disegno sono strumenti utili per lo studio di curve come le sezioni coniche. In molti casi, la geometria del dispositivo rispecchia le proprietà che definiscono le curve, che vengono quindi percepite in modo dinamico. Una digressione storica a questo proposito: Isaac Newton inventò infatti il calcolo infinitesimale (e la dinamica) attraverso lo studio cinematico delle curve geometriche. Nel XVII secolo, questo approccio era chiamato geometria organica, dove organica deriva dal greco e significa meccanico. Quindi, in un certo senso, lo studio meccanico delle curve era una pietra miliare per lo sviluppo del calcolo moderno. In fisica, l'analisi del funzionamento interno delle macchine e dei dispositivi di misura è una grande opportunità per chiarire aspetti importanti del metodo di indagine, come il rapporto tra entità teoriche e processi di misura. Nel processo di modellizzazione, la familiarità con le macchine e i meccanismi ha anche un grande valore cognitivo poiché la metafora meccanica è al centro di ogni ragionamento di causa-effetto ed è della massima importanza in fisica. Inoltre, nella fisica moderna le definizioni operative che specificano come deve essere misurata una grandezza fisica sono state riconosciute come un modo efficace per evitare incongruenze e ottenere informazioni sui concetti fondamentali.

#### La bilancia dinamometrica

Una questione centrale in meccanica è la definizione univoca di forza. Poiché la parola forza deriva dal linguaggio di tutti i giorni, sia con gli adulti che con i bambini, di solito iniziamo questo argomento con una discussione aperta sulla varietà di contesti in cui la parola viene usata, sia letteralmente che metaforicamente. Per procedere, ci basiamo sulla nozione intuitiva di forza come stress muscolare e analizziamo i possibili effetti che possono essere osservati esercitando una forza di contatto su un corpo a riposo. Questi sono essenzialmente due: il movimento, se il corpo è approssimativamente libero, e la deformazione, se è vincolato. Ci concentriamo su quest'ultimo, facendo una distinzione tra comportamento rigido, plastico ed elastico. Le forze sono invisibili e, con i bambini, i materiali elastici funzionano efficacemente come dinamometri. Dopo un'esplorazione qualitativa delle proprietà elastiche di diversi oggetti, introduciamo il problema del confronto delle forze tra loro e l'idea di dinamometro. Le operazioni coinvolte nella costruzione di un tale dispositivo portano naturalmente alla legge di Hooke, la relazione empirica che esprime la proporzionalità diretta tra la forza applicata e la deformazione di una molla. Osserviamo che nella nostra trattazione, la legge di Hooke non è data a priori, ma è la sintesi idealizzata di misure reali. Con gli adulti, ci soffermiamo in una discussione dettagliata sui principi di funzionamento del dinamometro a molla, toccando molti dei concetti trasversali che stanno alla base del nostro corso: sistemi e interazione tra sistemi, equilibrio, misura, variabili e rappresentazioni. C'è una chiara distinzione tra il sistema di misura e il sistema che viene misurato, interagendo tra loro, e la misura stessa si basa su un equilibrio tra di loro. La procedura di calibrazione evidenzia il fatto che, in ultima analisi, qualsiasi misurazione è un confronto tra sistemi, con il dispositivo di misura che funge da mediatore per questo confronto. Parlando di misura in generale, il dinamometro a molla è anche un perfetto esempio di sistema di trasduzione, ovvero un sistema che opera una conversione da una grandezza all'altra attraverso un processo controllato. Questo tipo di trasduzione, come è noto, è inevitabile quando misuriamo grandezze intensive. A questo proposito, è utile sia con bambini e con adulti fare un paragone tra la misurazione della forza (con un dinamometro) e la misurazione della temperatura (con un termometro): in entrambi i casi, tutto ciò che possiamo osservare è l'effetto provocato su un dispositivo adatto da una variazione della grandezza da misurare. Le proprietà elastiche di una molla svolgono lo stesso ruolo delle proprietà di dilatazione di un liquido termometrico e, in entrambi i casi, la scala graduata dipende dalla loro scelta arbitraria. Infine, sia il dinamometro a molla che il termometro a liquido possono essere utilizzati per dare una definizione

operativa di forza e temperatura, liberandoci dall'ambiguità del linguaggio ordinario. Partendo dalla definizione operativa di forza, diventa più facile capire perché possiamo usare la stessa parola forza per descrivere fenomeni diversi come la gravità, il magnetismo o l'interazione di contatto: hanno lo stesso effetto su un dispositivo scelto convenzionalmente che può essere utilizzato per fare un confronto quantitativo tra di loro. Con una chiara percezione di ciò, tutti i successivi studi delle forze in condizioni statiche possono essere eseguiti con l'aiuto di dinamometri a molla in modo significativo. Per entrare in contatto con l'esperienza di tutti i giorni, durante la discussione, facciamo spesso riferimento a una bilancia da cucina, un buon esempio di dinamometro a molla che è familiare alla maggior parte degli studenti. È interessante osservare le differenze tra i processi di trasduzione che operano in un dinamometro a molla standard e in una bilancia da cucina. Nel primo caso, la forza deve essere una trazione e la grandezza di uscita da leggere sulla scala è una lunghezza; In quest'ultimo, devi spingere e la forza applicata viene convertita in un angolo su un quadrante. L'ispezione dell'interno di una bilancia da cucina mostra che oltre alla molla, il processo di trasduzione coinvolge altri due componenti: una ruota dentata e un parallelogramma articolato. Insieme, operano una trasformazione geometrica che converte la traslazione della piastra nella rotazione di un puntatore. Sottolineiamo qui l'importanza della proporzionalità diretta, cruciale per il corretto funzionamento della maggior parte dei dispositivi di misura: vogliamo che uguali allungamenti della molla corrispondano ad angoli uguali tracciati dall'indice, e questo è possibile solo se la trasformazione da lunghezza ad angolo è lineare. Per estendere il discorso anche agli adulti, è interessante analizzare anche la bilancia pesalettera, un dispositivo sensibile il cui principio di funzionamento è l'equilibrio tra i momenti di forza. Infine, discutiamo i vantaggi e i limiti di questi dispositivi in termini di sensibilità, precisione, portata e praticità d'uso.

#### Il sensore di moto

Nello studio del movimento e delle sue rappresentazioni, facciamo un grande uso di Rilevatori di Movimento (RD) basati su microsistemi elettromeccanici che misurano le distanze mediante eco-localizzazione, un processo utilizzato anche da delfini, pipistrelli e persone ipovedenti come sostituto della vista. La magnitudo misurata direttamente in eco-localizzazione è l'intervallo di tempo  $\Delta t$  tra l'emissione e la ricezione di impulsi ultrasonici, dal quale, data la velocità del segnale  $v$ , si calcola la distanza dell'ostacolo riflettente  $d$  come  $d = v \cdot \Delta t / 2$ . Se invece la distanza dell'ostacolo viene misurata in modo indipendente, invertendo questa formula, la RD può essere utilizzata per stimare la velocità di propagazione del suono. I RD sono estremamente utili per esplorare la cinematica. Spostando gli oggetti davanti all'RD si ottengono grafici in tempo reale che possono essere analizzati per evidenziare le corrispondenze tra il movimento reale e le sue rappresentazioni grafiche. Un'attività interessante per i bambini è disegnare un grafico spazio-tempo con il proprio corpo, camminando avanti e indietro in direzione del RD. Attraverso questa esperienza, viene chiaramente percepito il significato matematico-cinematico delle caratteristiche del grafico come punti stazionari, pendenze e intercetta. Con gli adulti, la generazione di grafici in tempo reale è utile per discutere le connessioni tra grandezze cinematiche come distanza, velocità e accelerazione. Passando al processo di misurazione effettuato dal RD, da un punto di vista operativo, la distanza misurata dall'eco-localizzazione è qualcosa di diverso dalla distanza misurata da un righello, e il problema della loro consistenza può essere discusso. Inoltre, l'eco-localizzazione si basa su alcune assunzioni sulla propagazione del suono: usare la semplice formula di cui sopra per la distanza dell'ostacolo equivale infatti ad assumere un modello corpuscolare in cui gli impulsi si muovono uniformemente in linea retta. È importante discutere i limiti di questo modello e le sue connessioni con il modello ondulatorio, un aspetto che può essere toccato anche in altre attività. Una caratteristica interessante di molti RD è che sono completamente programmabili dall'utente. Ispezionare il codice è come guardare l'ingranaggio di un meccanismo nascosto, poiché la sua struttura rispecchia le operazioni svolte dal dispositivo e il modello teorico su cui poggiano. Questo codice può essere

modificato liberamente e armeggiare con esso è un modo eccellente sia per gli adulti che per i bambini di integrare in modo significativo la codifica, il ragionamento matematico e la modellizzazione fisica.

### 3. Discussione

Lo studio delle macchine e dei meccanismi nella pratica didattica è promosso dalle linee guida nazionali del Ministero dell'Istruzione già dalla scuola dell'infanzia e dalla scuola primaria (Cerini 2012, pp. 29-30). Una riflessione sullo stato dell'insegnamento nel nostro Paese, d'altra parte, ci dice che la scuola e l'università non sono in grado di sfruttare appieno le potenzialità di una esplicitata integrazione didattica tra scienza e tecnologia nate e sviluppatasi in stretta connessione reciproca. Discipline come la matematica, la fisica, la tecnologia e la storia, anche se necessariamente distinte come discipline nell'insegnamento scolastico, formano in realtà un sistema culturale organico che dovrebbe essere colto con una visione unitaria. A nostro avviso, sarebbe auspicabile trasmettere ai nostri studenti il significato profondo di questa unità, immaginando percorsi che intreccino argomenti di matematica, fisica e storia all'interno delle singole unità didattiche. Realizzare tale integrazione nel contesto scolastico non è affatto facile, se si tiene conto che anche i modelli didattici con cui si sono formati molti insegnanti fanno esplicito riferimento alla separazione tra teoria e pratica sperimentale (si pensi alla didattica nei licei e a quella negli istituti tecnici e professionali). C'è ancora molto lavoro da fare in questo senso, soprattutto nella formazione iniziale e continua degli insegnanti (Amabile *et al.* 2022). Un obiettivo di questo lavoro è quindi quello di contribuire alla riflessione sul tipo di formazione che potrebbe consentire a docenti e ricercatori di sviluppare attività didattiche interdisciplinari, arricchendole con le potenzialità, non ancora del tutto esplorate, dello studio delle macchine e dei meccanismi.

### Bibliografia

- Ackermann, E.K. (2004). "Constructing knowledge and transforming the world", in Tokoro, M. & Steels, L. (eds.) *A learning zone of one's own: Sharing representations and flow in collaborative learning environments*. Amsterdam: IOS Press, pp. 15-37.
- Amabile, A. *et al.* (2022). "Experimentation and Research in the Physics Course for the Preparation of Primary School Teachers in Naples", *Education Sciences*, 12(4), 241. doi: 10.3390/educsci12040241
- Arcà, M. & Guidoni, P. (1987). *Guardare per sistemi, guardare per variabili: un approccio alla fisica e alla biologia per la scuola dell'obbligo*. Torino: Emme Edizioni.
- Aristotele (2000). *Problemi Meccanici*. Soveria Mannelli (CZ): Rubbettino, Studia Aristotelica.
- Bridgman, P.W. & Somenzi, V. (1977). *La logica della fisica moderna*. Torino: Boringhieri.
- Cerini, G. (2012). *Indicazioni nazionali per il curriculum della scuola dell'infanzia e del primo ciclo d'istruzione*. Firenze: Le Monnier.
- Micheli, G. (1995). *Le origini del concetto di macchina*. Firenze: L.S. Olschki.
- Papert, S. (1986). *Mindstorms: bambini, computers e creatività*. Milano: Emme edizioni.
- Università di Napoli-LES. *Laboratorio per l'Educazione alla Scienza*. Disponibile a: [www.les.unina.it](http://www.les.unina.it) (Ultimo accesso: 18 luglio 2024).