

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica delle Scienze di Base
Area didattica di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”



Laurea Magistrale in Fisica

Progettazione e realizzazione di sistemi per l’acquisizione automatica dei dati in esperimenti per il laboratorio di didattica della fisica

Relatore:

Prof. Emilio Balzano
Dott. Giancarlo Artiano

Correlatore:

Prof. Raffaele Giordano

Candidato:

Francesco Guida
Matricola N94000567

A.A. 2022/2023

Indice

Introduzione	1
1 Natura: uomo, scienza e tecnica	4
1.1 Definizione dei termini	4
1.2 Un intreccio indissolubile	6
1.3 Modi di guardare	8
1.3.1 Il linguaggio	10
1.3.2 Riconoscere schematizzando	10
1.3.3 Fenomeni e processi	11
1.3.4 Sistemi	12
1.3.5 Variabili	13
1.3.6 Strategie cognitive	15
1.4 La logica della misura	18
1.5 Discipline STEM e nuove tecnologie digitali	21
2 Strumenti di misura: sensori e trasduttori	24
2.1 Macchine e strumenti di misura	24
2.2 Sensori e trasduttori	25
2.2.1 Classificazione dei sensori	27
2.2.2 Sensori Resistivi	32
2.2.3 Sensori Capacitivi	42
2.2.4 Sensori Induttivi	49
2.2.5 Blocco di Condizionamento	55
2.2.6 Interferenze	57
2.2.7 Caratteristiche	60
2.3 Sensore BMP180	68
2.4 Scheda a microcontrollore: Arduino Uno	76
2.4.1 Arduino Uno	77
3 Proposta didattica	83
3.1 Il progetto Didattica Laboratoriale Multidisciplinare	84
3.1.1 Black-Box e White-Box	84
3.2 Descrizione dell'apparato sperimentale	86
3.2.1 Cablaggio dell'hardware	88
3.2.2 Codice Arduino	90
3.2.3 Terminale seriale e visualizzazione dei dati	95
3.3 Sistemi termodinamici e gas ideali	100
3.3.1 Sistemi termodinamici, stati, trasformazioni ed equilibrio	100
3.3.2 Il quadro teorico	102

3.4 Verifica della legge di Boyle-Mariotte	103
3.4.1 Apparato, misure e risultati	104
3.5 La legge dell'isocora o 2 ^a di Gay Lussac	108
3.5.1 Apparato, misure e risultati	109
3.5.2 Termometro a gas	114
3.6 Un ciclo termodinamico	119
3.7 Considerazioni didattiche	124
Conclusioni	127
A Codici	130
Bibliografia	133

Introduzione

Negli ultimi anni, nel campo della ricerca in didattica della fisica si sta ponendo particolare attenzione alla possibilità di utilizzare le nuove tecnologie digitali per costruire competenze articolate e trasversali che riguardano fisica, matematica e tecnologia. Nelle proposte più interessanti appare chiaro che, le nuove tecnologie, non sono neutre. Con le potenzialità, i vincoli e i limiti che offrono, consentono di costruire abilità e competenze diverse e, parallelamente, contribuiscono alla forma del pensiero e alla produzione dei concetti matematici e fisici (Balzano, 2007). Gli obiettivi didattici che si possono raggiungere sono potenzialmente diversi e si configurano come orizzonti da raggiungere in cui sviluppare nuovi modi di apprendere e di comunicare, nuovi laboratori di conoscenze ed esperienze in cui i contenuti disciplinari specifici e il processo d'indagine e di costruzione di modelli potenziano in modo significativo l'insegnamento e l'apprendimento.

In particolare, negli ultimi anni, grazie ad un'elettronica a basso costo si sono diffusi sistemi programmabili basati su schede a microcontrollore e trasduttori che, programmati in modo mirato, possono essere utilizzati come strumenti di misura di grandezze fisiche. In più, le piattaforme di simulazione e i linguaggi di programmazione sono sempre più versatili permettendo la modellizzazione del fenomeno e la scrittura di codici per la programmazione delle schede in una maniera semplice e intuitiva. In generale, lo studio di fenomeni fisici con sistemi di acquisizione “automatici” e programmati dallo studente o dall'insegnante offre, dal nostro punto di vista diversi vantaggi. Sinteticamente le potenzialità riguardano le possibilità di:

- a. studiare fenomeni che si svolgono in brevi intervalli di tempo;

- b. ridurre i tempi di acquisizione e concentrarsi sull’analisi dell’esperienza;
- c. analizzare fenomeni d’interesse per lo studente che riguardano spesso esperienze quotidiane e non solo esperimenti tradizionali di laboratorio;
- d. aiutare nel processo di formalizzazione, correlando l’osservazione del fenomeno ai diversi modi per rappresentare simbolicamente una grandezza;
- e. progettare attività orientate alla modellizzazione dei fenomeni studiati;
- f. ottenere grande flessibilità nell’uso del sistema che si costruisce, che permette attività che vanno dalle dimostrazioni interattive condotte dal docente con esperienze già predisposte (ad esempio per affrontare difficoltà di apprendimento di concetti chiave) alla realizzazione di esperimenti che coinvolgono gli studenti nella configurazione degli apparati di rivelazione, nella gestione dell’acquisizione, nell’analisi dei dati.

In questo lavoro di tesi, si propongono una serie di attività didattiche svolte utilizzando una scheda a microcontrollore per la gestione di un sensore digitale di pressione e di temperatura e di un potenziometro analogico per la trasduzione di misure di posizione. Queste attività possono essere proposte in un corso universitario introduttivo di fisica, negli indirizzi scientifici delle scuole secondarie di secondo grado e per la formazione docenti. Lo studente è coinvolto in tutte le fasi della proposta didattica, dall’assemblaggio dell’apparato sperimentale alla scrittura del codice, dall’acquisizione dei dati alla loro elaborazione con strumenti per analisi statistiche e la rappresentazione grafica. Ha l’opportunità di acquisire padronanza nella costruzione e nella configurazione di macchine e meccanismi utilizzando la misura per definire operativamente le grandezze fisiche interessate acquisendo una comprensione più approfondita del processo fisico indagato e riflettendo sulle difficoltà “teoriche” e sperimentalì che si possono incontrare. Il coinvolgimento attivo in tutte le fasi delle attività sperimentali permette di apprezzare la trasversalità tra le discipline informatiche, fisiche, matematiche e tecniche, e di comprendere come la multidisciplinarità possa favorire l’apprendimento e la costruzione di conoscenza in ambito scientifico. Il lavoro è strutturato come nel seguito descritto. Nel

primo capitolo viene discusso l'approccio pedagogico che ha guidato l'intero percorso di questo lavoro. Questo si ispira soprattutto al lavoro di ricerca svolto da Paolo Guidoni in “Guardare per sistemi, guardare per variabili” in cui si propone una strategia didattica che integra attività sperimentale e riflessione continua sul modo di costruire concetti e modelli interpretativi specificando i sistemi interagenti e le grandezze di stato e di interazione che permettono di seguire l’evoluzione di processi e fenomeni fisici. Questa strategia che prevede che gli studenti diventino protagonisti del loro apprendimento attraverso l'esplorazione attiva dei fenomeni e la costruzione di modelli con il docente che svolge il ruolo centrale di mediazione didattica è particolarmente efficace nello studio di processi termodinamici che sono affrontati nei capitoli che seguono. Nel secondo capitolo, sulla scia di quanto esposto precedentemente sulla logica della misura, è presentata una panoramica sulle principali tipologie di sensori e trasduttori. In particolare, sono presenti due sezioni in cui vengono descritti rispettivamente la scheda a microcontrollore e il sensore di temperatura e di pressione utilizzati nella proposta didattica. La presentazione dei diversi sensori e trasduttori è giustificata dal fatto che questo lavoro si propone di essere anche di supporto ai docenti delle scuole che intendono utilizzare questi strumenti per sviluppare proposte didattiche. Infine, nel terzo capitolo, è presentata una proposta didattica per lo studio delle leggi sui gas ideali. Si descrive l'apparato sperimentale utilizzato del termometro a gas; si sperimentano le leggi di Boyle e di Gay Lussac e si analizza un possibile un ciclo termodinamico per stimare numericamente il lavoro. Le potenzialità del sistema sono evidenziate nei diversi fenomeni studiati e in particolare lavorando sul modo di realizzare e studiare trasformazioni quasi statiche e quasi reversibili. In questo contesto, la possibilità di guardare le variabili del sistema in tempo reale grazie ad un setup sperimentale costruito dallo studente rappresenta un'utile risorsa per arricchire la formazione di studenti e docenti.

Capitolo 1

Natura: uomo, scienza e tecnica

Consapevoli di affrontare un argomento di tesi in didattica della fisica, si è ritenuto indispensabile iniziare il lavoro con il seguente capitolo dove vengono discussi argomenti di carattere epistemologico, storico, cognitivo e psicologico che hanno influenzato e tutt'ora permeano l'evoluzione della scienza e della fisica in particolare. Un educatore, un docente di fisica non può essere totalmente all'oscuro di quelli che sono stati e sono gli aspetti e i problemi più generali e profondi della filosofia della scienza, ne tantomeno si possono trascurare gli aspetti di carattere pedagogico che studiano i differenti modi che l'uomo usa per interagire, *guardare* [15], schematizzare, modellizzare, catalogare la natura.

1.1 Definizione dei termini

In un dibattito sul rapporto tra natura e uomo ci si imbatte fin da subito nella definizione dei termini [25].

In origine le parole greche *techné* ed *epistéme*¹ hanno avuto un significato etimologico molto sfumato: queste erano traducibili entrambe con arte, perizia, abilità. Solo successivamente i termini hanno assunto significato via via differente, in particolare il primo si è accostato a "mestiere" cioè il sapere concreto, mentre il secondo ha acquistato

¹Le prime tracce della parola **epistéme** si trovano negli scritti del poeta lirico Bacchilide (520-450 a.C.) "infinte sono le arti degli uomini", in cui *epistéme* è usata come sinonimo di **techné**, nel senso di saper fare.

il significato di "conoscenza, sapienza" ovvero il sapere astratto.²

Nei testi di Aristotele *epistéme* viene tradotta con "scienza". Questo apre una questione filosofica tutt'altro che risolta nota come *problema della demarcazione*. In altri termini ci si pone il problema di discernere ciò che è scienza, *epistemé* nel senso aristotelico, da ciò che opinione (*dòxa*). Questo problema, noto già in epoca ellenistica, è diventato a ben vedere particolarmente caro alla scuola neopositivista con la battaglia antimetafisica[10]. L'esclusione della metafisica dalla scienza interessa anche Popper, egli propone un *criterio di demarcazione* fra quelle che possono essere proposizioni della scienza empirica e quelle che non possono esserlo: tutte le proposizioni che non sono falsificabili non sono scientifiche. Per evitare di affrontare tale difficoltà nel seguito si indicherà con scienza un sapere, una conoscenza che include un certo livello di astrazione teorica; un approccio in cui si definiscono enti teorici, distinti dalla realtà, con cui si costruiscono modelli che sono autonomi e coerenti indipendentemente dalla loro capacità di interpretazione dei problemi reali. Quindi per conoscenza scientifica indichiamo tutti i possibili modi che utilizza l'uomo per interpretare, modellizzare, "guardare" (§ 1.3) la natura, attraverso i suoi sensi e con le contingenze materiali, culturali del periodo storico.

Chiameremo *tecnica* l'insieme delle attività finalizzate alla costruzione di strumenti e mezzi per svolgere specifiche funzioni. La tecnica non esclude conoscenze di tipo teorico, tuttavia essa si distingue dalla scienza in quanto il suo prodotto è sempre materiale e il fine ultimo è il sapere pratico. Dunque la distinzione tra scienza e tecnica si pone in termini di metodo e finalità, e non è direttamente collegata al sapere in quanto tale. Infatti si possono trovare esempi di come uno stesso tipo di conoscenza sia stato considerato in epoche diverse di tipo tecnico oppure di tipo scientifico. Basti pensare, per esempio, che agli egiziani era già nota la nozione per la quale nel triangolo rettangolo il quadrato costruito sull'ipotenusa era equivalente alla somma dei quadrati costruiti sui due cateti. Questa informazione era usata sistematicamente nella costruzione di edifici e nella divisione delle terre, era dunque un sapere tecnico. Quando poi in età ellenistica

²Va osservato che il concetto primitivo di *techné* veniva usato per indicare una pregorativa degli dèi e non perché questi l'avessero appresa, ma in quanto a loro sostanziale, si identificavano con essa.

venne formalizzato il metodo dimostrativo, mediante procedimenti logici-deduttivo a partire da una serie di assiomi, di punti fissi, la stessa nozione sul triangolo rettangolo diventa un sapere di tipo scientifico. L'affermazione sui triangoli prende il nome di teorema, e se pur applicabile alla realtà essa diventa un oggetto di un sistema astratto. Peraltro il teorema di Pitagora vale rigorosamente solo nell'ente, anche esso astratto, piano euclideo: potrà essere applicato alla realtà con una certa approssimazione(ottima nella spartizione delle terre per gli egizi, pessima su distanza oceaniche).

Infine diamo la definizione del termine *tecnologia* che può essere definita come tecnica scientifica, ossia una tecnica che non si avvale della sola pratica empirica, ma sfrutta e studia le conoscenze teoriche acquisite per inventare nuovi oggetti e nuovi mezzi. D'altra parte la produzione del sapere teorico non è più separata dalla parte applicativa, le due pratiche forniscono reciprocamente l'una all'altra strumenti e mezzi per progredire insieme.

1.2 Un intreccio indissolubile

In base alle definizioni date si può affermare che le conoscenze della civiltà egizia sul triangolo rettangolo possono ritenersi di tipo tecniche, ma sicuramente non tecnologiche. Va inoltre osservato che la tecnica sopravvive anche dopo la nascita della scienza in quanto essa fa ricorso alla pratica empirica che si rivela una inesauribile fonte di progresso. Addirittura può succedere che la scienza si rivolga alla tecnica per trarne materiale di studio: emblematico è stato il caso della termodinamica.

La temodinamica studia le trasformazioni fisiche legate al calore. Oggi essa è composta da un sistema coerente e formale, da modelli teorici ben definite, dove valgono precise leggi matematiche. Le sue applicazioni sono molteplici: motori termici, cicli frigoriferi, trasformazioni chimiche e qualsiasi altro sistema abbia a che fare con il calore. Storicamente però le applicazioni sono nate molto prima della nascita della termodinamica: basti pensare che la prima applicazione industriale della macchina a vapore

con Newcomen risale al 1705, mentre il perfezionamento di quest'ultima avvenne con il brevetto del 1764 con la macchina di Watt. Quando Carnot muove i suoi primi passi nella teoria formale della termodinamica siamo nel 1824, mentre bisogna aspettare al 1848 per avere l'enunciato del secondo principio nella formulazione di Kelvin. Quindi la termodinamica nasce per spiegare il funzionamento di macchine già costruite , di una tecnica sviluppata con metodi empirici.

Diverso è stato il caso dell'elettromagnetismo in cui le macchine elettriche si sono sviluppate di pari passo con le teorizzazioni scientifiche, dunque in base alle definizioni del paragrafo precedente si può parlare di tecnologia. In altri casi questo sincronismo non c'è stato basti pensare alla costruzione del laser che è avvenuta nel 1960, mentre le sue basi teoriche risalgono al 1917 ³.

Un aspetto da non sottovalutare è quello socio-economico in cui si sviluppano le conoscenze, come scrive Castellani nel suo articolo [25]: “*pur se considerata un sapere teorico e astratto, la scienza non è affatto indipendente dal contesto socio-economico in cui si sviluppa. Spesso le conoscenze scientifiche sono legate a necessità commerciali e addirittura militari. Non si può negare che la termodinamica nasca dalla rivoluzione industriale, né che i grandi progressi della fisica nucleare nascano dalla “urgenza” di costruire armi atomiche con il “progetto Manhattan”. Le stesse catapulte greche nascono da necessità militari, ed è opportuno osservare che lo studio newtoniano del moto parabolico dei proiettili è contemporaneo all’arrivo in Occidente della polvere da sparo e alla conseguente necessità di sviluppare competenze sull’uso delle armi da fuoco. La scienza è tutt’altro che un’impresa puramente conoscitiva svincolata dal resto; scienza, tecnica e tecnologia sono così profondamente intrecciate tra loro e con politica ed economia che ogni discorso intorno a esse si riveste di una complessità ineliminabile.*”

Un aspetto della stretta relazione tra scienza e tecnica è il rapporto scienziato strumento. Quest'ultimo nasce con l'intento di estendere i sensi dello scienziato, permettendogli di rilevare informazioni dalla natura altrimenti impercettibili e di quantificarle secondo dei processi prestabiliti.

³On the quantum theory of radiation, Einstein, 1917

Gli scienziati si sono sempre costruiti i loro strumenti o comunque ne avevano una dettagliata conoscenza, non averla li avrebbe esposti a facili critiche: basta pensare che i primi dubbi sulle scoperte di Galileo riguardavano proprio l'inattendibilità ("trucchetti") del suo cannocchiale. Tuttavia oggi questo scenario sta cambiando, gli scienziati si trovano sempre più spesso a utilizzare strumenti che non conoscono in maniera approfondita. Questo in parte è dovuto anche a scelte educative: a partire dagli studi scolastici prende piede sempre più l'idea che non sia necessario conoscere in dettaglio i fondamenti teorici degli strumenti che si utilizzano, strumenti che possono essere tecnici come un computer o teorici come un teorema di fisica o matematica. Questo modo di procedere sembra ricordare molto l'inquietante storia delle catapulte in epoca romana.⁴ Basti pensare che il matematico e meteorologo Norton Lorenz pose le basi dei sistemi caotici proprio grazie alla profonda conoscenza dell'elaboratore che utilizzava per il suo modello matematico.

Anche nell'ambito della didattica della fisica questo è un problema aperto: tale questione verrà discussa nel paragrafo 3.1 dove verranno discussi vantaggi e svantaggi nel trattare i dispositivi tecnologici funzionali alla didattica come *Black-Box* oppure come *White-Box*.

1.3 Modi di guardare

Questo paragrafo è ispirato al lavoro di Paolo Guidoni [15], qui dove vengono esplicitate schematicamente le diverse strategie cognitive e i diversi criteri di interpretazione dei fatti della realtà: attraverso i modi che ha l'uomo di *guardare* la natura, nel tentativo di scovarne i meccanismi che ne regolano il funzionamento. Nell'ambito di questi modi ricade sicuramente l'educazione scientifica, cioè l'organizzazione e la formazione delle conoscenze e dei modi di pensare sui fatti della realtà nell'ambito di scuola e università. Vogliamo rimarcare il fatto che l'osservatore in questione è l'uomo e non un ente

⁴Le catapulte realizzate su solide teorie meccaniche in epoca ellenistica persero tutta la loro efficacia in età romana, questi si limitarono alla riproduzione diretta senza sfruttare le rigorose teorie meccaniche dei greci. Il risultato fu la rinuncia alla loro costruzione visto l'inevitabile sommarsi di numerosi errori di "copia".

qualsiasi: l'uomo con la sua specifica forma, la sua materia, la sua memoria, il suo linguaggio, la sua logica⁵ e i suoi sensi si affaccia nell'ambiente; da questa interazione scaturiscono tutti i processi psichici, coscienti e inconsci, cognitivi e dinamici propri dell'uomo.

Il mondo ci diventa comprensibile quando la sua complessità può essere scandita in aspetti più facilmente analizzabili; e quando questi possono essere nuovamente correlati tra di loro. Il separare e riconnettere aspetti della realtà impegna criteri e strategie di pensiero che costituiscono il comportamento cognitivo degli esseri umani e determina lo sviluppo della cultura umana nel tempo a determinate condizioni materiali.

Davanti alla complessità della realtà ci serviamo di varie strategie cognitive per disegnizzarla, schematizzarla privilegiando aspetti piuttosto che altri. Si può allora, per esempio, scandire il mondo individuandone strutture che chiamiamo *sistemi* (sistemi biologici, sistemi viventi...). Alternativamente possiamo guardare il mondo individuandone reti di *fenomeni* (fenomeni fisici, fenomenologie biologiche, sociali...). D'altro lato si possono cogliere le interazioni, le trasformazioni, i cambiamenti, le differenze che coinvolgono sistemi e fenomeni, anche in singoli aspetti, attributi, qualità, che possono essere individuati proprio in quanto soggetti a cambiamento, pur conservando la propria identità; tali *aspetti variabili* o semplicemente *variabili* costituiscono un altro modo di guardare il mondo.

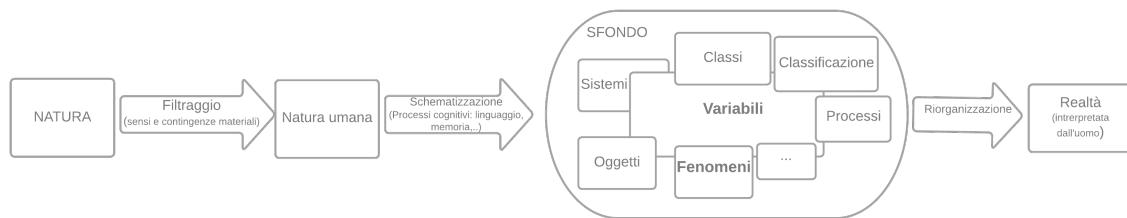


Figura 1.1: Schema interazione cognitiva uomo natura

⁵G.Boole scrive nell'introduzione dell' *Analisi matematica della logica*[9] « Ciò che rende possibile la logica è l'esistenza, nella nostra mente, di nozioni generali[...] nonostante si possa affermare con sicurezza che, se fossero diverse da come sono, l'intero meccanismo del ragionamento, anzi le autentiche leggi e la stessa struttura dell'intelletto umano, verrebbero modificate in modo essenziale. Una logica, naturalmente, potrebbe esistere, ma non sarebbe più la logica che possediamo. »

1.3.1 Il linguaggio

Ogni comprensione dei fatti è resa possibile attraverso linguaggi e codici con differenti specificità (formali, simbolici, verbali, gestuali, etc.). Ogni linguaggio riflette specifiche caratteristiche della complessità del reale.

Dopo averli notati bisogna trovare parole e modi adatti a esprimere differenze, cambiamenti, permanenze, invarianti e intrecci. Sappiamo "naturalmente" vedere la *stabilità delle forme* degli *oggetti* che ci circondano e a queste forme sappiamo dare un nome.

I nomi degli oggetti, dei fenomeni, delle azioni, ci fanno ricordare mentalmente le loro immagini e i significati a cui si riveriscono. Tuttavia non bastano certamente a rappresentare il mondo nei suoi molteplici aspetti, nei sui processi: sono necessarie diverse parole connesse in una struttura linguistica complessa che solo nel suo intreccio dà significato pieno alla struttura reale che si vuole descrivere.

Le condizioni fondamentali per le quali sappiamo trovare le somiglianze tra forme stabili sono: il saper *individuare* e il saper *riconoscere*.

Con *individuare* si intende fare emergere un'unità significativa da uno "sfondo", non si riferisce soltanto ad oggetti separati l'uno dall'altro; ma anche processi, fenomeni, situazioni, a parti di sistemi complicati che evolvono nel tempo in modo specifico.

Riconoscere un oggetto significa che quella cosa (individuata da uno sfondo) è come molte altre a cui abbiamo dato lo stesso nome, per riconoscere non abbiamo bisogno necessariamente di uno sfondo da cui l'oggetto esce per contrasto, ma di uno schema che ci ricorda altri oggetti simili, una varietà di individui che hanno contribuito a creare lo schema stesso. Quindi ciò che è nuovo può essere individuato, ma non riconosciuto. Quando gli individui (oggetti, fenomeni...) sono riconosciuti uguali tra loro, secondo lo schema che funge da modello di riconoscimento, possono essere chiamati con lo stesso nome.

1.3.2 Riconoscere schematizzando

La dinamica cognitiva di ricerca e organizzazione di uno schema, che ci appare più adatto alla realtà che si sta guardando, è sistematicamente coinvolta in ogni processo

di conoscenza (ri-conoscere). La costruzione di prototipi nasce dal confronto tra strutture schematiche. Ogni oggetto, ogni fenomeno può essere schematizzato con criteri e modalità diversificate a seconda delle circostanze e degli scopi. La dinamica della schematizzazione è molto più complessa di quella evocata da un elenco di somiglianze e differenze: uno stesso individuo potrà ricorrere in uno schema piuttosto che in un altro assai diverso a seconda dei *modi* cognitivi messi in moto. Via via che lo schema prototipo diventa più fine il margine di differenze con gli individui che vi sono associati tende ad annullarsi e l'individuo diventa un elemento di una *classe*. Lo schema che è necessario e sufficiente a definire un individuo membro di una classe si affina sempre più man mano che si imparano a riconoscere e quantificare le differenze.

La sensazione di incertezza di fronte a qualcosa di sconosciuto corrisponde, nel processo cognitivo, all'evocazione di famiglie di schemi (anche molto diversi tra loro) nel tentativo di riconoscere classi già note. Un po' come guardare qualcosa in lontananza nella nebbia, man mano che ci avviciniamo prende forma, si scartano ipotesi, se ne fanno di nuove.

Riconoscere nel "nuovo" quello che già si sa è fondamentale sia al processo di conoscenza tecnico scientifico , sia nel processo didattico d'apprendimento: spesso risulta fruttuoso partire da quello che lo studente già ri-conosce per sviluppare un percorso didattico vincente, il docente deve essere un mediatore didattico tra ciò che si conosce e ciò che si deve imparare a riconoscere⁶ e schematizzare.

1.3.3 Fenomeni e processi

Sappiamo assegnare nomi per gli oggetti, ma anche a processi e fenomeni. Un oggetto non cambia nel tempo, ha una forma stabile quindi è facile riconoscerlo. Invece un fenomeno è qualcosa che si evolve nel tempo, ma proprio il fatto che un fenomeno si evolve nel tempo e nello spazio secondo uno schema noto permette di distinguerlo da altri fenomeni e di assegnargli un nome.

Riconoscere forme modulate nel tempo richiede necessari meccanismi di memoria capa-

⁶Nella teoria di Lev Vygotskij questa è indicata come zona di sviluppo prossimale

ci di evocare non solo immagini statiche, ma anche sequenze strutturate di movimenti, trasformazioni e cambiamenti per confrontarle con altre attuali o ricordate. Così come si scopre cognitivamente la permanenza dell'oggetto, si scopre l'invarianza del fenomeno, la stabilità delle regole e delle condizioni per le trasformazioni e i cambiamenti. Le operazioni cognitive di memoria, intrecciate con constatazioni e previsioni, costruiscono i legami tra porzioni di fatti che nel complesso chiamiamo realtà.

1.3.4 Sistemi

Nel separare oggetti e fenomeni dal continuum del loro sfondo spaziale e temporale si opera un'azione di *discretizzazione*. L'attività di separare e nominare cognitivamente gli elementi che ci sembrano i costituenti di oggetti e fenomeni, così come l'attività di riconnettere in maniera organizzata questi elementi ci porta a definire le strutture dei *sistemi*. Guardare per sistemi ci porta ad interpretare relazioni complesse tra eventi anche lontani nel tempo e nello spazio.

Un *sistema* è un "intero" che vediamo formato da parti disposte e correlate secondo un ordine definito, coordinate da un'organizzazione complessiva, legate da relazioni che possono anche cambiare nel tempo e nello spazio. In un sistema l'articolazione delle sue strutture interne riflette quella delle relazioni con l'esterno, non si può pensare a un sistema totalmente indipendente dall'ambiente (basti pensare al sistema motore termico, oppure a un sistema vivente).

I sistemi, così come oggetti e fenomeni, hanno un'identità conferita loro dalla nostra (umana e culturalmente contingente⁷). La scelta del criterio adatto ad individuare una struttura sistemica è condizionata e dominata dallo scopo pratico (tecnica) e teorico (scienza) che si vuole raggiungere, bisogna imparare a ristrutturare continuamente i modi di guardare per organizzare il mondo in sistemi.

Organizzando le dinamiche del mondo in sistemi, si possono guardare le loro relazioni interne, le relazioni tra i sistemi e l'ambiente e le interazioni tra sistemi. Guidati da

⁷Nell'ambito della dottrina marxista si fa riverimento alla dialettica materialistica: «*la produzione delle idee, delle rappresentazioni, della coscienza è, in un primo tempo, direttamente intrecciata con la vita materiale*» [12]

interpretazioni culturali e contingenti ci si accorge che alcune regole precedentemente individuate vanno rigettate, altre trasformate, altre ancora negate, per passare a un livello di consapevolezza superiore (o inferiore).

Ci rivolgiamo al pensiero sistematico per dominare la complessità, cercando in ogni situazione un modello: la stessa tecnologia tende a realizzare prodotti e strumenti [cap.2] con carattere il più possibile sistematico (basti bensare ad un'automobile).

Discretizzando la natura in sistemi *mettiamo confini*, d'altra parte è possibile collegare più sistemi *mettendo relazioni*. Ogni volta che si mettono più sistemi in relazione tra loro e con l'ambiente si ottengono risultati nuovi.⁸

Così come abbiamo parlato di forma spaziale per gli oggetti e di forme spazio-temporali per i fenomeni (processi, eventi) parleremo di forme per i sistemi. Tuttavia un sistema è definito da qualcosa di più complesso della configurazione di parti e spazi e della configurazioni di eventi e tempi. Una struttura sistematica è in qualche misura chiusa su sé stessa, organizzata al suo interno da una struttura di *relazioni causali*.

1.3.5 Variabili

Usando il linguaggio si ritrovano le radici dei modi di guardare, ragionare e agire al fine di strutturare la realtà. Siamo in grado di far emergere da uno sfondo comune somiglianze per raggruppare oggetti, fenomeni e sistemi e differenze per dividere. Formando gruppi definiti da una caratteristica raramente riusciamo a dare un nome comune a tutti gli elementi del gruppo, questo invece è la norma quando si raggruppa in classi. *Classificare* significa trovare uno schema prototipo comune in individui (fenomeni, oggetti, sistemi..) diversi, cioè si mettono in atto delle operazioni mentali sugli individui al fine di considerarli equivalenti, oppure diversi. Questo porta a riunire sotto uno stesso nome comune (quello della classe) gli individui che ricadono sotto lo schema stabilito.

Va osservato però che uno schema risulta essere un intreccio di *proprietà variabili* e caratteristiche invarianti correlate tra loro da relazioni complesse.

⁸Un motto che si usava già in età ellenistica era: «Il tutto è maggiore della somma delle parti»

L'esistenza stessa degli schemi sottointende una dimensione della realtà che allo schema non è riducibile: quella delle *proprietà variabili*, che possono di volta in volta variare lasciando inalterato lo schema. Il *guardare per variabili* ci consente di confrontare individui, di rendere discreto un continuo, di ordinare in uno schema.

La differenza sostanziale tra guardare per variabili e guardare per classi sta nel fatto che una classe è costruita mediante uno schema che serve a raggruppare tutti gli individui che ne fanno parte, una variabile invece deve poter essere valutata in ogni individuo (oggetto, fenomeno, sistema), cioè è essenziale alla sua natura individuale, mentre può non essere essenziale all'operazione cognitiva di schematizzazione necessaria per definire una classe.

Individuare determinati modi di variare, possibilità di variare, confronti e correlazioni tra variabili rappresenta un modo efficacie per conoscere il "nuovo", organizzare il mondo e interpretarne le regole. La *differenza* può essere valutata in maniera *sincrona*, cioè attraverso il confronto di una variabile tra individui diversi in uno stesso momento, oppure *diacronica*, cioè si valuta il cambiamento della proprietà variabile in uno stesso individuo tra momenti diversi. Confrontando coppie di individui secondo una variabile si impara a *ordinare*, questa esperienza cognitiva è alla base della logica delle relazioni d'ordine.

Il modo di operare per variabili porta anche alla consapevolezza della *continuità* del variare, infatti dati due individui per cui la variabile scelta è diversa, si può sempre trovare un altro individuo "intermedio" tra i due. Sempre il modo di guardare per variabili porta al concetto di *transitività* delle relazioni d'ordine.

Ancora attraverso l'esperienza arriviamo alla distinzione tra *variabile estensiva* e *variabile intensiva*. Il modo di guardare per classi e quello di guardare per variabili quindi risultano sempre intrecciati, ma corrispondono a criteri diversi di schematizzare la realtà.

È importante osservare che:

- relazioni tra più variabili semplici portano a definire un'altra variabile utile per stabilire relazioni d'ordine, oppure può individuare uno schema utile a classificare;

- una variabile complessa (intreccio di più variabili semplici) può essere più efficace delle singole variabili semplici. Si pensi ad esempio alla variabile complessa densità derivata dalle variabili semplici volume e massa rispetto alle informazioni che queste ultime possono dare sulla galleggiabilità di un corpo;
- gli intrecci di variabili continue portano a criteri di discretizzazione con cui formare schemi e individuare classi, da questo punto di vista le variabili discrete possono essere viste come intrecci, "nodi" di variabili continue.

1.3.6 Strategie cognitive

Tutte le considerazioni fatte sui *modi di guardare* oggetti stabili, fenomeni e processi che evolvono nel tempo con forme definite, sistemi complessi, ci dicono che un'organizzazione cognitiva del mondo risulta possibile solo se si riescono a gestire diversi criteri di analisi a seconda delle intenzioni e della situazione. La padronanza cognitiva del cambiamento rappresenta da sempre un'attività particolarmente difficile sia per i ragazzi che devono apprendere sia per la scienza che si sviluppa. Analizzando il processo di conoscenza si possono mettere in luce degli aspetti essenziali, delle *strategie cognitive* che se riconosciute ed adoperate nel loro insieme permettono di comprendere i processi di cambiamento che sono alla base della conoscenza del mondo, d'altro canto queste strategie permettono di mettere in relazione le strutture della conoscenza comune con quelle della conoscenza formalizzata. Quest'ultimo aspetto è essenziale per la riuscita di qualsiasi approccio didattico, partire da ciò che lo studente già conosce è un aspetto imprescindibile.

1. *Strategia di analisi differenziale e integrale*

La differenza di guardare al cambiamento in modo *differenziale* e *integrale* permette di passare da un giudizio sincrono, cioè come stanno andando le cose istante per istante, a un giudizio diacronico, che coglie i cambiamenti tra una situazione iniziale e una finale. Chiaramente le differenze complessive (integrali) sono

venute fuori da differenze istantanee (differenziali) quindi risulta cognitivamente necessario porre dei legami tra le due strategie.

2. *Strategia di analisi per stato e trasformazione*

Si possono infatti identificare aspetti della natura invarianti nel tempo, forme di permananza che prendono il nome di *stati*. D'altro canto è possibile cogliere configurazioni che cambiano nel tempo, forme di cambiamento: le *trasformazioni*. Quindi gli stati "durano nel tempo" mentre le trasformazioni si "svolgono nel tempo". Osserviamo che stati e trasformazioni sono relazioni di intrecci tra variabili e caratteristiche, ma mentre negli stati il tempo è escluso nelle trasformazioni è presente. È possibile immaginare una trasformazione come una successione di stati (non senza ambiguità).

3. *Strategie di analisi per cambiamento globale e variabili*

Guardare il cambiamento complessivo o delle singole variabili è un'altra coppia di strategie cognitive e si possono definire soltanto l'uno sullo sfondo dell'altro. Sappiamo riconoscere in un fenomeno un intreccio di variabili che possono cambiare nel tempo sia nel loro intreccio, sia prese come singole variabili. Inoltre poi ogni variabile presa singolarmente può essere osservata nel suo cambiamento complessivo (inizio, fine), oppure nel suo cambiamento differenziale (istante per istante).

Analizzando il modo di variare nel tempo delle variabili rispetto ad altre che variano anch'esse nel tempo si è portati ad escludere il tempo dall'analisi, cioè una volta che i due modi di cambiare sono messi in relazione il tempo non è più presente come parametro.

4. *Strategie di causalità e correlazione*

All'interno di un intreccio di variabili che cambiano insieme nel tempo è possibile isolare una che è considerata *causa* del cambiamento delle altre. Altre volte è possibile ricercare la causa comune del cambiamento delle variabili in un fattore

(variabile) esterno all'intreccio: in questo caso si parla di *correlazione* tra le diverse variabili dove nessuna è causa del cambiamento delle altre.

Le diverse strategie nei processi conoscitivi così come in quelli di insegnamento appaiono sempre intrecciate. Fenomeni, sistemi, processi, situazioni, etc. vengono visti ora nel loro aspetto complessivo, ora nel mutare delle singole variabili; ora si possono vedere gli stati di una situazione, ora le loro trasformazioni; ora si guardano le differenze istante per istante, ora il cambiamento globale. Molte incomprensioni e incomunicabilità nei processi di insegnamento nascono proprio dal fatto che si guarda sì uno stesso fatto, ma attraverso una *strategia* cognitiva differente che ovviamente non trova la giusta corrispondenza, la giusta armonizzazione tra chi si confronta.

Va inoltre osservato che la radicalizzazione di una singola modalità di approccio alla realtà sicuramente preclude degli aspetti che sarebbero chiaramente visibili con un'altra strategia cognitiva. L'intervento didattico deve saper guidare tra le diverse strategie cognitive. Bisogna capire che, per quanto siano complicate da padroneggiare queste strategie nel processo didattico, rappresentano i normali processi cognitivi che usiamo per svelarci la realtà. Solo attraverso la loro esplicitazione è possibile prendere consapevolezza dei limiti nel tentativo di far apparire il processo di apprendimento un piacere.

Riassumendo possiamo dire che i nostri *modi di guardare* corrispondono all'esigenza di ricostruire cognitivamente i fatti della realtà. Non si può vedere contemporaneamente la realtà in tutti i suoi aspetti: si sceglie quello che di volta in volta è più adatto alla circostanza, una sua particolare proiezione; lo si formalizza e si integra il risultato con altre analisi. Talvolta si devono scartare degli aspetti poco dominabili, poco chiari, o poco riproducibili e si cercano schematizzazioni più semplici ed elementari.

Qualunque ricostruzione dei fatti si scontra sempre con la difficoltà di gestire contemporaneamente: gli aspetti formali discreti, gli aspetti formali continui, gli aspetti interpretativi delle cose. Esistono però alcune strutture cognitive di base per la costruzione di conoscenza: modi di organizzare i fatti e modi di guardare per sistemi, per classi, per fenomeni, per variabili, per oggetti, per processi, per materiali etc. Tutti

questi modi si intrecciano formando fitte reti di interconnessioni, si sovappongono e sostengono a vicenda. Proprio a livello di questi intrecci bisogna cercare: le strategie per capire e per aiutare a capire, le ragioni del non capire.

Nella pratica didattica si può fare osservare come schemi cognitivi realativi a situazioni di comune esperienza possano essere reintrecciati tra loro fino a dar conto di fenomeni a prima vista poco correlati, ma sempre senza pretendere di uniformare le interpretazioni. In sostanza scrive Guidoni: «secondo noi c'è trasmissione culturale (per esempio, formazione scientifica di base) solo quando c'è anche trasmissione di consapevolezza e padronanza delle strategie base secondo cui è possibile pensare e agire [...] si tratta di essere coinvolti, con attenzione crescente, in un consapevole, continuo, molteplice *gioco cognitivo*, di cui i fatti, il proprio pensare e il pensiero degli altri sono gli attori essenziali.»

1.4 La logica della misura

Abbiamo visto che un modo per ricostruire cognitivamente differenze e cambiamenti è quello di guardare per proprietà variabili. Questo modo di analisi passa prima attraverso l'identificazione e il controllo delle singole variabili del sistema (o fenomeno), successivamente si devono rappresentare i legami che intercorrono all'interno del sistema tra le diverse variabili. Quindi abbiamo bisogno di un criterio coerente da adottare in diverse situazioni per "seguire" un aspetto che muta: questo può mutare tra due situazioni differenti nello stesso istante oppure nel tempo, ma in una stessa situazione. In generale è una procedura operativa⁹ a definire il confronto tra sistemi o fenomeni, questa procedura definisce la variabile di confronto che a sua volta permette di operare una relazione d'ordine. Dobbiamo poter dare valutazioni di *più* o *meno* o *uguale* secondo l'aspetto (variabile) per poter ordinare. I confronti possono essere fatti "a vista" oppure bisogna utilizzare oggetti e procedure che fungono da intermediari (ad esempio uno spago per misurare lunghezze), altre volte ancora si ricorre a uno strumento

⁹Si dice che una grandezza è definita operativamente quando viene specificato, in maniera univoca ed universale, il modo con cui detta grandezza viene misurata.[14]

[cap.2].

Per alcune variabili è possibile definire delle *operazioni di giustapposizione* di sistemi elementari in cui la variabile è definita, viene così a costruirsi un sistema composto in cui i criteri per identificare la variabile sono gli stessi di quelli usati per identifierla nel sistema elementare. La variabile così definita è equivalente a tutte quelle dei sistemi elementari presi insieme. Si giunge allora a definire due grandi classi di variabili: *estensive*, in cui la regola di equivalenza per giustapposizione è data dalla regola di addizione dei numeri interi, e variabili *intensive* in cui tale proprietà non vale.

Le variabili estensive possono dunque essere messe in corrispondenza, in modo approssimato, con i numeri interi (isomorfismo). Questo numero corrisponde al numero di volte per cui si deve replicare il *sistema unità* (elementare) scelto per ottenere il sistema equivalente (l'equivalenza è riferita alla variabile). Questo criterio porta a discretizzare una variabile continua e gli trasferisce anche le stesse proprietà che valgono per i numeri interi (commutativa, distributiva, etc.), inoltre si ha la possibilità di effettuare le stesse operazioni numeriche (addizioni, moltiplicazioni per N, etc.). Va comunque osservato che il processo di discretizzazione porta con sé il fatto che ogni misura risulta essere sempre approssimata, quello che si può fare è scegliere un opportuno *sistema unità* in modo da stabilire l'ordine di grandezza rispetto a cui si ritengono significativi i cambiamenti della variabile misurata. Suddividendo N volte in parti uguali il sistema unità si ottiene un nuovo sistema unità, un sottomultiplo, viceversa replicandolo N volte si ottiene un suo multiplo. L'uso dei decimali per rappresentare una variabile estensiva corrisponde alla possibilità di misurarla con differente sensibilità mediante un'opportuna scelta del sistema unità. In generale la misura per confronto di variabili estensive non è molto agevole, basti pensare che per effettuare misure di peso servono bilancie tarate sul peso campione e realizzate sulla base del principio di funzionamento delle bilancie a bracci uguali.

Una *variabile intensiva* invece non si può misurare sulla base del criterio "rapporto rispetto al sistema-unità"¹⁰ come avviene per le variabili extensive. Tuttavia esistono

¹⁰Un terremoto di valore zero non esiste, così come un terremoto di valore otto non corrisponde a due di valore quattro.

diverse strategie per assegnare numeri alle variabili intensive: i numeri così assegnati assumono di volta in volta un significato diverso in base al criterio scelto.

Per esempio si possono costruire *scales*: si scelgono un certo numero di situazioni campione, si ordinano dal *più* al *meno*, e si assegnano numeri crescenti alle diverse situazioni campione scelte. Così ogni altra situazione di cui si vuole misurare la variabile intensiva prescelta potrà essere esattamente equivalente a un valore numerico (campione) oppure intermedia tra campioni.

Un'altra strategia per assegnare numeri alle variabili intensive consiste nell'utilizzo di *trasduttori*: il cambiamento di una variabile intensiva è riferito sistematicamente al cambiamento di una variabile estensiva. Un esempio per tutti è quello del termometro, in cui la variazione di volume del liquido termometrico è messa in corrispondenza con la variazione di temperatura. Anche in questo caso, come nel precedente, la scala numerica è arbitraria: lo *zero* secondo Newton è la temperatura dell'uomo sano, l'*uno* quella dell'uccello, mentre per Celsius *zero* è la temperatura del ghiaccio fondente e *cento* quella dell'acqua che bolle.

Le misure di variabili intensive mediante sensori e trasduttori sono ormai entrate a far parte della nostra comune esperienza (basti pensare a uno smartphone, oppure a un'automobile) e saranno trattate nel secondo capitolo. Va comunque osservato che questo modo di procedere mediante trasduzione pone due problemi: il primo è relativo al fatto che la scala di misura risulta essere una scelta convenzionale, il secondo è un problema di principio. Infatti ad esempio una volta definito il cambiamento di lunghezza attribuito alla variazione di un grado nel termometro a mercurio si suppone che ad un cambiamento doppio, triplo di lunghezza corrisponda una cambiamento doppio, triplo di temperatura. Si suppone che la lunghezza (variabile dipendente) sia sempre linearmente¹¹ proporzionale alla temperatura (variabile indipendente). In natura esistono però materiali che reagiscono differentemente alle variazioni di temperatura: un termometro fatto con un materiale che varia poco il suo volume con la temperatura (si

¹¹Per quanto riguarda il termometro a mercurio questo vale nell'intervallo -38 °C / 350 °C

veda l'invar¹²) ci porta a dire che acqua bollente e ghiaccio fondente hanno la stessa temperatura. Siamo quindi di fronte a un problema di principio perché di per sé la temperatura non è misurabile se non per mezzo di una trasduzione, in cui si assume che la variabile dipendente (la lunghezza) vari linearmente con la variabile causale (la temperatura).

1.5 Discipline STEM e nuove tecnologie digitali

Centrale nello studio di tutte le scienze naturali è il *problema della misura*¹³. La logica che sta dietro le operazioni cognitive che si effettuano per associare un valore al cambiamento di una o più variabili, che fungono da descrittori nei fenomeni, sistemi, processi, è stata diffusamente trattata nell'1.4. In questo paragrafo discuteremo circa l'utilizzo delle nuove ¹⁴ tecnologie digitali nella didattica delle discipline STEM¹⁵.

Le domande intorno a cui ci si interroga sono, in sintesi, le seguenti: *in che modo le nuove tecnologie possono integrarsi nello studio delle discipline scientifiche? In che modo i nuovi strumenti possono contribuire alla comprensione di concetti fondamentali della matematica e della fisica?*[4]

Uno strumento di misura è un congegno tecnologico progettato per ampliare i nostri sensi, rendere possibile qualcosa che altrimenti non sarebbe possibile. Spesso le novità tecnologiche in ambito didattico vanno ad aggiungersi al materiale già esistente senza sfruttarne appieno le potenzialità e senza coglierne gli aspetti trasversali alle varie materie scientifiche. Questo problema va inquadrato nel fatto (par.1.3) che si è portati, anche da docenti, a *guardare* ai fatti del mondo in un unico modo, attraverso la scelta di un'unica e privilegiata *strategia cognitiva*. In tal senso una formazione iniziale e continua degli insegnanti potrebbe alleviare molto tale problematica.

¹²L'invar è una lega di ferro (64%) e nichel (36%), con tracce di carbonio, manganese, silicio. Venne scoperto da Charles Edouard Guillaume che per questo ricevette nel 1920 il premio Nobel.

¹³Il materiale di riferimento per la stesura di questo paragrafo è tratto nei tre documenti redatti dal gruppo di ricerca in Didattica della Fisica di Napoli [4].

¹⁴Non c'è dubbio che alcune tecnologie siano cronologicamente più recenti di altre. Per *nuovi* si intendono supporti tecnologici che possono coadiuvare il processo cognitivo di apprendimento delle discipline STEM. Effettuare una misura di pressione con un barometro a mercurio è didatticamente differente [Cap.3] dal farla con un sensore di pressione capacitivo o induttivo

¹⁵STEM è acronimo di science, technology, engineering and mathematics.

Un aspetto fondamentale del rapporto tra scienza e tecnologia è la sua *bidirezionalità*¹⁶: da un lato la progettazione di nuovi strumenti tecnologici deve basarsi sui modelli teorici della scienza, dall'altro la storia mostra come dalla tecnologia siano derivate rappresentazioni metaforiche della realtà. Secondo alcuni autori¹⁷, comprendere una cosa significa pervenire a una metafora per quel fenomeno, sistema etc. sostituendo ad esso qualcosa di più familiare; la familiarità a sua volta è associata ai processi cognitivi, alla memoria, alle contingenze culturali e materiali. Scrive Seymour Papert¹⁸: « Non avevo ancora due anni che ero già affascinato dalle automobili [...] Credo che l'aver tanto giocato con il differenziale sia stato più efficace per la mia comprensione della matematica di tutto quello che mi è stato insegnato alla scuola elementare. »

Qualunque strumento di misura costituisce un sistema fisico a sua volta, esso è caratterizzabile in termini di interazione con i sistemi studiati e in termini delle sue configurazioni interne, cioè in termini delle grandezze che definiscono lo *stato*¹⁹ interno del sistema di misura. Ogni interazione tra le parti di un sistema (sottosistemi), tra sistemi e tra sistema e ambiente avviene mediante strutture adatte a realizzare lo scambio, il raccordo tra le parti. Queste strutture per Guidoni[15] sono le *interfacce*: cioè qualcosa che si pone tra due realtà in interazione. Queste interfacce sono capaci di trasformare (trasdurre) un'informazione (segnaletico o stimolo), relative a uno stato o un cambiamento, in un'informazione capace di determinare un cambiamento in un altro sistema. Quindi ogni interfaccia è sensibile al cambiamento di una variabile. Porre l'attenzione sul meccanismo di trasduzione e sulle interfacce risulta fondamentale tanto nell'insegnamento delle discipline STEM che fanno uso di nuove tecnologie, quanto nel percorso che porta a nuove scoperte scientifiche.

Nell'utilizzo didattico di nuove tecnologie digitali, oltre che sugli aspetti di trasduzione e interfaccia, è fondamentale porre l'attenzione anche sui seguenti punti *codifica, rappresentazione, modellizzazione*. Infatti l'uso e il controllo di tali dispositivi di misura passa attraverso l'utilizzo di un linguaggio predefinito: il codice. Questo codice pone

¹⁶Questo aspetto era già intuibile nella definizione di tecnologia data nel paragrafo 1.1.

¹⁷Jaynes

¹⁸Seymour Papert, teorico del costruzionismo

¹⁹vedi par.1.3

dei vincoli sul modo di interagire con lo strumento, la forma stessa dei dati raccolti dipende dal dispositivo e dal tipo di codifica che bisogna utilizzare.

La possibilità di acquisizione dei dati in tempo reale offerta dai nuovi dispositivi digitali permette di porre l'attenzione sull' evoluzione dei fenomeni, sulla dinamica dei processi in gioco e sui possibili meccanismi di retroazione. I dati così acquisiti e codificati devono poi essere manipolati per consentire una *rappresentazione* del fenomeno in esame.

Risulta fondamentale per il processo di comprensione degli studenti riuscire a connettere i diversi tipi di rappresentazioni di uno stesso fenomeno (grafiche, numeriche...).

Come passo finale del processo di apprendimento troviamo la *modellizzazione*, ovvero il processo cognitivo che porta alla creazione di un modello. I modelli sono la rappresentazione mentale di fatti della realtà, essi sono formulati coerentemente ai dati acquisiti nel processo di trasduzione, codificati, e rappresentati. Nella creazione di un modello si fa uso di tutti i processi cognitivi enunciati nel paragrafo 1.3 (schematizzazione, modi di guardare, intrecci, relazioni, linguaggio, memoria, logica, contingenze culturali etc.).

Mediante l'utilizzo delle tecnologie digitali nel processo di misura è possibile verificare un modello già formulato precedentemente al fine di promuovere un'esperienza didattica oppure formulare nuovi modelli per interpretare i dati acquisiti.

Ognuno di questi aspetti meriterebbe un notevole approfondimento, ma già si intuisce quanto l'utilizzo di nuove tecnologie digitali sia trasversale nelle didattica delle discipline scientifiche: fisica, matematica, informatica (e non solo) vengono ad intrecciarsi magnificando il ruolo multidisciplinare che questi strumenti portano dietro.

Capitolo 2

Strumenti di misura: sensori e trasduttori

In accordo con quanto già detto nel primo capitolo sull'importanza della *trasduzione* nel processo conoscitivo, faremo qui una panoramica sugli strumenti di misura che operano questa *strategia* (§1.3.6) per *guardare* la natura. Saranno discusse le principali caratteristiche dei sensori con particolare riferimento a quelli usati nell'ambito della didattica delle discipline STEM, successivamente, sempre nell'ambito delle nuove tecnologie digitali usate in didattica, sono presentate le schede a microcontrollore che fungono da *interfaccia* (§1.5) tra utente e sensore. Infine sarà analizzato il funzionamento del sensore BMP180 oggetto della proposta didattica trattata nel capitolo successivo.

2.1 Macchine e strumenti di misura

Secondo Nicola Russo¹ una prima definizione di macchine, dove ricadono naturalmente gli strumenti di misurazione, è la seguente: “*Parola che ha una lunghissima storia e un'ampiezza semantica tale, che è opportuno precisare subito in quale significato più ristretto la utilizziamo: «macchina» vale qui innanzitutto come congegno artefatto. Vale a dire come composizione di una pluralità di elementi materiali estratti dalla loro*

¹ *Ontologia e genealogia delle macchine: un sunto*, Mechane, 2021

collocazione naturale e combinati secondo una catena di interazioni causali e retroazioni, tale che mediante il suo uso un uomo, un ceto, una classe, una corporazione, una cultura, una società... persegono e realizzano certi loro fini.”

La macchina, dunque, non è solamente un mero oggetto empirico, bensì un correlato inseparabile di attività umana e storica. Di un’attività che di fatto è la prima ad essere testimoniata: si parla di uomini solo dal momento che se ne ritrovano le prime creazioni tecniche, i primi artefatti. Sempre Russo, servendosi delle metodologie e di argomenti propri della filosofia teoretica, arriva a una definizione sintetica e complessiva: “*la macchina ci appare come medium strumentale artificioso tra uomo e natura, e tra uomo e uomo, tendente all’automatismo, ma finalizzato in maniera eteronoma, che incarna una decisione preteorica intorno alla causalità.*”

Chiudiamo questo paragrafo introduttivo al secondo capitolo stabilendo che gli strumenti di misura rientrano nella definizione sopra data di macchine, e seguendo *la logica della misura* data da Guidoni (§1.4) affermiamo che la misura è il procedimento attraverso il quale, usando uno strumento appropriato (macchina), si stabilisce il valore di una grandezza fisica, cioè si associano a essa un numero e una unità di misura. Nei paragrafi successivi descriveremo dei particolari strumenti (macchine) utili allo scopo del processo di misurazione: sensori e trasduttori.

2.2 Sensori e trasduttori

Così come fatto nel §1.1, è opportuno anche qui passare preliminarmente per la definizione dei termini. Le parole *trasduttore* e *sensore* sono molto utilizzate nell’ambito dei processi di misura e controllo. Il loro utilizzo nei più disparati campi delle scienze, dell’ingegneria e dell’industria ha contribuito a coniare sempre nuovi termini (gauge, cella, convertitore, attuatori ecc.) con la nascita di non poche confusioni. In molti casi la distinzione tra sensore e trasduttore non è così netta e delineata e molto spesso nella letteratura tecnica e nella pratica comune i due termini sono utilizzati come sinonimi. Opinione comune è quella che i trasduttori siano macchine che operano una trasformazione tra una grandezza fisica di ingresso e una grandezza fisica di uscita di tipo

diverso. Per quanto riguarda invece i sensori una definizione possibile li pone come dispositivi finalizzati alla trasformazione di segnali di bassa potenza a scopo di misura e che si differenzia dall'attuatore il quale è destinato a convertire grandezze cui è associata un'energia non trascurabile. Questa classificazione si basa sul significato che le due parole assumono nella lingua italiana: sensore è l'elemento di percezione mentre attuatore è l'elemento che agisce per mettere in atto un comando.

Un'altra schematizzazione vuole il sensore come lo stadio di ingresso di qualsiasi trasduttore, mentre l'attuatore come lo stadio di uscita. La seconda definizione è più vicina alla norma UNI 4546, secondo la quale il trasduttore è: "un mezzo tecnico che compie su un segnale d'ingresso una certa elaborazione, trasformandolo in un segnale d'uscita"; il sensore è un: "particolare trasduttore che si trova in diretta interazione con il sistema misurato" e infine l'attuatore è un: "particolare trasduttore che si trova in diretta interazione con l'utilizzatore dell'indicazione fornita". Per gli scopi di questo elaborato non si fanno distinzioni tra sensori e trasduttori e si useranno indistintamente i due termini.

Attualmente il segnale elettrico è il "vettore" più versatile per la trasmissione, la cattura, l'elaborazione e la memorizzazione delle informazioni, dunque i trasduttori di cui ci occupremo saranno quelli che convertono un segnale generico in segnale elettrico. La figura 2.1 mostra un trasduttore di posizione formato da un primo stadio di trasduzione forza-spostamento e da un successivo stadio spostamento-tensione elettrica. L'elemento mobile si sposta in base alla grandezza fisica di ingresso determinando la modifica del punto di contatto del cursore sulla resistenza del potenziometro e quindi provocando una variazione della tensione di uscita. La fig. 2.2 mostra invece il funzionamento mediante uno schema a blocchi del trasduttore:

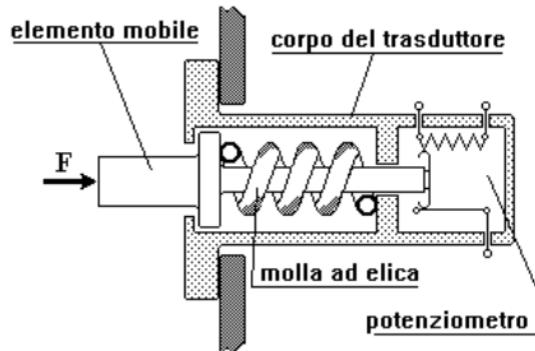


Figura 2.1: *Trasduttore "forza-tensione elettrica"*: la catena di trasduzione prevede il primo trasduttore elementare forza-spostamento e il secondo trasduttore spostamento-tensione elettrica.

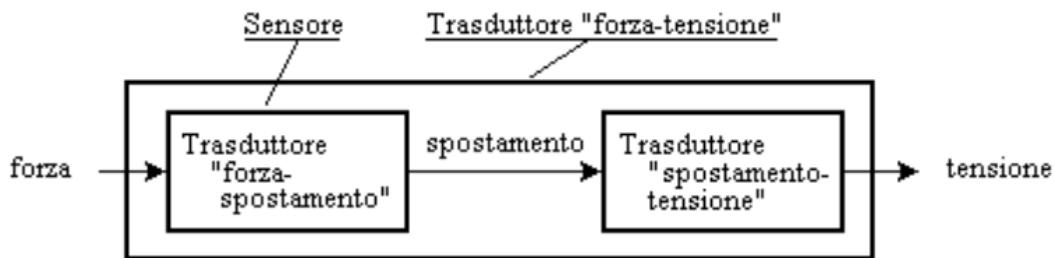


Figura 2.2: *Schema a blocchi del trasduttore forza-tensione*.

2.2.1 Classificazione dei sensori

I sensori misurano grandezze fisiche, l'informazione associata a una grandezza fisica che varia nel tempo è detta *segnaletico*. Le tipologie di segnali sono numerose, poiché numerose sono le grandezze fisiche misurabili; troviamo tra i principali tipi di segnale quelli: meccanici, elettrici, chimici, termici, magnetici, radioattivi. Data la natura elettrica della materia, per ogni grandezza fisica non elettrica, è sempre possibile realizzare un sensore che ha come uscita un segnale elettrico. Questo è detto a *tempo continuo* quando la variabile tempo t è continua in un dato intervallo (o su tutto l'asse dei tempi). Viceversa si dice a *tempo discreto* quando t è una variabile discreta, tipicamente

equi-spaziata e dove T_c è detto passo di campionamento. Combinando le possibili combinazioni dell'ampiezza del segnale e del tempo otteniamo quattro diverse tipologie di segnali riassunti nella seguente tabella:

Ampiezza	Tempo	Tipologia
Continuo	Continuo	Segnale Analogico
Continuo	Discreto	Segnale Campionato
Discreto	Discreto	Segnale Digitale
Discreto	Continuo	Non Usato

Tabella 2.1: Possibili tipologie di segnale

Prima di passare alla rassegna i possibili modi di classificare i sensori enunciamo il concetto di *dominio dei dati*², esso rappresenta il modo di codificare l'informazione. Il concetto di domini di dati e la suddivisione tra domini aiuta nella descrizione dei sensori e dei circuiti elettronici ad essi associati. Nella figura seguente sono contenuti i domini possibili per i segnali, si può vedere che una prima classificazione li divide in domini elettrici e non elettrici:

²Per una analisi approfondita si veda *Sensors and Signal Conditioning* [28].

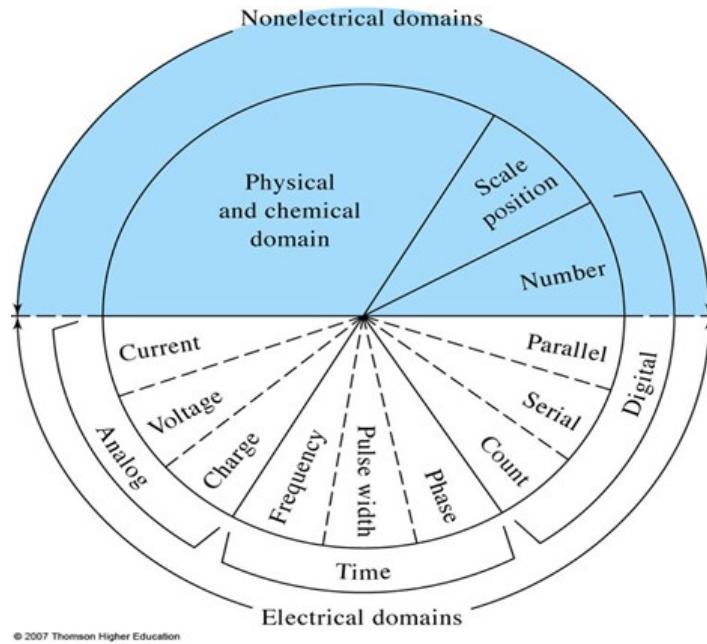


Figura 2.3: *Classificazione domini dei dati*

Nel dominio elettrico troviamo a loro volta i (sotto)domini analogico, digitale e del tempo, suddivisi a loro volta in altri sottodomini; ad esempio nel *dominio analogico* l'informazione è contenuta nell'ampiezza del segnale (tensione, carica, corrente o potenza), mentre nel *dominio del tempo* l'informazione è trasportata dalle relazioni temporali [28].

I sensori nel loro processo di trasduzione hanno bisogno di energia per funzionare, basandoci sul sistema che fornisce questa energia possiamo operare una prima suddivisione tra sensori *attivi* e *passivi*: nei sensori attivi (modulating) gran parte dell'energia del segnale d'uscita è fornita da una fonte ausiliaria di energia; nei sensori passivi (self-generating) l'energia del segnale d'uscita proviene dal segnale d'ingresso.

I trasduttori misurando grandezze fisiche possono trovarsi di fronte a segnali d'ingresso (stimoli) continui, cioè che possono assumere tutti i valori entro un certo intervallo, e segnali di ingresso discreti, si pensi ad esempio al verso di rotazione di un organo meccanico. Allo stesso modo rispetto al segnale di uscita possono essere suddivisi in sensori *analognici* e *digitali*:

Sensori analogici

In questi sensori il segnale d'uscita segue in maniera continua le variazioni del segnale di ingresso (dal punto di vista macroscopico); con l'aggettivo analogico si intende un dispositivo operante su segnali d'uscita elettrici, meccanici o di altra natura che rappresentano, per analogia³, le grandezze caratteristiche del sistema studiato cioè il segnale d'ingresso, ossia mettono in relazione due fenomeni fisici di natura diversa.

Sensori digitali

Qui l'uscita non potrà variare con continuità, ma in maniera discontinua rispetto al segnale di ingresso, essa può assumere solo valori discreti, ciascuno dei quali è un multiplo intero di una unità di base. Il segnale digitale è una modalità di rappresentazione di variabili fisiche nel quale la grandezza fisica è rappresentata da valori numerici (dall'inglese digit = cifra). Generalmente nei trasduttori digitali oltre ad uno o più sensori, che trasformano il segnale d'ingresso, solitamente continuo, in un segnale d'uscita elettrico, è presente un convertitore analogico digitale (ADC): effettua un campionamento del segnale analogico al fine di discretizzarlo. Questa discretizzazione non comporta, a rigore, perdita di informazioni se la frequenza di campionamento soddisfa il teorema di Shannon:

$$f_c = \frac{1}{T_c} > 2f_{max}$$

dove f_c rappresenta la frequenza di campionamento e f_{max} è la frequenza massima che compare nelle componenti armoniche del segnale campionato, dunque il segnale da campionare deve avere una banda limitata di frequenze. Il segnale campionato ancora non può essere elaborato in quanto può assumere teoricamente infiniti valori, mentre un calcolatore può rappresentare un numero finito di valori in base alla massima dimensione di parola rappresentabile dall'unità aritmetica. Occorre quindi eseguire un'operazione di quantizzazione sul segnale campionato in modo che questo possa venire rappresenta-

³Dal latino analogia, in greco antico *αναλογία*, cioè relazione di somiglianza, uguaglianza di rapporti, proporzione matematica.

to dall'aritmetica del calcolatore. L'operazione di quantizzazione porta con se sempre inevitabilmente una riduzione del contenuto informativo.

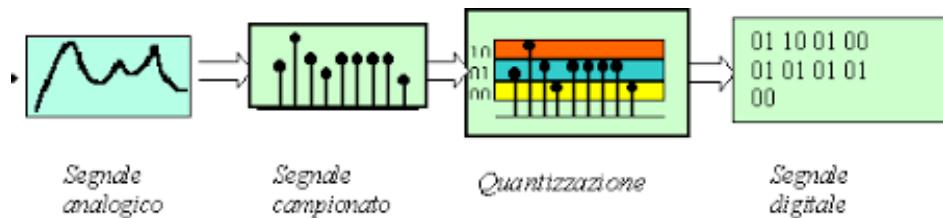


Figura 2.4: *Campionamento, quantizzazione e codifica di un segnale analogico*

Un altro modo di classificare i sensori è rispetto al modo di operare, troviamo: i *sensori a deflessione* dove la quantità misurata produce un effetto fisico che genera un effetto simile ma contrario alla causa (es. dinamometro); *sensori ad attraversamento dello zero (Null-type sensors)* dove si cerca di prevenire la deflessione dal punto di equilibrio opponendo un effetto noto che si oppone alla quantità da misurare. Vi deve essere un dispositivo che misuri lo scostamento dall'equilibrio e un sistema che restauri l'equilibrio (es. bilancia con due piatti). I sensori di “zero” sono in genere più accurati e sensibili e non necessitano di calibrazioni, ma sono più lenti e con tempi di risposta più lunghi.

Considerando la relazione risposta-stimolo *l'ordine* è un altro modo possibile di classificare i sensori, questo è legato al numero di elementi indipendenti che conservano energia (memoria), tipicamente nessuno (ordine zero, corrispondenti a sistemi di tipo *statico*, privi di memoria o istantaneo, la cui uscita dipende solo dalle variabili di ingresso e non dallo stato). Sensori del primo e del secondo ordine hanno uno o due elementi che memorizzano energia e corrispondono a sistemi *dinamici*, il cui comportamento è tipicamente più complesso dei primi e introduce dei tempi di risposta che possono essere significativi.

In generale i sensori vengono classificati in base alla grandezza fisica che misurano: temperatura, umidità, pressione, pH, flusso, velocità, accelerazione, forza, densità, composizione chimica, posizione etc. Questo approccio è difficilmente esaustivo a causa del

numero elevato di grandezze che possono essere misurate. In ambito ingegneristico si preferisce quindi classificare i sensori in base alla quantità elettrica variabile d'uscita, così si hanno i *sensori resistivi, capacativi e induttivi*; a questi vanno aggiunti i sensori capaci di generare tensione elettrica, carica (o corrente) e quelli basati sui semiconduttori a giunzione che rispondono alle radiazioni. Questo approccio riduce notevolmente i gruppi e favorisce lo studio dei *circuiti di condizionamento* del segnale.

2.2.2 Sensori Resistivi

I sensori basati sulla variazione della resistenza elettrica di un dispositivo sono molto comuni. Questo perché molte grandezze fisiche influenzano la resistenza elettrica di un materiale. Pertanto i sensori resistivi vengono utilizzati per risolvere molte tipologie di misurazioni. Questi sono a loro volta classificati in base alla grandezze fisiche misurate, ad esempio variabili meccaniche, termiche, magnetiche, ottiche e chimiche. In questa sezione ci limiteremo ad elencare le principali tipologie di questi sensori senza entrare nel dettagli tecnici.

Potenziometri

Un potenziometro è un dispositivo resistivo con un contatto elettrico scorrevole, solitamente lineare o rotante, utilizzato come sensore di posizione. Con riferimento alla figura 2.5, la resistenza tra il contatto scorrevole e uno dei terminali è data da:

$$R = x \frac{\rho}{A} = l\alpha \frac{\rho}{A}$$

Dove ρ è la resistività, A è la sezione trasversale, l è la lunghezza, x è la distanza percorsa dal terminale inferiore e $\alpha = x/l$ è la frazione di lunghezza corrispondente, con $1 \geq \alpha \geq 0$.

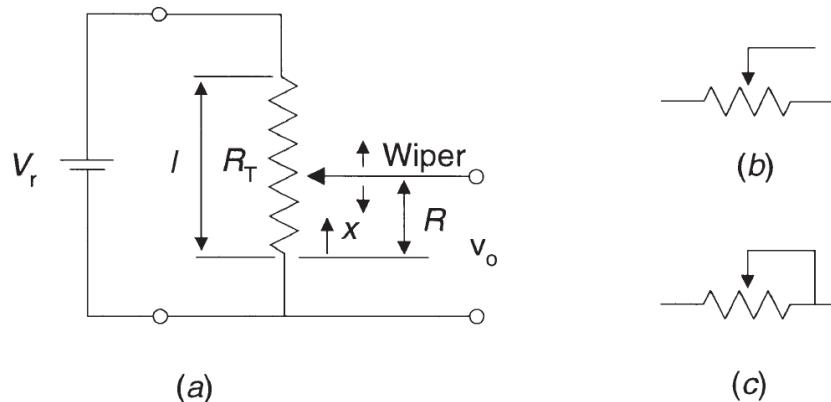


Figura 2.5: *Potenziometro come partitore di tensione (a) e suoi simboli circuituali (b), (c).*

Se V_r è la tensione di alimentazione del potenziometro, R_T è la resistenza del potenziometro quando $x = l$, cioè quando $\alpha = 1$, allora:

$$V_0 = V_r \frac{\alpha R_T}{R_T} = V_r \alpha$$

I potenziometri hanno un ampio input range, un'ottima linearità, una buona risoluzione (fino a $50 \mu m$) e una lunga vita. Soffrono però di autoriscaldamento che può creare drift in uscita.

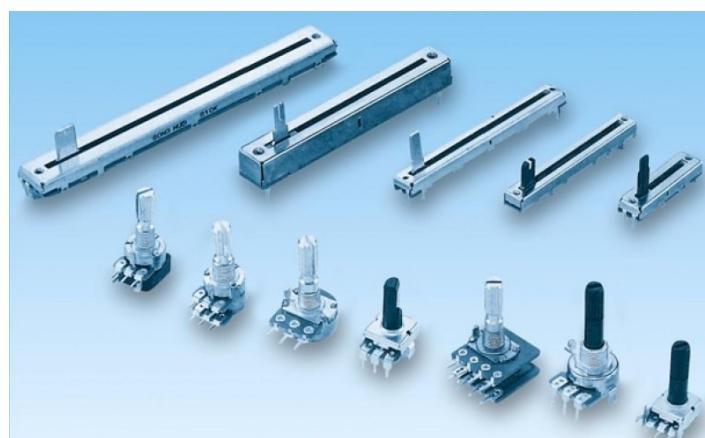


Figura 2.6: *Alcune tipologie di potenziometri.*

Estensimetri

Gli estensimetri si basano sulla variazione della resistenza elettrica di un conduttore o di un semiconduttore in seguito ad una sollecitazione meccanica, per un metallo con comportamento elastico vale:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\epsilon = E \frac{dl}{l}$$

dove E è il modulo di Young, A la sezione trasversale (supponiamo cilindrica), σ lo stress, ϵ è lo strain (variazione relativa della lunghezza l). Lord Kelvin ha riferito di questo effetto nei conduttori nel 1856, e C. S. Smith studiò l'effetto nel silicio e germanio nel 1954. Dalla seconda legge di Ohm sappiamo che in un conduttore la variazione di resistenza può essere indotta da variazioni della geometria e da variazioni della resistività ρ . Possiamo allora scrivere una variazione relativa di R :

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}$$

Esplicitando i vari termini si arriva a scrivere:

$$\frac{dR}{R} = G \frac{dl}{l} = G\epsilon$$

con

$$G = [1 + 2\nu + c(1 - 2\nu)]$$

G è un valore costante che dipende dal materiale (es. $G=6$ per il platino), c è la costante di Bridgman, ν il coefficiente di Poisson. Dunque se abbiamo una variazione di resistenza $R = R_0 + dR$ possiamo scrivere:

$$R = R_0 \left(1 + \frac{dR}{R_0}\right) \simeq R_0(1 + G\epsilon) \equiv R_0(1 + x).$$

Invece nel caso di semiconduttori lo stress meccanico provoca la variazione del numero di portatori n e della loro mobilità μ nella banda di conduzione; la variazione di resi-

stività predomina sui termini geometrici. Per sforzi di trazione o compressione, se gli elettroni scorrono lungo l'asse di sollecitazione, vale:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \pi_L \sigma$$

dove π_L è detto coefficiente piezoresistivo longitudinale del materiale. Anche per i semiconduttori si arriva a scrivere una relazione analoga:

$$G = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon}$$

però in questo caso $G \approx 10^2/10^3$ circa un ordine di grandezza superiore al caso dei conduttori.

Alcuni dei problemi relativi agli estensimetri sono:

- Non si deve oltrepassare il regime elastico (circa il 4% della lunghezza);
- problema legato all'adesivo da utilizzare;
- Problema legato alla temperatura che può portare un effetto confrontabile con quello dovuto alla deformazione, in special modo nei semiconduttori dove il numero dei portatori sono una funzione anche della temperatura $n = n(T)$;
- Problema legato alla dimensione dell'estensimetro che deve essere dello stesso ordine della lunghezza d'onda della grandezza da misurare.

Gli estensimenti riescono a misurare deformazioni di pochi micron, e solitamente sono accoppiati a sensori primari; ad esempio collegati ad una membrana deformabile (trasduttore primario) sono usati per misure di pressione.

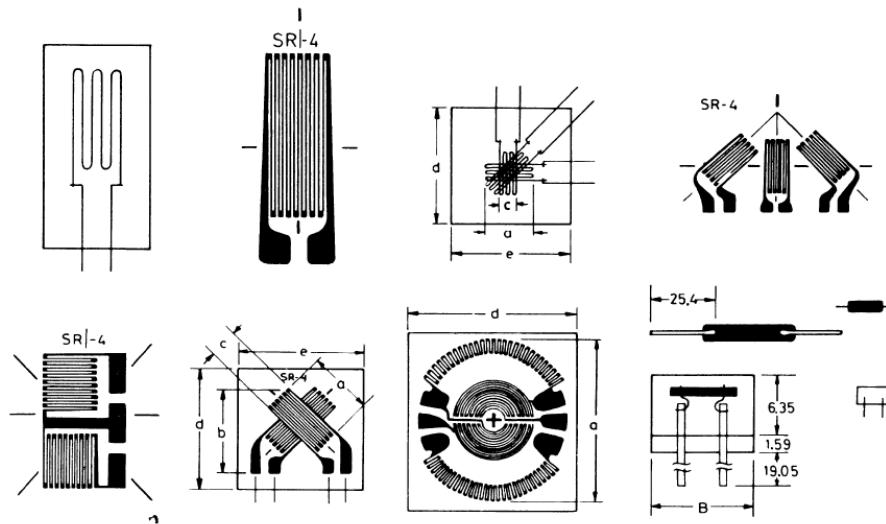


Figura 2.7: Esempi di diverse geometrie di estensimetri.

Sensori resistivi di temperatura

I sensori RTD basano il loro principio di funzionamento sul fatto che la variazione di temperatura di un conduttore, ad esempio un aumento, provoca un aumento delle vibrazioni medie degli atomi dalla loro posizione di equilibrio. Ciò si traduce in una maggiore dispersione di elettroni, che riduce la loro velocità media, di conseguenza, la resistenza aumenta quando la temperatura aumenta. Nell'immagine seguente sono mostrati i simboli circuitali dei sensori RTD, la barra sul simbolo della resistenza indica che la variazione della stessa è lineare rispetto la temperatura; quelli con tre o quattro terminali sono utilizzati per compensare errori e interferenze di misura.

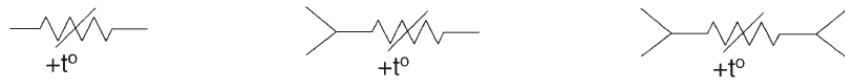


Figura 2.8: Simboli sensori RTD.

La relazione tra temperatura e resistenza elettrica si può scrivere con uno sviluppo

di questo tipo:

$$R = R_0[1 + \alpha_1(T - T_0) + \alpha_2(T - T_0)^2 + \dots + \alpha_n(T - T_0)^n]$$

R_0 è la resistenza alla temperatura T_0 , i coefficienti α_i sono ricavati sperimentalmente misurando R a fissate temperature. Nel platino il termine quadratico è un ordine di grandezza inferiore al termine lineare fino alla temperatura di 650°C questo lo porta ad essere il metallo più utilizzato per queste applicazioni.

I problemi legati a questi sensori sono dovuti all'autoriscaldamento che fissa un limite alla corrente massima estraibile, quindi un ΔT_{max} rispetto alla temperatura ambiente; altri problemi sono legati agli stress meccanici che sono fonte di interferenza.

D'altro canto godono di buona sensibilità, ripetibilità, costi contenuti, facilità di collegamento. Dal punto di vista dinamico si comportano come sistemi del primo ordine, con comportamento passa basso vista la loro elevata capacità termica. Per migliorare la velocità di risposta conviene usare RTD di piccola massa e alta resistenza elettrica. Nel campo dei semiconduttori troviamo invece i **termistori** che si dividono in NTC e PTC; si differenziano per il tipo di risposta al variare della temperatura. Godono di alta sensibilità sono più economici rispetto agli RTD, ma non sono lineari.

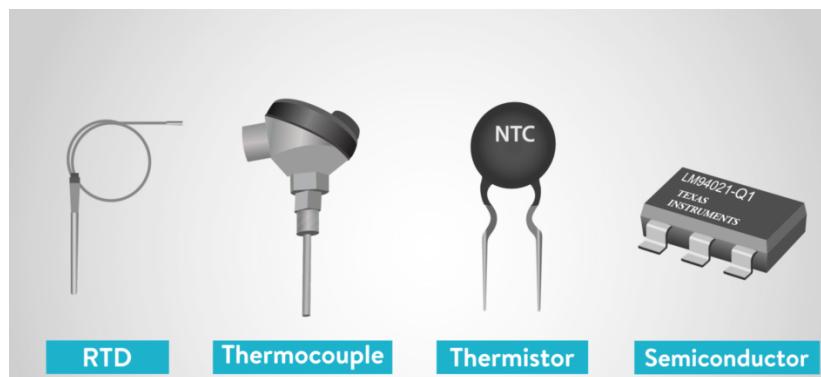


Figura 2.9: *RTD, termocoppie e Termistori*

Possiamo concludere dicendo che:

- I termistori sono realizzati in materiali semiconduttore mentre gli RTD sono

realizzati in metalli puri;

- I termistori hanno una precisione uguale o migliore rispetto agli RTD;
- I termistori consentono lunghezze di cavo maggiori rispetto agli RTD;
- I termistori hanno un tempo di risposta molto più rapido rispetto agli RTD;
- Gli RTD hanno un intervallo di temperatura maggiore rispetto ai termistori;
- Gli RTD sono generalmente utilizzati nelle installazioni industriali mentre i termistori sono maggiormente utilizzati nei sistemi elettronici di largo consumo.

Magnetoresistori

Un metallo percorso da corrente elettrica posto in un campo magnetico presenta quello che si chiama effetto Hall, nei materiali ferromagnetici si genera anche *l'effetto magnetoresistivo*: un aumento della resistenza elettrica del metallo dovuta al campo magnetico.

La relazione che lega resistenza e campo magnetico è data da:

$$R = R_{min} + (R_{max} - R_{min})\cos^2\theta$$

dove θ rappresenta l'angolo tra il vettore di magnetizzazione \vec{M} del materiale e la corrente, R_{min} ed R_{max} sono rispettivamente il valore della resistenza elettrica quando $\theta = \pi/2$ e quando $\theta = 0$.

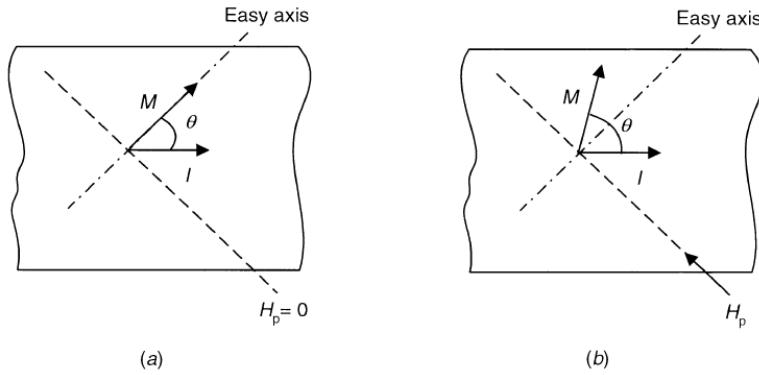


Figura 2.10: In figura (b) si vede la rotazione vettore \vec{M} in presenza di un campo magnetico \vec{H} rispetto al caso (a) in cui $\vec{H} = 0$

Se ignoriamo la necessità di linearizzazione e la dipendenza termica della resistenza i magnetoresistori offrono diversi vantaggi rispetto ad altri sensori magnetici. Primo, il loro modello matematico è un sistema di ordine zero: questo differisce dai sensori induttivi, la cui risposta dipende dalla derivata del flusso magnetico. Inoltre rispetto ai sensori ad effetto Hall, anch'essi dotati di un modello di ordine zero, i magnetoresistori mostrano una maggiore sensibilità, un range di temperatura più ampio (da 55 °C a 200 °C) e una banda passante di frequenza maggiore (da 0 a 5 MHz fino a 100 MHz, rispetto ai 25 kHz per i comuni sensori ad effetto Hall). Inoltre sono insensibili alle sollecitazioni meccaniche, ma anche molto più costosi. La loro principale applicazioni è riferita a misure angolari.

Fotoresistori

I fotoresistori (LDR) basano il loro principio di funzionamento sulla variazione della resistenza elettrica di un semiconduttore colpito dalla radiazione elettromagnetica. Il range di lunghezza d'onda a cui sono sensibili varia da 1mm fino a 10nm.

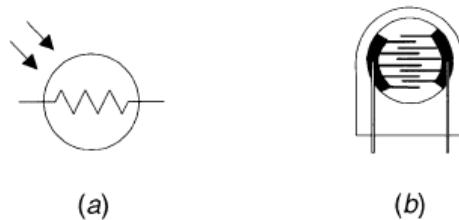


Figura 2.11: Simbolo circuitale fotoresistenza (a) ed esempio di fotoresistenza della Philips incapsulata in plastica trasparente (b)

Anche in questo caso il fenomeno è dettato dalla variazione del numero di portatori nella banda di conduzione; la luce fa aumentare il numero di portatori che saltano dalla banda di valenza a quella di conduzione facendo diminuire la resistenza elettrica del materiale. Nel caso di semiconduttori drogati il fenomeno è anche favorito dalla ionizzazione degli atomi delle impurità droganti (fig.2.12).

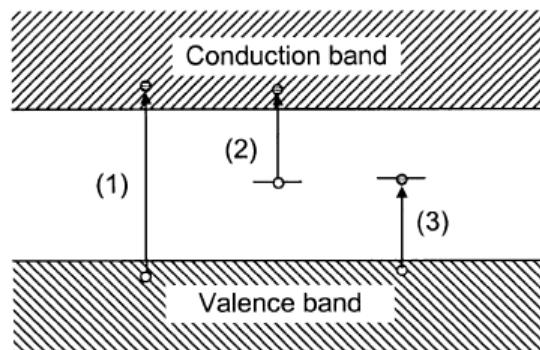


Figura 2.12: Tre meccanismi possibili che producono portatori liberi quando si illuminano semiconduttori drogati: (1) transizioni da banda a banda, (2) ionizzazione di atomi donatori (3) ionizzazione di atomi accettori.

La relazione tra resistenza e illuminamento E_ν è non lineare:

$$R = AE_\nu\alpha$$

dove A e α sono due parametri costruttivi; si hanno variazioni di resistenza fino $10^4\Omega$ tra condizione di buio e luce.

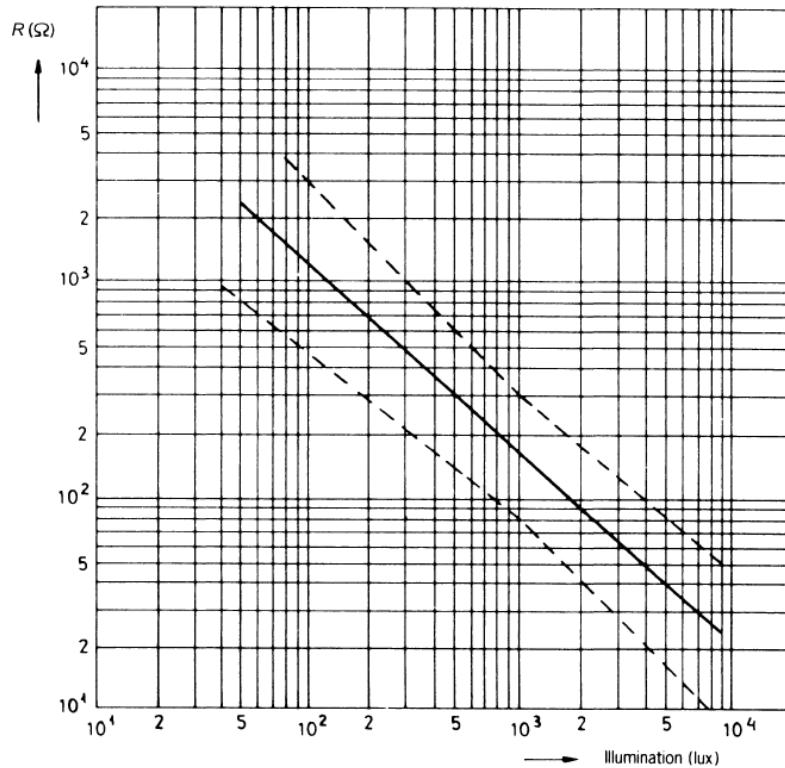


Figura 2.13: *Resistance-illumination characteristic for a CdS photoconductor for a color temperature of 2850 K (from Philips).*

Godono di un ampio spettro di sensibilità specialmente nella luce visibile, questa dipende dal tempo di vita media dei portatori prima della loro ricombinazione. Nei conduttori tale effetto non è visibile a causa dell'elevato numero di portatori liberi. Tra gli svantaggi troviamo l'isteresi e tempi di risposta lunghi dipendenti anche dalla temperatura (2-100ms); un altro limite è la temperatura massima d'utilizzo $T_{max} \approx 70^\circ\text{C}$. La temperatura influenza anche il rumore: conviene lavorare a basse temperature quando si vogliono misurare stimoli con lunghezza d'onda grande (infrarosso). Va inoltre osservato che la risposta dei fotoresistori dipende fortemente dal materiale e dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente: ad esempio, materiali a base di cadmio hanno un'ottima risposta nel visibile, mentre il piombo va bene nell'infrarosso

vicino, invece l'indio nell'infrarosso lontano.

Igrometri resistivi

Chiudiamo questa breve panoramica sui sensori resistivi con gli igrometri resistivi: parliamo di umidità quando ci si riferisce alla presenza di vapore d'acqua in un gas, oppure, nel caso di liquidi e solidi, all'acqua assorbita da questi (moisture).

Gli igrometri resistivi si basano sulla perdita di isolamento elettrico quando aumenta l'acqua del mezzo igroscopico, con conseguente variazione della resistenza elettrica. Ne troviamo essenzialmente di tre tipi:

- igrometri basati su sali (LiCl, BaF2, P2O5);
- igrometri basati su polimeri conduttori: questi hanno sostituito quelli basati sui sali. In entrambi i casi l'acqua ionizza il mezzo igroscopico con conseguente aumento della conducibilità elettrica. Il vantaggio di questi igrometri è il fatto che sono esenti da contaminazione superficiale, d'altro canto hanno tempi di risposta lunghi perché l'acqua deve penetrare all'interno del mezzo igroscopico e discoglierlo. Funzionano bene con alta umidità relativa $RH > 15\%$, sotto questa soglia la bassa ionizzazione del mezzo igroscopico non viene rilevata con conseguente perdita di sensibilità;
- igrometri basati su superfici trattate: questi sensori al contrario dei precedenti risentono fortemente degli effetti di superficie, ma sono più veloci.

Rispetto agli igrometri capacitivi, gli igrometri resistivi sono più precisi a $RH > 95\%$, non saturano ma sono un po' più lenti, meno precisi con $RH < 15\%$, e si adattano a un intervallo di temperatura più ristretto.

2.2.3 Sensori Capacitivi

I sensori capacitivi rientrano nella classe dei sensori a reattanza, questi, a differenza dei sensori resistivi, hanno il vantaggio che nella maggior parte delle applicazioni non

richiedono il contatto meccanico, o quando lo fanno, l'effetto di carico meccanico risulta minimo.

Sappiamo che i fattori che influenzano la capacità elettrica C di un sistema fisico sono la geometria G e il dielettrico ϵ :

$$C(\epsilon, G) = \frac{Q}{V}$$

Un dispositivo dotato di capacità elettrica è detto capacitivo, un tipico sistema progettato per essere puramente capacitivo (almeno idealmente) è il condensatore; esso è formato da due conduttori dette armature e da un materiale interposto tra le armature, il dielettrico. Ad esempio per un condensatore piano $C = \epsilon \frac{A}{d}$, dove A e d sono rispettivamente la superficie e la distanza tra le armature. Per n piani paralleli si ha:

$$C \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} (n - 1)$$

Nel caso il dielettrico fosse acqua abbiamo $\epsilon_r = 88$ a 0°C e $\epsilon_r = 55$ a 100°C dunque siamo in grado di associare ad una variazione di capacità una variazione di temperatura; nei materiali ferroelettrici vale la relazione:

$$\epsilon = \frac{k}{T - T_c}$$

con T_c temperatura di Curie e k una costante dipendente dal materiale.

Limiti

- Effetti di bordo: avvicinandosi agli estremi delle armature del condensatore il campo elettrico interno risulta non uniforme, tale effetto può trascurarsi sole se $d \gg l$, dove l è la dimensione caratteristica dell'armatura (o r nel caso di armatura circolare). In caso contrario per limitare questi effetti si racchiude il condensatore all'interno di lamine metalliche a potenziale fissato detti *anelli di guardia*:

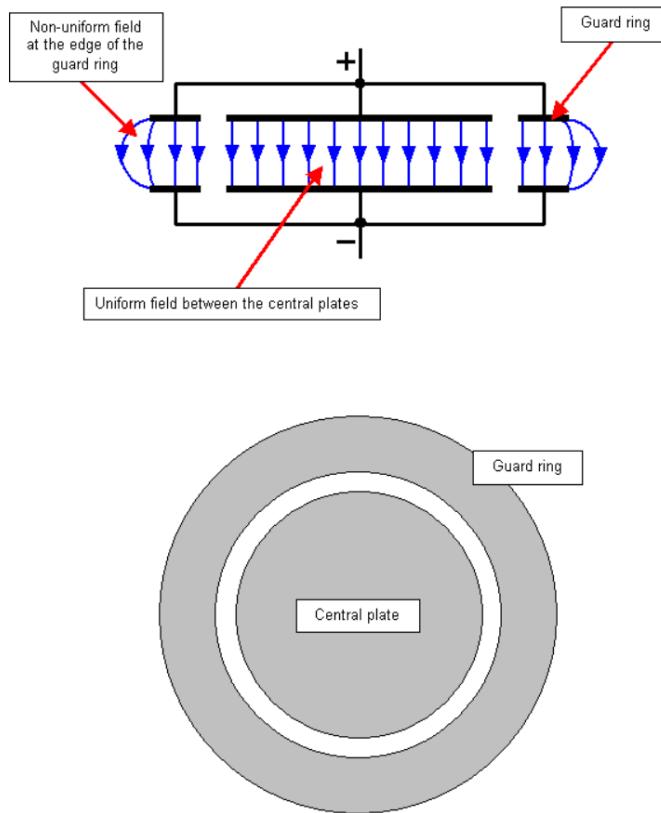


Figura 2.14: *Condensatore con anelli di guardia.*

- Variazione dell’isolamento del dielettrico: ad esempio l’umidità che penetra nel dielettrico porta con se un termine resistivo, quindi bisogna considerare l’impedenza complessiva $R + jX$. Il termine resistivo porta dietro anche fenomeni di dissipazione termica che non vanno sottovalutati. In aggiunta l’acqua ha comportamento resistivo molto diverso tra regime alternato e regime continuo;
- Interferenze: tutte le parti metalliche che compongono il sensore, compreso cablaggio e sistema di condizionamento del segnale, possono aggiungere capacità parassite non facilmente trattabili: ad esempio un movimento relativo tra due cavi, o cavo sensore può portare alla variazione del valore delle capacità parassita, quindi a delle interferenze variabili. Per ridurre queste problematiche sia il sensore che i cavi vengono schermati.

Vantaggi

- Le principali applicazioni che trovano i sensori capacitivi sono le misure di spostamento. Questi infatti come già detto non necessitano di contatto meccanico con conseguente riduzione di attriti ed errori. È facile osservare che se l'oggetto di cui si vuole misurare lo spostamento rappresenta una delle due armature del condensatore, la forza di attrazione che questo subisce è di pochi nN;
- Stabilità, riproducibilità, assenza di isteresi;
- Basso drift per invecchiamento;
- Alta risoluzione (per i sensori di posizione sotto i 10pm);
- Schermaggio: non creano interferenze esterne contrariamente ai sensori induttivi;
- Effetti dovuti alle variazioni di temperatura ΔT sono controllabili.

Tipologie

1. Sensori in cui varia l'area delle armature;
2. Sensori in cui varia la distanza tra le armature;
3. Sensori in cui varia il dielettrico.

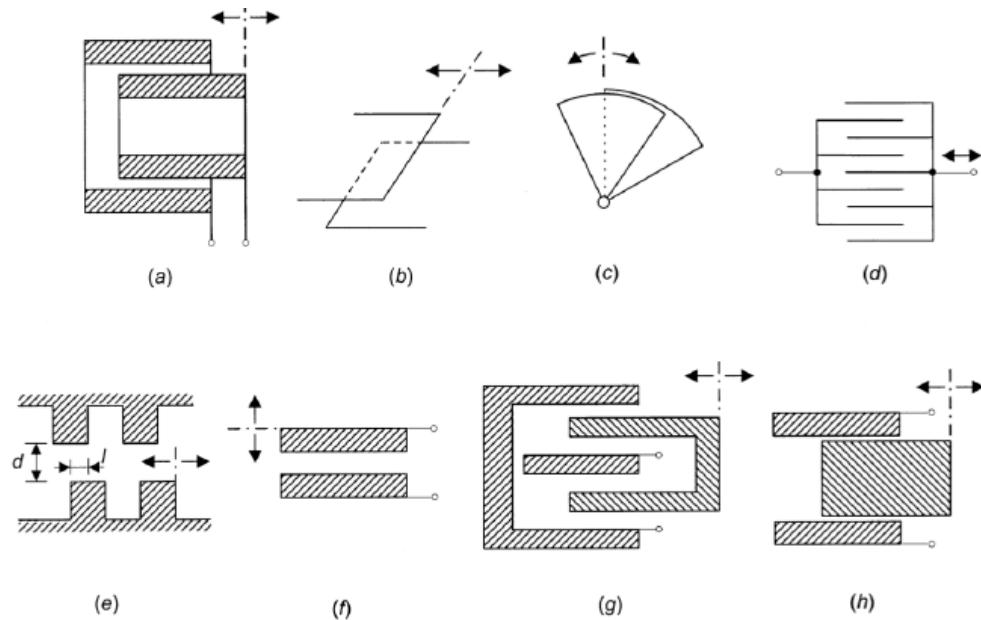


Figura 2.15: (a)-(e) sensori a variazione di area, (f) a variazione di distanza tra le armature, (g)-(h) a variazione di dielettrico.

Un sensore di tipo 1. è il *level gauge* che misura il livello di liquido in un recipiente. Il liquido può essere conduttivo o isolante, nel caso sia conduttivo esso funge da armatura. Possibili configurazioni sono illustrate nella figura 2.16:

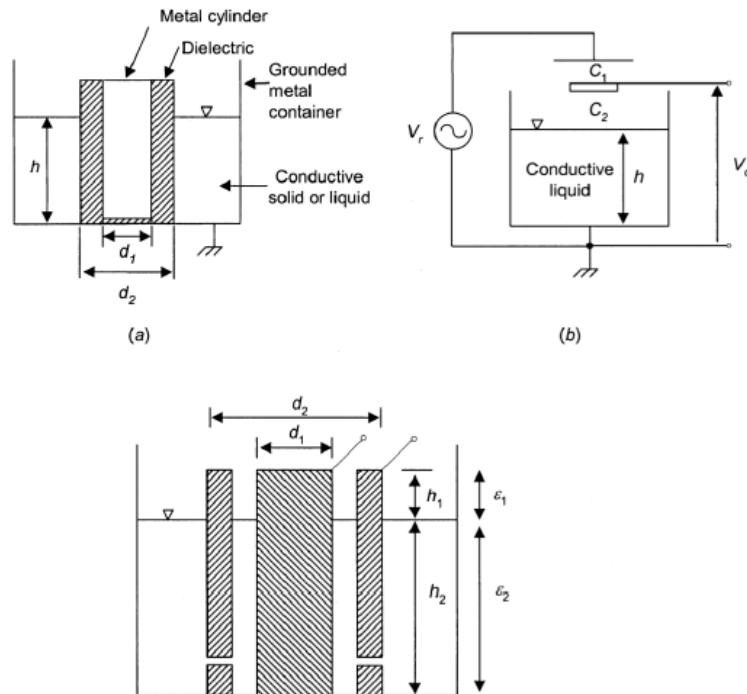


Figura 2.16: Possibili configurazioni di Level Gauge: (a) e (b) in cui il liquido è un conduttore, (c) in cui il liquido è un isolante.

Cor riferimento 2.16a, essendo il recipiente cilindrico abbiamo:

$$C = \frac{2\pi\epsilon h}{\ln(d_2/d_1)}.$$

Nel caso della figura 2.16b abbiamo una tipologia di tipo 2., dove si ha la variazione della distanza tra le armature. La configurazione definisce un partitore capacitivo con C_1 fissato e C_2 variabile in funzione del livello del liquido conduttivo:

$$V_0 = V_r \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Nella figura 2.16c abbiamo il caso del liquido dielettrico, questa configurazione è una di tipo 3. dove varia il dielettrico. In questa configurazione abbiamo il parallelo di due condensatori: uno ad aria dove l'altezza del dielettrico è data da h_1 e uno a liquido

di altezza h_2 ; la minima capacità del sistema è data per $h_2 = 0$ dove abbiamo un condensatore ad aria che restituisce la capacità di offset:

$$C \approx \frac{2\pi(\epsilon_1 h_1 + \epsilon_2 h_2)}{\ln(d_2/d_1)}$$

I **sensori capacitivi differenziali** rappresentano un'altra importante tipologia: questi sono realizzati in modo da avere due condensatori variabili che subiscono una variazione uguale ed opposta; ad esempio in uno si ha l'aumento della distanza $d + \delta d$ e nell'altro $d - \delta d$. Nei sensori differenziali un opportuno condizionamento del segnale produce un'uscita lineare, elevata sensibilità e zero offset. Nella figura seguente è illustrato lo schema di un sensore capacitivo differenziale:

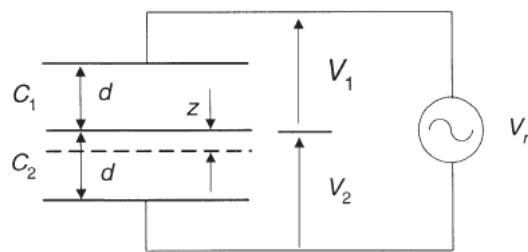


Figura 2.17: Capacitore differenziale basato sulla variazione di distanza tra le armature.

Inizialmente $d_1 = d_2$, se poi a causa di uno stimolo il condensatore C_1 passa a $d_1 + z$ e il condensatore C_2 a $d_2 - z$ si ottiene una differenza di tensione ai capi dei due condensatori:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \frac{V_r z}{d}$$

si vede la linearità della relazione e lo zero offset, infatti per $z = 0$ si ha $\Delta V = 0$.

Applicazioni e caratteristiche

Tra le principali applicazioni dei sensori capacitivi troviamo quelle di sensori di prossimità, igrometri ad alta sensibilità per bassi valori di umidità reale, tomografia elettrica (ECT), level gauge, applicazioni medicali (misura del tremore umano), etc.

I sensori capacitivi inoltre sono facilmente implementabili nel silicio (sensori di pressione, di forza, di accelerazione) e hanno un basso coefficiente di temperatura rispetto ai sensori resistivi. L'uscita è sia lineare, come abbiamo visto nel sensore differenziale, che non lineare. L'impedenza d'uscita tende a diminuire in corrente alternata con le alte frequenze, mentre l'impedenza di ingresso è alta.

2.2.4 Sensori Induttivi

L'altra importante tipologia di sensori a reattanza è rappresentata dai sensori induttivi.

Dato un circuito magnetico a N spire percorse da corrente I (fig.2.18):

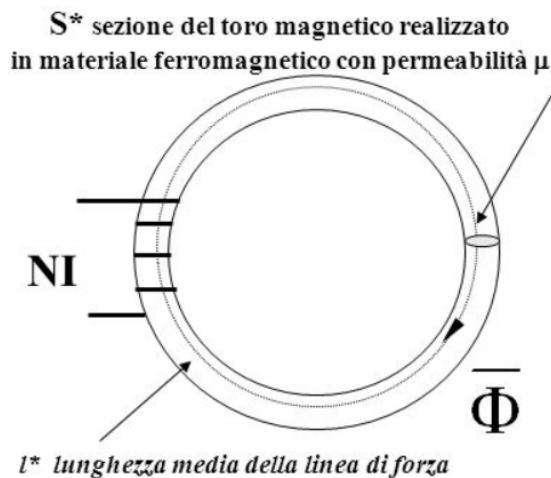


Figura 2.18: Circuito magnetico toroidale a N spire, di sezione S , lunghezza l , e permeabilità magnetica μ .

Vale la legge di Hopkinson:

$$F = R\Phi$$

Dove $F \equiv NI$ prende il nome di forza magnetomotrice, $R = \oint_l \frac{dl}{\mu S}$ è la riluttanza e $\Phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S}$ è il flusso del campo magnetico \vec{B} attraverso la superficie S . La riluttanza può essere anche messa in relazione con il coefficiente di autoinduzione L se si considera il circuito stesso o con il coefficiente di mutua induzione M se si considerano gli effetti di interazione con altri circuiti vicini. Pertanto, qualsiasi variazione di N , μ o nella

geometria (l o S) può essere applicata in linea di principio per il rilevamento. Gran parte dei sensori si basano però sulla variazione della riluttanza R , attraverso una spostamento che può far variare l (variable gap sensors) o μ (moving core sensors); in alcune applicazioni R può variare anche a causa di correnti parassite (eddy currents sensors).

Limiti

Una problematica che riguarda i sensori induttivi è l'alta sensibilità ai campi magnetici esterni, sono quindi spesso schermati con materiali ad alto μ ; d'altra parte anche gli effetti di bordo, dovuti dal sensore stesso, sono molto invasivi per i circuiti e gli eventuali sensori vicini, questo limita il range di misura per un dato sensore, cioè un sensore induttivo di lunghezza l non sarà sfruttato nella sua interezza, ma per una lunghezza $l_0 < l$ per evitare distorsioni dovute agli effetti di bordo; nei casi in cui abbiamo bisogno di sensori induttivi con core ferromagnetico bisogna lavorare a temperature T più basse di quella di Curie $T < T_c$ per non perdere le proprietà ferromagnetiche del nucleo.

Vantaggi

Tra i principali vantaggi di questi sensori troviamo:

- Alta vita media: l'assenza di contatti meccanici tra le parti genera un MTBF⁴ molto alto (fino a 100 anni);
- Possibilità di essere usati in ambienti polverosi, soprchi e vibranti;
- Alte temperature di utilizzo (oltre 600°C): si possono raggiungere temperature superiori a quelle di Curie quando gli effetti ferromagnetici del core non sono necessari;
- Alla grande forza di inerzia necessaria per mettere in moto il core (dove presente) corrispondono segnali molto ampi e quindi facilmente rilevabili rispetto al rumore;

⁴Mean time between failures, ovvero il tempo medio tra i guasti.

- Alta ripetibilità.

Configurazioni

Nella figura seguente troviamo delle possibili configurazioni per sensori a riluttanza variabile:

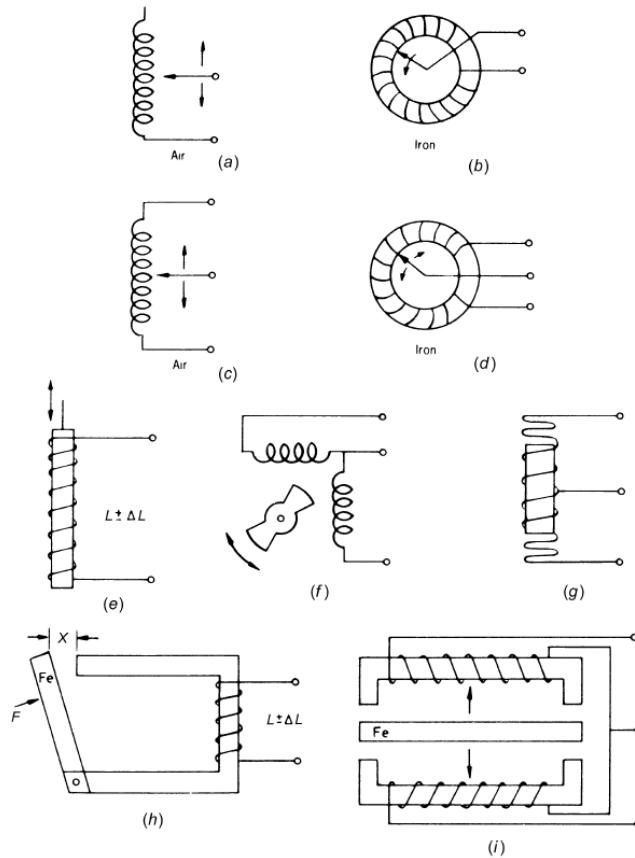


Figura 2.19: *Sensori a riluttanza variabile: (a)-(d) a variazione di numero di spire, (e)-(g) a variazione del core, (h) e (i) a variazione di geometria. I sensori (c), (d), (f), (g) e (i) sono di tipo differenziale.*

Le proprietà dei sensori a riluttanza variabile dipendono fortemente dal tipo di nucleo. I sensori con un nucleo d'aria funzionano bene ad alte frequenze rispetto a quando si utilizza un nucleo ferromagnetico, questo perché l'aria non subisce correnti parassite. Di contro abbiamo una minore sensibilità con il core d'aria, mentre invece

i nuclei ferromagnetici schermano da interferenze esterne e aumentano la sensibilità (1-1000 mH).

Applicazioni

I sensori induttivi accoppiati a un sensore primario possono essere usati per numerose applicazioni di misura. Trovano largo utilizzo per misure di spostamento, prossimità e spessore. Tra questi sensori troviamo quelli che sfruttano il fenomeno delle **correnti parassite** indotte: il coefficiente di autoinduzione L di una bobina alimentata da corrente alternata diminuisce se un oggetto conduttivo non magnetico è posto all'interno del suo campo magnetico. Infatti il campo magnetico variabile, generato dalla bobina, induce correnti parassite sulla superficie dell'oggetto che, a loro volta, producono un campo magnetico secondario, il quale induce una corrente opposta nella bobina. Più l'oggetto è vicino alla bobina, maggiore è la variazione di impedenza ΔL . Nei materiali bersaglio ferromagnetici, cioè quelli di cui si vuole conoscere la posizione o lo spessore, aumentano il coefficiente L della bobina a causa dell'aumento del campo magnetico dovuto alla loro maggiore permeabilità. Tuttavia se le correnti parassite sono abbastanza forti da superare l'effetto prodotto dal ferromagnete, la reattanza induttiva diminuisce. Per utilizzare questo metodo di misurazione il target da misurare, in cui sono prodotte le correnti parassite, deve essere sufficientemente spesso rispetto alla *profondità di pelle* della corrente, come dato da:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

Quindi per target sottili bisogna lavorare ad alta frequenza in modo da avere un δ piccolo rispetto allo spessore t ; ad esempio per l'alluminio se lavoriamo a frequenze di 1MHz abbiamo un $\delta = 84\mu m$. Nelle figure 2.20 e 2.21 sono mostrati rispettivamente sensori induttivi per misure di spessore t , in particolare nel caso in cui il materiale di cui si vuole conoscere lo spessore è isolante si applica al di sotto di questo uno strato di materiale conduttivo (es. alluminio) :

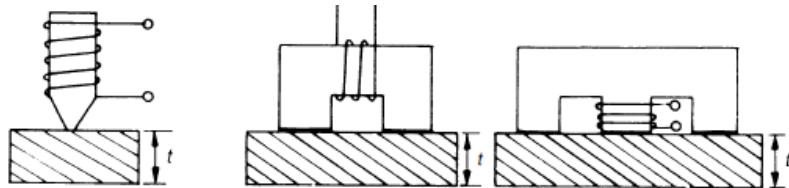


Figura 2.20: *Misura di spessore t in cui il target è un conduttore ferromagnetico.*

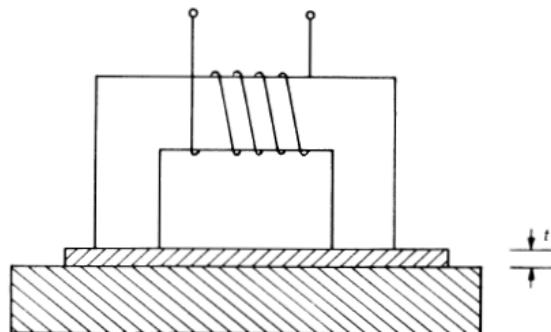
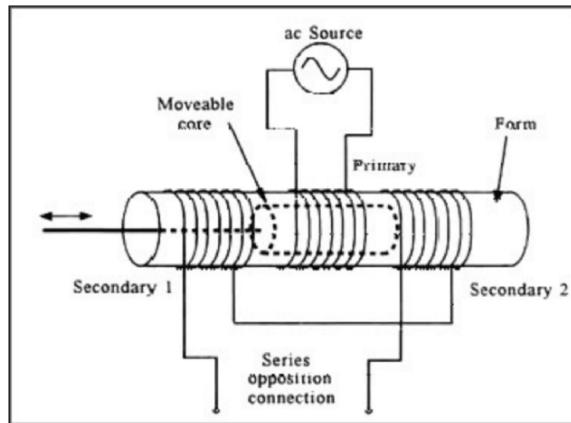
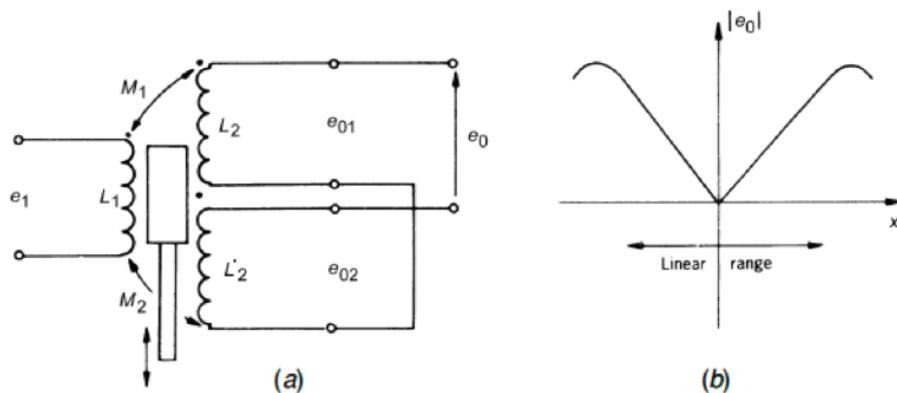


Figura 2.21: *Misura di spessore t con target non conduttivo di spessore t .*

Nei sensori induttori a correnti parassite troviamo una relazione esponenziale tra l'induttanza L della bobina e la distanza d del target.
Un'altra applicazione dei sensori induttori basata sulla mutua induzione è data dai **Linear Variable Differential Transformers** (LVDTs). Il loro schema di funzionamento è rappresentato nella figura seguente:

Figura 2.22: *Schema costruttivo LVD.*Figura 2.23: *Rappresentazione circuitale di un LVDT (a), andamento risposta-stimolo (b).*

All'equilibrio la massa ferromagnetica è in posizione centrale tra i due avvolgimenti secondari, questa massa tramite un'asta non magnetica è collegata meccanicamente all'oggetto di cui si vuole misurare lo spostamento. Quando il ferromagnete si muove genera una variazione differenziale nei coefficienti di mutua induzione, questa variazione corrisponde ad una variazione di tensione e_0 (fig.2.23a). Come si evince dalla

(fig.2.23b) l'andamento della e_0 in funzione dello spostamento del core ha andamento lineare. Va osservato che c'è bisogno anche di una misura di fase per valutare il verso dello spostamento. Questa tipologia di sensore hanno un comportamento passa alto, dunque una maggiore sensibilità alle frequenze alte; l'interferenza da temperatura può essere limitata alimentando il primario con una corrente costante. Altre caratteristiche vantaggiose di questi sensori si trovano: nell'alta risoluzione, nell'alto MTBF dettato dall'assenza di attriti e nell'isolamento elettrico tra primario e secondario.

Chiudiamo questa sezione ricordando che una variazione di campo elettrico o magnetico non è necessariamente collegata a una variazione di reattanza, i sensori per i quali ad una variazione di una grandezza fisica di ingresso corrisponde una variazione di campo elettrico o magnetico prendono il nome di **sensori elettromagnetici**. Ad esempio tra questi troviamo i sensori che sfruttano la legge di Faraday e i sensori ad effetto Hall.

2.2.5 Blocco di Condizionamento

I *signal conditioners* sono elementi del sistema di misura che trattano il segnale elettrico proveniente dal sensore e forniscono in uscita un segnale utilizzabile per la trasmissione, la visualizzazione o la memorizzazione del segnale stesso. A volte servono per meglio adattare il segnale ad un dispositivo successivo. Sono normalmente dispositivi elettronici che possono:

- Amplificare;
- Spostare il livello di tensione;
- Filtrare;
- Adattare l'impedenza;
- Modulare o demodulare.

Il sistema sensore più *conditioner* è spesso chiamato *transmitter*. Un ADC per esempio può avere una impedenza di ingresso relativamente bassa e una sensibilità nell'ordine

dei volt, mentre l'uscita del sensore può essere di pochi mV, per cui il segnale va trattato in tensione, amplificandolo, e adattato in impedenza se l'impedenza di uscita del sensore è paragonabile a quella di ingresso dell'ADC.

Si distinguono essenzialmente due tipologie di circuiti di condizionamento: *a deflessione* e *metodi di zero*. Per quanto riguarda i sensori resistivi i metodi per deflessione consistono nel rilevare la differenza di potenziale ΔV ai capi del sensore resistivo oppure la corrente che lo attraversa, mentre i metodi di zero si basano sul bilanciamento di un ponte di Wheatstone(2.24), ovvero la condizione di azzeramento del ponte si raggiunge quando la corrente i_{AB} che scorre tra in nodo A e il nodo B è nulla.

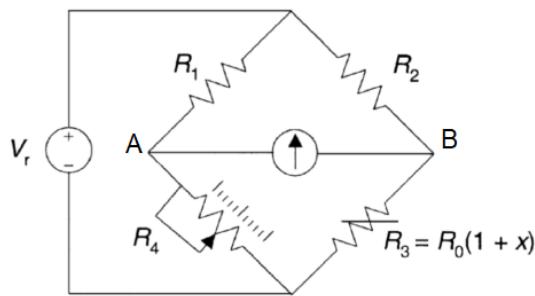


Figura 2.24: *Circuito di zero a ponte di Wheatstone: R_3 resistenza variabile, R_4 sensore resistivo.*

I metodi di zero restituiscono misure più accurate di tipo differenziale, buoni nel limitare le interferenze in temperatura, inoltre si hanno sensibilità più elevate dei metodi a deflessione. Per contro la condizione di azzeramento è molto difficile da soddisfare, infatti spesso i ponti sono usati “a deflessione”, cioè $V_A \neq V_B$ anche se nei calcoli si considera l'approssimazione $i_{AB} \approx 0$. Nel caso dei sensori a reattanza l'alimentazione del circuito di condizionamento deve essere in regime alternato (tensione o corrente), contrariamente a quanto avviene nei sensori resistivi.

Per quanto riguarda il condizionamento di segnali dinamici le cose si complicano notevolmente: si utilizzano tecniche raffinate di modulazioni in ampiezza tramite amplificatori a frequenza portante (carrier amplifier).

2.2.6 Interferenze

Il sensore non risponde solo alla grandezza da misurare e il segnale di uscita non è dovuto interamente al solo segnale di ingresso. Un semplice modello che tenga conto dei possibili modi in cui il segnale d'uscita viene alterato è il seguente:

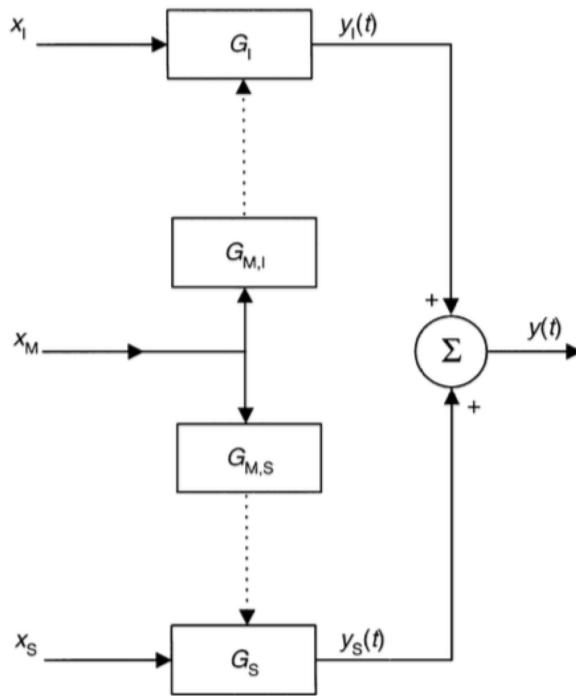


Figura 2.25: *Un possibile modello di interferenza del segnale d'uscita*

x_S rappresenta il segnale da misurare, x_I è il segnale di interferenza, mentre x_M sono altri segnali di ingresso che vanno a modificare i guadagni di G_S e G_I per mezzo di $G_{M,S}$ e $G_{M,I}$. L'uscita è rappresentata dal segnale $y(t)$, dato dalla sommatoria del segnale di ingresso e dalle interferenze, ciascuno con i rispettivi guadagni (o perdite). I guadagni possono essere lineari, non lineari, variabili o casuali. Ad esempio gli estensimetri (strain gauges) sono sensori di deformazione che sfruttano la variazione di resistenza elettrica R (segnalet x_S), di un conduttore o semiconduttore, sottoposto a deformazione. Anche una variazione della temperatura T può portare alla variazione di R (segnalet x_I). Inoltre per misurare R si utilizza un circuito elettronico, che risente anch'esso della variazione di T (segnalet x_M) attraverso i guadagni

G_{MS}, G_{MI} .

Senza entrare nei dettagli matematici dei sistemi lineari, della trasformata di Laplace e delle funzioni di trasferimento una possibile tecnica di compensazione è quella *retroazione negativa*: una tecnica comunemente usata per ridurre gli effetti delle interferenze e viene usata nei sistemi ad attraversamento dello zero. Assumiamo che G sia la funzione di trasferimento complessiva del sistema (interferenze incluse) e H la funzione di trasferimento associata al sistema di retroazione.

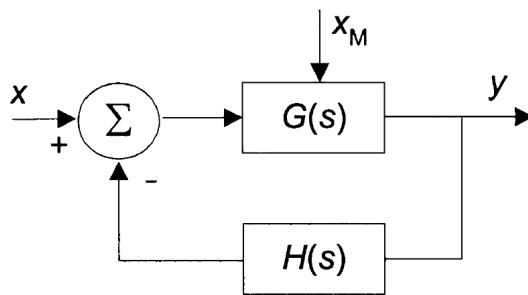


Figura 2.26: Compensazione interferenza tramite retroazione

La relazione ingresso-uscita può essere ricavata, nello spazio delle frequenze ($t \rightarrow s$), considerando che:

$$Y = G(s)X(s) - G(s)H(s)Y(s) \rightarrow$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{G}{1 + GH} \simeq \frac{1}{H} \quad se \quad G(s)H(s) \gg 1$$

Nell'ipotesi $GH \gg 1$ la funzione di trasferimento dipende solo da H e non da G . Se H è poco sensibile alle interferenze, utilizzando ad esempio un dispositivo di bassa potenza rispetto a G , il sistema risulta meno sensibile alle interferenze e più lineare. Altre tecniche di compensazione dell'interferenza sono il *filtraggio* e la *compensazione negativa*, il primo è molto vantaggioso quando lo spettro delle frequenze di interferenza è molto diverso da quelle del segnale di interesse, invece la compensazione consiste nell'applicare degli ingressi con comportamento opposto a quello dell'interferenza.

Un ultimo aspetto che in questa sezione merita nota è il cosiddetto *problema diretto-*

inverso: nel dominio delle frequenze $t \rightarrow s$ la trasformata di Laplace (fig.2.27) permette di studiare la risposta $Y(s)$ di un sistema, attraverso la sua funzione di trasferimento $H(s)$, ad uno stimolo $X(s)$. Antitrasformando ritroviamo la risposta $y(t)$ allo stimolo $x(t)$ nel dominio del tempo. Questo appena descritto è detto problema diretto.

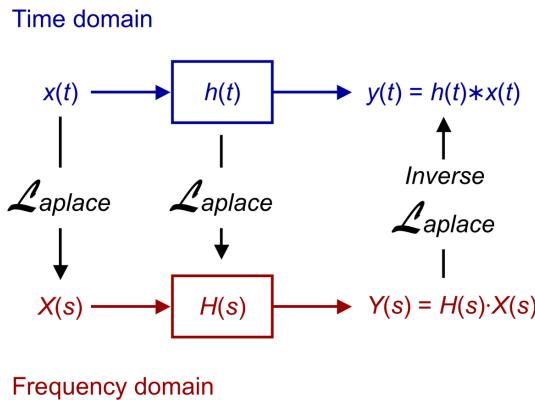


Figura 2.27: *Descrizione trasformata di Laplace su un sistema dinamico lineare stazionario*

In realtà in molti casi noi siamo interessati alla variabile di ingresso $x(t)$ di cui misuriamo l'effetto $y(t)$ attraverso il sistema rappresentato dalla funzione di trasferimento $H(s)$ nello spazio delle s : ci troviamo quindi di fronte al problema cosiddetto inverso:

$$x(t) = L^{-1}[X(s)] = L^{-1}\left[\frac{Y(s)}{H(s)}\right]$$

Dal punto di vista matematico questa l'inversione è sempre possibile⁵, però nella realtà dei fatti abbiamo che:

- quello che misuriamo è affetto da rumore;
- La misura è spesso una campionatura più o meno fedele del segnale che vorremmo misurare.

Per quel che riguarda il primo problema: se il rumore è additivo, casuale ed indipendente dalla quantità che vogliamo misurare l'approccio non può che essere statistico

⁵Se il segnale rispetta le condizioni di convergenza stabilite dalla trasformata di Laplace.

e la deconvoluzione non potrà essere effettuata con precisione. Esistono però svariate tecniche che permettono di minimizzare l'errore ed ottenere inversioni accurate anche in presenza di rumore, purché esso non si sovrapponga alla parte di segnale che porta informazione. Si pensi ad esempio alle tecniche di filtraggio a bassa ed alta frequenza che migliorano il rapporto segnale-rumore.

2.2.7 Caratteristiche

Caratteristiche Statiche

Le caratteristiche statiche di uno strumento di misura, come un sensore, descrivono il comportamento dello strumento rispetto a un segnale d'ingresso stazionario o lentamente variabile relativamente alle altre grandezze in gioco. Possono essere misurate dopo che tutti gli effetti transienti si sono stabilizzati al loro valore finale o stato stazionario (equilibrio). Alcune tra le più importanti:

- Accuratezza (Accuracy): capacità dello strumento di fornire una misura $M(G)$ vicino al valore vero G . Per stabilirla si utilizzano dei campioni di riferimento o si paragona con uno strumento più accurato. Misure per differenti valori veri, prese a distanza temporale sufficientemente lunga, permettono di ricavare la curva di accuratezza o calibrazione. Si definiscono l'errore assoluto, l'errore relativo, l'accuratezza assoluta e relativa nel seguente modo:

$$E_{ass} = |M(G) - G|$$

$$E_{rel} = (|M(G) - G|)/G$$

$$A_{rel} = (|M(G) - G|)^{-1}$$

$$A_{ass} = |M(G) - G|^{-1}$$

Il concetto di classe di accuratezza permette di confrontare differenti sensori tra di loro. Sensori appartenenti alla stessa classe hanno lo stesso errore di misura;

- Precisione: la precisione è la capacità del sistema di fornire la stessa lettura quando vengono effettuate ripetute misure di un misurando nelle stesse condizioni in un intervallo breve di tempo. Si misura attraverso la deviazione standard di un insieme ripetuto di misure:

$$P = \frac{\sigma_{M(G)}}{\langle M(G) \rangle} \Big|_{G=cost}$$

- Riproducibilità (Reproducibility): è la capacità di riprodurre le stesse risposte dopo che le condizioni della misura sono cambiate è detta riproducibilità. Ad esempio cambiando operatore, oppure il luogo della misura. Essa non va confusa con la ripetibilità;
- Sensibilità (Sensitivity): rapporto tra la variazione dell'risposta ΔR , corrispondente ad una variazione ΔG del misurando. La pendenza della curva di calibrazione fornisce l'andamento della sensibilità in funzione di G . Un sensore ideale dovrebbe possedere una sensibilità elevata e costante (linearità) nel suo intervallo di misura. La saturazione corrisponde alla regione in cui la variazione di risposta tende ad essere nulla.

$$S(x_a) = \frac{dR}{dG} \Big|_{G=x_a}$$

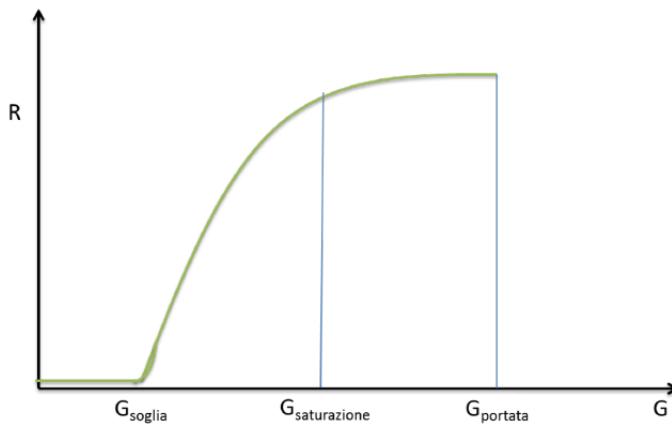


Figura 2.28: Curva di calibrazione

- Risoluzione: è il minimo cambiamento del misurando capace di produrre una variazione apprezzabile del segnale di uscita. Se la variazione è riferita allo zero si parla di soglia. La risoluzione è fortemente limitata dal rumore in ingresso. Negli strumenti digitali, in assenza di rumore, corrisponde alla cifra meno significativa;
- Soglia (Minimum Detectable Signal);
- Linearità: descrive quanto la curva di calibrazione approssima una linea retta; a seconda della linea retta scelta si possono definire le seguenti linearità:
 - Indipendente: si ottiene da un fit dei minimi quadrati. In questo caso il massimo errore positivo e il minimo errore negativo sono uguali;
 - Zero based: come sopra, ma la retta passa per lo zero;
 - Terminated based: La retta passa per il valore di uscita corrispondente al valore di ingresso minimo e il valore di uscita atteso quando in ingresso viene fornito il valore massimo;
 - End-points: la retta passa per i valori reali forniti dallo strumento in corrispondenza del valore minimo e massimo dell'ingresso;
 - Theoretical : la retta è quella attesa dal modello teorico del sensore.

La figura seguente mostra le diverse rette che si possono estrapolare dalla curva di calibrazione:

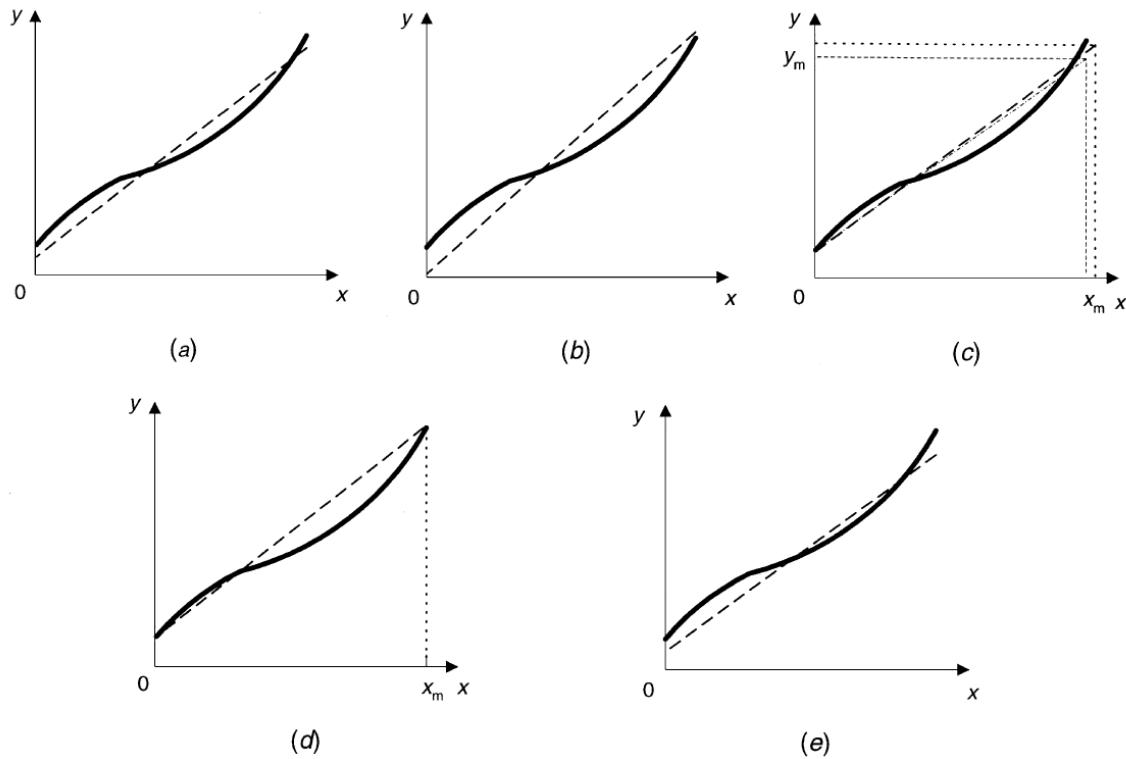


Figura 2.29: (a) independent linearity (least squares method); (b) zero-based linearity (least squares adjusted to zero); (c) terminal-based linearity; (d) end-points-defined linearity; (e) theoretical linearity.

- Selettività (Selectivity): è la capacità del sensore di restituire una misura vicina al valore vero in presenza di interferenza;
- Isteresi: differenza tra diversi segnali di uscita per uno stesso misurando dovute alla "traiettoria" seguita dal sensore;

Altre caratteristiche statiche sono:

- Intervallo di misura (Range);
- Tempi di risposta e di recupero (response and recovery time);
- Stabilità;
- Errori (Statistici, o di altra natura);

- Rumore (sorgenti esterne, sorgenti interne: rumore Johnson, shot noise);
- Deriva (Drift).

Caratteristiche Dinamiche

La risposta del sensore ai segnali di ingresso variabili nel tempo differisce da quella mostrata quando i segnali di ingresso sono costanti (caratteristiche statiche). Il motivo è la presenza di elementi che immagazzinano energia, come elementi inerziali (massa, induttanza, ecc.) e capacità (elettrica, termica, ecc.). Le caratteristiche dinamiche sono *l'errore dinamico* e la *velocità di risposta*.

L'errore dinamico è la differenza tra il valore misurato dal sensore e il valore reale per la grandezza di ingresso, quando l'errore statico è zero. Descrive la differenza tra la risposta di un sensore, alla stessa ampiezza di ingresso, a seconda che l'ingresso sia costante o variabile nel tempo.

La velocità di risposta indica quanto velocemente reagisce il sistema di misurazione ai cambiamenti nella variabile di ingresso. Un ritardo tra l'ingresso applicato e il corrispondente l'output è irrilevante dal punto di vista della misurazione, ma se il sensore fa parte di un sistema di controllo, tale ritardo può causare oscillazioni.

Per determinare le caratteristiche dinamiche di un sensore, dobbiamo applicare un segnale variabile al suo ingresso. Questo input può assumere forme diverse, ma si è soliti studiare la risposta agli input transitori (impulso, gradino, rampa), input periodici (sinusoidali) o input casuali (rumore bianco). Nei sistemi lineari ognuna di queste risposte è sufficiente per caratterizzare completamente il sistema.

La scelta di un ingresso piuttosto che un altro, nello studio delle caratteristiche dinamiche, dipende dal tipo di sensore: ad esempio, è difficile produrre una temperatura con variazioni sinusoidali, ma è facile provocare un improvviso sbalzo di temperatura. D'altra parte, è più facile avere un impulso piuttosto che un gradino di accelerazione. Lo studio delle caratteristiche dinamiche avviene utilizzando la modellizzazione dei sistemi lineari tempo invariante. In genere, oltre ai sistemi di ordine zero (statici), i sistemi maggiormente studiati sono del primo e del secondo ordine.

Caratteristiche di ingresso: Impedenza

Utilizzando un termometro di massa considerevole per misurare la temperatura raggiunta da un transistor, è lecito chiedersi se il termometro stesso può raffreddarlo e darne una lettura inferiore.

Sappiamo che in un potenziometro per evitare la perdita di contatto elettrico tra l'elemento resistivo e la parte strisciante è necessario che si eserciti una forza tra i due componenti. Cosa succederebbe se volessimo misurare il movimento di un oggetto incapace di superare la forza di attrito tra l'elemento resistivo e la parte strisciante?

Né le caratteristiche statiche né quelle dinamiche permettono di descrivere il comportamento reale del sensore combinato con il sistema da misurare; il sensore estrae potenza dal sistema misurato, e se questa estrazione di potenza modifica il valore della variabile misurata, diciamo che c'è un *errore di carico* (loading error). Il concetto di *impedenza di ingresso* consente di determinare quando ci sarà un errore di carico.

Quando si misura una quantità x_1 detta di *sforzo*, è sempre presente un'altra quantità x_2 di *flusso*, tale che il prodotto *Sforzo * Flusso* abbia le dimensioni di una potenza. Ad esempio, quando si misura una forza, c'è sempre una velocità; quando si misura un flusso c'è una caduta di pressione; quando si misura una corrente elettrica, c'è una caduta di tensione, e così via. Per i sistemi lineari l'impedenza di ingresso $Z(s)$ viene definita come il rapporto tra la trasformata di Laplace della variabile di sforzo d'ingresso e l'associata variabile di flusso:

$$Z(s) = \frac{X(s)_1, \text{sforzo}}{X(s)_2, \text{flusso}}$$

Si capisce allora che per minimizzare la potenza assorbita dal sistema $P = x_1 x_2$, quando misuro uno sforzo x_1 (ad esempio una caduta di tensione) la corrispondente variabile di carico x_2 deve essere piccola, questo implica che l'impedenza Z di ingresso deve essere grande. Quando si misura una variabile di flusso x_2 per avere l'errore di carico minimo è necessario che x_1 sia più piccola possibile, quindi bisogna che l'impedenza Z di ingresso sia piccola.

L'impedenza d'uscita del sensore determina l'impedenza d'ingresso necessaria al *circuito di interfaccia*. Un'uscita in tensione necessita di una grande impedenza d'ingresso del circuito di interfaccia se si vuole che la grandezza misurata si avvicini al valore vero, al contrario se l'uscita del sensore è in corrente l'impedenza di ingresso deve essere bassa; risulta facile osservare che per il sensore con l'uscita in tensione vale:

$$V_i = V_0 \frac{Z_i}{Z_0 + Z_i} \simeq V_0 \quad \text{se} \quad Z_i \gg Z_0$$

mentre per l'uscita in corrente si ha:

$$I_i = I_0 \frac{Z_0}{Z_0 + Z_i} \simeq I_0 \quad \text{se} \quad Z_0 \gg Z_i$$

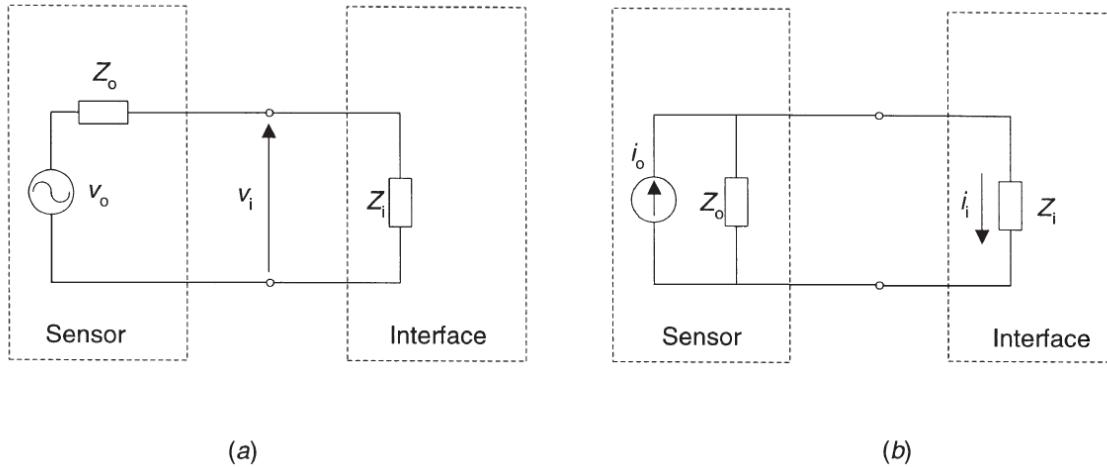


Figura 2.30: I circuiti di interfaccia devono avere: alta impedenza di ingresso per i sensori con uscita in tensione (a) e bassa impedenza di ingresso per sensori con uscita in corrente (b).

Affidabilità

Un sensore è affidabile quando lavora senza fallire per un periodo di tempo determinato sotto specifiche condizioni. Alta affidabilità significa avere una probabilità vicino ad uno di lavorare come desiderato, cioè che unità di quel sensore raramente falliscono

in un dato periodo di tempo considerato. Il rate di fallimento λ è definito come il numero di fallimenti di un oggetto nell'unità di tempo normalizzato al numero di unità sopravvissute. Se in un intervallo di tempo dt abbiamo $N_f(t)$ unità su N che falliscono, e $N_s(t)$ che non falliscono, il rate di fallimento e l'affidabilità $R(t)$ sono definite come:

$$\lambda = \frac{1}{N_s(t)} \frac{N_f(t)}{dt}$$

$$R(t) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{N_s(t)}{N}$$

da cui si ottiene il tempo medio tra i fallimenti MTBF = $\frac{1}{\lambda}$.

Studi empirici su differenti tipi di dispositivi, compreso i sensori, hanno mostrato che il loro rate di fallimento non è costante ma, una volta che sono stati eliminati i fallimenti evidenti, segue piuttosto una curva a "vasca da bagno":

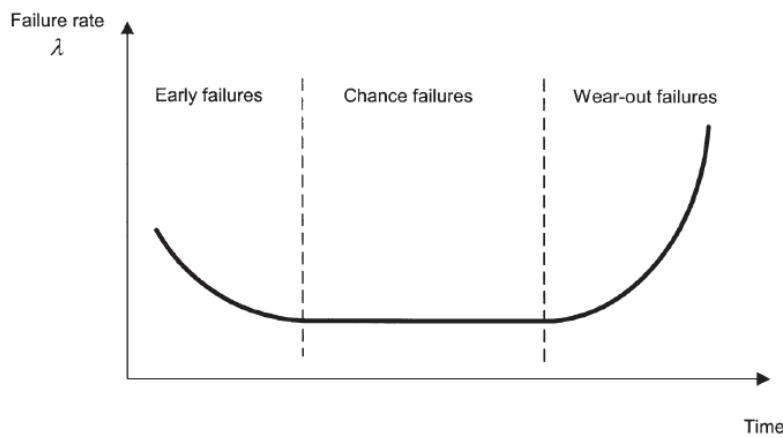


Figura 2.31: Andamento rate di fallimento nel tempo.

Gli Early failures sono esclusi dal conto della MTBF e dipendono da difetti microscopici dei materiali non rilevati in fase di test, la parte piatta del grafico corrisponde alla vita utile del dispositivo dovuta a fallimenti casuali (intrinseci o relativi a stress), infine abbiamo la fase di wear-out quando i dispositivi falliscono a causa del deterioramento dovuto ai cicli termici, all'usura, o a qualsiasi altra causa che comporta indebolimento durante la fase normale di utilizzo. L'affidabilità di un sistema è di fon-

damentale importanza nella scelta di un dispositivo rispetto ad un altro, in particolare nei sistemi di controllo dei processi critici.

Criteri per la scelta di un sensore

Troviamo tra i principali criteri:

- Il campo, o range (es.: 200-600 °C) e l'intervallo, o span (400°C) di misura;
- Le caratteristiche statiche (l'accuratezza, la precisione, la risoluzione, etc.);
- Le caratteristiche dinamiche;
- Il livello di affidabilità (es.: in termini di MTBF);
- I costi (di acquisto, installazione e manutenzione);
- I problemi legati a installazione e pericolosità;
- Il materiale di costruzione;

Ad esempio il campo di misura (range) e la risoluzione complessiva sulla misura si influenzano mutuamente nel caso di conversione digitale del segnale:

Range	Bit ADC	Risoluzione
0-1000 °C	12 (0-4095)	0.25 °C
0-100 °C	12 (0-4095)	0.025 °C

Tabella 2.2: Influenza tra range e risoluzione con ADC a numero di bit fissato

2.3 Sensore BMP180

Nella proposta didattica presentata nel terzo capitolo si farà uso del sensore digitale di pressione e temperatura Bosch BMP180[20]. Il sensore in questione è un MEMS

(**micro electro-mechanical systems**)⁶ che sfrutta l'effetto **piezoresistivo**[22] per il suo funzionamento; gode di elevata precisione, linearità, stabilità a lungo termine e robustezza EMC.

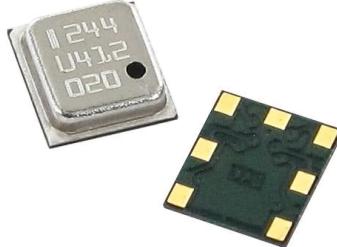


Figura 2.32: *Sensore BMP180.*

Il sensore utilizzato viene fornito dalla AZ-Delivery sotto il nome di modulo GY-68, questo oltre al sensore comprende il regolatore di tensione 662K che fornisce la giusta tensione di ingresso al BMP180 e facilita l'interfacciamento con il microcontrollore.

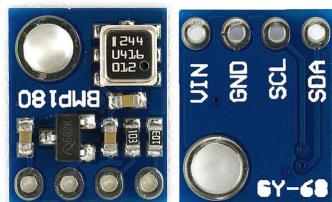


Figura 2.33: *Modulo GY-68: comprende sensore di pressione, temperatura e regolatore di tensione.*

Nella tabella seguente troviamo alcune delle principali caratteristiche del BMP180:

Dimensions, mass (GY-68)	20 x 25 mm, < 5 g
Supply voltage, power consumption	2.5 VDC (typical), < 2 mW

⁶Per approfondire l'argomento MEMS si veda la presentazione tenuta al CERN del Prof. Piero Malcovati [17] e il capitolo 2 del lavoro di tesi del dott. Giancarlo Artiano[7]

Supply current @ 1 sample/s, 25 °C	5 μ A (standard mode)
Peak current	650 μ A (during conversion)
Pressure-sensing range	300–1100 hPa
Temperature-sensing range	-40 °C to +85 °C
Absolute accuracy temperature ($VDD = 3.3V$)	±0.5°C (Typ)
Relative accuracy pressure ($VDD = 3.3V$)	±0.12 hPa
Absolute accuracy pressure ($VDD = 3.3V$)	-1 ± 1 hPa
Pressure resolution	0.01 hPa
Temperature resolution	0.1 °C
Conversion time pressure (standard mode)	7.5 ms (max)
Conversion time temperature (standard mode)	4.5 ms (max)
Serial data clock	3.4 MHz
RMS noise (standard mode)	5 Pa
Long-term stability (12 months)	± 1.0 hPa
Overpressure	10000 hPa

Come indicato dal datasheet il BMP180 è il successore del BMP085, una nuova generazione di sensori digitali di pressione ad alta qualità per applicazioni consumer di precisione. L'elettronica a bassissima potenza e bassa tensione del BMP180 è ottimizzata per l'uso nei telefoni cellulari, PDA, dispositivi di navigazione GPS e attrezzature per esterni (es. stazioni meteo). L'interfaccia I2C consente una facile integrazione con qualsiasi sistema a microcontrollore. I dati di pressione e temperatura vengono compensati dai *coefficienti di calibrazione* contenuti nell'EEPROM del sensore (fig.2.34). Il BMP180 è costituito da un sensore piezoresistivo, un convertitore analogico-digitale, un'unità di controllo con EEPROM e un'interfaccia seriale I2C. Il BMP180 fornisce il valore non compensato della pressione UP e della temperatura UT. L'E2PROM ha

memorizzati 176 bit di dati di calibrazione: questi sono utilizzati per compensare l'offset, la dipendenza dalla temperatura e altri parametri. L'unità di controllo permette anche il calcolo dell'altitudine come misura indiretta a partire dal valore della pressione atmosferica rilevato.

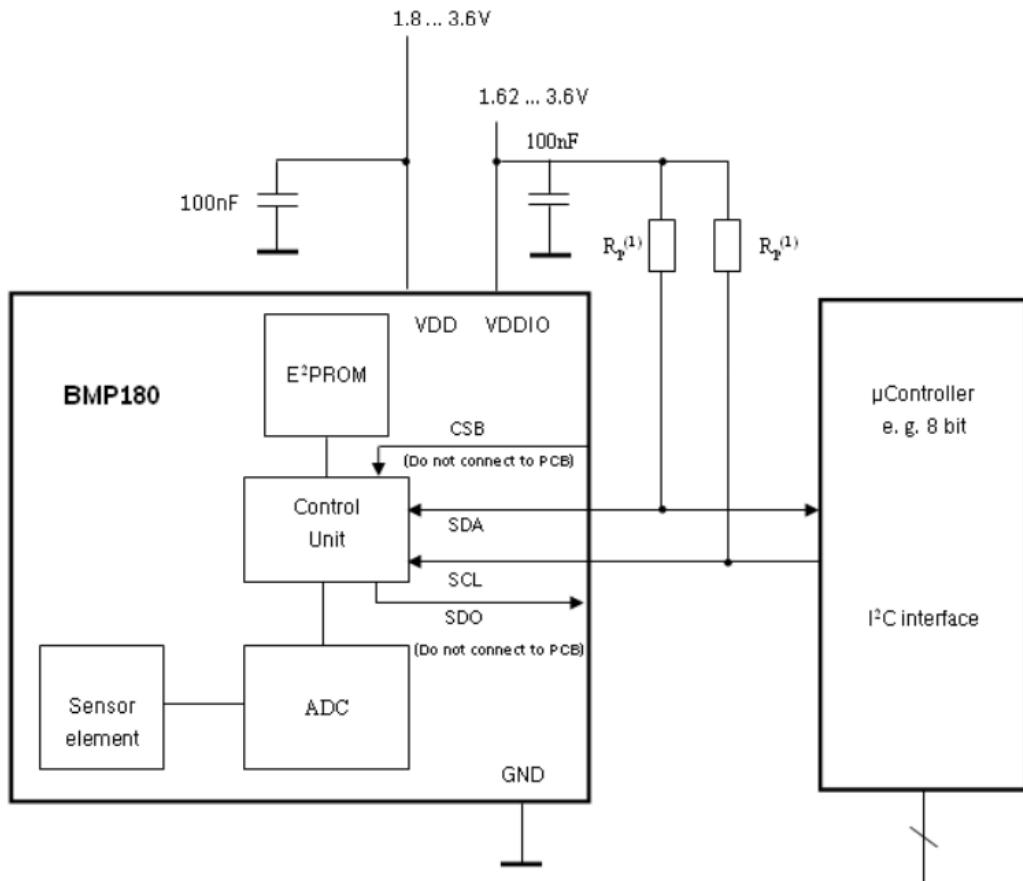


Figura 2.34: Schema a blocchi del sensore collegato al microcontrollore.

Effetto piezoresistivo

L'elemento piezoresistivo del BMP180 è un dispositivo al silicio monocristallino che utilizza una membrana deformabile e piezoresistori ad essa collegata come elementi sensibili. Pur essendo i piezoresistori al silicio molto simili agli estensimetri metallici, si evidenziano le seguenti differenze: in particolare, con la deformazione, gli estensimetri metallici variano solitamente la geometria (lunghezza o sezione) dell'elemento sensibile, mentre i piezoresistori al silicio variano la resistività del materiale. I piezoresistori sono

inseriti all'interno di ponte di Wheatstone mediante drogaggio per diffusione[26].

Sotto l'azione della pressione la membrana può deformarsi, questo provoca la variazione di resistenza elettrica del piezoresistore ad essa collegata con conseguente squilibrio del ponte di Wheatstone. La variazione della resistenza risulta essere linearmente dipendente alla deformazione della membrana. Il sensore fornisce anche il valore della temperatura. Nella foto 2.35 è mostrato l'interno del sensore MEMS BMP180; si possono distinguere l'elemento sensibile del sensore, l'ASIC e i collegamenti metallici mediante wire bond. Nell'ASIC sono contenuti l'unità di controllo, la memoria EEPROM, e l'ADC. Mentre nella figura 2.36 è mostrato il packaging interno del sensore (fonti [24]):

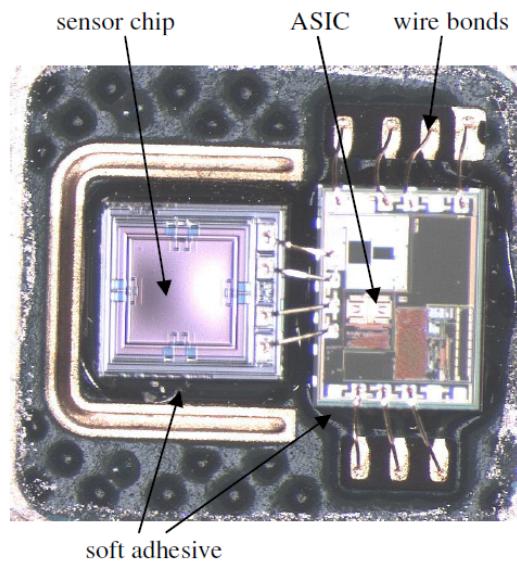


Figura 2.35: Foto del sensore BMP180 senza case metallico di rivestimento.

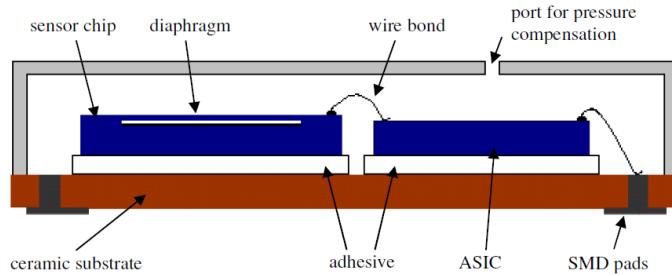


Figura 2.36: Schema dei collegamenti e della struttura interna del BMP180.

Si vede come ASIC ed elemento sensibile sono incollati sul substrato ceramico tramite adesivo, il collegamento elettrico con i pads è garantito da fili sottili (wire bond); una tecnica alternativa è detta *flip-chip packaging* dove il collegamento elettrico non prevede l'utilizzo di fili.

Lettura del sensore

Il microcontrollore invia una sequenza di avvio per iniziare la misurazione della pressione UP (16 to 19 bit) o della temperatura UT (16 bit). Atteso un certo tempo, che dipende dalla modalità di acquisizione (standard, high, low, etc.), il dato non compensato può essere letto tramite l'interfaccia I2C. Per calcolare la temperatura in °C e la pressione in Pa devono essere utilizzati i dati di calibrazione⁷ secondo l'algoritmo di calcolo illustrato in figura 2.38. La frequenza di campionamento può essere aumentata fino a 128 campioni al secondo (modalità standard), con conseguente aumento proporzionale di assorbimento di corrente. In questo caso è sufficiente misurare la temperatura una sola volta al secondo e utilizzare questo valore per tutte le misure di pressione nello stesso periodo.

⁷I dati di calibrazione sono contenuti nei registri della E2PROM e possono essere letti, ma non modificati. Essi sono specifici per ogni sensore e stimati dal produttore in fase di testing.

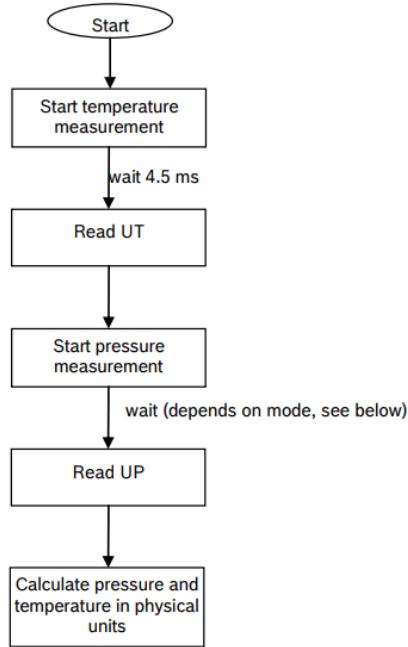
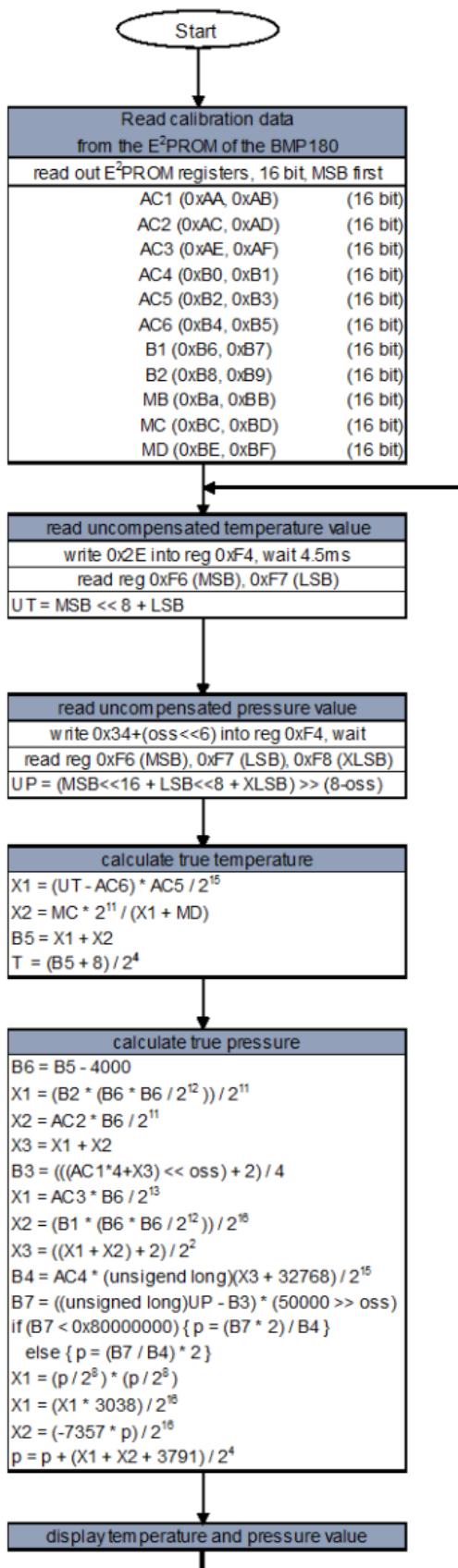


Figura 2.37: *Flusso acquisizione dati dal BMP180.*

La figura seguente mostra l'algoritmo dettagliato per la misurazione della pressione e della temperatura con un esempio:



example:	C code function:	type:
	bmp180_get_cal_param	
AC1 = 408 AC2 = -72 AC3 = -14383 AC4 = 32741 AC5 = 32757 AC6 = 23153 B1 = 6190 B2 = 4 MB = -32768 MC = -8711 MD = 2868		short short short unsigned short unsigned short unsigned short short short short short short
UT = 27898	bmp180_get_ut	long
OSS = 0 = oversampling_setting (ultra low power mode)	bmp180_get_up	short (0 .. 3)
UP = 23843		long
X1 = 4743 X2 = -2344 B5 = 2399 T = 150	bmp180_get_temperature	long long long temp in 0.1°C long
B6 = -1601 X1 = 1 X2 = 56 X3 = 57 B3 = 422 X1 = 2810 X2 = 59 X3 = 717 B4 = 33457 B7 = 1171050000 p = 70003 X1 = 74529 X1 = 3454 X2 = -7859 p = 69964	BMP180_calpressure	long long long long long long long unsigned long unsigned long long long long long long long press. in Pa long

Figura 2.38: Algoritmo per la misura di pressione e temperatura con esempio a lato.

Nella proposta didattica presentata nel capitolo successivo si fa uso delle funzioni di alto livello presenti nella libreria <**Adafruit_BMP085.h**> dell' IDE Arduino per la lettura di temperatura e pressione. L'utilizzo del sensore avverrà in modalità standard: avremo 4,5 ms per la lettura di UT e 7,5 ms di attesa per UP (16 bit). La selezione della modalità standard avviene senza richiamare alcun parametro⁸ nella funzione *BMP180.begin()* che inizializza il sensore.

2.4 Scheda a microcontrollore: Arduino Uno

Si è già discusso dell'importanza delle nuove tecnologie digitali nella didattica della fisica, senza alcun dubbio un ruolo fondamentale è rivestito dalle *schede di sviluppo* a microcontrollore (MCU). Queste differiscono dall'altra importante categoria rappresentata dalle schede di sviluppo a microprocessore (MPU). Le schede a microcontrollore sono più lente, ma anche più facili da programmare, più semplici da gestire e non richiedono alcun sistema operativo; consumano meno energia e possono avere costi contenuti. Al contrario una scheda ad MPU è molto più veloce, ma anche più complessa da programmare e necessita di un sistema operativo; anche il consumo di corrente elettrica cambia notevolmente: un Raspberry Pi consuma alcune centinaia di milliampere, mentre un Arduino consuma qualche decina di milliampere. MCU e MPU sono entrambi sistemi che esistono da decenni, quindi sono le finalità a dettare la scelta: la tensione elettrica di funzionamento e d'ingresso, la corrente necessaria alla scheda, la velocità di clock, il numero di porte di I/O, il tipo di linguaggio di programmazione utilizzato, l'eventuale sistema operativo a bordo, la memoria presente, ecc.

⁸Passando il parametro 0 si va in ULTRALOWPOWER, mentre con i parametri 2 e 3 siamo rispettivamente nelle modalità HIGHRES e ULTRAHIGHRES.

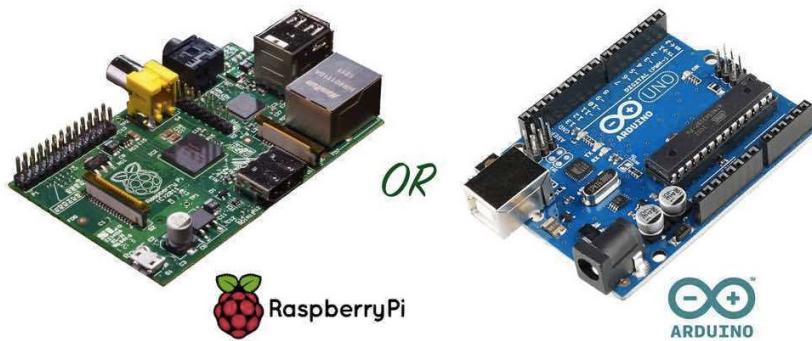


Figura 2.39: A sinistra una scheda *RaspberryPi* ad *MPU*, a destra la scheda *Arduino Uno* ad *MCU*.

2.4.1 Arduino Uno

Nella proposta didattica presentata nel capitolo successivo si farà uso della scheda a microcontrollore Arduino Uno R3[2]. Il progetto Arduino nasce ad Ivrea nel 2005, come sistema di prototipazione elettronica a basso costo per fini didattici, ha tra le sue caratteristiche più apprezzate la possibilità di disporre completamente e liberamente dell’hardware: viene definito Open Hardware. La piattaforma Arduino ha avuto uno sviluppo rapidissimo in termini di evoluzione con numerose implementazioni che differiscono tra di loro a partire dalla scelta del MCU installato sulla scheda. Tra i motivi del grande successo di Arduino, oltre al fatto di essere aperto ed economico, c’è anche l’ambiente di sviluppo; le piattaforme Arduino infatti dispongono di IDE gratuito e libero con numerose librerie decitate: i programmi di Arduino, chiamati sketch, sono scritti in linguaggio semplificato derivato dal C/C++.

Nel caso dell’Arduino Uno, la MCU è l’ATmega328P: un microcontrollore ad alte prestazioni con bus a 8 bit prodotto dalla Atmel con architettura di tipo RISC. Oltre al microcontrollore troviamo come altro componente di rilievo sulla scheda il processore ATmega16U2, questo viene usato per la conversione USB-Seriale attraverso la quale l’Arduino si interfaccia al PC. Alcune delle principali caratteristiche di Arduino Uno sono riassunte nella seguente tabella:

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current for I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
Communication	UART, I2C, SPI
LED _ BUILTIN	PIN 13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g
Timer/Counter	2x 8-bit
Timer/Counter	1x 16-bit
Analog Comparator (AC)	1x

Nella figure 2.40,2.41,2.43 è illustrato il pinouts[1] della scheda Arduino Uno:

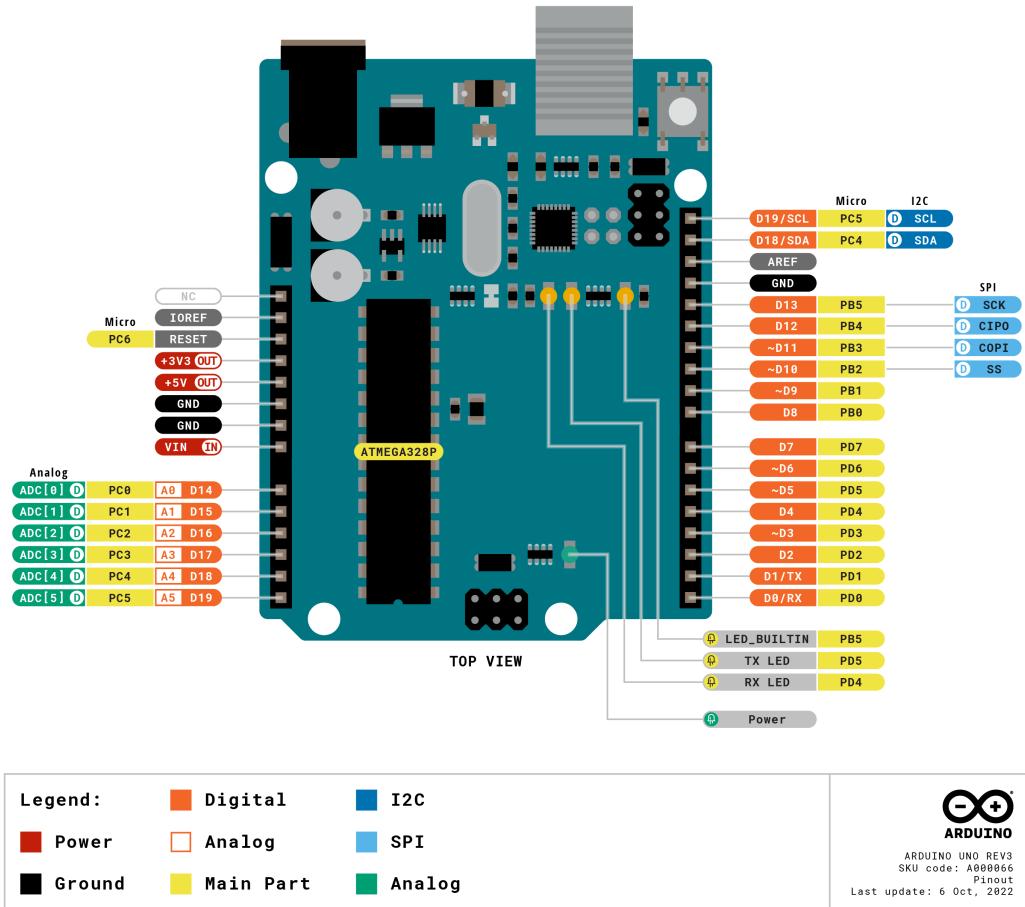


Figura 2.40: Pinouts Arduino UNO.

Pin	Function	Type	Description
1	NC	NC	Not connected
2	IOREF	IOREF	Reference for digital logic V - connected to 5V
3	Reset	Reset	Reset
4	+3V3	Power	+3V3 Power Rail
5	+5V	Power	+5V Power Rail
6	GND	Power	Ground
7	GND	Power	Ground
8	VIN	Power	Voltage Input
9	A0	Analog/GPIO	Analog input 0 /GPIO
10	A1	Analog/GPIO	Analog input 1 /GPIO
11	A2	Analog/GPIO	Analog input 2 /GPIO
12	A3	Analog/GPIO	Analog input 3 /GPIO
13	A4/SDA	Analog input/I2C	Analog input 4/I2C Data line
14	A5/SCL	Analog input/I2C	Analog input 5/I2C Clock line

Figura 2.41: Analog Pins.

Pin	Function	Type	Description
1	D0	Digital/GPIO	Digital pin 0/GPIO
2	D1	Digital/GPIO	Digital pin 1/GPIO
3	D2	Digital/GPIO	Digital pin 2/GPIO
4	D3	Digital/GPIO	Digital pin 3/GPIO
5	D4	Digital/GPIO	Digital pin 4/GPIO
6	D5	Digital/GPIO	Digital pin 5/GPIO
7	D6	Digital/GPIO	Digital pin 6/GPIO
8	D7	Digital/GPIO	Digital pin 7/GPIO
9	D8	Digital/GPIO	Digital pin 8/GPIO
10	D9	Digital/GPIO	Digital pin 9/GPIO
11	SS	Digital	SPI Chip Select
12	MOSI	Digital	SPI1 Main Out Secondary In
13	MISO	Digital	SPI Main In Secondary Out
14	SCK	Digital	SPI serial clock output
15	GND	Power	Ground
16	AREF	Digital	Analog reference voltage
17	A4/SD4	Digital	Analog input 4/I2C Data line (duplicated)
18	A5/SD5	Digital	Analog input 5/I2C Clock line (duplicated)

Figura 2.42: *Digital Pins*

I 14 pin IO digitali (D0-D13) possono essere usati sia come input che come output, secondo quanto specificato nello sketch che si crea nell'IDE; i 6 pin analogici(A0-A5) sono dedicati agli ingressi analogici, questi ingressi sono poi digitalizzati attraverso convertitori analogico-digitale (ADC) a 10 bit in un valore numerico compreso tra 0 e 1023. I pin A4 e A5 possono essere utilizzati anche nella comunicazione I2C⁹ rispettivamente come linea dati (pin A4) e linea di clock (pin A5).

Secondo quanto dichiarato nel datasheet [2] Arduino Uno rientra a tutti gli effetti tra i dispositivi *general purpose*, infatti trova ampia applicazione nei dispositivi PLC delle industrie; nella **first entry to electronics**, cioè per chi si avvicina per la prima volta allo prototipazione hardware; infine un'altra grande area di applicazione è la **education purposes**: sebbene il Arduino Uno sia presente sul mercato da oltre dieci anni (2010), è ancora ampiamente utilizzata per molte applicazioni didattiche e progetti scientifici. L'elevato standard e le prestazioni di alta qualità della scheda la rendono un'ottima risorsa per l'acquisizione in tempo reale dei dati dai sensori e per l'attivazione

⁹Nel capitolo 3 utilizzeremo questi pin per la comunicazione I2C con il sensore BMP180. Per approfondire i dettagli del protocollo I2C ed in particolare quello relativo alla lettura del sensore BMP180 si consiglia di leggere il cap.5 del datasheet [20].

di apparecchiature di laboratorio complesse.

Altro fattore da non trascurare è quello dei costi molto contenuti: il prezzo della scheda di sviluppo Arduino Uno R3 sul sito ufficiale al momendo della stesura di questo lavoro è di 24 euro, ma si possono facilmente reperire schede cloni a costi dimezzati.

Il modulo bluetooth HC05

In commercio esistono numerose schede a microcontrollore che permettono la comunicazione wireless con PC, smartphone, tablet e qualsiasi altro sistema di acquisizione dati. Ad esempio tra queste troviamo la scheda Arduino Nano 33 BLE che integra un chipset per la comunicazione bluetooth, oppure la scheda WEMOS D1 R1 basata sul microcontrollore ESP8266 in grado di gestire una comunicazione Wi-Fi.

In alternativa per ottenere una comunicazione wireless tra una scheda a microcontrollore senza hardware dedicato, ad esempio Arduino Uno, e PC possiamo utilizzare dei moduli aggiuntivi da interfacciare alla scheda: è il caso del modulo bluetooth HC05. Il modulo Bluetooth HC-05 è uno dei moduli più popolari e poco costosi utilizzati per le comunicazioni RF, il suo costo è di circa 6 euro e risulta molto semplice da implementare in qualsiasi progetto. La portata è di 10 mt, i suoi parametri (baud rate, password, id, data bit, stop bit, parità, etc.) sono configurabili dall'utente (AT mode [23]) ed è programmabile sia come master che come slave. Il modulo HC-05 permette di trasformare la porta seriale di Arduino in una porta Bluetooth, può essere trovato sia come semplice componente oppure già montato su una scheda di breakout¹⁰. Nel secondo caso il modulo è montato su una piccola basetta su cui sono presenti un regolatore LDV 662K e un LED che indica lo stato del dispositivo.

¹⁰Ovvero schede di prototipazione contenenti il componente interessato già saldato e corredata di eventuale elettronica di contorno, le cui connessioni sono portate all'esterno della scheda su connessioni facilmente utilizzabili per passo e terminazione.

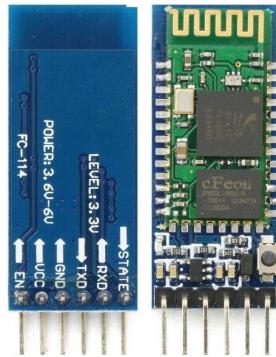


Figura 2.43: Modulo HC05 montato su scheda di breakout.

La tensione di alimentazione può essere compresa tra i 3.3 e 6 V, mentre le linee dati sono a 3.3 V, dunque necessita di un convertitore di livelli logici per essere interfacciato ad Arduino il quale utilizza livelli logici a 5 V. Altre caratteristiche sono contenute nel seguente elenco:

- Bluetooth 2.0 + EDR.
- Frequenza di funzionamento è 2.4GHz ISM band.
- Processore CSR Bluecore4.
- Tensione di alimentazione consigliata 3.3 V 50mA.
- Corrente richiesta in fase di accoppiamento 30/40 mA, mentre in fase di comunicazione è di circa 8 mA.
- Possibili velocità della seriale configurabili 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200, 234000, 460800, 921600, 1382400 bps.
- Il modulo HC-05 è di classe 2 (potenza in mW 2.5, distanza metri circa 10).

Capitolo 3

Un percorso didattico sui gas ideali mediante l'utilizzo di schede a microcontrollore e sensori

In questo capitolo viene presentata una proposta didattica che si rivolge agli studenti della scuola secondaria di secondo grado e ai corsi introduttivi di fisica universitari, offrendo anche un supporto per i docenti. Fondamentale sarà l'utilizzo di una scheda a microcontrollore, di sensori digitali ad essa interfacciabili e del calcolatore. Quest'ultimo indispensabile per la parte iniziale di scrittura e/o studio del *codice*, per la *rappresentazione* e l'analisi dei dati acquisiti.

In particolare con l'apparato sperimentale messo in campo sarà possibile *guardare* le variabili temperatura, pressione e volume; osservare il loro variare nel tempo, metterle in relazione tra di loro e verificare l'eventuale accordo sperimentale con i modelli studiati.

Una delle grandi potenzialità delle schede a microcontrollore è la duttilità: infatti cambiando i sensori e modificando il codice è possibile *guardare* altre variabili, cioè cogliere altri aspetti di uno stesso *sistema*, *processo*, o *fenomeno*, oppure passare allo studio di altri modelli che sono trattati nel corso dei programmi scientifici scolastici o universitari.

3.1 Il progetto Didattica Laboratoriale Multidisciplinare

Il gruppo di ricerca in didattica della fisica del Dipartimento “E. Pancini” dell’Università Federico II di Napoli nell’ambito del progetto *Didattica laboratoriale multidisciplinare* (SDLM) si è trovato ad affrontare già una discussione sull’utilizzo delle nuove tecnologie digitali nella didattica delle scienze. In collaborazione con altri ricercatori e docenti delle scuole secondarie sono state formulate delle linee guida esposte nel paragrafo 1.4 e nei documenti [4].

3.1.1 Black-Box e White-Box

Oggi più che mai la nostra vita quotidiana è plasmata dall’utilizzo di dispositivi tecnologici molto complessi. Uno smartphone, ad esempio, contiene al suo interno numerosi sensori (fig.3.1): giroscopio, accelerometro, sensore di prossimità, temperatura, voltmetro etc. Sarebbe auspicabile che le persone ne facessero uso con un livello anche basileare di consapevolezza, purtroppo questo accade raramente. Una docente del gruppo SDLM, nel periodo di didattica a distanza, ha invitato i suoi studenti ad effettuare a casa misure fisiche sfruttando i sensori dei propri smartphone e delle applicazioni disponibili gratuitamente. La docente sottolinea che se da una parte l’utilizzo di uno strumento di misura visto come una **black-box** rende immediatamente fruibile agli sperimentatori (docenti e studenti) la verifica del modello teorico, d’altra parte questo appiattisce il processo formativo limitando fortemente le possibilità di apprendimento offerte dalla pratica sperimentale.

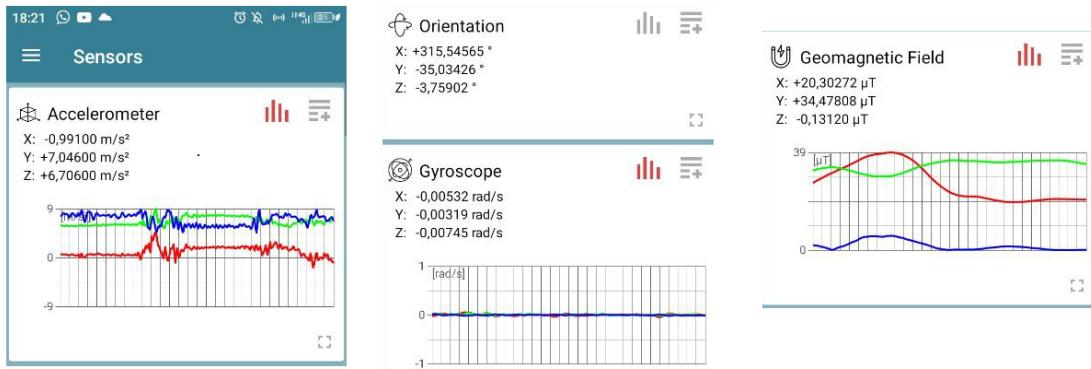


Figura 3.1: *Alcuni dati rilevabili da uno smartphone: accelerazione, velocità angolare, orientazione, campo magnetico.*

Le schede programmabili a microcontrollore permettono di aggirare, almeno in parte, questo problema. Questi dispositivi sono sistemi *aperti*, il loro funzionamento può essere seguito e analizzato con il dettaglio desiderato. Per funzionare bisogna anzitutto programmare la scheda, impartendo le istruzioni necessarie con la scrittura di un *codice* mediante un opportuno *linguaggio*. Bisogna personalizzare un’interfaccia, cioè qualcosa che faccia da tramite tra il sistema, fenomeno, processo, che si vuole osservare e chi osserva, secondo le necessità, per evidenziare il legame tra modello teorico ed esperimento. Vengono esaltate tutte le problematiche legate al processo di trasduzione¹. Anche l’informatica entra a far parte della cassetta degli attrezzi dello sperimentatore. L’interdisciplinarità assume così un significato pieno: le competenze informatiche, matematiche e fisiche vengono ad incontrarsi e rafforzarsi reciprocamente.

L’approccio didattico sperimentale che fa uso di sistemi a microcontrollore crea invece delle **white-box**, queste, oltre agli evidenti vantaggi che apportano al processo di apprendimento cognitivo, presentano però anche delle criticità: come esposto da un membro del gruppo SDLM un docente da solo difficilmente potrà far fronte a tutte le problematiche che vengono fuori da un approccio multidisciplinare di questo tipo, senza parlare del numero di ore richieste per un processo formativo di questo tipo che

¹Si pensi, ad esempio, al processo di trasduzione della variabile temperatura: la scelta della scala, le *situazioni campione*, la linearità di risposta. Infatti tutti i manuali di fisica si trovano costretti a dover dedicare ampio spazio a questo aspetto.

richede un tempo non compatibile con l'orario curricolare del nostro sistema scolastico. Una possibile soluzione a queste criticità può essere la collaborazione strutturata tra docenti con bagagli culturali differenti, d'altra parte questo è il modo che ha di procedere la ricerca scientifica nei grandi esperimenti.

3.2 Descrizione dell'apparato sperimentale

L' apparato sperimentale usato, con il quale si propone un'indagine sulle leggi dei gas, è illustrato schematicamente in figura 3.2. Una configurazione possibile (par.3.5) prevede che all'interno di un contenitore di vetro ermetico, contenete un volume V_0 di aria, sia inserita la scheda a microcontrollore Arduino Uno², questa sarà corredata dal sensore di temperatura e pressione BMP180, dal modulo bluetooth HC05 per il trasferimento dei dati wireless e dalle batterie di alimentazione. Un'altra applicazione prevede di collegare il sensore di pressione³, tramite un tubo in gomma, all'estremità di una siringa, mentre un potenziometro a slitta, solidale alla stessa, trasduce la variazione di volume operata dallo sperimentatore che agisce sullo stantuffo (par.3.4); in questo caso il collegamento tra la scheda a microcontrollore e PC è di tipo wired. È ragionevole supporre, almeno entro gli obiettivi che si propone l'esperienza didattica, che il numero di moli di gas (aria) del sistema sia costante durante le diverse misure proposte.

²Per la descrizione e le specifiche del dispositivo e dei moduli ad esso collegati si veda il capitolo 2.

³In questo caso al sensore è stato incollato un apposito beccuccio che permettere il collegamento al tubo in gomma. Date le esigue pressioni in gioco e i risultati sperimentali concordi al modello, si ritiene questa scelta soddisfacente per gli scopi didattici di questo lavoro. In alternativa è possibile inserire il sensore direttamente all'interno della siringa oppure scegliere un sensore già dotato di apposito beccuccio.

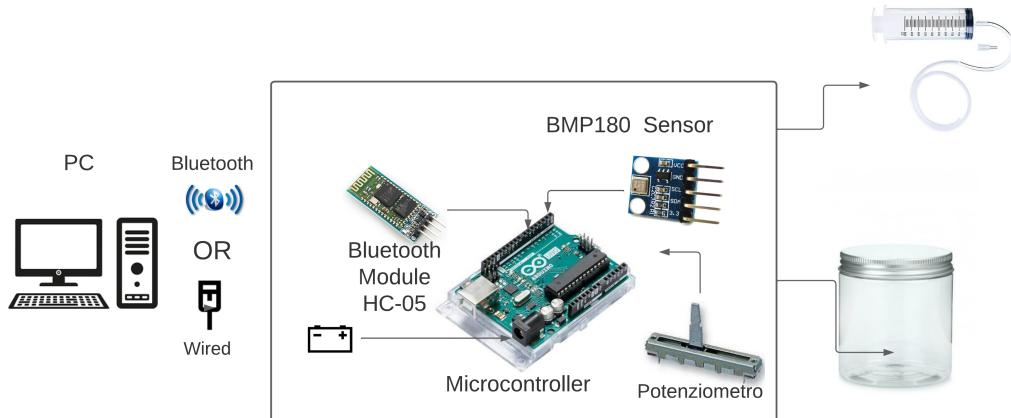


Figura 3.2: Elementi del setup sperimentale

L'utilizzo della siringa avviene per la verifica della *legge di Boyle* nella sezione 3.4, mentre per la verificare la *legge dell'isocora* (ref. 3.5) basterà il solo barattolo chiuso ermeticamente contenente la scheda Arduino e i moduli: in questo caso è il volume del gas che deve mantenersi costante.

I valori di temperatura e pressione del gas (aria) all'interno del contenitore (o della siringa nel caso della legge di Boyle) vengono rilevati da sensore ed inviati tramite protocollo I2C al microcontrollore, questo a sua volta, attraverso il modulo HC05, invia i dati in formato CSV al PC. Sfruttando il monitor seriale RealTerm, che gestisce il protocollo di trasmissione, i dati vengono salvati in un file di testo per le successive fasi di elaborazione, rappresentazione e modellizzazione. Si ha inoltre la possibilità di rappresentare graficamente i dati in tempo reale grazie al software open-source KST, oppure per mezzo di uno script Python⁴.

In questa proposta didattica lo studente potrà mettere mano in tutti i processi che compongono la catena sperimentale: assemblaggio e configurazione dell'hardware in base all'esperienza che si vuole eseguire, scrittura e/o adattamento del codice mediante l'IDE open-source di Arduino, gestione del terminale per la ricezione e il salvataggio dei dati sul pc, configurazione del software (KST) per il plottaggio dei dati in tempo reale,

⁴In appendice sono inseriti degli esempi di codici Python per il plottaggio dei dati e per la stima dei parametri di regressione lineare.

analisi dei dati.

3.2.1 Cablaggio dell'hardware

La prima operazione da svolgere, indipendentemente dalla trasformazione termodinamica che si andrà ad eseguire, consiste nel collegare il modulo sensore BMP180 con il microcontrollore come illustrato nella figura 3.3.

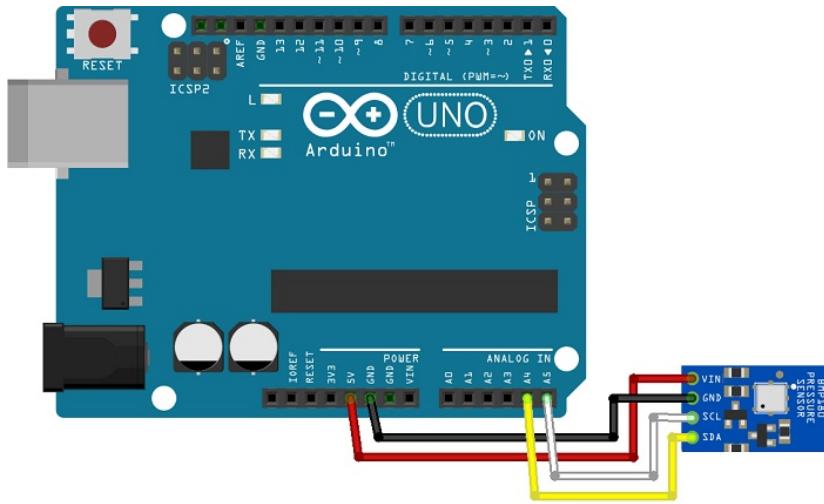


Figura 3.3: *Cablaggio BMP180 su Arduino Uno*

Il sensore ha bisogno di una tensione di alimentazione continua di 5 volt, dunque vanno collegati i pin V_{in} e GND del modulo rispettivamente ai pin $5V$ e GND della scheda Arduino; devono inoltre essere collegati i pin SCL e SDA , questi rappresentano rispettivamente il segnale di clock e il segnale di dati per il protocollo di trasmissione I 2 C⁵. Il pin SCL dovrà essere collegato al pin $A5$ della scheda Arduino, mentre l' SDA al pin $A4$. Questa scelta è dettata dal fatto che, come visto nel capitolo 2, $A4$ e $A5$ sono i pin dedicati da Arduino Uno al protocollo I 2 C.

Il secondo componente da cablare è il modulo HC05, questo presenta allo stesso modo una tensione di alimentazione a 5 volt, inoltre vanno collegati i pin di trasmissione Tx e ricezione Rx a due pin digitali di Arduino.

Va notato che i livelli logici a cui lavora il modulo HC05 sono a 3,3 volt, quindi non

⁵Per una discussione dettagliata su questo protocollo si veda [20].

possiamo collegare direttamente il pin di ricezione del modulo alla scheda a microcontrollore: Arduino lavora con livelli logici a 5 volt quindi abbiamo bisogno di un adattatore di livelli logici o più semplicemente di un partitore di tensione⁶ resistivo (fig.3.4).

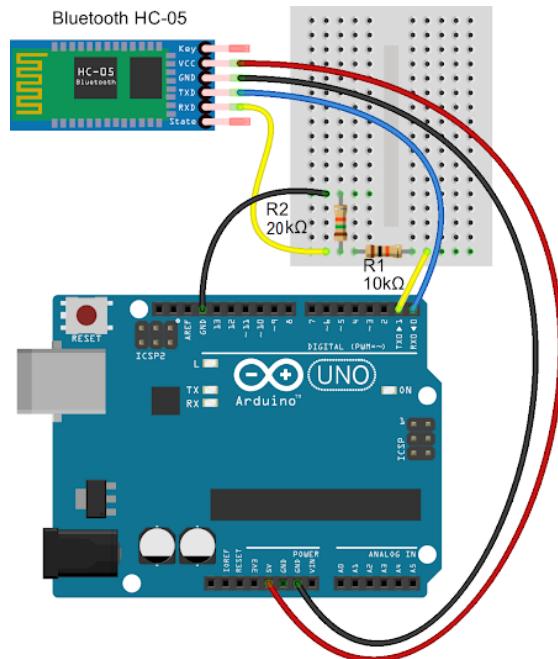


Figura 3.4: Cablaggio del modulo HC05

In alternativa al modulo bluetooth HC05 è possibile utilizzare una scheda a microcontrollore che incorpora già sul PCB la parte circuitale per la trasmissione wireless, ad esempio si vedano le schede Arduino Nano 33 BLE, o la WEMOS D1.

Nel caso dell'esperienza riguardante la verifica della legge di Boyle non è necessario collegare il moduolo HC05 perchè la trasmissione dati con il PC sarà wireline. D'altra parte in questo caso abbiamo bisogno di collegare il potenziometro a slitta⁷, reso solidale alla siringa tramite incollaggio, alla scheda Arduino: dal punto di vista circuitale un potenziometro è l'analogico del partitore di tensione, dunque avremo due pin

⁶Un partitore di tensione è un circuito elettrico costituito da due componenti passivi in serie, solitamente resistori R_1 e R_2 , ai cui capi è applicata una differenza di potenziale V . Come conseguenza della legge di Ohm e delle leggi di Kirchhoff abbiamo che la caduta di tensione V_2 ai capi di R_2 vale: $V_2 = V \frac{R_2}{R_1 + R_2}$. Nel caso indicato in figura 3.4 $R_1 = 10k\Omega$ e $R_2 = 20k\Omega$, in questo modo la caduta di tensione ai capi di R_2 sarà di 3,3 volt.

⁷Per una descrizione sui potenziometri si faccia riferimento al secondo capitolo. Secondo i dati forniti dal venditore l'elemento resistivo è a film di carbonio, la risposta è di tipo logaritmica.

per l'alimentazione (GND e V_{in}) e un pin che ci fornisce il valore variabile collegato all'ingresso analogico $A0$ di Arduino (fig.3.5).

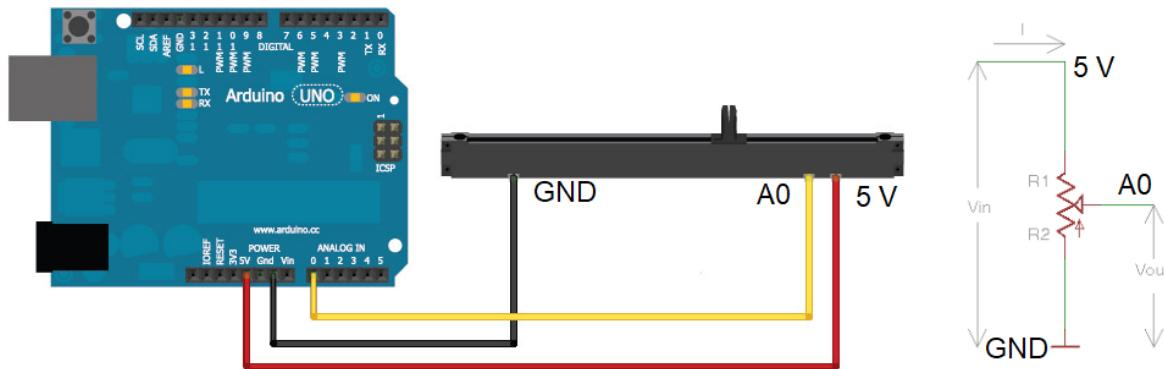


Figura 3.5: *Cablaggio del potenziometro a slitta.*

Il potenziometro utilizzato restituisce valori di resistenza compresi tra 2 e $10k\Omega$, il valore in tensione prelevato dal pin $A0$ viene poi convertito dall'ADC di Arduino in un valore compreso tra 0 e 1023. Tali valori sono poi mappati, all'interno del codice stesso, sul corrispondente valore di volume, compreso tra 0 e 33 cm^3 , della siringa⁸. Quest'ultimo è un passaggio cruciale nel processo didattico, che è esso stesso parte fondamentale della proposta didattica, infatti sono qui contenuti tutte le principali tematiche esposte nel primo capitolo: i modi di guardare per variabili, il processo di trasduzione che crea relazioni tra le stesse, la conversione continuo-discreto, l'assegnare relazioni d'ordine, la necessità di competenze multidisciplinari dello studente.

3.2.2 Codice Arduino

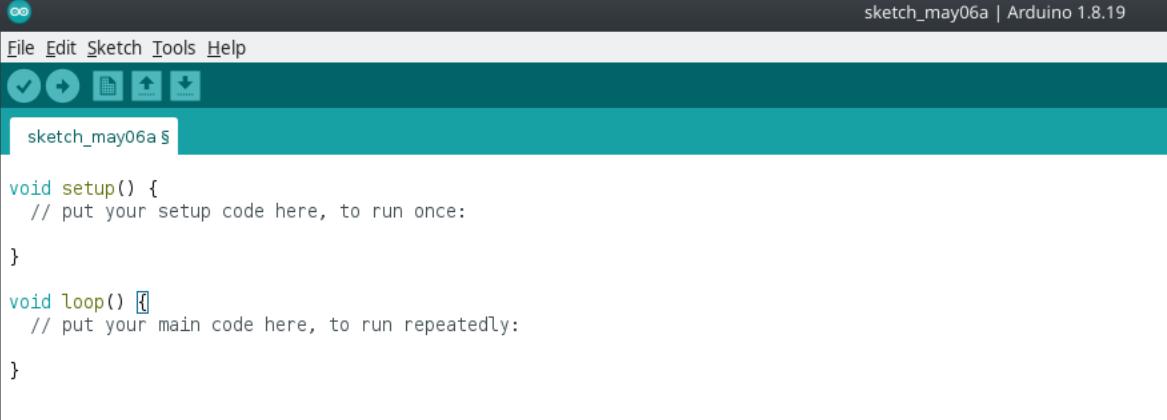
In questa sezione viene illustrato il codice necessario alla gestione del sensore BMP180 e del modulo HC05 tramite scheda Arduino Uno⁹. Per la scrittura del codice (lo sketch), la compilazione e il caricamento sul microcontrollore viene utilizzata l'IDE¹⁰ di sviluppo

⁸Questo intervallo è dettato dalla corsa utile del potenziometro che è stato incollato alla siringa.

⁹In appendice è riportato il link che indirizza al codice per la gestione del potenziometro e del sensore BMP180 usato nell'esperienza di par. 3.4.

¹⁰Per l'installazione si rimanda al sito ufficiale [6], ulteriore utile documentazione si può trovare in [19].

Arduino. In generale un codice Arduino è composto da due blocchi: *void setup()* e *loop setup()* (fig.3.6).



The screenshot shows the Arduino IDE interface. The title bar reads "sketch_may06a | Arduino 1.8.19". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". Below the menu is a toolbar with icons for file operations. The main area is a code editor with the following content:

```
sketch_may06a §

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}
```

Figura 3.6: *Template di uno Sketch vuoto sull'editor dell'IDE Arduino*

La funzione *setup()* è il posto dove si inserisce tutto il codice che si vuole eseguire una sola volta all'inizio del programma, *loop()*, come suggerisce il suo stesso nome, contiene il programma vero e proprio che viene eseguito ripetutamente. In *setup* si inizializzano variabili e oggetti delle librerie, si imposta lo stato dei pin e le comunicazioni seriali. Prima di passare all'analisi del codice proposto va sottolineato il fatto che, così come per i *modi di guardare* la natura trattati nel primo capitolo, non esiste un unico modo di scrivere il codice, sarà il docente che dovrà valutare e dettare le linee guida in base alle contingenze culturali, al livello di astrazione che si vuole raggiungere, al controllo che si vuole avere sul processo. A titolo di esempio e come caso limite basti pensare che se si volesse gestire in maniera completa un protocollo I2C si dovrebbe ragionare su singolo colpo di clock, ma non è questo il caso né la tecnologia adeguata per tali scopi.¹¹ Per gli scopi dell'esperienza didattica proposta si farà uso di librerie e funzioni ad hoc per la gestione dei protocolli di trasmissione e dei moduli. Analizziamo adesso il codice proposto:

¹¹La gestione di processi di questo tipo è invece fondamentale quando si deve operare con l'architettura hardware di sistemi elettronici integrati performanti.

```

1 //includo le librerie necessarie
2 #include <SoftwareSerial.h>
3 #include <Adafruit_BMP085.h>
4
5 //istanzia un oggetto della classe adafruit_BMP085: il BMP180
6 //il pin A4 del sensore va collegato a SDA, il pin A5 SCL
7 Adafruit_BMP085 BMP180;
8 //crea un oggetto della classe SoftwareSerial chiamato BTSerial
9 //il pin 7 sarà deputato alla ricezione, il pin 6 alla trasmissione:
10 SoftwareSerial BTSerial(7, 6);
11
12
13 void setup() {
14     //inizializzo la seriale standard e la SoftwareSeriala con velocita di 9600 bts
15     BTSerial.begin(9600);
16     Serial.begin(9600);
17     delay(1000); // aspetto 1s
18
19     //controllo se il sensore è connesso
20     if (!BMP180.begin()) { //restituisce 1 quando il sensore è connesso
21         Serial.println("Attenzione, il sensore barometrico BMP180 non è connesso!");
22         while (1) { //ciclo infinito che blocca il codice se l'IF è verificato
23     }
24 }
25
26 void loop() {
27     //scrivo le misurazioni sulla seriale:
28
29     //temperatura
30     float temperatura = BMP180.readTemperature();
31     Serial.print("Temperatura = ");
32     Serial.print(temperatura);
33     Serial.println(" *C");
34
35     //pressione
36     float pressione = BMP180.readPressure();
37     Serial.print("Pressione atmosferica = ");
38     Serial.print(pressione);
39     Serial.println(" Pa ");
40
41     //invio dei dati via seriale bluetooth in formato csv
42     BTSerial.println( (String)pressione + "," + (String)temperatura);
43     delay(3000);
44 }
```

Nelle righe iniziali vengono definite le librerie necessarie al funzionamento dei mo-

duli: la libreria `<Adafruit_BMP085.h>` si occupa del sensore BMP180, essa permette di gestire la comunicazione microcontrollore-sensore, mentre `<SoftwareSerial.h>` consente di instaurare una comunicazione seriale sui pin digitali di Arduino. Quando sono chiamati i metodi `BMP180.begin()`, oppure `BMP180.readPressure()`, o ancora `BMP180.readTemperature()` si instaura una comunicazione seriale I2C tra scheda e sensore finalizzata ad ottenere i valori di pressione e temperatura, o altri valori di stato. Questi metodi sono tutti definiti ed illustrati nella libreria Adafruit¹². La libreria `SoftwareSerial.h` invece permette di instaurare comunicazioni seriali aggiuntive sulla scheda Arduino Uno, che possono essere utilizzate per comunicare con altri dispositivi (in questo caso il modulo HC05) o per leggere dati da sensori che utilizzano la comunicazione seriale. La libreria `SoftwareSerial` utilizza due pin digitali dell'Arduino per creare la porta seriale aggiuntiva: uno dei pin viene utilizzato per la trasmissione (pin 6) e l'altro per la ricezione (pin 7). La velocità di trasmissione dei dati può essere configurata in base alle esigenze del progetto, nel nostro caso è impostata al valore di 9600 baud, che coincide con il valore di default¹³ del modulo HC05.

Nel `setup()` vengono inizializzate le seriali: il valore di default dei parametri è `SERIAL_8N1`, che sta ad indicare una comunicazione seriale asincrona con 8 bit di dati, nessun bit di parità, e 1 bit di stop. Un ritardo è impostato per dare tempo al sistema di assestarsi, al termine del quale c'è la chiamata alla funzione `BMP180.begin()`, che combinata nel costrutto IF, verifica se il sensore è connesso, in caso contrario si avrà un messaggio di errore: il codice si blocca nel ciclo `while(1)`.

Passiamo adesso a descrivere il `loop()`: vengono prelevati i valori di temperatura e pressione dal sensore con le funzioni `BMP180.readTemperature()` e `BMP180.readPressure()`, questi sono assegnati alle due variabili omonime di tipo float (numeri in virgola mobile a 32 bit). Successivamente i dati vengono stampati con la funzione `Serial.print()` sulla seriale standard di Arduino, in modo tale da poter essere letti sul Monitor seriale dell'IDE: questa parte è fondamentale per la fase di debugging;

i dati sono contestualmente inviati sulla `softwareSerial`, destinata alla comunicazione

¹²Per approfondimenti si veda: <https://github.com/adafruit/Adafruit-BMP085-Library>.

¹³Questo valore può essere modificato mediante comandi AT, si veda [23].

con il modulo HC05, tramite la funzione:

```
BTSerial.println( (String)pressione +" , "+ (String)temperatura);
```

questa concatena i due valori di pressione e temperatura e li invia sulla seriale bluetooth in formato csv. Infine si imposta un ritardo per la lettura successiva del sensore, che nel codice in esame è di 3000ms. Al termine della scrittura del codice si procede al caricamento sul microcontrollore, questa procedura, una volta collegata la scheda al PC tramite cavo USB, avviene in maniera del tutto automatica.

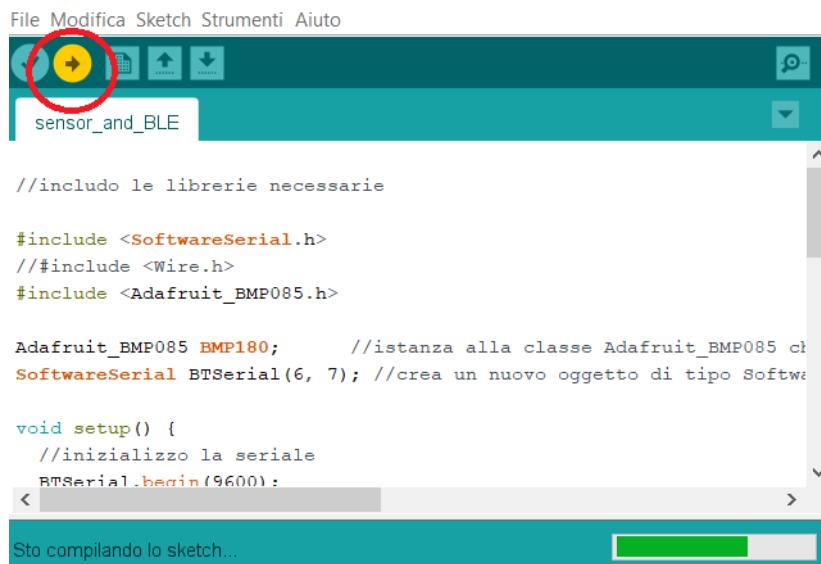


Figura 3.7: *Tasto caricamento sketch Ide Arduino*

Premendo il tasto di caricamento (figura 3.7) il codice sarà prima compilato e poi caricato sulla scheda Arduino¹⁴, qui vi rimarrà fin quando non si carica un nuovo sketch. Ogni volta che sarà collegata l'alimentazione alla scheda il programma verrà eseguito automaticamente.

¹⁴L'unico controllo da eseguire preventivamente al caricamento è quello di verificare nella finestra **strumenti** dell'IDE, nella sezione **porta** se la porta seriale del PC selezionata è quella a cui effettivamente è collegata la scheda a microcontrollore.

3.2.3 Terminale seriale e visualizzazione dei dati

Configurazione di RealTerm

Per l'acquisizione e il salvataggio del flusso dati ricevuti via bluetooth utilizziamo un terminale seriale, RealTerm. I terminali seriali sono strumenti software utilizzati per scopi di sviluppo, debugging e reverse engineering. Sono utili per inviare e ricevere dati tramite protocolli di comunicazione seriale, ad esempio RS-232, I2C o UART. RealTerm è ricco di funzionalità perché può visualizzare i dati in diversi formati tra cui ASCII, ANSI, esadecimale, intero (8 bit e 16 bit), binario, float, etc. Offre la funzione di salvataggio dati in un file con la possibilità di aggiungere un'etichetta temporale e caratteri di fine riga.

Vediamo quali parametri impostare nel caso della comunicazione seriale UART con Arduino: dopo aver effettuato il cablaggio dei moduli e dell'alimentazione sul microcontrollore, viene eseguito automaticamente lo sketch precaricato. Da questo momento il modulo HC05 effettua un lampeggio veloce, questo indica che è pronto per essere accoppiato al bluetooth del PC;¹⁵ una volta accoppiato il dispositivo apriamo il programma RealTerm che ci apparirà come in figura 3.8

¹⁵La password predefinita del modulo HC05 è: 1234, questa può essere comunque sostituita o controllata con gli appositi comandi AT. Per ulteriori informazioni sui comandi AT consultare [23].

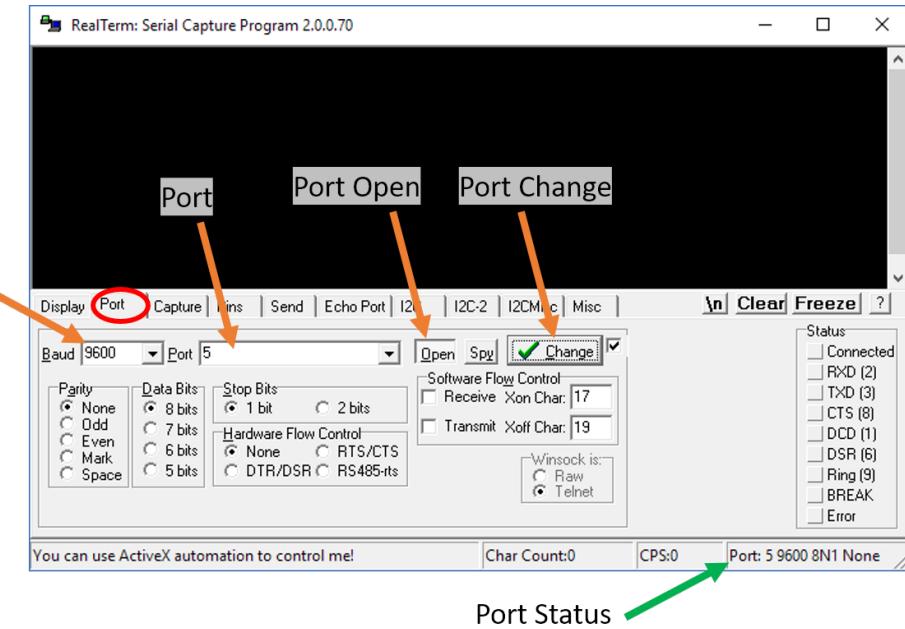


Figura 3.8: *RealTerm:configurazione protocollo*

Nella finestra **port** dovremo impostare: la velocità di trasmissione, cioè la *baud* che nel nostro caso è di 9600; la porta di comunicazione seriale assegnata al dispositivo¹⁶ (ad esempio la COM8); il numero di bit dati, parità e bit di stop; premendo infine sul pulsante **open** avvieremo la comunicazione. Le altre due sezioni importanti da impostare sono le finestre **Display** e **Capture** (figure 3.9).

¹⁶Nel sistema operativo Windows si può andare nella sezione *Dispositivi e Stampanti*, trovare il dispositivo HC05 e visualizzare la porta ad esso assegnata nella sezione *proprietà*.

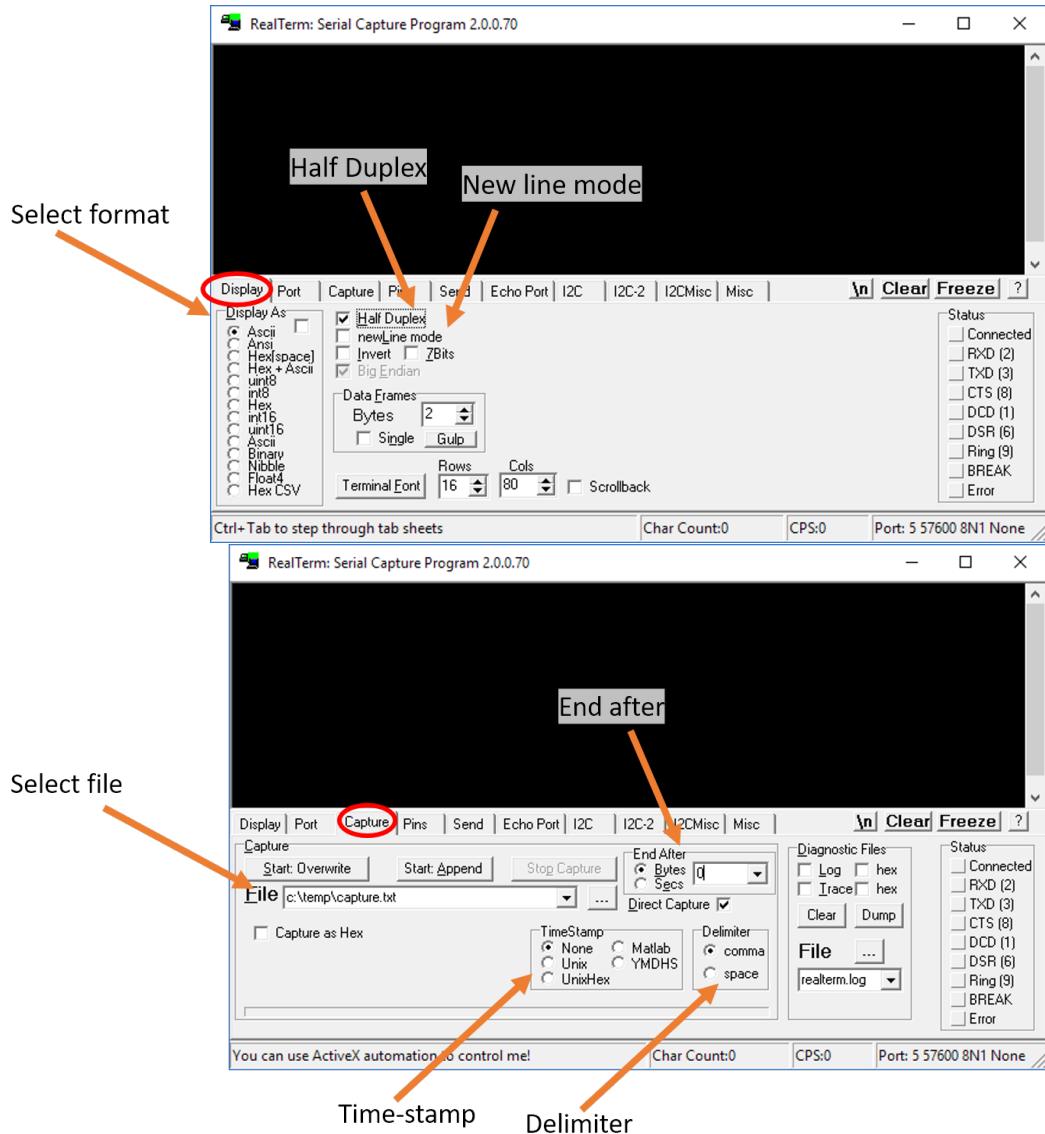


Figura 3.9: *RealTerm: configurazione del Display e Capture*

Nella finestra **Display** il parametro principale da impostare è il tipo di codifica dei bit (nel nostro caso sceglieremo la codifica ASCII), mentre la finestra **Capture** serve per avviare il salvataggio dei dati, questi saranno memorizzati all'interno di un file scelto dall'operatore. La memorizzazione dati parte quando si preme il pulsante **Start:Overwrite** o **Start:Append** che rispettivamente sovrascrivono oppure aggiungono in coda i dati nel file selezionato.

Plottaggio in tempo reale con KST

Avviata la cattura dei dati con RealTerm è possibile visualizzarli in tempo reale con il software KST. Esso infatti consente di rappresentare graficamente temperatura e pressione in tempo reale man mano che vengono acquisiti. Mediante procedura guidata (*Wizard* fig.3.10) si configura il tipo di grafico che si intende realizzare a partire dal file dati sorgente, che è rappresentato, nel nostro caso, dal file di *capture* creato con il terminale RealTerm. Temperatura e pressione possono essere graficate in funzione dell'etichetta temporale associata a ogni misura da RealTerm oppure rispetto all'indice di misura. In figura 3.11 è mostrato un esempio di grafico di pressione in funzione dell'etichetta temporale (tempo Unix) assegnata ad ogni lettura da RealTerm.

Si vuole sottolineare che KST è un software open-source utilizzabile su tutti i principali sistemi operativi, è stato sviluppato dall'astrofisico canadese Barth Netterfield dell'università di Toronto ed attualmente il suo sviluppo è finanziato dall'agenzia spaziale canadese¹⁷. Nasce come un programma di tracciamento e visualizzazione di grandi set di dati, attualmente è noto per essere un software libero per la rappresentazione dei dati in tempo reale.

¹⁷Si veda l'intervista fatta al suo ideatore Barth Netterfield: <https://tomchance.org.uk/writing/kstinterview/>

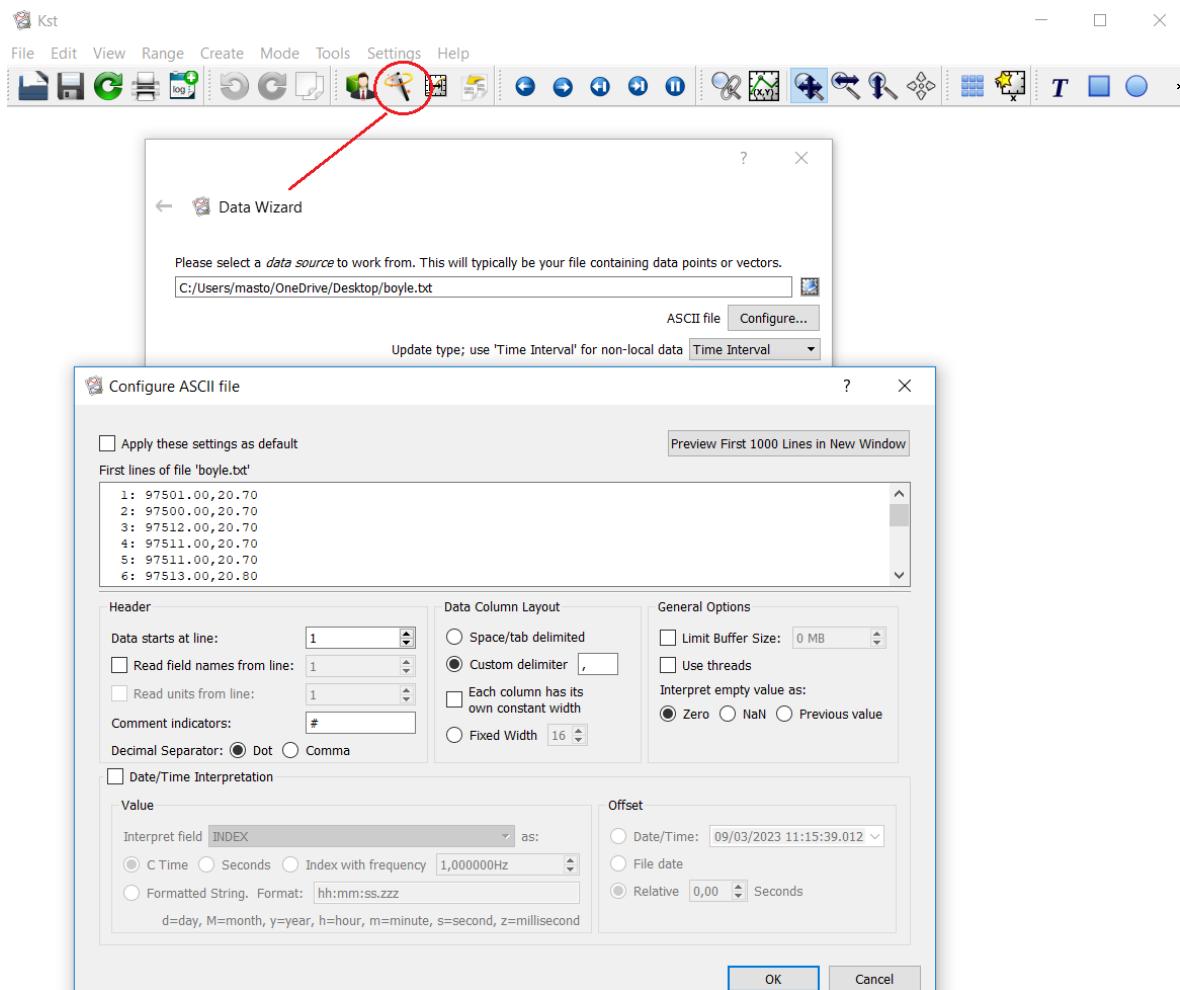


Figura 3.10: Schermata Wizard KST

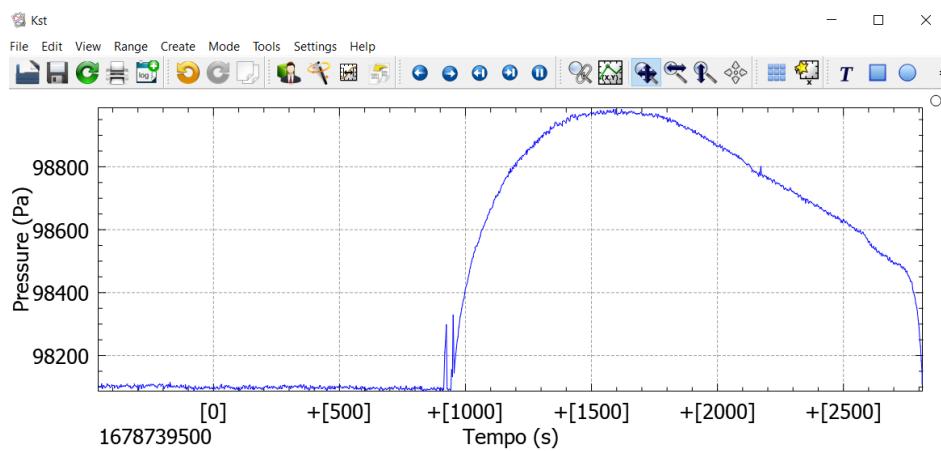


Figura 3.11: Grafico di pressione in funzione del tempo (Unix) con KST.

Si ritiene questo lato della proposta didattica di non secondaria importanza: la *rappresentazione* grafica dei dati in tempo reale è molto utile per seguire l'aspetto dinamico dei fenomeni in atto. Se è vero che le equazioni della termodinamica a cui si farà riferimento sono associate a stati di equilibrio, è anche vero che ogni stato può essere visto come inizio o risultato di una trasformazione; ogni trasformazione come “percorso” che connette due stati.

3.3 Sistemi termodinamici e gas ideali

In questo paragrafo viene discussa la definizione dei termini riguardanti i sistemi¹⁸ termodinamici, l'equilibrio, gli stati e le trasformazioni. Questo per due motivi: in primo luogo perché si raccorda perfettamente agli argomenti trattati nel capitolo primo e secondo perché tali definizioni si ritengono indispensabili per comprendere il ruolo che svolge la termodinamica dell'equilibrio.

3.3.1 Sistemi termodinamici, stati, trasformazioni ed equilibrio

Definiamo sistema fisico termodinamico *macroscopico* una schematizzazione cognitiva della realtà tale da essere osservabile direttamente dai nostri sensi. D'altro canto sappiamo dai modelli vigenti che ogni sistema macroscopico risulta essere un aggregato di sotto-sistemi microscopici (atomi, molecole, particelle), tuttavia è impossibile e poco utile descrivere il sistema (macro) attraverso lo stato di moto dei singoli costituenti (micro). Un sistema macroscopico è invece ben descritto ricorrendo a variabili di insieme che ne definiscono univocamente lo stato: le *variabili termodinamiche* o *variabili di stato*. Sono variabili di stato ad esempio volume, la pressione, la temperatura, etc. Un sistema macroscopico definito per mezzo di varibili di stato è detto *sistema termodinamico*.

La *termodinamica* studia i *fenomeni temici* in relazione ad altre forme di energia (meccanica, chimica). Chiameremo *chiuso* un sistema che non scambia materia con l'am-

¹⁸ *Sistemi* nel senso definito nel capitolo 1. Si vedano inoltre [21, 27] per le definizioni contenute in questo paragrafo.

biente; invece un sistema è *isolato* se non scambia né materia né energia; le *sorgenti* sono i sistemi con cui un sistema non isolato scambia energia.

Lo stato di un sistema, definito per mezzo delle sue variabili termodinamiche, è detto *stazionario* se il loro valore resta costante nel tempo. Un sistema chiuso raggiunge lo stato di *equilibrio termodinamico* quando si realizza *l'equilibrio meccanico* delle forze agenti tra sistema e ambiente, *l'equilibrio temico* e *l'equilibrio chimico*. Un sistema isolato raggiunge sempre l'equilibrio termodinamico dopo un tempo sufficientemente lungo.

Quando un sistema cambia stato si dice che subisce una *trasformazione*, se si passa da uno stato iniziale di equilibrio a uno stato finale anch'esso di equilibrio si parla di termodinamica tra stati di equilibrio: questa studia le relazioni tra le variabili dello stato iniziale e finale disinteressandosi della descrizione del sistema mentre la trasformazione ha luogo. Elenchiamo adesso alcuni modi di schematizzare e classificare le trasformazioni:

1. *Trasformazioni cicliche*: una trasformazione si dice ciclica quando lo stato iniziale e finale coincidono;
2. *Trasformazioni quasi statiche*: sono una schematizzazione teorica della realtà, presuppongono che il sistema passi solo attraverso stati di equilibrio. Si possono vedere come caso limite delle trasformazioni reali e come un utile strumento teorico;
3. *Trasformazioni adiabatiche*: sono trasformazioni durante il quale non vi è scambio di calore tra ambiente e sistema;
4. *Trasformazioni isobare, isocore e isotermi*: sono trasformazioni in cui restano costanti rispettivamente pressione, volume e temperatura;
5. *Trasformazioni reversibili e irreversibili*: nel passare da uno stato iniziale a uno finale un sistema passa attraverso numerosi stati intermedi in cui potrà essere scambiato calore e lavoro con l'ambiente. Una trasformazione reversibile è tale se è possibile riportare il sistema allo stato iniziale passando attraverso i singoli stati

intermedi: cioè le sorgenti recuperano il calore scambiato e i dispositivi esterni che hanno compiuto lavoro recuperano l'energia ceduta. Le trasformazioni reali hanno sempre un grado di irreversibilità (meccanica, termica, chimica). Dunque le trasformazioni reversibili sono quasi statiche e non presentano fenomeni dissipativi: cioè la quasi staticità è condizione necessaria, ma non sufficiente per ottenere una trasformazione reversibile. Le trasformazioni irreversibili presentano la caratteristica di non essere sequenza di infiniti stati di equilibrio, oppure presentano effetti dissipativi (attriti, deformazioni, etc.), oppure ancora entrambe le circostanze;

6. *Trasformazioni spontanee*: a partire da uno stato di non equilibrio un sistema, lasciato isolato, effettua una trasformazione spontanea fino a raggiungere l'equilibrio, le trasformazioni spontanee non sono quasi statiche;
7. *Trasformazioni del non equilibrio*: un sistema non isolato e non chiuso si trasforma e permane nello “stato” di non equilibrio.

3.3.2 Il quadro teorico

Data una certa quantità di gas contenuta in un recipiente possiamo constatare che un suo stato di equilibrio è completamente specificato dalle variabili termodinamiche di pressione P , volume V , temperatura T e dalla sua massa m che resta costante se il sistema è chiuso.

Sperimentalmente si riscontra che i parametri sono legati dall'*equazione di stato dei gas perfetti (o ideali)*:

$$\frac{PV}{nT} = R \quad (3.1)$$

dove abbiamo espresso la massa in moli $n=\frac{m}{M}$, con M il peso molecolare del gas; il valore della temperatura è espresso in kelvin; $R=8,314 \text{ J/K mol}$ è la *costante dei gas*. Alcuni gas seguono con ottima approssimazione questa legge entro ampi intervalli di pressione e temperatura, altri invece la seguono bene a pressioni non troppo elevate. In ogni caso ciò che si osserva sperimentalmente è che il comportamento di un gas reale

si avvicina a quello di un gas perfetto al diminuire dalla pressione.

L'equazione di stato dei gas perfetti rappresenta la sintesi delle leggi empiriche sui gas di Avogadro, Boyle, Charles e Gay-Lussac. Alcune di queste saranno discusse e analizzate nelle sezioni successive del seguente capitolo per mezzo dell'apparato sperimentale proposto e realizzato in questo lavoro di tesi. Il gas oggetto di studio sarà l'aria, questo per gli scopi dell'esperienza si comporta in buona approssimazione come un gas perfetto.

3.4 Verifica della legge di Boyle-Mariotte

Dato un gas in equilibrio termodinamico a temperatura T e ad una certa pressione p entro un dato volume V : si osserva che per tutti i possibili stati di equilibrio isotermi il prodotto della pressione per il volume del gas rimane costante, vale cioè quella che viene chiamata la legge di Boyle:

$$pV = \text{cost} \quad (3.2)$$

È facile osservare che questa è diretta conseguenza dell'equazione di stato dei gas ideali (3.1) mantenendo fissi T e n . Quindi in un sistema di coordinate cartesiane ortogonalì graficando la pressione in funzione del volume, il luogo dei punti, che rappresentano i diversi stati di equilibrio a fissata temperatura, è rappresentato da un ramo di iperbole equilatera per la (3.2). Per ogni fissata temperatura si avrà uno specifico ramo di iperbole, queste curve sono dette *isoterme* del gas (fig.3.12).

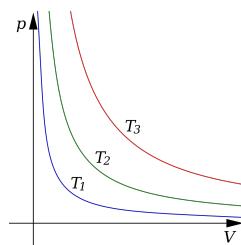


Figura 3.12: *Isoterme nel piano (p, V) detto anche di Clapeyron, con $T_1 < T_2 < T_3$*

Una trasformazione isoterma si può realizzare mettendo in contatto termico il sistema termodinamico in esame (a pareti diatermiche) con una sorgente di calore (idealmemente infinita) a temperatura T costante (fig.3.13).

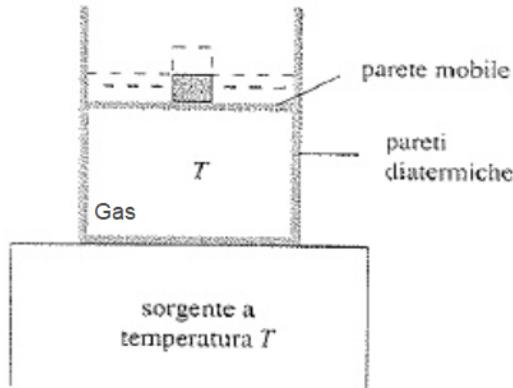


Figura 3.13:

3.4.1 Apparato, misure e risultati

Per la verifica dell'equazione $pV = \text{cost}$ useremo il seguente setup sperimentale:

1. Scheda a microcontrollore Arduino Uno;
2. Sensore di pressione BMP180;
3. Siringa a stantuffo (50 cm^3) ;
4. Potenziometro a slitta per la trasduzione del volume della siringa;
5. Tubo in gomma per collegare la siringa al sensore di pressione;
6. PC per l'acquisizione dati tramite cavo USB;
7. Software grafico KST per il plottaggio dei dati;
8. Rubinetto a tre vie per lo sfiato del sistema.

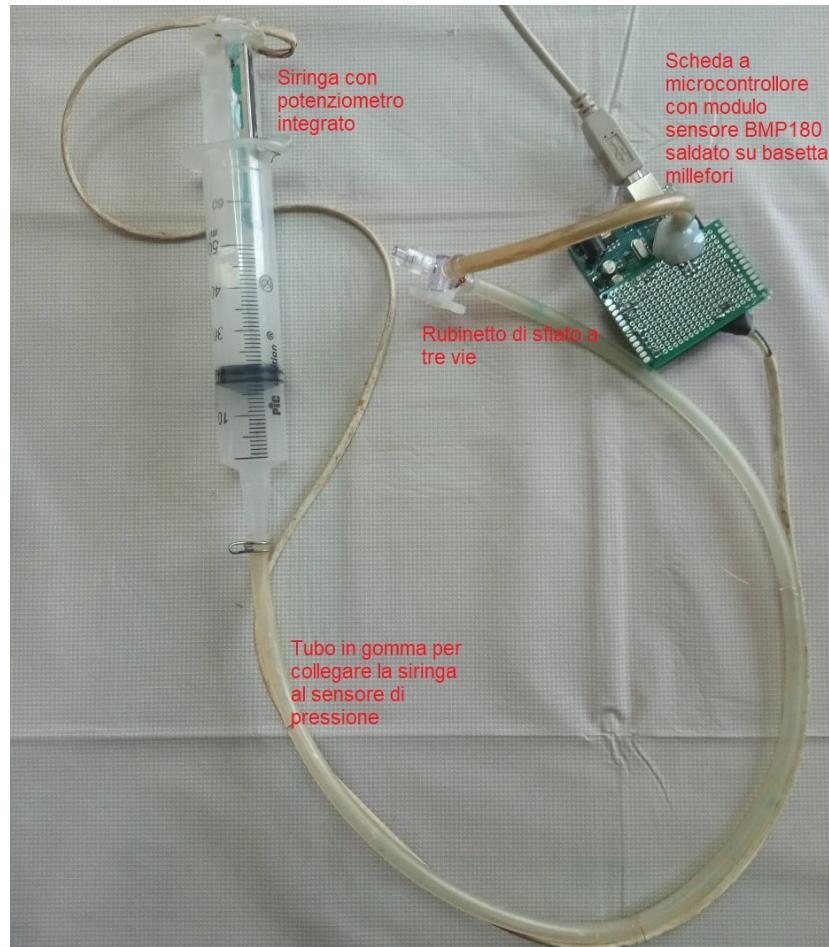


Figura 3.14: *Setup sperimentale per la legge di Boyle*

L'esperienza si svolge nel seguente modo: il microcontrollore viene collegato al sensore di pressione BMP180 e al potenziometro mediante basetta millefori opportunamente cablata come precedentemente descritto. Con il tubo in gomma si collega l'estremità della siringa al sensore di pressione dotato di apposito beccuccio (fig.3.14); il potenziometro è incollato alla siringa in modo tale da trasdurre la variazione di volume dovuta al movimento dello stantuffo, nell'intervallo 0-30 cm³, in una corrispondente variazione di tensione. Il sistema a microcontrollore inizierà fin da subito ad inviare i valori di pressione e volume al terminale seriale presente sul PC. Quest'ultimo deve essere configurato secondo la procedura indicata nella sezione 3.2.3. Atteso qualche istante, in modo da poter ragionevolmente considerare il sistema in equilibrio termico con l'ambiente, si varia il volume del sistema agendo sullo stantuffo della siringa; il volume

iniziale $V_0 + 5\text{cm}^3$ viene aumentato fino a raggiungere il volume di $V_0 + 30\text{ cm}^3$.

L'andamento temporale delle variabili di stato è mostrato nella figura seguente:

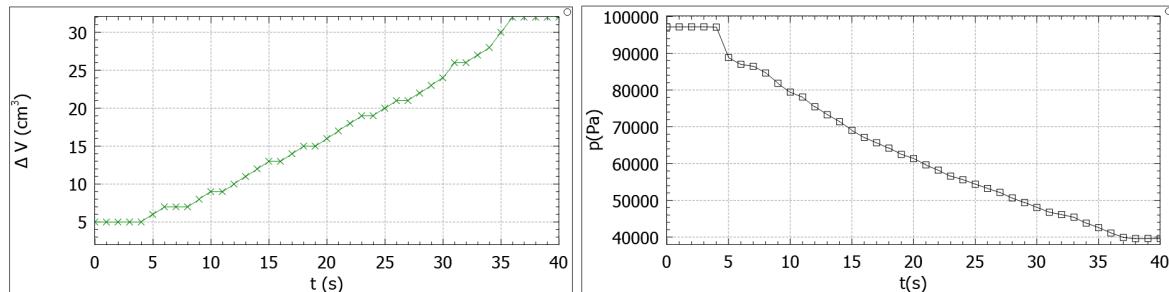


Figura 3.15: *Plottaggio in tempo reale di pressione e ΔV con il software KST*

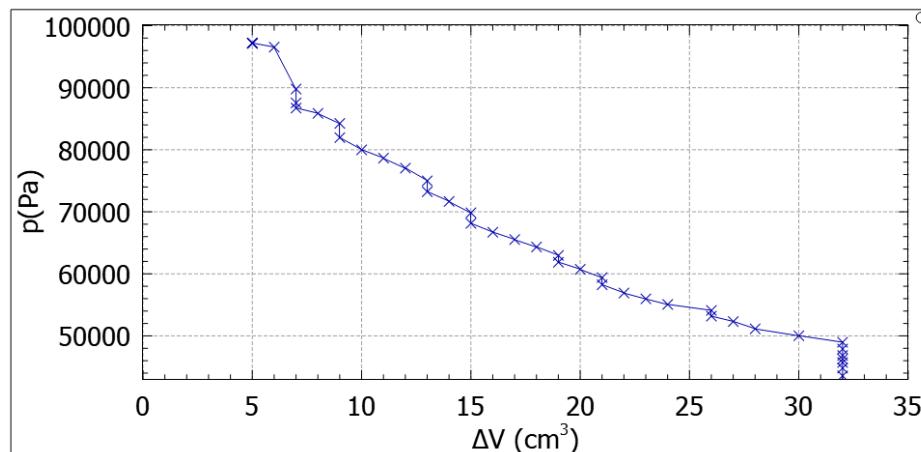


Figura 3.16: *Diagramma p - ΔV in tempo reale con KST*

La stima del valore di V_0 può essere ottenuta sfruttando la costanza del prodotto pV , da cui ricaviamo la relazione:

$$V_0 = \frac{p_2 \Delta V_2 - p_1 \Delta V_1}{p_1 - p_2},$$

dove $V_i = V_0 + \Delta V_i$ e gli indici 1 e 2 indicano due generici stati di equilibrio. Una stima¹⁹ per V_0 è di $14,5 \pm 2,7 \text{ cm}^3$ compatibile con il volume V_0 misurato di 14 ± 1

¹⁹Questa stima è stata ricavata tra i punti ($p_1 = 97142\text{Pa}$, $\Delta V_1 = 5\text{cm}^3$) e ($p_2 = 42519\text{Pa}$, $\Delta V_2 = 30\text{cm}^3$). L'errore elevato è dettato dalla bassa sensibilità del potenziometro. Facciamo inoltre notare che nel proseguo di questo paragrafo si userà la stima di V_0 senza considerare l'errore ϵ_{V_0} .

cm^3 .

Dal fit curvilineo ricaviamo il valore della costante $\text{cost} = 1868830 \pm 4225 \text{ Pa cm}^3$.

Mentre dai valori di pressione p_i e volume V_i misurati, ricaviamo un coefficiente di variabilità statistica tra i vari prodotti $(pV)_i$ di $CV = \frac{\sigma_{pV}}{\langle pV \rangle} = 0,012$.

L'immagine successiva mostra l'andamento dei vari punti di misura nel piano di Clapeyron alla temperatura $\theta = 16,7^\circ\text{C}$, inevitabilmente tra i vari punti di misura la temperatura subisce delle fluttuazioni.

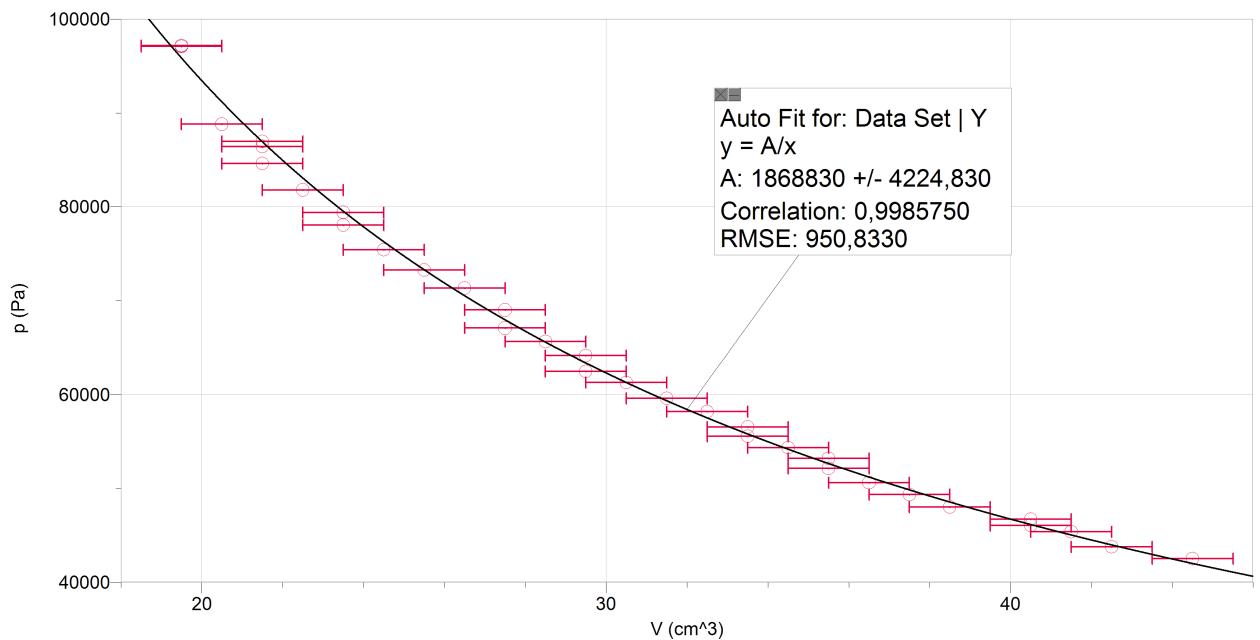


Figura 3.17: *Grafico dell'isoterma nel piano p-V realizzato con LoggerPro*

In alternativa è possibile verificare l'andamento della pressione in funzione del reciproco del volume: ci si aspetta una variazione di tipo lineare, infatti

$$p = \text{cost} \frac{1}{V}$$

La figura 3.18 mostra la retta di tendenza ricavata con un fit lineare sul campione dati che restituisce un coefficiente di determinazione di $R^2 = 0,998$ e un'intercetta di $-94,3 \pm 643,2 \text{ Pa}$ dunque compatibile con lo zero entro gli errori.

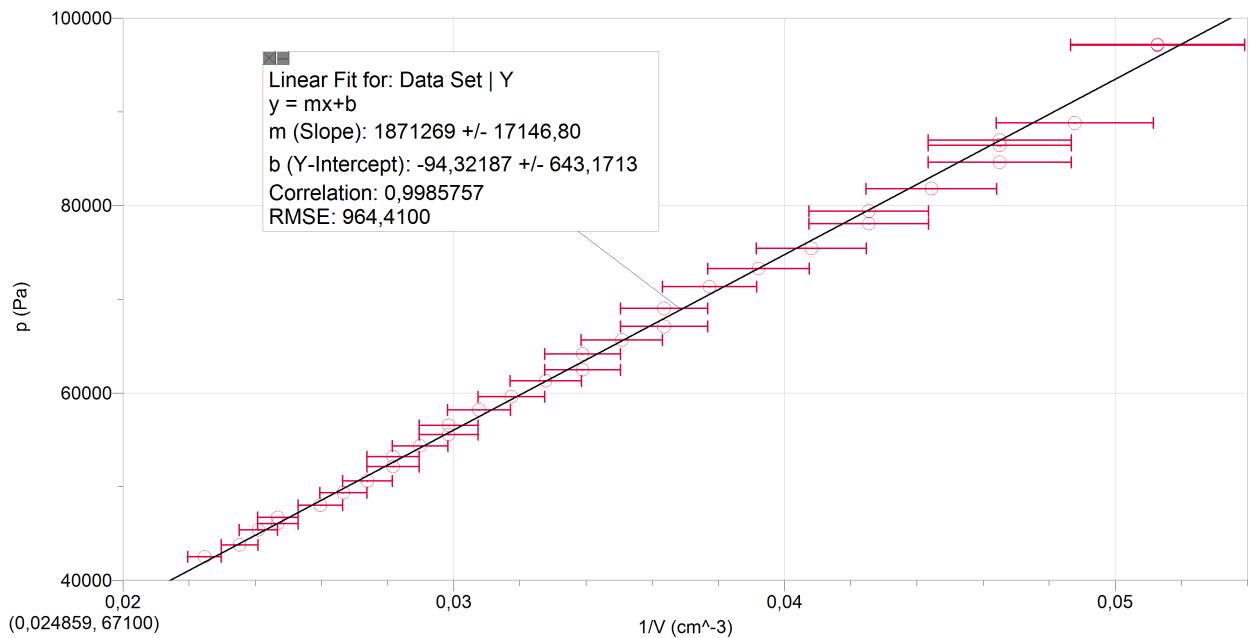


Figura 3.18: *Fit lineare di p vs $\frac{1}{V}$*

A partire dal valore stimato di $pV = cost$ è possibile stimare il valore del numero di moli di gas n_{stim} , il calcolo di restituisce un valore di $0,78 * 10^{-3} \pm 2,5 * 10^{-5}$ mol. Questo valore può essere confrontato con il valore ricavato dall'equazione di stato dei gas (3.1) $n_{th} = 0,83 * 10^{-3} \pm 6,8 * 10^{-5}$ mol.

3.5 La legge dell'isocora o 2^a di Gay Lussac

Mantenendo costante il volume V del gas, si trova una relazione di tipo lineare tra pressione e temperatura, questa discende in maniera naturale dall'equazione di stato (3.1) fissando n e V :

$$p = \left(\frac{nR}{V}\right)(\theta + T_0) = cost(\theta + T_0) \quad (3.3)$$

La θ rappresenta la temperatura in gradi Celsius, mentre T_0 è un valore costante, che indichiamo come il valore da aggiungere alla temperatura espressa in grado Celsius per ottenere il valore in kelvin. Alternativamente si può vedere come il valore, espresso

in gradi Celsius, dello zero assoluto di temperatura. Mettendo in contatto termico il sistema con diverse sorgenti di temperatura T_i e misurando all'equilibrio i corrispondenti valori di pressione p , è possibile verificare la *legge dell'isocora* anche detta 2° Legge di Gay-Lussac. Una trasformazione isocora è rappresentata nel diagramma $p - V$ da un segmento parallelo all'asse p , si veda la figura seguente:

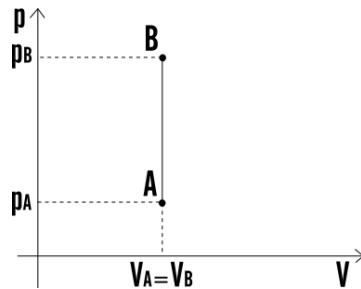


Figura 3.19: *Trasformazione isocora tra due stati di equilibrio A e B*

L'obiettivo di questa esperienza didattica è verificare la linearità della relazione tra pressione e temperatura e stimare il valore di T_0 utilizzando i parametri di regressione lineare. Dall'equazione (3.3) ricaviamo:

$$p = \left(\frac{nR}{V}\right)(\theta + T_0) \equiv m\theta + q$$

con

$$m \equiv \frac{nR}{V}$$

$$q \equiv \frac{nR}{V}T_0$$

risulta adesso facile osservare che da q e m si può ricavare una stima di :

$$T_0 = \frac{q}{m}.$$

3.5.1 Apparato, misure e risultati

Per la verifica dell'equazione (3.3) e la stima di T_0 useremo il seguente setup sperimentale:

1. Microcontrollore ArduinoUno;
2. Sensore di temperatura e pressione BMP180;
3. Modulo bluetooth HC05;
4. Batterie di alimentazione;
5. Contenitore ermetico in grado di contenere i moduli, il microcontrollore e le batterie di alimentazione;
6. PC per l'acquisizione dei dati;
7. Software grafico KST per il plottaggio dei dati.

In questa esperienza l'apparato proposto mostra tutta la sua utilità, infatti il processo di misura è totalmente automatizzato. La scheda a microcontrollore corredata di moduli ed alimentazione, opportunamente cablati, viene inserita nel contenitore, che viene poi chiuso con apposita capsula, in modo da fissarne il volume V e il numero di moli n del gas (aria)(fig.3.20). Il modo scelto per variare la temperatura del sistema è stato quello di riporlo in ambiente refrigerato a temperatura T_1 per un certo tempo, successivamente è stato prelevato e riposto a temperatura ambiente T_2 ; in questo modo la temperatura del sistema contenente il gas passa in maniera graduale dalla temperatura T_1 alla temperatura ambiente T_2 , con $T_1 < T_2$. In questo frangente il sistema ha registrato i valori della pressione in funzione della temperatura ad intervalli di 0.5s e li ha salvati in un file nominato *isocora.txt*.

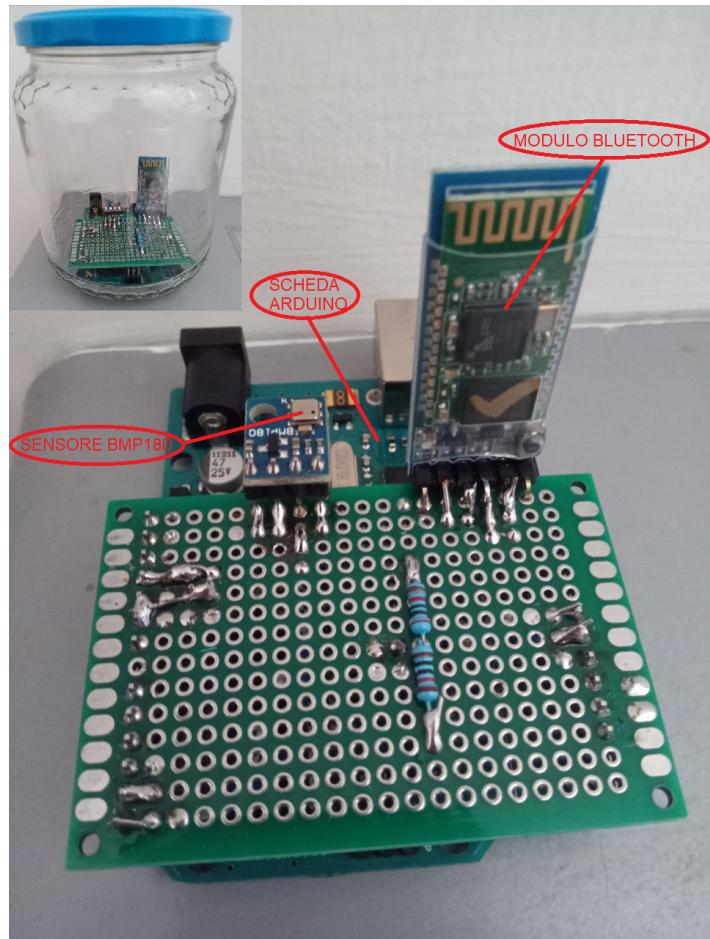


Figura 3.20: Apparato sperimentale per la verifica della legge dell’isocora

In circa un’ora di acquisizione abbiamo ottenuto 7000 punti di misura, passando dalla temperatura $T_1 = -8,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $T_2 = 16,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ e dalla pressione $p_1 = 88104 \text{ Pa}$ a $p_1 = 97795 \text{ Pa}$. Nella figura seguente osserviamo i grafici in tempo reale ottenuti con KST per la pressione e le temperatura in funzione del tempo:

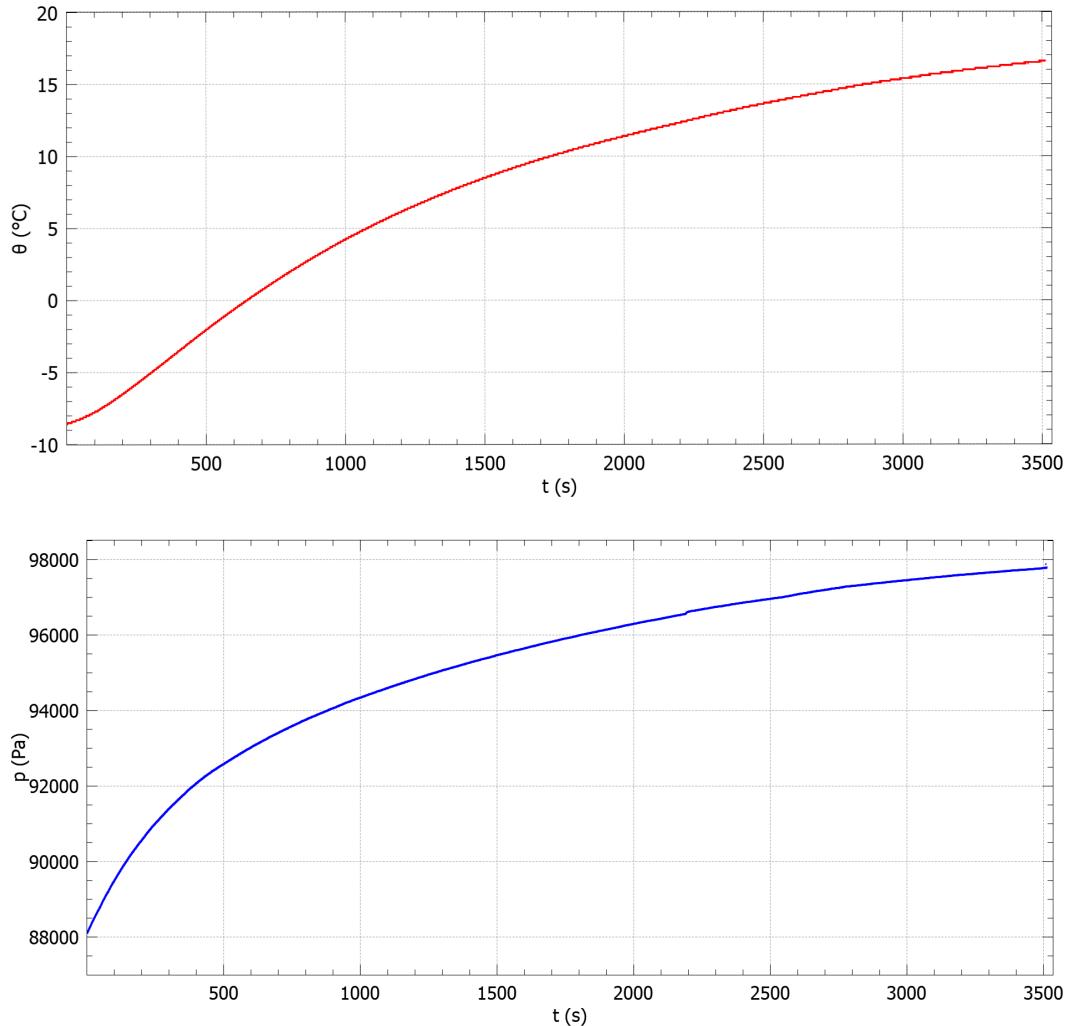


Figura 3.21: *Andamento di p e θ in funzione nel tempo registrato con KST*

Dai valori di temperatura e pressione mostrati in figura 3.21 è interessante ricavare le costanti di tempo τ_θ e τ_p , tramite un fit esponenziale si ha : $\tau_\theta = 1575,5 \pm 1,9s$ e $\tau_p = 1123,8 \pm 1,4s$.

Il diagramma pressione temperatura invece è mostrato in figura 3.22:

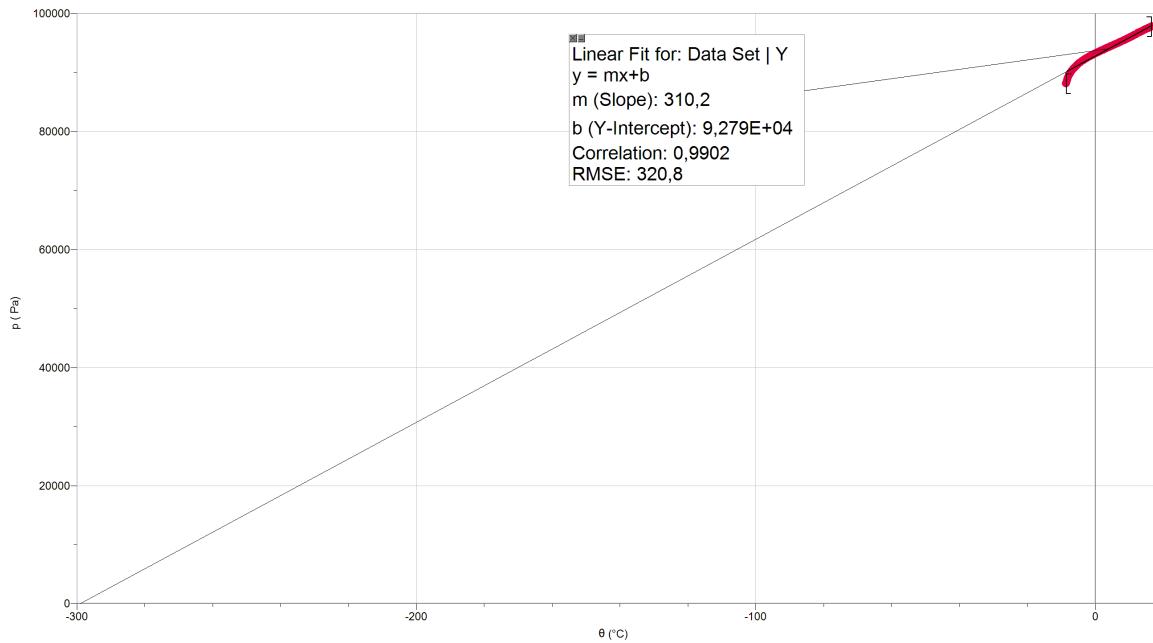


Figura 3.22: Pressione VS Temperatura con retta di regressione realizzato con *LoggerPro*

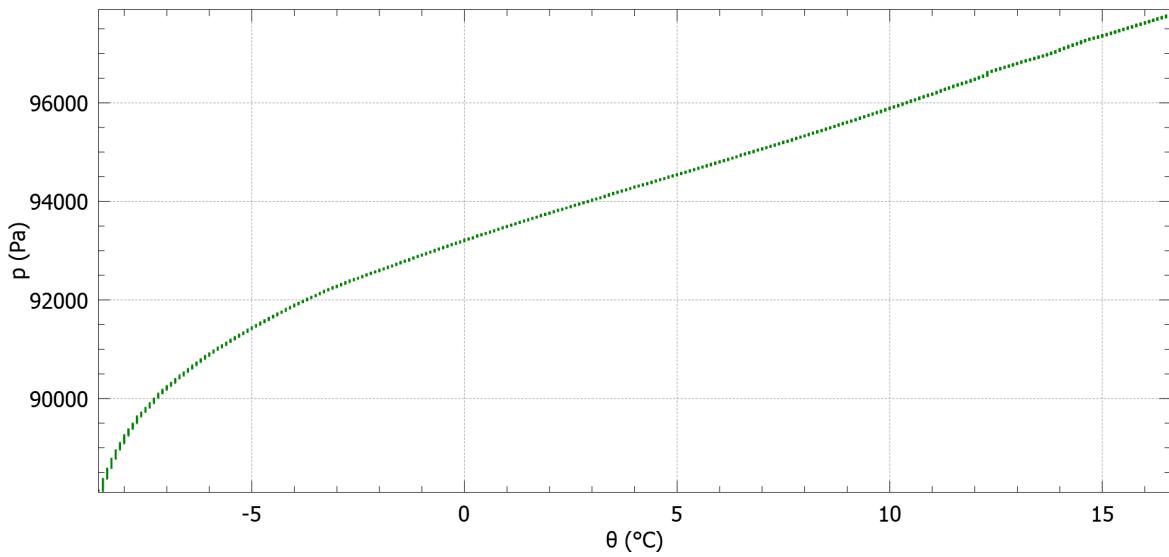


Figura 3.23: Pressione VS Temperatura con KST

Osserviamo come la retta di regressione lineare intercetta l'asse θ vicino i -300°C ; dalla stima dei parametri di regressione otteniamo i seguenti valori: $q = 92790,3 \pm 5,6$ e $m = 310,2 \pm 0,5$ da cui ricaviamo una stima per il valore di $T_0 = \frac{q}{m} = -299 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Limitando la regressione ai primi ai primi 3000 o 3500 punti di misura si ottengono rispettivamente $T_0 = -263 \pm 1^\circ\text{C}$ e $T_0 = -274 \pm 1^\circ\text{C}$, questo può essere un ulteriore spunto di riflessione da sottoporre agli studenti: ad esempio si possono fare nuove misure su sottointervalli di temperatura, ripetere le stime e confrontare i risultati.

Un esperimento analogo, dove $T_1 = -2,2^\circ\text{C}$ e $T_2 = 18,2^\circ\text{C}$, in cui la lettura del sensore viene effettuata ogni 3 secondi, per 870 punti di misura, restituisce i seguenti parametri di regressione lineare: $q = 92070 \pm 8$, $m = 317,1 \pm 0,6$ da cui $T_0 = \frac{q}{m} = -290,3 \pm 0,6^\circ\text{C}$. Il fatto che la temperatura T_0 sia estrapolata dai dati, senza effettuare un'effettiva misurazione, ha un impatto forte sugli studenti e pone le basi per ulteriori discussioni[16].

3.5.2 Termometro a gas

Sfruttando la variabilità della pressione di un gas con la temperatura è possibile costruire un termometro in cui la caratteristica termometrica è la pressione oppure il volume. Rispetto ai termometri a liquido, che funzionano in un intervallo di temperature limitato e lontano dai punti di congelamento e evaporazione, i termometri a gas danno misure più accurate in un ampio intervallo di temperature. Lo schema concettuale di un termometro a gas a volume costante è illustrato nella figura 3.24.

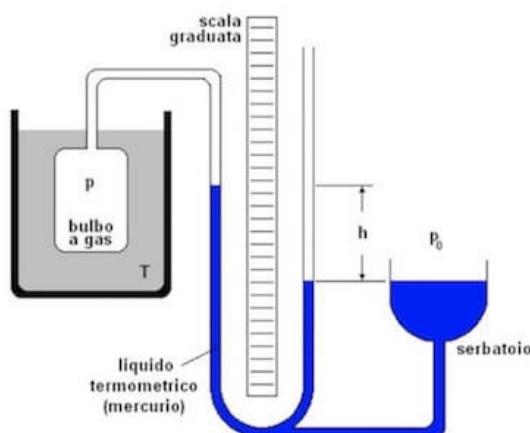


Figura 3.24: Struttura schematica di un termometro a gas.

Un bulbo contenente gas è collegato ad un tubo a U graduato e dotato di un serbatoio. Il tubo viene riempito di un liquido, solitamente mercurio. Quando si vuole misurare la temperatura di un corpo il bulbo è messo in contatto con esso. La variazione di temperatura provoca una variazione di pressione del gas, che si ripercuote sul livello del liquido. Dalla variazione Δh si ricava la variazione di pressione, successivamente spostando il serbatoio si ripristina il volume iniziale del gas. Dunque, considerando noto il punto relativo allo zero assoluto di temperatura ($p = 0 \text{ Pa}$, $\theta = -273,15^\circ\text{C}$), basta calcolare un altro punto del piano p-T per ricavare la retta di calibrazione del termometro a gas. A questo punto nota la pressione del gas è possibile risalire al valore corrispondente di temperatura.

È interessante verificare il comportamento dell'apparato sperimentale sviluppato in questo paragrafo come termometro a gas. Rispetto allo schema concettuale di figura 3.24 il sistema qui proposto fornisce direttamente la misura di pressione mediante il sensore contenuto all'interno del gas. Analogamente a quanto fatto sopra ricaviamo una stima dei parametri di regressione q e m che compaiono nella (3.3) per un nuovo set di misure, ottenendo $m = 302,2 \pm 0,4$ e $q = 90416 \pm 6$. La retta così ottenuta rappresenta la curva per la stima delle temperature fuori dall'intervallo di calibrazione²⁰, che nel caso in esame varia tra $\theta_1 = 12,6^\circ\text{C}$ e $\theta_2 = 14,4^\circ\text{C}$.

²⁰Facciamo notare che a rigore basterebbero solo due punti determinare la retta di calibrazione di un termometro a gas, è questo il modo in cui viene illustrato nei manuali di fisica.

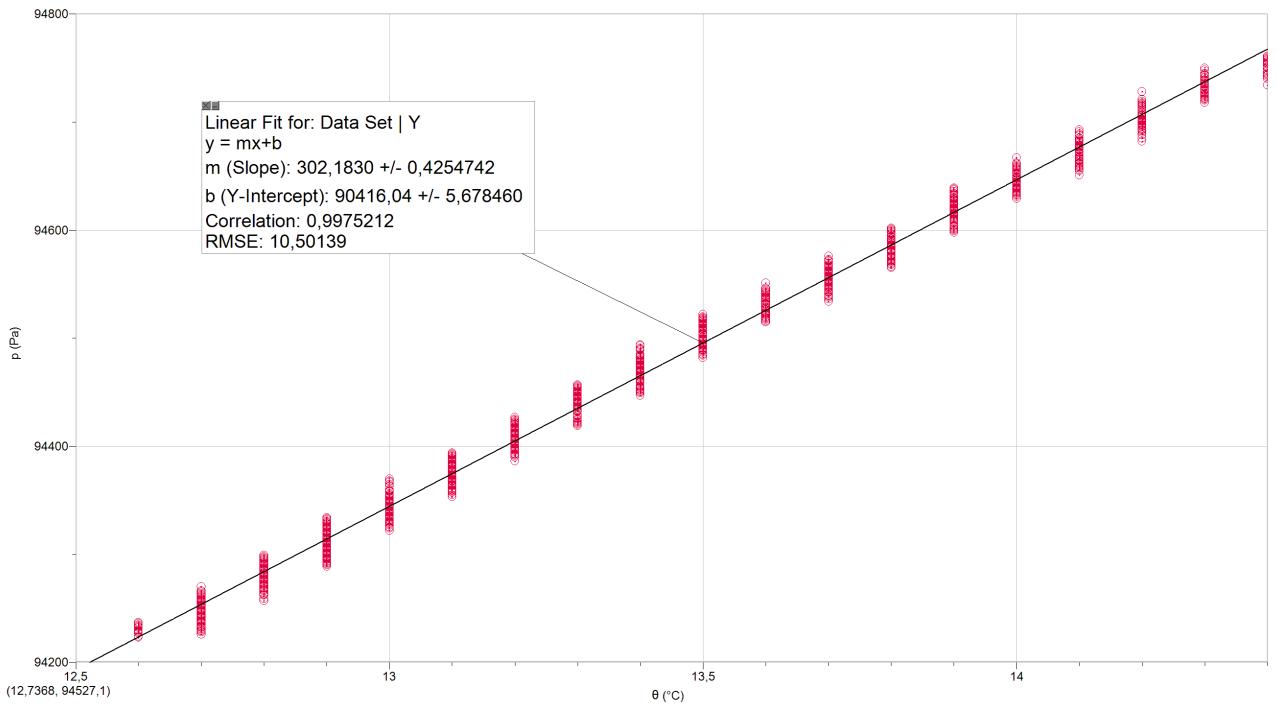


Figura 3.25: *Retta di calibrazione per il setup sperimentale usato come termometro a gas.*

Dall' equazione (3.3) è facile ricavare che:

$$\theta = \frac{p - q}{m}.$$

Dunque a fissata pressione è possibile determinare la temperatura corrispondente e viceversa. A tal proposito abbiamo messo in contatto termico il nostro apparato con un bagno termico a diverse temperature²¹. Atteso un certo tempo, affinché sia stabilito l'equilibrio termico tra il bagno e il gas contenuto nel sistema, si legge il valore di pressione p che restituisce il sensore. Dai parametri q e m della retta di regressione siamo in grado di calcolare il valore corrispondente di temperatura $\theta(p)$ e confrontarlo con la temperatura effettiva del del bagno termico.

²¹Misurate con il termometro HI 98501 prodotto dall'Hanna instruments, questo presenta un'accuratezza di $\pm 0,3^\circ\text{C}$ e una risoluzione di $0,1^\circ\text{C}$ nell'intervallo $-30:120^\circ\text{C}$.



Figura 3.26: *Setup sperimentale per testare il funzionamento del sistema come termometro a gas a volume costante.*

La tabella seguente contiene i risultati per quattro diversi punti di misura:

$p(\text{Pa})$	$\theta_{stimata}(\text{°C})$	$\theta_{sensore}(\text{°C})$	$\theta_{bagno}(\text{°C})$
93320 ± 100	$9,5 \pm 0,4$	$9,1 \pm 0,5$	$5,8 \pm 0,3$
93500 ± 100	$10,2 \pm 0,4$	$9,8 \pm 0,5$	$6,4 \pm 0,3$
93650 ± 100	$10,7 \pm 0,4$	$10,3 \pm 0,5$	$6,8 \pm 0,3$

Tabella 3.1: Stima di temperatura utilizzando l'apparato come un termometro a gas.

Come si può osservare la $\theta_{stimata}$ approssima entro gli errori la misura di $\theta_{sensore}$, mentre la temperatura del bagno termico (θ_{bagno}) risulta essere sempre sovrastimata. Uno dei possibili motivi va ricercato nel calore sviluppato, all'interno del gas, dall'elettronica. Facciamo notare che il termometro utilizzato per misurare la temperatura del bagno termico e il sensore restituiscono valori di temperatura compatibili quando sono nello stesso ambiente.

Per approfondire tale argomento, e valutare l'entità dell'errore indotto per riscaldamento dall'elettronica, si è realizzato un setup sperimentale in cui microcontrollore e alimentazione sono posti all'esterno del contenitore, mentre il sensore di pressione resta all'interno. Nell'intervallo di temperature compreso tra $\theta_1 = 11,0^{\circ}\text{C}$ e $\theta_2 = 14,0^{\circ}\text{C}$, abbiamo ricavato una nuova retta di calibrazione per la stima della temperatura $\theta(p)$.

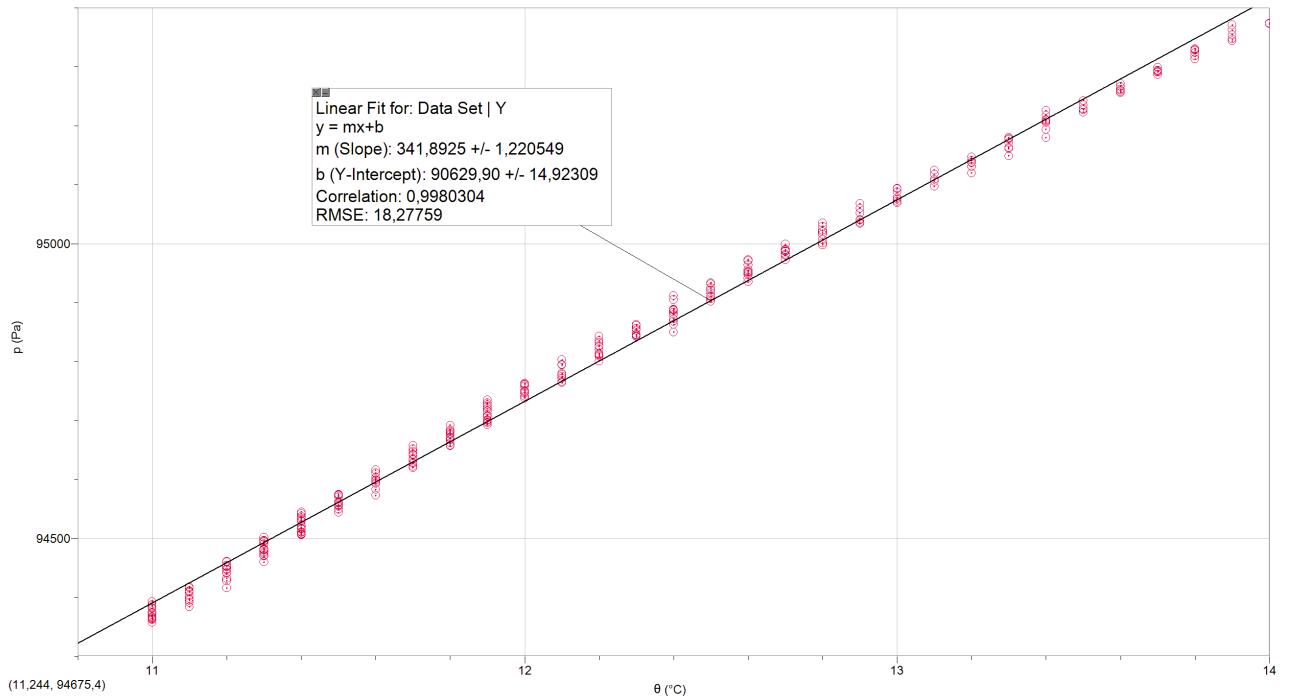


Figura 3.27: *Retta di calibrazione per il setup sperimentale usato come termometro a gas in cui la scheda a microcontrollore è posta all'esterno del recipiente contenente il gas.*

Riportiamo nella tabella seguente i risultati ottenuti:

$p(\text{Pa})$	$\theta_{stimata}(\text{°C})$	$\theta_{sensore}(\text{°C})$	$\theta_{bagno}(\text{°C})$
93700 ± 100	$9,0 \pm 0,4$	$9,2 \pm 0,5$	$8,9 \pm 0,3$
93500 ± 100	$8,4 \pm 0,4$	$8,5 \pm 0,5$	$8,5 \pm 0,3$
92440 ± 100	$5,3 \pm 0,4$	$5,7 \pm 0,5$	$5,8 \pm 0,3$

Tabella 3.2: Stima di temperatura utilizzando l'apparato come termometro a gas (Configurazione con microcontrollore all'esterno del gas).

Dunque, entro gli errori sperimentali, il termometro a gas proposto in quest'ultima configurazione è in grado di stimare la temperatura del bagno termico anche al di fuori dell'intervallo di calibrazione. Questo ci porta a concludere che le ipotesi fatte sulla configurazione precedente del setup sperimentale, in cui l'elettronica presente all'interno del gas induce un errore nella stima della temperatura del bagno termico, siano ragionevolmente corrette.

3.6 Un ciclo termodinamico

Come già discusso ad inizio capitolo tutte le trasformazioni reali hanno un qualche grado di irreversibilità, nel diagramma $p - V$ che segue è mostrato l'andamento della pressione del gas (aria) in funzione della variazione di volume²² nel piano di Clapeyron:

²²È stato utilizzato lo stesso apparato sperimentale utilizzato nella sezione 3.4.

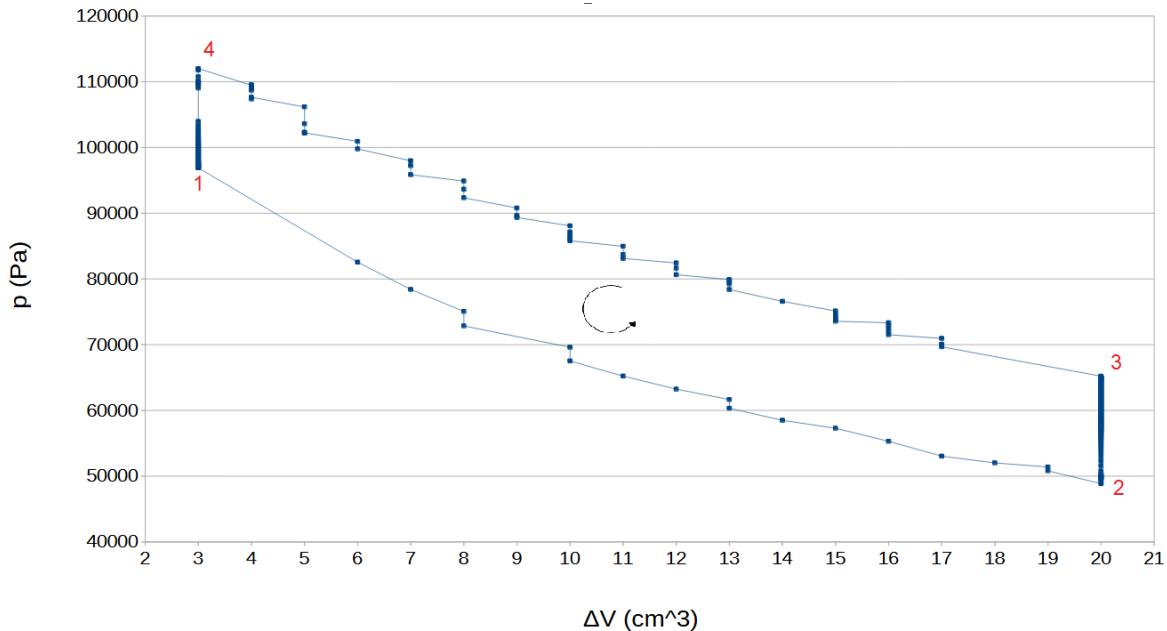


Figura 3.28: Rappresentazione nel piano p - V del Ciclo termodinamico realizzato con l'apparato sperimentale proposto.

Inizialmente la siringa contenete il gas a volume $V = V_0 + 3\text{cm}^3$ è in equilibrio con un bagno termico a $\theta_1=19,5^\circ\text{C}$, successivamente, agendo sul pistone, è stata effettuata un'espansione ($1 \rightarrow 2$) fino a raggiungere il volume $V = V_0 + 20\text{cm}^3$; a questo punto la siringa, contenente il gas, è stata immersa in un bagno termico a $\theta_2=74^\circ\text{C}$, ne risulta una trasformazione isocora ($2 \rightarrow 3$) al termine del quale, sempre agendo sul pistone, è effettuata una compressione fino a raggiungere il volume iniziale $V = V_0 + 3\text{cm}^3$ ($3 \rightarrow 4$); infine il gas è posto nuovamente a contatto con la sorgente T_1 fino ad ottenere la chiusura del ciclo ($4 \rightarrow 1$).

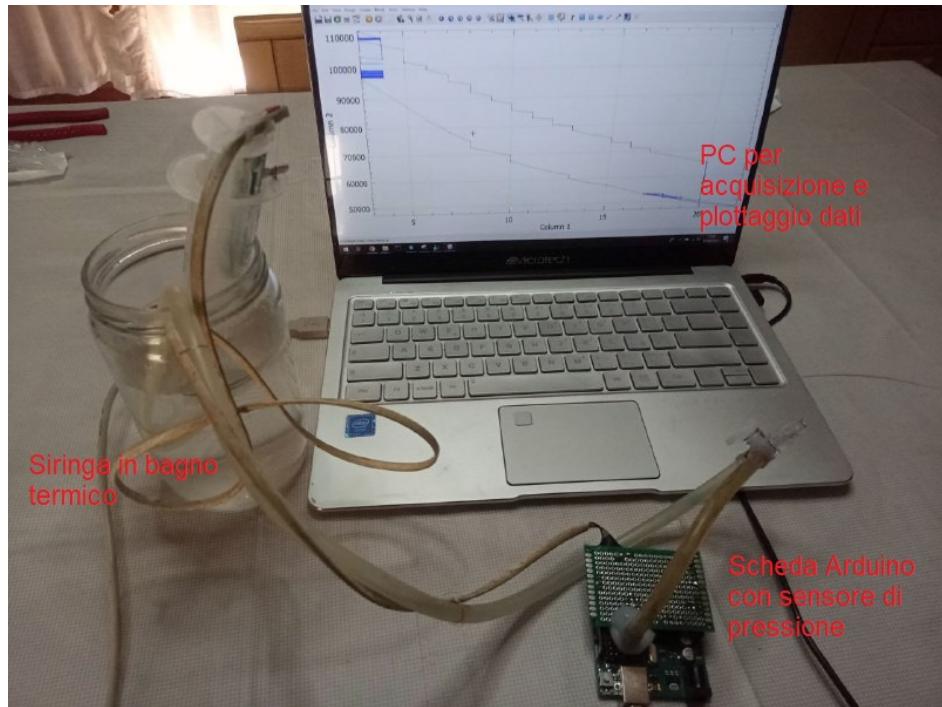


Figura 3.29: *Setup per la realizzazione del ciclo termodinamico*

Un aspetto interessante delle trasformazioni cicliche è il fatto che lo stato finale e lo stato iniziale coincidano, dunque dal primo principio della termodinamica si ha:

$$\Delta U = 0 = Q - L \rightarrow L = Q$$

l'energia interna U è una funzione di stato, cioè dipende solo dallo stato iniziale A e dallo stato finale B :

$$\Delta U = U(B) - U(A) = 0 \quad \text{con} \quad A = B.$$

Il lavoro infinitesimo è dato dall'equazione

$$\delta L = pdV,$$

dove la δ indica che il lavoro rappresenta un differenziale non esatto.

Nel piano di Clapeyron, per trasformazioni reversibili, il lavoro è rappresentato dal-

l'aria sotto la curva. Riasulta allora immediato che in una trasformazione isocora il lavoro è nullo, in una trasformazione isobara il lavoro è l'area del rettangolo sotto il segmento parallelo all'asse V, mentre in una isotermica è l'area sotto la curva rappresentata dal ramo di iperbole equilatera (fig.3.30)

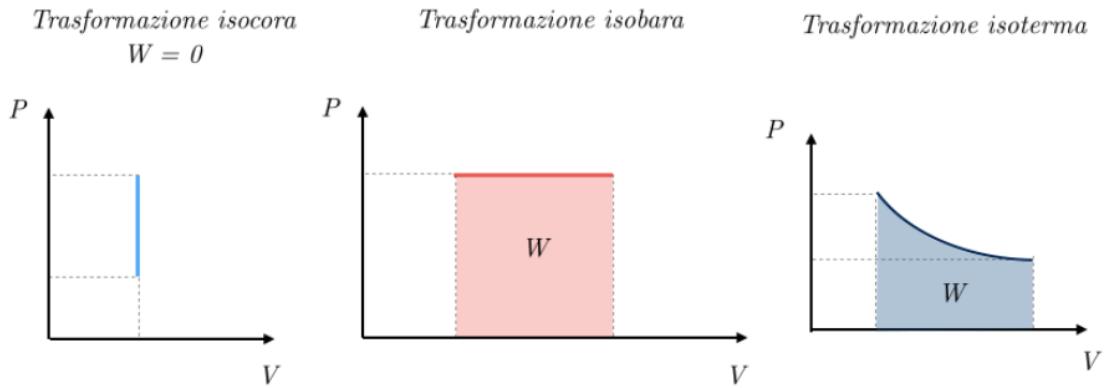


Figura 3.30: *Lavoro nel piano P-V per trasformazioni isocore, isobare e isotermiche*

Nel caso di una trasformazione ciclica abbiamo quindi che il lavoro è dato dall'aria interna alla curva chiusa rappresentante il ciclo: quest'area si può calcolare come la differenza tra l'area sotto la curva di andate e l'area sotto la curva di ritorno:

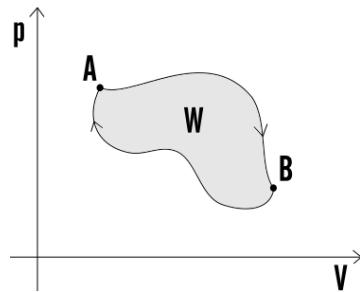


Figura 3.31: *Lavoro in una trasformazione ciclica*

Con riferimento al ciclo realizzato e mostrato in figura 3.28 è possibile valutare numericamente l'area intrna alla curva, quindi il lavoro svolto durante il ciclo. Il valore numerico ottenuto è di 278 mJ: questo valore è il lavoro svolto sul gas, quindi, convenzionalmente, lavoro negativo. In generale ad una trasformazione nel piano p-V

che si svolge in senso antiorario è associato un lavoro negativo.

È interessante far notare agli studenti quanto sia delicato “guidare” un ciclo e in generale le trasformazioni termodinamiche. Grazie alla possibilità di *guardare* le variabili p e V in tempo reale ci si accorge che chiudere un ciclo non è affatto banale. Un esempio è mostrato nella figura 3.32

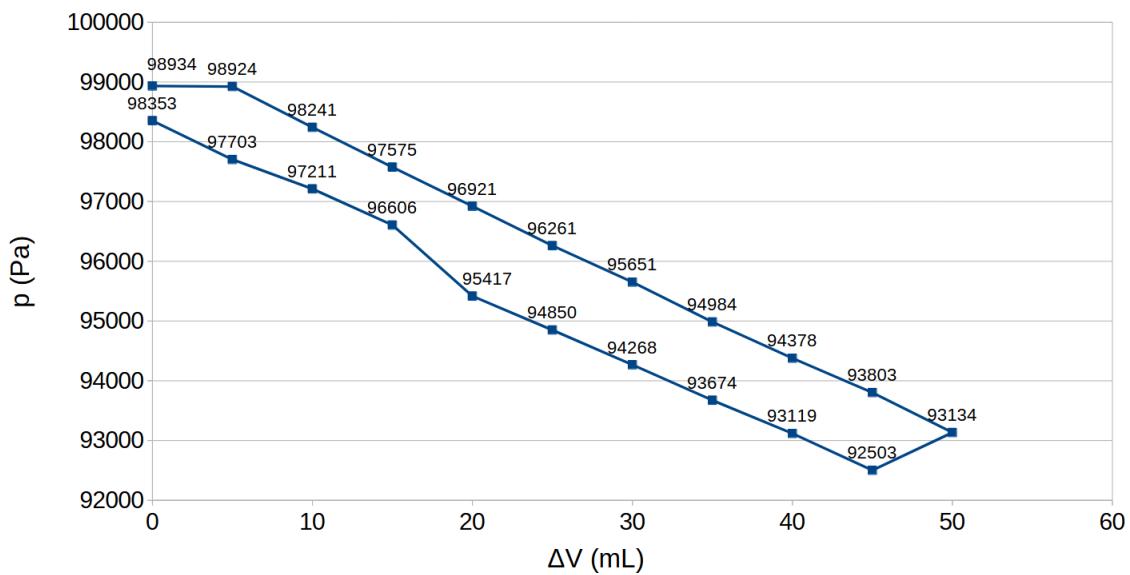


Figura 3.32: Diagramma P-V trasformazione quasi ciclica

Utilizzando l'apparato descritto nell'esperienza 3.5, dove alla capsula del contenitore è stata collegata una siringa da 50 cm³ (fig.3.33), inizialmente, è stata effettuata un'espansione passando da V_0 a $V_0 + 50$ cm³, successivamente una compressione ha riportato il sistema al volume V_0 .

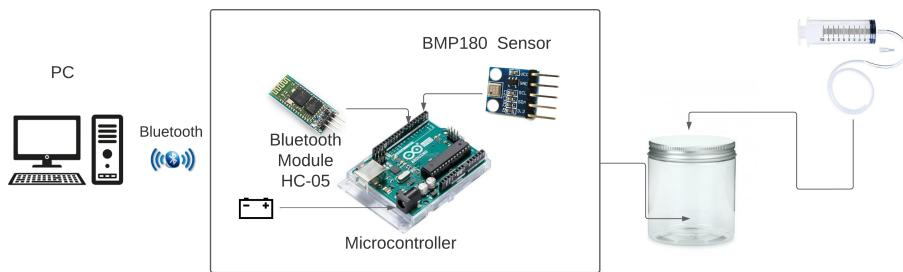


Figura 3.33: Setup utilizzato nella trasformazione quasi ciclica.

Come si può notare, il ciclo non si chiude perfettamente a causa di un aumento della pressione (a parità di volume): una discussione con gli studenti sulle ragioni fisiche di tale *fenomeno* e su dove si debba agire, sperimentalmente, per riportare lo stato finale vicino a quello iniziale risulta essere un’importante opportunità formativa.

3.7 Considerazioni didattiche

Nell’articolo *Syringe thermodynamics: The many uses of a glass syringe* [16] gli autori, ponendo l’accento sui vantaggi che hanno portato alla didattica della fisica i dispositivi tecnologici, presentano delle proposte didattiche per lo studio della termodinamica. Servendosi di siringhe in vetro²³, sensori di pressione, temperatura e posizione illustrano come lo studente debba familiarizzare dapprima qualitativamente e poi quantitativamente con questa branca della fisica molto più insidiosa della meccanica. Gli autori propongono la verifica delle leggi sui gas ideali e a conclusione del lavoro realizzano un ciclo termodinamico mediante l’utilizzo di una macchina termica schematizzata in fig.3.34.

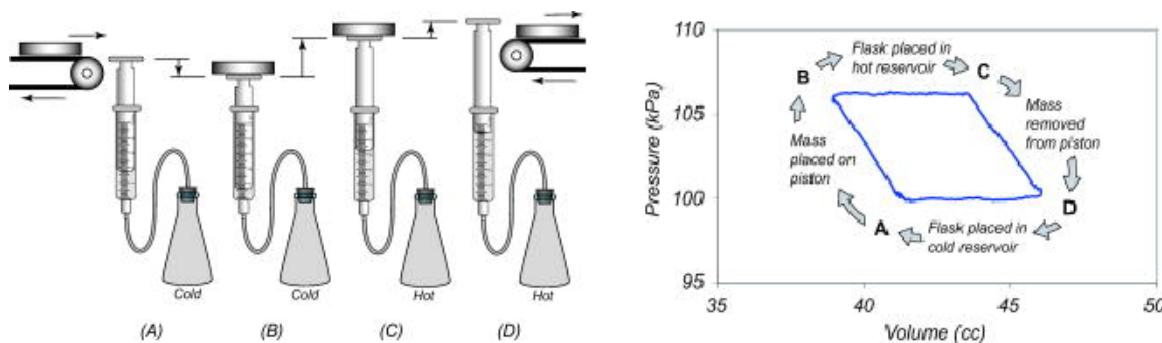


Figura 3.34: *American Journal of Physics.* 2006;74(2):94-101. doi:10.1119/1.2162547

Sfruttando un sensore di pressione e uno di movimento²⁴ stimano il lavoro del ciclo termodinamico, realizzato con la macchina termica, in 26 mJ a fronte di un lavoro

²³Le siringhe di vetro godono di attriti molto piccoli, per contro sopportano pressioni relativamente basse rispetto alle siringhe in plastica.

²⁴Questo sviluppato in collaborazione con la PASCO Scientific per avere una misura automatizzata del volume.

teorico previsto di 29 mJ.

Nel lavoro è posto l'accento sull'importanza dell'esperienza laboratoriale in didattica, questo in particolar modo nella termodinamica, dove alcuni concetti sono particolarmente astratti (stato, energia interna, lavoro, trasformazioni). Lo stesso concetto di pressione può essere introdotto a poseriori di alcune esperienze svolte con l'ausilio di siringhe in vetro. Uno degli aspetti più importanti del ciclo termodinamico che propongono è che offre agli studenti l'opportunità di sperimentare una macchina termica funzionante. Questo coinvolgimento rende più concreto il concetto astratto di motore termico perché gli studenti portano fisicamente il motore attraverso il suo ciclo senza rinunciare agli aspetti quantitativi. In letteratura molti autori hanno presentato diverse proposte sulla termodinamica, nell'ambito della verifica delle leggi dei gas, ad esempio è stato proposto l'utilizzo di sensori di forza in sostituzione dei tradizionali sensori di pressione. Questo approccio è stato adottato nel caso del lavoro *Mechanical sensors and plastic syringes to verify the gas laws without neglecting friction* [5], al fine di considerare gli attriti che si sviluppano tra il pistone e il corpo delle siringhe durante le misurazioni.

Il ciclo termodinamico presentato nella sezione 3.6, e comunque tutte le esperienze didattiche del terzo capitolo, si inquadra in quest'ottica: l'esperienza laboratoriale apporta un tangibile valore all'assimilazione dei concetti fondamentali della fisica. Inoltre, se si fa ricorso a moderni dispositivi tecnologici per arricchire tale esperienza, ciò rappresenta un ulteriore elemento positivo che favorisce l'apprendimento.

In armonia con l'approccio pedagogico esposto nel primo capitolo, si è voluto realizzare un apparato sperimentale che non avesse come unico scopo la verifica delle leggi dei gas ideali, ma piuttosto si propone di essere un sistema aperto e personalizzabile, progettato per essere adattabile e modificabile in base alle specifiche esigenze dell'utente. In questo modo, il dispositivo è in grado di fornire un'esperienza personalizzata e mirata all'apprendimento, consentendo di esplorare e approfondire i concetti sperimentali in modo più efficace. L'azione di personalizzare l'apparato sperimentale stessa diventa un'attività didattica utile per gli studenti, poiché li coinvolge attivamente nella

progettazione e nella comprensione dei principi scientifici alla base della loro ricerca²⁵. Tuttavia siamo stati in grado di validare i modelli teorici sui gas ideali con buona precisione utilizzando strumenti non proprietari²⁶; inoltre nella sezione 3.6, è stata effettuata una trasformazione ciclica e siamo stati in grado di stimare il lavoro del ciclo alla stregua di quanto fatto da altri autori. Questi risultati confermano l'efficacia dell'apparato sperimentale anche per la validazione di modelli teorici.

²⁵Nella *Storia chimica di una candela*[18], Faraday pone al centro, del suo ciclo di lezioni, la candela. Questa è considerata uno scrigno di preziosi stratagemmi dimostrativi e idee utili a comprendere i vari fatti della natura. Egli propone agli ascoltatori delle sue lezioni di ripetere a casa gli esperimenti che mostra loro, è convinto che chiunque sia in grado di apprendere se osserva i fenomeni della natura e li riproduce.

²⁶Infatti nei lavori [5][16] gli autori utilizzano hardware e software proprietario: Vernier, PASCO.

Conclusioni

Questo lavoro di tesi, inquadrato nell'ambito della ricerca in didattica della fisica, ha riguardato la progettazione e lo sviluppo di un apparato sperimentale realizzato dall'assemblaggio di singole parti elettroniche, fatto in casa, per l'analisi e lo studio delle trasformazioni dei gas perfetti. Le esperienze didattiche più significative (verifica delle leggi di Gay-Lussac, Boyle-Mariotte, ecc.) sono state riprodotte con il setup sperimentale, realizzato nei laboratori didattici del gruppo di ricerca in Didattica della Fisica del Dipartimento di Fisica E. Pancini dell'Università Federico II di Napoli. Tale progetto, per il suo carattere multidisciplinare, ben si inserisce nella programmazione didattica rivolta alle classi quinte dei licei e degli istituti tecnici a indirizzo scientifico, ai corsi di laboratorio delle lauree triennali delle discipline scientifiche (ingegneria, matematica, fisica) e ai corsi di formazione dei docenti per la scuola secondaria di secondo grado. La connotazione artigianale, il basso costo dei componenti utilizzati e la trasversalità didattica della proposta, rappresentano i punti di forza del lavoro, nonché fattori di innovazione nel panorama d'insegnamento e apprendimento della fisica, della matematica e dell'informatica. Le argomentazioni sono frutto del lavoro svolto in laboratorio, per lo sviluppo e la progettazione, e di quello sul campo, con interventi nei corsi di didattica della fisica e di formazione per i docenti. Più precisamente, gli aspetti originali di questo lavoro riguardano:

- a. Le attività proposte hanno una forte impostazione laboratoriale. Le esperienze coinvolgono lo studente fin dall'inizio nella scelta dell'elettronica, nella progettazione dell'apparato sperimentale, nell'assemblaggio dei componenti elettronici e dello sviluppo del software finalizzato all'acquisizione e all'analisi di grandezze

fisiche. Si punta quindi alla realizzazione di “white box” di cui lo studente comprende il funzionamento delle singole parti e del loro insieme, ha manualità nel montaggio dell’elettronica (ad esempio la saldatura dei componenti elettronici), e si impadronisce delle nozioni di base di informatica per la realizzazione della misura.

- b. L’impostazione laboratoriale non deve far pensare che gli aspetti formali della teoria passino in secondo piano. Teoria ed esperimento sono consustanziali. L’azione dello studente è orientata dalla scelta delle variabili da osservare. La possibilità di programmare dei dispositivi capaci di misurare, in tempo reale, variabili come pressione, temperatura e volume, permette la facilitazione del processo di modellizzazione, esercitando nel medesimo tempo il pensiero formale e il pensiero pratico.
- c. La dipendenza dal tempo delle variabili di stato, il controllo dei tempi di acquisizione di pressione, volume e temperatura mette lo studente di fronte allo studio di una trasformazione reale del processo termodinamico. Tale esperienza permette di cogliere meglio il senso di trasformazione quasi-statica (fondamentale per la reversibilità), definendo meglio i limiti del modello ed evidenziando gli aspetti di realtà dell’esperienza come gli attriti in gioco e i limiti degli strumenti di misura adoperati.
- d. Il costo contenuto dell’apparato proposto, rispetto a quelli distribuiti dalle aziende nel settore della didattica delle scienze, rappresenta un’opportunità sia per le scuole che non dispongono di budget elevati, ma anche per gli studenti e i docenti che vogliono approfondire in maniera indipendente la sperimentazione didattica, rendendo l’apprendimento della fisica più inclusivo ed equo. In questo contesto il docente svolge una funzione molto delicata, infatti il processo di formazione deve prevedere diverse strategie didattiche, flessibili e mirate in base alle esigenze. Senza rinunciare agli aspetti formali occorre entrare in risonanza con chi deve apprendere, valorizzando ciò che ha già imparato anche in altri contesti.

In conclusione, questa proposta didattica rappresenta un esempio di come la tecnologia possa essere utilizzata in modo efficace per migliorare l'apprendimento della fisica e favorire anche lo sviluppo di abilità e competenze trasversali nelle altre discipline scientifiche. Gli studenti, attraverso l'esperienza sperimentale, "mettendo mano" nelle cose, comprendono la differenza tra l'aspetto formale teorico e quello reale pratico. Ad esempio, scoprono quanto sia difficile controllare un processo in temperatura, si confrontano con le non idealità dei processi, arricchendo così la loro formazione e comprensione dei fatti. Tuttavia, è fondamentale che l'insegnante agisca come guida, stimolando la riflessione critica e favorendo l'integrazione della tecnologia nel contesto educativo, al fine di massimizzare i vantaggi pedagogici.

Appendice A

Codici

Al seguente link https://github.com/Arturo8978/Tesi_Magistrale/blob/main/README.md è possibile trovare una repository con tutti i codici utilizzati per la gestione dei trasduttori e del microcontrollore. Inoltre sono riportati alcuni script Python per il plottaggio dai dati in tempo reale e la stima dei parametri di regressione.

Bibliografia

- [1] Pinouts arduino uno r3, 2022. URL: <https://content.arduino.cc/assets/A000066-full-pinout.pdf>.
- [2] Arduino uno r3, 2023. Datasheet. URL: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>.
- [3] Priscilla W. Laws . *Workshop Physics Activity Guide*. Wiley, 2004.
- [4] G. Artiano, A. Amabile. Documenti redatti nell'ambito del progetto didattica laboratoriale multidisciplinare.
- [5] P. Onorato, P. Mascheretti, A. De Ambrosis. Mechanical sensors and plastic syringes to verify the gas laws without neglecting friction. *Physics Education*, 2010.
- [6] Arduino, 2023. URL: <https://www.arduino.cc/en/software>.
- [7] Giancarlo Artiano. Progettazione di un percorso didattico sulla dinamica del corpo rigido. utilizzo di schede a microcontrollori e sensori mems. *Università degli Studi di Napoli Federico II*, 2018.
- [8] Massimo Banzi. *Arduino la guida ufficiale*. Hops Tecniche Nuove, 2009.
- [9] George Boole. *L'analisi matematica della logica*. Bollati Boringhieri, 1993.
- [10] Giuliano Toraldo di Francia. *L'idagine del mondo fisico*. Einaudi, 1976.
- [11] G.Avitabile, E.Balzano, G.Buono, U.Lepore, E.Sassi. *Termogas*. Olivetti Education, 1987.

- [12] K.Marx, F.Engels. *L'ideologia tedesca*. Editori Riuniti, 1972.
- [13] Ronalf H. Warring, Stan Gibilisco. *I Trasduttori*. Jackson, 1987.
- [14] Dalba Giuseppe. Appunti di meccanica e termodinamica, 2005. URL: <https://www.science.unitn.it/~fisical/fisical/>.
- [15] Maria Arcà, Paolo Guidaoni. *Guardare per sistemi, guardare per variabili: un approccio alla fisica e alla biologia per la scuola dell'obbligo*. Emme, 1989.
- [16] David P. Jackson, Priscilla W. Laws. Syringe thermodynamics: The many uses of a glass syringe. *American Journal of Physics*, 2006.
- [17] Piero Malcovati. Microsensors, microsystems and mems, 2020. Department of Electrical, Computer, and Biomedical Engineering University of Padua. URL: https://indico.cern.ch/event/871930/attachments/1963320/3287033/CERN_MEMS_2020_slides_full.pdf.
- [18] Faraday Michael. *La storia chimica di una candela*. TREVES EDITORE, 2009.
- [19] Fancello Salvatore. Progetti arduino, 2019. URL: <https://www.progettiarduino.com/guida-al-software-di-arduino-ide-sketch.html>.
- [20] Bosch Sensortec. Bmp180, 2013. Datasheet. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>.
- [21] Mencuccini, Silvestrini. *Fisica 1 Meccanica e termodinamica*. Liguori Editore, 1996.
- [22] Andreas Dietzel, Monika Lester-Schädel. Stephanus Büttgenbach, Iordania Constantinou. *Piezoresistive Pressure Sensors*. Springer Nature, 2020.
- [23] Itead Studio. Hc-05-bluetooth to serial port module. URL: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/HC-05%20Datasheet.pdf.

- [24] M. Schmidtb, G. Feiertaga, S. Stuflerb, R. Dudekc, A. Leidlb, T. Waber, W. Pahlb. Flip-chip packaging of piezoresistive barometric pressure sensors. *Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme ENAS*, 2013.
- [25] Castellani Tommaso. Scienza, tecnica, tecnologia: un intreccio indissolubile, insegnare 1/2-2011. 2011.
- [26] Mykola Vasylenko. Testing system for unmanned aerial vehicles microelectromechanical sensors. *National Aviation University*, 2017.
- [27] Mazzoldi, Nigro, Voci. *Elementi di fisica*. EdiSES, 2008.
- [28] RAMON PALLAÁ S-ARENÝ, JOHN G. WEBSTER. *Sensors and Signal Conditioning*. Wiley-Interscience, 2000.