

Capitolo 6

Primo contatto con il laboratorio

6.1 Nota introduttiva

Siamo giunti al punto di cominciare a provare sul campo quanto imparato finora sui circuiti. Ovviamente, non c'è nessuna necessità di attendere così tanto prima di andare in laboratorio. Al contrario, può essere estremamente istruttivo andare in laboratorio con un bagaglio minimo di nozioni, provare a sperimentare con una certa libertà, discutere i risultati a lezione e reiterare le esercitazioni. Purtroppo non sempre ciò è possibile, soprattutto nelle grandi università, per questioni organizzative. Ma sarebbe molto bello se lo studente potesse 'fare un salto in laboratorio', anche per una mezz'oretta a fare qualche misura, tanto per mettere in pratica quanto ha appreso a lezione, controllare quanto non ha ben capito o provare a sperimentare in base a sue intuizioni.

Essendo – purtroppo, ripetiamo – le esercitazioni a blocchi di interi pomeriggi, diciamo che questo è il momento opportuno per 'andare in laboratorio', in quanto possiamo fare semplici esperienze in corrente continua, incluso lo studio di carica e scarica del condensatore *senza* l'oscilloscopio. Prima di entrare nei dettagli delle esperienze specifiche del laboratorio di circuiti, riportiamo delle *note sulla didattica* che concludevano una nota interna su *Errori e incertezze di misura*¹ al fine di capire l'approccio verso i laboratori di chi scrive.

6.1.1 Note sulla didattica [Estratto dalla Nota Interna N. 1094, pp. 76-77]

(Questo paragrafo, essendo un estratto della nota citata, fa riferimento ai contenuti di tale nota, che chi è interessato ad approfondire è invitato a leggere. Le conclusioni di interesse per questo corso sono riportate in grassetto.) Probabilmente, chi ha letto attentamente gli ultimi paragrafi sulle applicazioni rimarrà stupito venendo a sapere che, nella maggior parte delle esercitazioni, gli

¹G. D'Agostini, *Errori e incertezze di misura – Rassegna critica e proposte per l'insegnamento*, Nota Interna N. 1094, Maggio 1998 (versione aggiornata a Gennaio 1999). <http://www.roma1.infn.it/~dagos/perfezionamento.pdf>, 1.2MB.

studenti del mio corso non fanno calcoli di incertezze di misura. Questa scelta didattica è basata sugli stessi presupposti a base della teoria di incertezza di misura qui illustrata, riassunta dallo slogan “*imparare dall’esperienza*”, e su alcune considerazioni sulla finalità del corso di esercitazioni di laboratorio.

Ricordiamo che le finalità del laboratorio di Fisica sono molteplici:

1. Prima fra tutte c’è - a mio avviso - l’importanza di verificare di persona delle leggi fisiche, anche se in modo approssimativo e semiquantitativo. Questo avviene, in genere, dopo che tali leggi sono state studiate dal punto di vista teorico, ma è anche proficuo far precedere l’esperienza alla teoria, con grandi vantaggi per l’apprendimento.²
2. C’è poi l’aspetto legato allo sviluppo di una certa confidenza e manualità nell’uso degli strumenti di misura e all’apprendimento di tecniche di misura.
3. C’è quindi la parte di interpretazione quantitativa dei risultati e di valutazione delle incertezze, sulla quale abbiamo lungamente parlato.
4. Infine, come sintesi dei punti precedenti, si può arrivare ad una pianificazione qualitativa e quantitativa degli esperimenti.

Alla luce di questi obiettivi e della metodologia di analisi dei dati illustrata, seguono un certo numero di proposte, tutte sperimentate con successo nel mio corso.³

- Gli studenti dovrebbero cominciare a frequentare il laboratorio e a eseguire misure il più presto possibile, affrontando inizialmente semplici esperienze, per acquisire le basi della metodologia scientifica (metodo e ordine nell’acquisizione dei dati, tabelle, grafici, prime elaborazioni quantitative, etc.).⁴
- Finché gli studenti non abbiano sperimentato di prima persona, ripetendo gli esperimenti e/o confrontando fra di loro i risultati, quale sia il significato di errore ed incertezza di misura e non abbiano imparato, in parallelo, il linguaggio per trattare le incertezze (quello della probabilità) non dovrebbero subire una teoria astratta su errori e incertezze. Frasi del tipo “dicesi errore...” dovrebbero seguire e non precedere la loro diretta esperienza.
- Ne segue che, nelle esperienze iniziali, è da evitare qualsiasi valutazione di incertezze, al di là di quelle che vengono spontanee agli studenti

²A mio giudizio, sapere “tutto” prima di andare in laboratorio può essere poco stimolante in quanto elimina l’“effetto sorpresa”. Trovo spesso utile informare gli studenti soltanto su come fare la misura ma non su quello che verrà fuori, specialmente se il risultato può essere a prima vista controintuitivo.

³Si riferiva al corso di Laboratorio di Fisica per studenti di Chimica, tenuto negli anni novanta.

⁴Nota aggiunta: A chi dubita che questo sia sensato è opportuno ricordare che Galileo e Newton hanno fatto esperimenti senza conoscere né a Fisica, né la Matematica, né tantomeno la teoria delle incertezze di misura.

alla luce delle cifre da loro apprezzabili sugli strumenti, della semplice propagazione del numero di cifre significative e della constatazione che, ripetendo le misure, essi ottengono generalmente risultati diversi. Trovo che sia particolarmente stimolante provocare gli studenti con domande del tipo “quanto ci credi?”, magari rafforzate dalla proposta di scommesse coerenti con poste uguali.⁵

- Siccome procedendo in questo modo gli studenti devono fare pochissimi conti, essi hanno più tempo per ripetere le misure, sviluppando l'intuito per le “verosimiglianze”, o per fare altre esperienze, arricchendo il campo della fenomenologia sperimentabile durante il corso.
- In parallelo gli studenti dovrebbero apprendere le basi del calcolo delle probabilità (e non solo una collezione di formulette) e dell'inferenza statistica. A tale scopo sono molto utili semplici esperienze di statistica o analisi di dati simulati, affinché anche l'apprendimento della teoria della probabilità sia visto come risposta a problemi concreti e non un semplice sviluppo matematico.
- Soltanto essi quando hanno acquisito una certa esperienza di laboratorio e il linguaggio della statistica inferenziale (anche nella forma semplificata secondo la traccia che abbiamo qui illustrato) possono apprezzare appieno una sistemazione più formale dei termini di metrologia, delle cause di errori e della valutazione delle incertezze. Sarà allora molto interessante rianalizzare vecchie esperienze alla luce delle nuove conoscenze, come, ad esempio, confrontare le rette calcolate con i minimi quadrati con quelle tracciate a occhio (è anche istruttivo rileggere il quaderno di laboratorio a distanza di mesi!).
- Non è detto che una volta appreso come valutare le incertezze di misura essi debbano farlo sempre, o farlo sempre nella maniera più rigorosa: alcune esperienze sono complicate e richiederebbero un tempo enorme; in altre sono più importanti gli aspetti fenomenologici e/o strumentali che l'analisi quantitativa rigorosa dei risultati.

Ad esempio, **nelle esperienze sui circuiti elettrici l'interesse primario è quello di familiarizzarsi con la strumentazione e con il comportamento degli elementi circuitali, piuttosto che misurare al percento un'amplificazione o uno sfasamento. Per queste esercitazioni, ogni analisi dell'incertezza che vada oltre un controllo della ragionevolezza delle cifre significative può essere addirittura controproducente.**⁶

⁵Ad esempio, dovendo stimare una temperatura ambiente, se dicono 23 ± 10 °C si scommette pro, se dicono 23.0 ± 0.1 °C si scommette contro, e così via finché non si converge ad risultato di indifferenza che definisce un intervallo di credibilità al 50 %.

⁶Note aggiunte:

1. ‘*Controproducente*’ in quanto si perde troppo tempo a fare analisi pedanti, molto spesso ‘propagando errori inventati’, imposti in modo dogmatico dal docente e facendo uso di metodi obsoleti, come gli ‘errori massimi’ e le ‘rette di massima e minima pendenza’ (vedi pp. 13-26 della nota a cui si sta facendo riferimento).
2. La maggior parte degli errori in gioco sono di natura sistematica e dalla mia esperienza

Quello che è importante è che lo studente si senta sicuro che all'occorrenza, magari con giorni di lavoro, consultando documentazione, informandosi in giro ed eventualmente sviluppando appositi programmi al computer, possa affrontare un'analisi delle incertezze condotta in modo professionale.

6.1.2 Elaborazione 'statistica dei dati'? No, grazie

Per i motivi esposti nelle 'note sulla didattica' appena riportate, si scoraggia in questo corso la cosiddetta 'trattazione statistica dei dati'. Diamo invece delle raccomandazioni pratiche (e di buon senso):

- Leggere al meglio gli strumenti, a partire da quelli analogici, le cui scale sono fatte per essere lette con continuità (nei limiti delle capacità umane) e non arrotondate alla mezza divisione o addirittura alla divisione intera.⁷
- In particolare, si ricorda che dal punto di vista sperimentale, riportare sul quaderno di laboratorio (o sul testo di una prova d'esame) 2 V è diverso da 2.0 V o da 2.00 V, come lo studente dovrebbe già sapere dai laboratori precedente.
- Cercare di compilare il quaderno di laboratorio⁸ ('logbook') per trarre il massimo vantaggio dalle informazioni in esso riportate, pur senza perdere tempo dilungandosi in dettagli inutili (ovviamente è una questione di esperienza: un'utile raccomandazione è quella di provare a rileggere il quaderno dopo un paio di settimane per trarne insegnamenti per il futuro; oppure ci si può scambiare il quaderno con altri gruppi per fare dei controlli incrociati, un'iniziativa questa da incoraggiare anche se è praticamente impossibile istituzionalizzarla nei corsi).
- Non perdere tempo con le cosiddette formule di 'propagazione degli errori', ma 'propagare le cifre significative' usando delle regolette di buon senso⁹ tenendo conto che, in caso di dubbio, è meglio una cifra in più che una in meno.¹⁰

decennali acquisita insegnando *Probabilità e incertezze di misura* al Dottorato in Fisica (<http://www.roma1.infn.it/~dagos/dott-prob/>) gli studenti non sono in grado di trattare in modo adeguato le incertezze dovute agli errori sistematici, la cui analisi richiederebbe comunque un tempo non trascurabile che non mi sentirei comunque di sottrarre alla sperimentazione della fenomenologia dei circuiti. (Su questo vedi anche ultimo capoverso del paragrafo.)

⁷Vedi pp. 12-19 e appendice A della citata nota 1094.

⁸A tale proposito si raccomanda il capitolo 3 di *Le Basi del Metodo Sperimentali*, <http://www.roma1.infn.it/~dagos/teaching.html>.

⁹Vedi anche a tale proposito il terzo capitolo delle dispense appena citate.

¹⁰Invece di seguire astratti argomenti matematici, su cerchi di ragionare sul significato dei numeri. Ad esempio, se si ha la tentazione di scrivere, come risultato di una *misura indiretta*, 2.3456 V, ci si chieda se veramente hanno senso tutte queste cifre *in base alle informazioni dalle quali sono state dedotte*. Così pure, se si scrive 0.2 V, ci si chieda "ma è possibile che non riesca a dire niente di meglio, o veramente questo 0.2 poteva essere quasi altrettanto bene 0.1 o 0.3?"

- Si usino scale tali da poter effettuare le letture al meglio (ad esempio nella lettura dei parametri dei segnali mediante oscilloscopio, si cerchi di ‘riempire’ lo schermo e, comunque di effettuare letture su ampi intervalli).
- I grafici al computer sono, almeno per queste esperienze, più una perdita di tempo che un aiuto, soprattutto se si usano fogli di calcolo, nati per fare tutt’altro. Si raccomanda invece caldamente l’uso del computer per fare – soprattutto a casa perché in laboratorio c’è poco tempo – previsioni teoriche su quanto ci si attende, usando il programma di grafici preferito.¹¹

6.2 Semplici esperienze in corrente continua

Le prime misure servono a familiarizzarsi con gli strumenti, che nel caso di circuiti in corrente continua, vogliono dire essenzialmente voltmetri, amperometri e ohmetri, generalmente presenti all’interno di uno stesso strumento ‘universale’, il multimetro dai quali abbiamo esordito nei primi capitoli. Chiaramente le esperienze proposte dai vari docenti riflettono particolari interessi e, molto spesso, la strumentazione a disposizione nelle varie università.

6.2.1 Multimetri digitali e multimetri analogici

Nonostante i multimetri presenti oggi nei laboratori di fisica siano digitali, quelli analogici hanno ancora una valenza didattica, in quanto permettono di capire il loro funzionamento con conoscenze elementari di circuiti (vedi paragrafo 2.10). In particolare, se ne raccomanda il suo uso per prender confidenza con le perturbazioni da essi prodotte sulle misure.

6.2.2 Semplici misure di resistenza, tensione e di corrente

Ovviamente si può cominciare con semplici misure per provare le varie opzioni del tester, per capire che per misurare intensità di corrente, la corrente da misurare deve attraversare lo strumento, o per fare ‘verifiche della legge di Ohm’. Il mio suggerimento è di cominciare subito con esperienze ‘mirate’, come quelle descritte nel seguito.

6.2.3 Resistenza di una ‘collanina’ di resistori

La cosiddetta ‘collanina’ è un classico dei laboratori di fisica della Sapienza. L’originale è costituita da una struttura di plexiglass che fa da supporto a 10 resistori da 100 k Ω nominali posti in serie. Opportune boccoline permettono di accedere con i puntali del tester ai punti di contatto fra resistori continui. Ovviamente può essere fatta in modo economico saldando 10 resistori.

¹¹Si raccomanda l’uso di R (<http://www.r-project.org/>), del quale nel seguito saranno dati alcuni ‘script’ (per una introduzione ed esempi orientati ad applicazioni di fisica vedi questo sito: <http://www.roma1.infn.it/~dagos/R/>).