

*Il riscatto del galvanometro: storia di uno strumento antico utilizzato per una didattica innovativa**

SIMON PETER LEBAN

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università degli Studi di Bologna
simonpeter.leban@studio.unibo.it

VALENTINA BOLOGNA

Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Trieste
valentina.bologna@phd.units.it

FRANCESCO LONGO

Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Trieste e INFN, sezione di Trieste
francesco.longo@ts.infn.it

ALBERTO CHERTI

Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Trieste
alberto.cherti@ts.infn.it

ABSTRACT

Analogic devices were, in the past, the best (and mostly unique) way to measure physical quantities of interest. With the great improvements in measuring technologies nowadays, it might happen that, students use in their experimental activities digital instruments without knowing how they work in terms of physical mechanisms, nor how they were developed, with the risk of losing the information about device-environment interactions. In our experience, starting from the functioning mechanism of an ancient galvanometer, we prepared a teaching course in a laboratory context, to improve learning on stationary currents in a secondary school. The good results obtained and discussed in a Bachelor thesis at the University of Trieste, suggests that this kind of approach could be extended to other ancient measuring instruments to teach students how physics has developed, thanks to the design and the use of smart instruments.

* Title: *The ransom of the galvanometer: history of an ancient instrument used for innovative teaching.*

PAROLE CHIAVE

FENOMENI ELETTRICI / ELECTRICAL PHENOMENA; DIDATTICA DELLA FISICA / PHYSICS EDUCATION; DIDATTICA LABORATORIALE / LABORATORY EDUCATION; STORIA DELLA FISICA / HISTORY OF PHYSICS; STRUMENTI DI MISURA / MEASURING INSTRUMENTS; SCUOLA SECONDARIA DI SECONDO GRADO / SECONDARY SCHOOL; ESEMPI DI APPRENDIMENTO SITUATO / EXAMPLES OF SITUATED LEARNING.

1. INTRODUZIONE

Da Galileo in poi il metodo scientifico prevede l'osservazione del fenomeno studiato mediante la realizzazione di esperimenti. La *misura* diventa dunque centrale nello studio della fisica e con essa la strumentazione e gli apparati con i quali essa viene eseguita.

Con l'evoluzione tecnologica si sono sviluppati strumenti per misure fisiche via via più elaborati e complessi, perfezionando la tecnica e minimizzando, per quanto possibile, il disturbo arrecato al sistema in esame.

Lo strumento di misura fornisce delle informazioni sul livello tecnologico raggiunto e sulle conoscenze note nell'epoca della sua costruzione. Con lo sviluppo dell'elettronica sono stati inventati vari nuovi strumenti digitali che, se non hanno del tutto rimpiazzato i vecchi strumenti analogici, hanno fortemente limitato il loro utilizzo. Certamente la rapidità con la quale si possono eseguire le misure e lo sviluppo di calcolatori capaci di analizzare i molteplici dati raccolti hanno favorito la proliferazione degli strumenti digitali che, oggi, sono largamente usati durante le attività di laboratorio.

I vecchi strumenti possono dunque assumere un valore storico, molte scuole e istituti¹ li espongono infatti nelle loro collezioni museali². Se sono ancora funzionanti, riteniamo tuttavia che essi si prestino bene anche per una *didattica laboratoriale*³. Il vantaggio dei vecchi strumenti analogici rispetto agli strumenti digitali è che gli studenti possono comprendere meglio il loro funzionamento. Mentre i circuiti elettronici non sono visibili e quindi è molto più difficile osservare l'operazione di misura della quantità fisica studiata, gli strumenti analogici almeno

¹ RINAUDO, LEONE 2017.

² ORGANTINI, MEDICI (a cura di) 2017.

³ BOLOGNA, MINUSSI 2018.

in parte funzionano con meccanismi macroscopici, dove è più evidente lo studio dell'interazione fra lo strumento e la grandezza misurata.

Se con gli strumenti digitali si potrà leggere quasi istantaneamente il risultato della misura sullo schermo, con gli strumenti analogici lo studente dovrà faticare di più per ottenere la misura voluta, ma il processo dispendioso in termini di tempo ed energie può essere significativo dal punto di vista del processo didattico, infatti il docente potrà motivare gli studenti a ragionare di più sul fenomeno studiato.

2. LO STRUMENTO: IL GALVANOMETRO

Tra i tanti strumenti di misura che si sono evoluti a causa della trasformazione tecnologica vi è sicuramente il *galvanometro*: è un misuratore indiretto della corrente elettrica, uno strumento vecchio più di duecento anni, nel tempo rimpiazzato prima da strumenti analogici (amperometri e voltmetri) e poi dalle apparecchiature digitali multifunzione (a partire dagli anni '80).

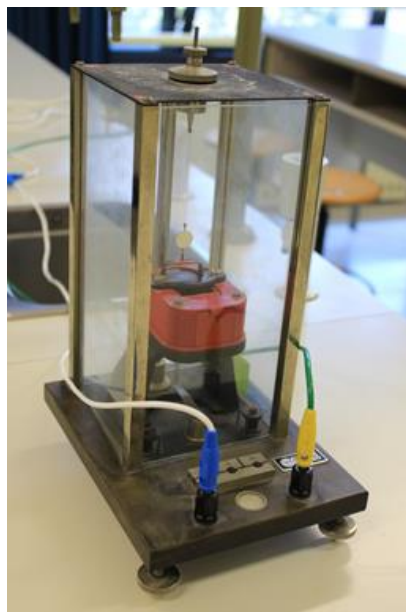


Figura 1. Un esempio di galvanometro di Deprez-D'Arsonval (Foto: S. P. Leban).

Il galvanometro converte una corrente elettrica, anche molto piccola, attraverso un momento magnetico in uno spostamento di un ago o un filo in torsione. I primi prototipi di galvanometri come il moltiplicatore di Schweigger o il galvanometro di

Nobili furono creati negli anni '20 dell'Ottocento; avevano però grandi problemi con la taratura⁴ (a causa dell'interazione dell'ago con il campo magnetico terrestre).

Successivamente vennero progettati da Poggendorff⁵ e migliorati da Gauss e Weber i galvanometri a bobina mobile con il metodo di lettura a cannocchiale. Intorno all'anno 1858 il fisico britannico William Thomson, più noto come Lord Kelvin, realizzò il galvanometro a specchio. Questo strumento oggi si chiama galvanometro in onore dello scienziato che osservò l'elettricità biologica: Luigi Galvani, sebbene egli stesso non lo utilizzò mai, essendo deceduto nel 1798.

A partire dal galvanometro a specchio sono stati sviluppati altri modelli come il galvanometro di Deprez-D'Arsonval (1880)⁶.



Figura 2. Due esempi di galvanometro D'Arsonval (Foto: S. P. Leban).

In tempi più recenti il galvanometro è stato sostituito da strumenti digitali, basati sui circuiti convertitori analogico-digitali, che convertono i valori analogici di tensione in ingresso in un numero espresso in codice binario poi rappresentato sullo schermo nel sistema decimale. Questi strumenti, noti come *tester* o *multimetri*, riescono a fare misure istantanee di corrente, di tensione e di resistenza e quindi possono funzionare come *amperometri*, *voltmetri* e *ohmmetri*.

⁴ IANNELLO (a cura di) 2017.

⁵ CORTINI, SCIUTI 1959.

⁶ CORTINI, SCIUTI 1959.

Utilizzando i galvanometri invece, bisogna montare un circuito *ad hoc* per ogni tipologia di misura di grandezza che si vuole effettuare, ottenendo comunque le stesse funzionalità dei tester.

In particolare, il galvanometro di Deprez-D'Arsonval è costituito da una bobina mobile che può ruotare parzialmente all'interno di un campo magnetico creato da un ferro magnete. La bobina può essere solidale con una lancetta indicatrice sovrapposta a una scala graduata oppure può essere come in una bilancia di torsione sospesa a un filo che monta un piccolo specchietto; in questo caso si parla di galvanometro a specchio (come lo strumento inventato da Poggendorff⁷ e migliorato da Thomson).



Figura 3. Le componenti del galvanometro Deprez-D'Arsonval (a. morsetti; b. magnete permanente; c. cilindro di ferro; d. bobina; e. filo di torsione metallico; f. specchio) (Foto: S. P. Leban).

Il filo originale dello strumento da noi usato nell'esperienza didattica era d'oro piatto di larghezza di 1 mm che garantiva una torsione lenta e armoniosa, sostituito per manutenzione da un filo di rame perché sfortunatamente surriscaldato e bruciato con l'uso.

Una molla tiene la bobina in posizione di equilibrio. Quando una corrente fluisce nelle spire del solenoide, si genera un campo magnetico che si oppone a quello esterno. Il momento magnetico fa ruotare la bobina e con essa l'ago indicatore o lo specchio. La molla contrasta la rotazione e l'angolo di deviazione che l'ago forma

⁷ CORTINI, SCIUTI 1959.

rispetto alla posizione iniziale è proporzionale all'intensità della corrente che scorre nel solenoide (v. Figura 3).

Nel caso del galvanometro a specchio per la lettura della misura si punta verso il galvanometro un faretto in modo che il fascio di luce venga riflesso su uno schermo, contenente una scala graduata: all'aumentare della distanza dallo schermo si possono apprezzare anche variazioni di corrente molto piccole. Si preferisce utilizzare il galvanometro a specchio, piuttosto che quello ad ago mobile, perché esso minimizza gli errori di parallasse durante la fase di lettura.

L'effetto del campo magnetico terrestre è trascurabile grazie all'azione amplificatrice del cilindro di ferro che aumenta notevolmente l'intensità del campo magnetico prodotto nel traferro della bobina. Le caratteristiche fondamentali di un galvanometro sono la sua sufficiente prontezza (perché è necessario minimizzare il tempo di stabilizzazione dello strumento tra una misura e la successiva) e la sensibilità della risposta.

È utile conoscere anche la resistenza interna dello strumento; infatti, con un'adeguata precisione è possibile usare il galvanometro come voltmetro, mettendolo in serie a una resistenza. La resistenza interna e quella in serie costituiscono un partitore di tensione, per cui il rapporto tra la tensione ai capi del galvanometro e la tensione ai capi del sistema equivale al rapporto tra la resistenza dello strumento e la resistenza totale.

I galvanometri sono dunque apparecchi atti a misurare correnti molto piccole (fino a 10^{-11} A)⁸. Per questa loro caratteristica possono essere adoperati come amperometri ad alta sensibilità o voltmetri.

3. LA SPERIMENTAZIONE DIDATTICA

Fermo nelle bacheche espositive dei vecchi strumenti nei corridoi, nei laboratori o negli scantinati di scuole e di università, il galvanometro è stato riproposto come strumento efficace per condurre un percorso per la comprensione dei fenomeni dell'elettromagnetismo.

⁸ CORTINI, SCIUTI 1959.

La sperimentazione è stata accolta da una classe quarta del Liceo Scientifico Statale con lingua d'insegnamento slovena "France Prešeren" di Trieste: una classe poco numerosa, descritta dal docente di fisica come problematica, perché gli studenti risultavano essere poco autonomi, con diverse lacune in matematica, lenti e soprattutto insicuri.

Il percorso è stato sviluppato durante il secondo quadrimestre per un totale di 12 ore di attività didattica curricolare, alcune dedicate alla presentazione degli argomenti (corrente elettrica, circuito, legge di Ohm, galvanometro), altre a esercitazioni di consolidamento e infine alle misure strumentali, alla raccolta dei dati, alla loro rielaborazione e discussione.

Per rendere gli studenti protagonisti del loro apprendimento si è proposta quindi l'attività secondo la metodologia dell'apprendere facendo (*learning by doing*)⁹, guidando gli studenti alla scoperta dei fenomeni, anche in presenza di concetti intuitivi (*prior-primitives*, come li ha denominati il fisico di Sessa¹⁰) che possono influenzare la costruzione concettuale corretta del fenomeno.

Al centro dell'intervento didattico è stato posto l'esperimento come metodo di studio e di modellizzazione della realtà, sfruttando le potenzialità della metodologia EAS (*episodi di apprendimento situato*)¹¹ con una fase preparatoria introduttiva, una fase operativa con una consegna e conseguente micro-attività, per finire con una fase di ristrutturazione con la presentazione, l'analisi e la discussione del lavoro svolto.

Questa metodologia si adatta bene all'esigenza didattica di sviluppare negli studenti competenze che si formano raggiungendo i seguenti obiettivi formativi disciplinari: *osservare la realtà, descrivere fenomeni, spiegare (e argomentare) la relazione fra grandezze fisiche, ma soprattutto rappresentare e tradurre nei molteplici linguaggi propri della fisica le osservazioni fatte nel corso dell'attività laboratoriale.*

Focalizzando l'attenzione anche sull'integrazione interdisciplinare si favorisce la costruzione concettuale di quello che comunemente viene identificato come "senso fisico

⁹ BOT, GOSSIAUX, RAUCH, TABIOU 2004.

¹⁰ DI SESSA 1993.

¹¹ RIVOLTELLA 2013, 2018.

della realtà”. Le formule che esprimono, con grande efficacia, se ben comprese, la relazione fra le grandezze fisiche non vanno “calate” dall’alto e poi, imparate a memoria. Affinché nello studente avvenga quello che viene chiamato il *cambiamento concettuale*¹², il docente dovrebbe dare significato alle rappresentazioni e alle descrizioni della realtà. È un passaggio cruciale, ma molto spesso, nella prassi didattica, purtroppo poco esplicitato. Alla classe è stato dunque proposto un percorso sull’elettromagnetismo basato su attività di laboratorio secondo la metodologia EAS. Gli studenti avevano in precedenza già acquisito i concetti di campo elettrico, carica e tensione elettrostatica, forza di Coulomb e capacità di un condensatore. Si trattava dunque di integrare il processo teorico di concettualizzazione con l’approccio laboratoriale.

L’intervento didattico è stato diviso in due parti: nella prima parte gli studenti hanno fatto pratica con la costruzione dei circuiti e con le misure di corrente e tensione sia mediante gli strumenti analogici sia quelli digitali per ottenere, tramite il metodo volt-amperometrico, il valore della resistenza dell’elemento dissipativo, nella seconda si è misurata una resistenza, utilizzando un galvanometro.

3.1 LA FASE PREPARATORIA

In questa fase della metodologia EAS viene preparato un momento introduttivo che serva da quadro concettuale per stimolare la curiosità epistemica degli studenti. Le strategie che si possono utilizzare per questa fase sono diverse: un video introduttivo, una mappa concettuale o una presentazione multimediale.

Nella sperimentazione fatta, si è scelto di indirizzare subito gli studenti all’attività laboratoriale, facendo provare direttamente a loro la costruzione di un circuito semplice con un elemento dissipativo ignoto che, dalla lettura della relazione lineare fra la tensione e corrente si è scoperto essere un resistore.

Si è utilizzato il metodo volt-amperometrico; variando la tensione, misurata con un voltmetro analogico collegato in parallelo all’elemento dissipativo, si è annotato il

¹² SHERIN 2017.

valore della corrente che attraversava il circuito, misurata con un amperometro legato in serie. Sono state prese misure nell'intervallo da 0.0 V a 4.0 V con un incremento di tensione pari a 0.5 V e da 4.0 V a 10.0 V con uno pari a 1.0 V.



Figura 4. La scala del voltmetro analogico (Foto: S. P. Leban).

Si è posta particolare attenzione ai cambi di scala dell'amperometro per non rischiare di far passare troppa corrente, evitando così di far raggiungere all'indicatore il fondo scala, danneggiando lo strumento. La scelta di utilizzare voltmetri e amperometri analogici e non digitali ha ulteriormente favorito la discussione sull'assegnazione dell'errore associato alla singola misura.

La classe ha appreso come leggere correttamente il valore indicato dalla lancetta, evitando gli errori di parallasse e ad associare a ogni misura un errore massimo assoluto che fosse metà tacca della risoluzione minima di lettura fornita dallo strumento e che non si potesse riportare a un numero di cifre significative maggiore all'errore associato. Cambiando la scala si è tenuto ovviamente conto dell'incremento dell'errore associato alla misura.

Agli studenti è stato chiesto come compito domestico di trascrivere i dati raccolti in un foglio di calcolo e di provare a identificare quale relazione matematica intercorre fra la corrente elettrica e la tensione.

L'argomentazione su come queste due grandezze fisiche fossero matematicamente legate fra di loro e l'introduzione del concetto di *resistenza* è stato oggetto di discussione in classe, per arrivare assieme alla derivazione sperimentale della *prima legge di Ohm* con il metodo volt-amperometrico.

Rappresentando graficamente i dati misurati con i relativi errori associati (Figura 5), è stata ottenuta in un altro modo la resistenza dell'elemento dissipativo circuitale, osservando la pendenza della retta volt-amperometrica.

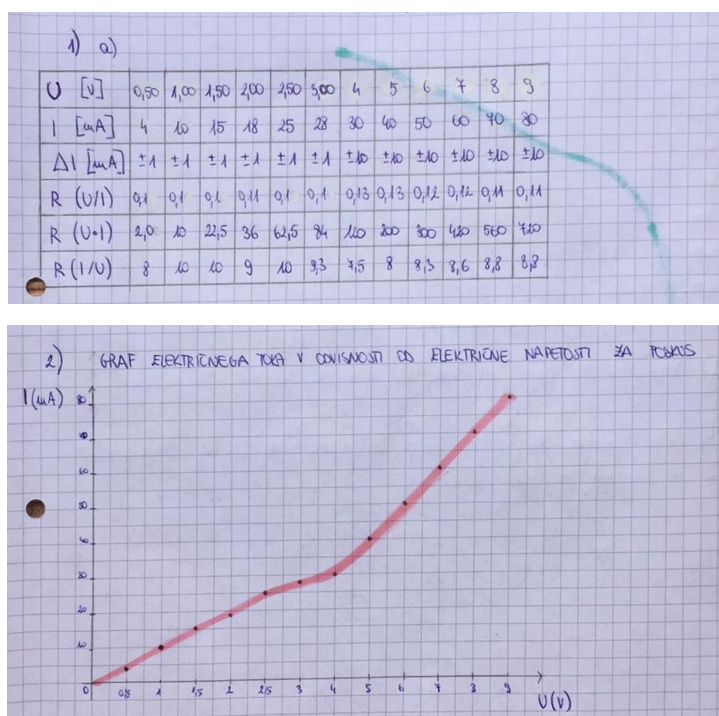


Figura 5. I dati raccolti in tabella (a) e la corrispondente rappresentazione grafica (b) tratta dalla relazione di uno studente di madre lingua slovena (Foto: S. P. Leban)¹³.

Si è misurato infine direttamente il suo valore, utilizzando la funzione dell'ohmetro presente in un multimetro digitale. Si è proceduto dunque al confronto sulla compatibilità dei valori ottenuti e alla rielaborazione delle diverse osservazioni,

¹³ Traduzione del titolo nella Figura 5b: "Grafico della corrente elettrica in funzione della tensione elettrica".

cercando di porre l'attenzione sulle potenzialità e le criticità dei metodi utilizzati come per esempio la difficoltà di calcolare la pendenza dal metodo grafico e di stimare l'errore delle misure sugli strumenti.

Gli studenti hanno comparato i dati misurati su un circuito contenente una lampadina a incandescenza come elemento dissipativo con quelli precedentemente ottenuti con il resistore. È stato loro chiesto di rappresentare graficamente entrambi i set di valori e di scoprire se ci fossero delle differenze: si è evidenziata la linearità del grafico per il resistore e la non linearità per la lampadina a incandescenza. Si è proceduto alla distinzione fra gli elementi dissipativi ohmici (per es. un resistore) e gli elementi dissipativi non ohmici (per es. una lampada a incandescenza).

Si sono disegnati sulla lavagna due circuiti, uno con due resistori in serie e l'altro con due resistori legati in parallelo fra di loro. Si è chiesto agli studenti di formulare una previsione sulla resistenza equivalente nei due casi, partendo dall'applicazione delle *leggi di Kirchhoff per i circuiti elettrici*, che esplicitano la conservazione totale della corrente e dell'energia in un circuito elettrico.

Con opportune modifiche del circuito, introducendo ove necessario altri amperometri e voltmetri digitali, si sono fatte misure di corrente e tensione elettrica, seguendo lo stesso procedimento del metodo volt-amperometrico. Sono stati confrontati i valori della resistenza equivalente ottenuti sperimentalmente con le previsioni teoriche fatte dagli studenti. Si è colta l'opportunità per parlare del metodo scientifico e dell'importanza della formulazione e della verifica delle previsioni teoriche.

Sebbene molto articolata, questa fase preparatoria voleva rendere gli studenti confidenti con la costruzione del circuito, la manipolazione delle grandezze in gioco (tensione, corrente e resistenza) attraverso la loro misurazione, la determinazione dell'errore associato alla misura, l'osservazione diretta delle relazioni fisiche tra loro e la loro rappresentazione in linguaggio grafico/matematico.

Tale passaggio è cruciale perché consente poi, nella fase successiva, di operare su situazioni fisiche più complesse che necessitano una elaborazione concettuale degli

elementi introdotti che non è solo “teorica” ma anche “osservativa” e fortemente “rappresentativa”. Ovvero richiede agli studenti di superare l’ostacolo dell’apprendimento didascalico verso un apprendimento situato a supporto di quello cognitivo.

3.2 LA FASE OPERATIVA

Se la fase preparatoria è il corrispondente della logica didattica che si potrebbe individuare come *problem posing and solving* (definizione del problema e sua soluzione), nella fase operativa la logica didattica di riferimento è il *learning by doing*, la metodologia dell’apprendere facendo. L’efficacia della fase può essere anche amplificata dall’integrazione metodologica del *cooperative learning*, l’apprendimento cooperativo. Ed è questa la fase del riscatto del galvanometro a specchio.

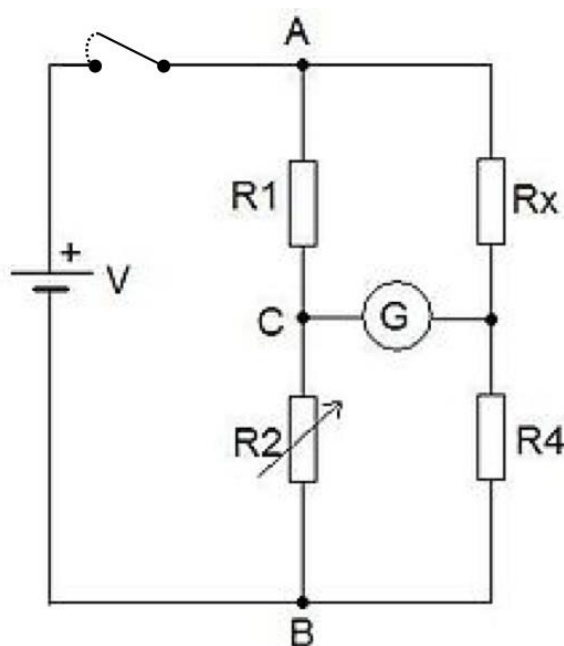


Figura 6. Lo schema semplificato del circuito elettrico di un *ponte di Wheatstone*: l’elemento con la G rappresenta il galvanometro, con R_x invece è rappresentato l’elemento incognito; l’elemento V rappresenta il generatore di tensione (Elaborato: V. Bologna).

Nella prima parte di laboratorio è stato misurato il valore di una resistenza con il metodo volt-amperometrico; in questa seconda fase si è voluto porre agli studenti la sfida di determinare sperimentalmente la misura di una resistenza incognita mediante l’utilizzo del galvanometro inserito in un *ponte di Wheatstone* (v. Figura 6).

Il ponte è costituito da quattro resistori (R_1 , R_2 , R_x , R_4), due a valore fisso (R_1 , R_4), uno variabile (R_2) e una resistenza incognita (R_x). I resistori sono legati fra di loro a due a due nei due rami paralleli di un circuito. Questi sono collegati tra loro mediante il galvanometro in funzione di amperometro. Sullo specchio del galvanometro viene puntato un fascio luminoso che attraverso la leva ottica permette la misura della corrente che fluisce nel ramo del circuito. Il circuito viene chiuso inserendo un generatore di tensione.

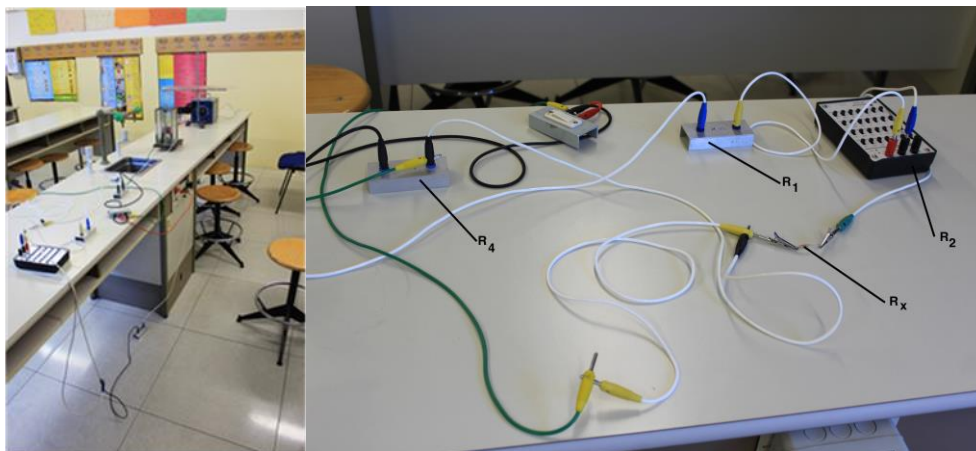


Figura 7. Il set sperimentale pronto per le misurazioni (a sinistra il banco sperimentale dove si vedono tutte le componenti del circuito, a destra un dettaglio delle quattro resistenze) (Foto: S. P. Leban).

Per eseguire la misura della resistenza incognita, si varia il valore del terzo resistore, fino a ottenere che il fascio luminoso riflesso dal galvanometro su una scala graduata non subisca deviazione, aprendo o chiudendo l'interruttore. In queste condizioni, dette di "ponte equilibrato", vale la nota relazione del *ponte di Wheatstone*: $R_1 R_4 = R_2 R_x$; all'equilibrio i due punti del circuito che collegano attraverso il galvanometro i due rami devono trovarsi allo stesso potenziale, affinché non passi corrente. Il galvanometro nella configurazione del ponte equilibrato è detto "rivelatore di zero".

Prima di iniziare la costruzione del circuito si è illustrato agli studenti il funzionamento del galvanometro, ponendo una particolare attenzione a come questo misuri la corrente elettrica.

Al fine di rendere operativa questa fase, una volta costruito il circuito (v. Figure 7 e 8), sono state utilizzate come resistenze note $R_1 = 10k\Omega$ e $R_4 = 4k\Omega$ (con errore associato dal costruttore del 5%), resistenza variabile $4\Omega \leq R_2 \leq 1M\Omega$ (con errore dello strumento dell' 1%) ed è stato fornito al circuito una corrente $I = (1,33 \pm 0,01)A$.

A questo punto sono stati assegnati agli studenti i seguenti compiti, da svolgere personalmente, alternandosi nelle diverse mansioni: chiudere e aprire il circuito mediante l'interruttore, cambiare il valore della scatola di resistenze, controllare lo spostamento del fascio luminoso sulla scala graduata e calcolare il valore della resistenza incognita, che è risultato, alla conclusione dell'esperimento, essere $R_x = (270 \pm 30) \Omega$, con errore compatibile ai valori forniti dal costruttore.

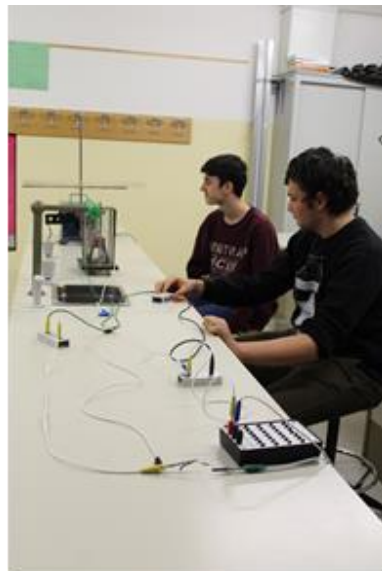


Figura 8. Gli studenti nel corso dell'attività laboratoriale (Foto: S. P. Leban).

L'esperimento nella sua semplicità racchiude un'elevata quantità d'informazioni sul funzionamento dello strumento e sulle relative misure delle quantità studiate.

I differenti modi di misurare la stessa quantità fisica hanno offerto uno spunto per una riflessione sull'importanza dello sviluppo tecnologico della strumentazione scientifica e sul cambiamento che esso porta inevitabilmente con sé. Il galvanometro è uno strumento molto preciso, ma per poterlo utilizzare era necessario montare un sistema per la leva ottica e costruire un circuito *ad hoc*.

Già l'invenzione dei voltmetri e degli amperometri analogici, dai quali si poteva leggere il valore della grandezza misurata senza calcoli aggiuntivi, contribuì a diminuire il tempo per l'esecuzione di una misura, ridotta ulteriormente con i multimetri digitali e l'interfaccia di un computer che elabori i dati e li rappresenti graficamente.

Gli studenti hanno capito che si possono fare misure fisiche di precisione anche con strumenti antichi. Utilizzando vari metodi, basati su nuove e vecchie tecnologie, si può verificare in più modi la correttezza delle misure fatte: in maniera indiretta con il metodo volt-amperometrico (mediante il calcolo analitico o mediante la pendenza del grafico) o con l'utilizzo del galvanometro, in maniera diretta utilizzando l'ohmmetro o leggendo i codici delle resistenze forniti dal produttore. Facendo una trattazione sugli errori da associare alle singole misure, si è verificata la compatibilità dei risultati ottenuti e la loro accordanza con quanto atteso.

3.3 LA FASE DI RISTRUTTURAZIONE

La logica didattica di quest'ultima fase è quella del *reflective learning*, la riflessione critica finale, più propriamente metacognitiva, dove si ragiona sull'agito, sul compreso e sull'operato.

Gli studenti hanno dimostrato in generale un grande interesse per le esperienze di laboratorio e gli argomenti trattati a lezione. L'attività laboratoriale ha motivato la loro curiosità e li ha resi protagonisti del processo di apprendimento. La partecipazione in classe è stata attiva da parte di tutti anche degli alunni che di solito manifestano difficoltà maggiori.

Durante la fase di elaborazione dei dati sono emerse alcune problematiche: innanzitutto si è riscontrato che in pochi sapevano operare correttamente con le unità di misura, con le conversioni e con la notazione scientifica. Buona parte della classe durante la determinazione della relazione che intercorre fra la corrente elettrica e la differenza di potenziale non ha escluso l'addizione e la sottrazione, come se le due quantità fisiche fossero grandezze omogenee. Spesso, poi, i dati

sperimentali raccolti venivano riportati senza specificare le unità di misura e/o con un numero eccessivo di cifre significative.

D'altra parte si è, però, riscontrato un grande impegno nell'interpretare i risultati ottenuti, a volte con ipotesi fantasiose talvolta anche errate, ma che dimostravano comunque il desiderio da parte degli studenti di ricercare la spiegazione della realtà osservata. Gli alunni sono stati tutti in grado di elaborare i grafici con i fogli di calcolo o sul quaderno e una buona parte di essi ha fornito una soddisfacente interpretazione delle relazioni individuate.

La scelta di introdurre gli argomenti in maniera empirica attraverso l'osservazione del fenomeno fisico è risultata adeguata, infatti molti hanno dimostrato intuizione e senso fisico della realtà. In particolare si è notato che alcuni alunni con disturbi specifici di apprendimento erano molto abili nell'attività pratica manuale di laboratorio e si sentivano utili al gruppo, quando soprattutto bisognava costruire il circuito.

Si è notato che la maggior parte della classe ha comunque difficoltà ad applicare le nozioni acquisite. Nessun studente è riuscito a predire correttamente il valore della resistenza equivalente nel caso di due resistori in serie e in parallelo, anche se erano note le due leggi di Kirchhoff e la prima legge di Ohm.

C'è una parziale consapevolezza da parte degli studenti nel cogliere che questa metodologia, sebbene richieda e spenda tempi di lavoro molto più estesi, consente loro di sviluppare quelle competenze disciplinari che lo studio mnemonico delle formule non attiva, attraverso obiettivi formativi quali: confrontare misure ottenute con strumenti analogici e digitali, calcolare analiticamente il valore di grandezze, ricavandole anche graficamente, decidere quale scelta sperimentale intraprendere per eseguire una misura rispetto a un'altra.

Hanno quindi sperimentato un *modus operandi* fondato sul laboratorio e sulla centralità della misura in fisica che li ha incentivati nell'apprendimento della materia in maniera empirica, stimolando la loro curiosità. Hanno potuto mettere in

pratica il metodo scientifico, osservando e descrivendo il fenomeno fisico, formulando delle ipotesi interpretative che sono state in seguito verificate.

4. CONCLUSIONI

Se per ogni strumento esposto nelle bacheche delle scuole o dei musei si pensasse un'attività didattica laboratoriale improntata sulla partecipazione e sul coinvolgimento attivo degli studenti nel processo di apprendimento, molto probabilmente anche l'atteggiamento verso la fisica cambierebbe.

Quasi certamente, basterebbe anche una sola volta all'anno proporre un percorso didattico che integri i linguaggi disciplinari, che esplori il significato concettuale delle grandezze fisiche attraverso la loro misura e l'osservazione sperimentale delle relazioni empiriche. Basterebbe, per rompere il vetro della teca, oseremmo dire anche concettuale, far parlare lo strumento della sua storia, del suo utilizzo e delle sue potenzialità.

Basterebbe, per creare un ambiente di apprendimento non formale fra pari dove le competenze di ciascuno sono una risorsa per il confronto e per l'esito dell'attività laboratoriale. Perché in fin dei conti, se non si riesce a far assaporare la necessità di condividere e scambiare idee, gli studenti non conosceranno il vero volto della ricerca scientifica.

BIBLIOGRAFIA

BOLOGNA V., MINUSSI S.

2018, «Fare astronomia a scuola, esercizi di didattica laboratoriale», *QuaderniCIRD* n. 17, pp. 68-88, scaricabile all'indirizzo web: <<https://www.openstarts.units.it/handle/10077/22747>>.

BOT L., GOSSIAUX P. B., RAUCH C. P., TABIOU S.

2005, «'Learning by doing': a teaching method for active learning in scientific graduate education», *European Journal of Engineering Education*, vol. 30 pp. 105-119, scaricabile all'indirizzo web: <<https://doi.org/10.1080/03043790512331313868>>.

CORTINI G., SCIUTI S.

1959, *Misure ed apparecchi di fisica (elettricità)*, Roma, Libreria eredi Virgilio Veschi.

DISSA A.

1993, «Toward an Epistemology of Physics», *Cognition and Instruction*, Vol. 10, No. 2/3, pp. 105-225, scaricabile all'indirizzo web: <<https://www.jstor.org/stable/3233725>>.

RIVOLTELLA P. C.

2013, *Fare didattica con gli EAS. Episodi di Apprendimento Situato*, Brescia, La Scuola.

2018, *Un'idea di scuola*, Brescia, Morcelliana.

SHERIN B.

2017, «Conceptual Change and symbol use in physics», in T. G. AMIN, O. LEVRINI (Editor), «Converging perspectives in conceptual change. Mapping and Emerging Paradigm in the Learning Sciences», Londra e New York, Routledge, pp. 81-88.

SITI WEB

IANNELLO M. G.

2020, *Museo di Fisica di Sapienza Università di Roma*,

<<https://www.phys.uniroma1.it/DipWeb/museo/galvan.html>>, sito consultato il 10.6.2020.

ORGANTINI G., MEDICI F.

2020, *Museo di Fisica di Sapienza Università di Roma*,

<<https://www.phys.uniroma1.it/DipWeb/museo/home.htm>>, sito consultato il 10.6.2020.

RINAUDO M., LEONE M.

2020, *Museo di Fisica dell'Università di Torino*,

<<http://www.museodifisica.unito.it/>>, sito consultato il 10.6.2020.