

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELLA
CALABRIA
DOTTORATO DI RICERCA IN FISICA CICLO XXIII
IN COTUTELA CON
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI UDINE

TESI DI DOTTORATO

**Nodi concettuali e percorsi di
apprendimento sull'induzione
elettromagnetica per studenti di scuola
primaria e secondaria**

Relatore
Prof.ssa Marisa Micheli
Prof.ssa Assunta Bonanno

Candidato
Dr. Giacomo Bozzo

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

Sommario

Capitolo 1: Approcci di ricerca didattica	4
1.1 Ricerca internazionale in didattica della fisica	4
1.2 Nuovi curricula didattici	7
1.2.1 Attività laboratoriali	8
1.2.2 Strumenti multimediali e laboratori on-line	14
Capitolo 2: Problemi di apprendimento in elettromagnetismo	18
2.1 Nodi concettuali sui fenomeni magnetici	19
Capitolo 3: Nuovi esperimenti hands-on sull'elettromagnetismo	25
3.1 Turbina a vento di Savonius	25
3.1.1 Descrizione del dispositivo	27
3.1.2 Esempi di applicazione	29
3.2 Motorino Elettrico	31
3.2.1 Esperimenti qualitativi	31
3.2.2 Esperimento quantitativo	34
3.3 Moto di un cilindro in un campo magnetico	42
3.3.1 Apparato sperimentale	42
3.3.2 Modellizzazione del sistema	44
3.3.3 Risultati sperimentali	48
3.4 Paradosso dei Geomags	52
3.4.1 Apparato sperimentale	53
3.4.2 Tutorial Multimediale	57
3.5 Macchina di Atwood	60
3.5.1 Apparato sperimentale	61
3.5.2 Analisi dei dati	65
3.5.3 Misure alternative con la macchina di Atwood	68
Capitolo 4: Studi preliminari	71
4.1 Studi preliminari	73
4.1.1 Savonius come attività introduttiva sull'induzione elettromagnetica	73
4.1.2 Savonius come PCK per gli insegnanti	84
4.1.3 Savonius e percorso sulle energie alternative (<i>POST-TEST di verifica sull'induzione elettromagnetica attraverso la Metodologia per Artefatti</i>)	95

4.1.1	Conclusioni	100
Capitolo 5:	Una proposta didattica	102
5.1	Struttura del percorso didattico	102
5.2	Contesto	103
5.3	Struttura dell'attività sperimentale	105
5.4	Risultati e analisi dei dati.	109
5.5	Conclusioni	127
Capitolo 6:	Conclusioni	131
Appendice A	.....	134
Physics by Inquiry program	.....	134
Appendice B	.....	136
Strategia didattica per artefatti	.....	136
Appendice C	.....	137
Trattamento teorico della macchina di Atwood	.....	137
Appendice D	.....	139
D.1	Scheda di lavoro S1: metodologia per artefatti come PRE-TEST.	139
D.2	Scheda di lavoro S2: metodologia per artefatti come PCK per insegnanti.	141
D.3	Scheda di lavoro S3: metodologia per artefatti come attività di verifica sull'induzione elettromagnetica nel percorso energetico.	146
Bibliografia	.....	148

Capitolo 1: Approcci di ricerca didattica

1.1 Ricerca internazionale in didattica della fisica

Negli ultimi trenta anni un'ampia attività di ricerca in didattica ha messo in luce le problematiche degli studenti nel comprendere i concetti essenziali della fisica (Bonanno et Al, 2009a), anche nei migliori corsi tradizionali di introduzione alla fisica in cui gli studenti leggono testi, risolvono esercizi, ascoltano lezioni ben preparate e svolgono attività di laboratorio tradizionale (McDermott & Shaffer, 1992; Merrill, 1992). Il più delle volte le difficoltà che gli studenti incontrano non sono dovute all'incapacità dei professori nel presentare gli argomenti in modo corretto, almeno da un punto di vista fisico (McDermott, 1991), quanto piuttosto alla differenza fra cosa dice l'insegnante e cosa interpreta l'alunno, fra cosa il docente pensa che lo studente abbia imparato e cosa realmente è stato appreso (McDermott, 1991; Viennot, 1985). I metodi tradizionali di insegnamento conducono ad una visione statica delle conoscenze, hanno come obiettivo principale "cosa" gli studenti imparano piuttosto che "come" e focalizzano l'attenzione sulla risoluzione di problemi fisici. Questi tralasciano completamente quelli che McDermott definisce "obiettivi intellettuali"¹ e che risultano invece necessari al raggiungimento di un apprendimento significativo dei concetti basilari della fisica. Molto spesso gli studenti sono ancorati alla soluzione di problemi e si concentrano maggiormente sugli algoritmi di risoluzione piuttosto che sugli argomenti e sui principi che ne stanno alla base. La didattica tradizionale indirizza gli studenti

¹ Secondo McDermott, alla fine di un corso, gli studenti dovrebbero: a) comprendere i concetti basilari che possono essere legati ad importanti principi fisici; b) avere dimestichezza con le rappresentazioni formali (equazioni, grafici, diagrammi, ecc.) ed essere in grado di descrivere in dettaglio la relazione fra un concetto fisico ed il formalismo usato per descriverlo c) esplicitare corrispondenze fra concetti o rappresentazioni ed oggetti o sistemi del mondo reale d) risolvere problemi fisici; e) raggiungere sufficienti abilità nel ragionamento scientifico per applicare concetti e rappresentazioni della fisica nell'analisi ed interpretazione di semplici fenomeni (McDermott, 1990; McDermott, 1991).

a focalizzare l'attenzione sulla soluzione di esercizi standard, ma questo non implica una profonda comprensione dei principi e delle leggi che stanno alla base di tali problemi (McDermott, 1993; McDermott & Shaffer, 1992; Bagno & Eylon, 1997).

Nonostante negli ultimi anni un'ampia ricerca internazionale abbia messo in luce le lacune della didattica tradizionale, l'insegnamento della fisica è avvenuto attraverso la trasmissione delle conoscenze sotto forma di informazioni generali nella forma più sintetica e strutturata possibile, e queste sono state convogliate "già pronte" dall'insegnante al discepolo (Michelini, 2007). In questo modo la fisica viene vissuta come una disciplina che parla di fatti e di formule (McDermott, 1993), di cose astratte che non esistono e ne vengono così nascoste la bellezza, l'utilità ed il vasto impiego (Michelini, 2007). Questa visione statica della disciplina, non connessa con il mondo reale (Vosniadou, 2001), ha fatto sì che la fisica fosse storicamente una delle materie più noiose e meno amate da parte degli studenti (Bonanno et Al., 2009a; Mazur, 1997). Tutto ciò ha determinato, in molti paesi di tutto il mondo, una diminuzione² nel reclutamento di studenti in fisica (McDermott L., 1990; Welch, et Al., 1984).

Molti insegnanti di fisica si preoccupano di trasmettere le loro conoscenze, il loro interesse, in generale tutto ciò che hanno appreso dopo mesi o anni di sforzi intellettuali. Nell'introdurre principi generali e nel mostrare le applicazioni in alcuni casi particolari, essi sperano di insegnare agli studenti come applicare i nuovi concetti appresi in altre situazioni differenti (McDermott, 1993). Volendo sintetizzare con un pensiero espresso da McDermott, "insegnare raccontando è un metodo didattico poco efficace per molti studenti" (McDermott, 1993).

In base a questo modello didattico, la fisica è stata insegnata nelle scuole solo dopo opportune basi matematiche, in modo formale e trascurando la costruzione di quel ponte concettuale che permette di evidenziare la sua capacità interpretativa (Michelini, 2007). Caratteristica quest'ultima essenziale per passare da una lettura di senso comune ad una visione scientifica adottata dal mondo accademico. La difficoltà di raccordo fra il pensiero di senso comune e quello formale viene individuata con una serie di nodi concettuali da una vasta letteratura sui problemi di apprendimento³. Tale processo parte dall'analisi delle idee spontanee che gli studenti hanno prima e durante l'istruzione (Maloney, 1985; Halloun & Hestenes, 1985; Clement, 1982; Goldberg & McDermott, 1987), molto spesso differenti dalla teoria accettata

² Già nel 1990 uno studio negli Stati Uniti aveva stimato una diminuzione di studenti in fisica del 50% rispetto agli anni precedenti (McDermott, 1990).

³ La letteratura internazionale sulla necessità di connettere i principi e le leggi fisiche al mondo reale, necessario per avviare il passaggio dal senso comune al pensiero formale, è vastissima. Per esempio vedere (McDermott, 1993; Michelini, 2007; Viennot, 2001 ; Viennot, 2003 ; Merrill, 1992 ; Vosniadou, 2001).

dal mondo accademico (Viennot, 1985; Duit, 2006; McDermott, 1991; Vosniadou, 2008; Maloney et Al., 2001), ma non per questo catalogate come semplici errori in un particolare ambito della fisica, bensì considerate come “misconceptions”, ossia “ragionamenti intuitivi” o “ragionamenti alternativi” o ancora “nozioni prescientifiche o pre-istruzione” (Viennot, 1985; Novak, 2002). Le persone possiedono, infatti, un schema esplicativo intuitivo per analizzare i fenomeni fisici, che non è appreso a scuola. Gli studenti ignorano di possedere questo insieme di concetti e di relazioni, e per questo non affrontano spontaneamente il conflitto fra la teoria accettata ed i loro ragionamenti. Gli insegnamenti che ignorano questi schemi comuni risultano sorprendentemente inadeguati al raggiungimento di un apprendimento significato degli studenti (Viennot, 1985). L’esperienza mostra che le idee a volte “strane” degli studenti forniscono un nuovo punto di vista dei contenuti scientifici e permettono una nuova e più profonda comprensione (Duit, 2006; Duit et Al., 1997).

E’ stato ampiamente dimostrato, infatti, che questi preconcetti influenzano fortemente l’apprendimento dei discenti durante l’istruzione (Reinson, Transtromer, & Viennot, 1994). Questa idea trova radici profonde già nella metà del XX secolo, negli studi di alcuni pionieri della ricerca in didattica fra cui Bachelard e Piaget (Viennot, 2001). Bachelard, in *La formation de l’esprit scientifique* (1938), sviluppa l’idea che tutte le conoscenze sono costruite *contro* ciò che ciascuno già conosce. In questa visione, le conoscenze di senso comune presentano caratteristiche diverse da quelle derivanti da un approccio scientifico e per ottenere un livello scientifico di pensiero bisogna sormontare ostacoli di differente natura, come per esempio legare alcune grandezze fisiche al mondo reale⁴. In modo analogo, Piaget parla di una lotta contro se stessi nei processi di apprendimento, di un negoziato fra una nuovo concetto e le proprie conoscenze⁵.

Da questa analisi si evince quanto sia fondamentale il ruolo degli studenti e del loro pensiero spontaneo nei processi di insegnamento/apprendimento^{6,7}. Seguendo un approccio costruttivista, molto diffuso negli ultimi trenta anni fra i ricercatori in didattica della fisica, tutti gli individui devono costruire i loro

⁴ G. Bachelard: *La formation de l’esprit scientifique: contribution à une psychanalyse de la connaissance objective* (1938)

⁵ B. Inhelder & J. Piaget: *De la logique de l’enfant à la logique de l’adolescent* (1955)

J. Piaget: *L’équilibration des structures cognitives, problème central de développement* (1975).

⁶Esistono due scuole di pensiero principali: un primo filone analizza un particolare dominio della scienza per progettare nuove sequenze di apprendimento/insegnamento (si tratta quindi di una ricerca “*Science Oriented*” orientata ai contenuti); un secondo filone “*Student Oriented*” pone al centro della ricerca gli studenti, enfatizzando le loro necessità e sviluppando ambienti di lavoro opportuni (all’interno di questa seconda categoria rientrano la maggior parte degli approcci basati sul cambiamento concettuale) (Michelini, 2007; Duit, 2006).

⁷ Come esempio di ricerca in didattica finalizzata alle necessità ed alle capacità degli studenti, oltre che ai contenuti scientifici, vedere in Appendice 2 il metodo MRE di Reinders Duit.

concetti a partire dalle conoscenze che già hanno o pensano di avere e che influenzano fortemente ciò che possono imparare. Prendendo le distanze dalla didattica tradizionale, la visione costruttivista non considera la mente dei discenti come una lavagna su cui poter scrivere nuove informazioni senza tenere in considerazione cosa è già scritto. (McDermott, 1991). Per passare dalle idee degli studenti prima dell'istruzione, intese come interpretazioni diverse dei fenomeni in contrasto con le visioni accademiche, al pensiero formale è necessario ottenere un significativo "*cambiamento concettuale*" (McDermott & Shaffer, 1992; Bosio, Michelini et Al., 1999). Tale processo richiede un periodo piuttosto lungo, in cui i discenti aggiungono nuove informazioni a una "teoria iniziale" spontanea ben strutturata attraverso meccanismi involontari e cambiano una a una le idee e le presupposizioni che sono in contrasto con la visione scientifica (Vosniadou, 2008). Alcuni ricercatori distinguono il *cambiamento concettuali spontaneo*, che avviene nel processo di sviluppo cognitivo, da quello *indotto*, prodotto come risultato dell'istruzione.

Per ottenere cambiamenti concettuali consistenti è necessario guidare gli studenti verso un apprendimento significativo, caratterizzato dalla capacità di utilizzare e di interpretare conoscenze in situazioni non identiche a quelle in cui sono state acquisite, e ciò comporta un forte coinvolgimento mentale da parte loro (McDermott, 1991). Per questo motivo lo studente non è visto come un recipiente passivo di contenuti, ma come un protagonista attivo nella costruzione delle sue conoscenze⁸. Gran parte della ricerca internazionale in didattica ha mostrato come gli ambienti di apprendimento, che coinvolgono gli studenti e consentono loro di avere un ruolo attivo nel processo formativo, producono dei risultati migliori in termini di "*guadagni concettuali*" rispetto alla didattica tradizionale, facilitando lo sviluppo del pensiero formale (Bonanno et Al., 2009a; Michelini & Cobal, 2002). La partecipazione attiva degli studenti nel processo di costruzione dei modelli qualitativi è, quindi, elemento fondamentale per raggiungere un livello di conoscenza definita in letteratura "*funzionale*", consentendo loro di sviluppare capacità di ragionamento, di riuscire ad applicare concetti assimilati in situazioni diverse da quelle proposte nella fase di apprendimento, di capire le relazioni e le differenze fra concetti (McDermott, 1991; McDermott, 1993).

1.2 Nuovi curricula didattici

La sfida diventa allora costruire nuovi curricula scolastici capaci di stimolare l'interesse e la partecipazione degli studenti, i quali devono essere da

⁸ Il ruolo attivo degli studenti è un tema presente in gran parte della letteratura internazionale. Per esempio vedere: (Bonanno et Al., 2009; Michelini, 2007; Michelini & Cobal, 2002; Vosniadou, 2008; McDermott, 1991; McDermott, 1993; Vosniadou, 2001)

un lato guidati nel processo formativo, dall'altro stimolati ad eseguire spontanee esplorazioni ed interpretazioni dei fenomeni e dei concetti proposti. Per raggiungere un tale ambiente di lavoro attivo, difficile da ottenere attraverso le lezioni frontali tradizionali, può essere molto utile costruire nuovi curricula basati su attività laboratoriali, utilizzando strumenti e metodologie didattiche fortemente coinvolgenti capaci di stimolare la curiosità, le abilità e la fantasia delle persone coinvolte.

1.2.1 Attività laboratoriali

Lo sviluppo di nuovi percorsi di apprendimento deve essere principalmente basato sulle attività finalizzate all'osservazione, sulle prove e sugli esperimenti fatti dagli studenti (Trumper, 2003). Una vastissima letteratura internazionale⁹ testimonia quanto tempo è stato dedicato, da parte dei ricercatori più illustri a livello mondiale, per testare i vantaggi di un tipo di didattica incentrata su attività di laboratorio, le quali consentono da un lato di ottenere un coinvolgimento intellettuale degli studenti molto maggiore delle attività tradizionali svolte in classe o nei laboratori (McDermott, 1991), dall'altro di facilitare il raccordo fra la fisica ed il mondo reale. Molti sono stati i dibattiti sull'utilità delle attività di laboratorio nell'ambito della ricerca in didattica e da molto tempo si sostiene il suo ruolo indispensabile nei processi di apprendimento nell'ambito della fisica. Ne è una testimonianza diretta la conferenza tenuta a Oxford nel luglio del 1978 dal tema "*Il ruolo del laboratorio nella didattica della fisica*", di cui esiste memoria nell'articolo di Woolnough pubblicato su *Physics Education* nel 1979 (Woolnough, 1979). Già in quell'occasione è stata individuata la necessità di tali pratiche per ottenere un apprendimento significativo: "*senza esperimenti non si impara niente seriamente*". Da quel convegno emergono interessanti considerazioni, quali per esempio il riscontro di un forte entusiasmo da parte degli studenti sottoposti ad attività reali di fisica, sia a livello motivazionale che a livello di apprendimento, oppure la convinzione che queste opere pratiche portino vantaggi sia in termini di abilità manuali¹⁰ sia nel rendere molto più concreti i fenomeni analizzati apprezzando così meglio il mondo reale in cui si vive.

Su queste basi vengono concepite e sviluppate tutte le attività hands-on, capaci di stimolare la curiosità, l'entusiasmo e l'interesse degli studenti (anche qui la letteratura è vastissima, si veda per esempio Bonanno et Al., 2009a; Woolnough, 1979). Si tratta molto spesso di semplici esperimenti che spingono

⁹ Sull'importanza del laboratorio nella didattica della fisica vedere fra gli innumerevoli riferimenti:

(Woolnough, 1979; Wellington, 1990; Morris, 1990; McDermott, 1991; Michelini, 2007; Bosio, Michelini et Al, 1999; Psillos et Al., 1999), (Trumper, *The Physics Laboratory - A Historical Overview and Future Perspectives*, 2003).

¹⁰ Anche nell'articolo di Wellington si parla dell'importanza di sviluppare capacità di manualità e destrezza, capacità sempre meno diffusa in ambito scientifico.

i discendenti a esplorare, formulare delle ipotesi di funzionamento e in molti casi ottenere quel coinvolgimento mentale necessario per lo sviluppo di un ambiente di apprendimento attivo. Wellington, analizzando in un articolo su *Physics Education* l'utilità dei centri scientifici interattivi, sottolinea come i centri di attività hands-on generino entusiasmo, adrenalina, interesse ed eccitamento (Wellington, 1990). Alla stessa conclusione giunge Thornton, secondo cui l'assenza di esperienza diretta, praticata nei laboratori ben progettati, rende la scienza meno interessante e meno accessibile agli studenti (Thornton, 1987). Alla fine degli anni 80' in alcuni report sulla ricerca in didattica della fisica, riguardanti attività laboratoriali hands-on, è stato messo in evidenza come tali attività aumentino l'attitudine degli studenti verso la scienza (Keys, 1987; Lawson et Al., 1989; Trumper, 2003).

Un cambiamento significativo nei propositi e negli obiettivi dei lavori di laboratorio ha avuto luogo con l'introduzione del Costruttivismo nella didattica delle scienze. Questo nuovo approccio cambia anche il modo di fare laboratorio, seguendo il concetto base secondo cui lo studente costruisce attivamente il proprio apprendimento piuttosto che riceverlo passivamente da una sorgente più autorevole (Trumper, 2003) e incoraggiandolo verso la costruzione delle proprie conoscenze direttamente dalla reale osservazione (Thornton & Sokoloff, 1998) a partire dalla loro visione del mondo (Pope & Gilbert, 1983). Un laboratorio ben progettato può aumentare le conoscenze degli studenti a partire dagli esperimenti reali (Arons A. , 1983). Redish¹¹ (Redish, 1993), un importante sostenitore dell'approccio costruttivista, afferma:

Come docente di fisica non sono soddisfatto di ottenere che i miei studenti memorizzino alcune equazioni ed algoritmi e siano capaci di applicarli in alcuni esempi limitati. Mi piacerebbe che essi capiscano che cos'è la fisica, in che modo lavoro e perché noi crediamo in questo. Mi piacerebbe che capiscano i concetti basilari e le differenti rappresentazioni usate dai fisici e come queste siano legate al mondo reale. Io voglio che essi vedano i legami fra le differenti idee in fisica e costruiscano una forte, accurata ed utile intuizione per i fenomeni fisici.

In accordo con i principi del costruttivismo, *l'American Association of Physics Teachers* ha pubblicato gli obiettivi dei laboratori di fisica (AAPT, 1997; 1998):

Ob.1. "*The art of experimentation*": i laboratori di introduzione alla fisica dovrebbero coinvolgere gli studenti in esperienze significative riguardanti processi sperimentali;

Ob2: "*Experimental and analytical skills*": il laboratorio dovrebbe aiutare gli studenti a sviluppare una vasta gamma di strumenti e di competenze di base della fisica sperimentale e dell'analisi dei dati;

¹¹Tratto da: Robert Resnick Symposium RPI, Troy NY, May, 1993

Ob.3: “*Conceptual learning*”: il laboratorio dovrebbe aiutare gli studenti a padroneggiare i concetti fisici basilari;

Ob.4. “*Understanding the basic of knowledge in physics*”: il laboratorio dovrebbe aiutare gli studenti a comprendere il ruolo delle osservazioni dirette in fisica e distinguere fra le inferenze basate sulla teoria e sui risultati degli esperimenti;

Ob.5. “*Developing Collaborative Learning Skills*”: il laboratorio dovrebbe aiutare gli studenti a sviluppare abilità di apprendimento collaborativo, vitali in molte attività.

Si può quindi parlare di laboratori “*centrati sugli studenti*”, i quali interagiscono con i processi di apprendimento e favoriscono i cambiamenti concettuali. Un laboratorio hands-on può proporre le esperienze necessarie a correggere le concezioni primitive degli studenti (Arons A. , 1983), fornendo abilità e concetti scientifici importanti (McDermott et Al., 1983). Secondo Arons il laboratorio è uno dei pochi luoghi in cui lo studente può veramente coinvolgere se stesso nei processi di scienza: guadagnano un primo apprendimento dei fenomeni fisici, costruiscono le teorie necessarie a comprendere il mondo fisico ed esprimono le loro domande (Arons, 1983; Trumper, 2003; Thornton, 1987). Il pensiero formale può quindi essere introdotto dalle esperienze pratiche all’interno di un percorso di apprendimento spontaneo, che mostra conseguentemente progressi concettuali notevoli e crea quel ponte fra l’esperienza spontanea e l’esperienza scientifica organizzata (Bosio, Michellini et Al., 1999). Il cambiamento concettuale avviene però quando lo studente si rende conto che è necessario introdurre un nuovo concetto e che quest’ultimo è più utile di quello precedente (Hewson & Hewson, 1984).

Accanto alle attività di laboratorio curricolari, negli anni 90’ sono state sviluppate una serie di attività che si svolgevano al di fuori di un contesto formale curricolare, note con il nome di “*Apprendimento Informale*”. Ciò ha condotto ad una serie di studi su attività svolte al di fuori del contesto scolastico: musei, zoo, gite culturali, ecc... Sono così nati una serie di centri di attività hands-on¹² capaci di dare contributi sia in termini di contestualizzazione dei fenomeni (“*una cosa accade in un certo contesto*”), sia lasciando memoria, sempre utile per l’apprendimento (Wellington, 1990). Man mano che la ricerca ha compreso i vantaggi derivanti dall’educazione informale, si è incominciato ad introdurre questo tipo di attività all’interno delle ore scolastiche. Il guadagno principale nell’introdurre gli esperimenti hands-on nel contesto scolastico consiste nel fatto che questi possono essere realizzati anche in classe, ossia nell’ambiente più familiare per gli alunni (Morris, 1990; Hofstein & Rosenfeld, 1996; Anderson, Lucas, & Ginns, 2003),

¹² A tal proposito anche il dipartimento di Fisica dell’UNICAL ha creato, alla fine degli anni 90’ , un centro di attività hands-on dal nome “*Impara Giocando*”, concepito per accogliere visite da parte delle scuole, sia in orari curricolari che in orari extra-curricolari.

in modo tale da creare i migliori presupposti anche psicologici. Infatti, l'apprendimento deve tenere conto anche delle emozioni dello studente, ed è legato ma non determinato dalla relazione fra ambiente esterno ed individuo (Anderson, Lucas, & Ginns, 2003).

Le attività hands-on si pongono quindi come elemento chiave nella risoluzione delle problematiche accennate nell'introduzione relative alla carenza di interesse da parte degli studenti nei confronti della fisica. Infatti, non solo offrono la possibilità di rendere la disciplina molto più intrigante e concreta per tutti gli studenti di ogni livello, quanto consentono di superare altri limiti evidenziati in letteratura, quali per esempio l'introduzione degli studi in fisica nell'età avanzata degli studenti solo dopo avergli fornito opportune basi matematiche. Questo tipo di attività, infatti, consente di avvicinare alla fisica anche ragazzi in età preadolescenziale, poiché si adattano fortemente al carattere dei bambini, esaltandone la naturale curiosità, fornendo così la possibilità di presentare fenomeni sotto forma di giochi, in modo divertente ed eccitante (Michelini & Stefanel, 2006; Corni, Michelini, & Stefanel, 2003; Morris, 1990; Goffredo et Al., 2009; Bonanno et Al., 2010).

Un altro aspetto non marginale che emerge dalle attività di laboratorio hands-on consiste nel fatto che gli studenti apprendono in un contesto sociale (Trumper, 2003). Seguendo il punto di vista del "*costruttivismo sociale*", Vygotskii spiega come l'interazione sociale sia cruciale affinché il discente interiorizzi nuovi o difficili apprendimenti, problemi e processi. Il laboratorio diventa un luogo di interscambio e di esplorazione di idee, un luogo di maturazione personale e di accrescimento cognitivo (Vygotsky, 1978). L'apprendimento diventa quindi un processo in cui il discente è coinvolto in un percorso di costruzione delle conoscenze, negoziando e confrontandosi con i suoi pari e con i docenti (Edwards & Mercer, 1987). Nello stesso tempo gli studenti costruiscono le loro conoscenze nel momento in cui le loro idee vengono valutate, esplorate e supportate in un contesto sociale, quale quello fornito da un laboratorio. Attraverso l'interazione sociale gli studenti diventano consapevoli delle idee degli altri, vanno alla ricerca di conferme delle proprie e rinforzano o rifiutano le loro costruzioni personali di concetti. I lavori di gruppo aiutano nella fase di apprendimento (Novak, 2002) e possono spingere gli studenti verso un alto livello di pensiero (Trumper, 2003). Le discussioni che si svolgono nei lavori di gruppo in laboratorio motivano gli studenti verso le indagini e trasformano i risultati in conoscenza (Mason, 1996). Ne è un esempio concreto il metodo utilizzato da alcuni ricercatori nei corsi di introduzione alla fisica presso l'università di Harvard, noto come "*Peer Instruction*" (Kohlmyer et Al., 2009). Questo progetto ha condotto gli studenti coinvolti verso un significativo guadagno, rispetto ai corsi tradizionali, sia in termini di apprendimento concettuale (misurato attraverso test standard) sia in

termini di abilità di problem solving (Mazur, 1997; Lasry, Mazur, & Watkins, 2008). Dal manifesto del metodo *Peer Instruction* si legge (Mazur, 1996):

“Un problema dell'insegnamento tradizionale risiede nella presentazione del materiale. Spesso, si basa direttamente su libri di testo e/o dispense, dando agli studenti uno scarso incentivo a frequentare le lezioni. La presentazione tradizionale è quasi sempre un monologo di fronte a un pubblico passivo e, solo in casi eccezionali, i docenti sono in grado di mantenere l'attenzione degli studenti per un intero periodo di lezione. È ancora più difficile fornire adeguate possibilità per gli studenti a pensare criticamente attraverso gli argomenti.

Per affrontare queste idee sbagliate sull'apprendimento, abbiamo sviluppato un metodo, *Peer Instruction*, che coinvolge gli studenti nel processo di apprendimento durante le lezioni e focalizza la propria attenzione sui concetti di fondo. Le lezioni sono intervallate da problemi concettuali, ConcepTests [...].

[...] agli studenti sono dati alcuni minuti per riflettere sulla questione e formulare le proprie risposte, altri minuti per discutere le loro risposte in gruppi di 3-4, nel tentativo di raggiungere un consenso sulla risposta corretta. Questo processo li costringe a pensare attraverso gli argomenti sviluppati, e permette loro (così come l'istruttore) di valutare la loro comprensione anche prima di lasciare l'aula”.

Purtroppo i laboratori sono troppo spesso omessi dalle attività curriculari o trascurati poiché molti materiali di laboratorio sono difficili da utilizzare, fragili, inaffidabili o troppo costosi (Thornton, 1987; Woolnough, 1979; Bonanno et Al., 2011). Questi fattori rendono quasi impossibile l'impiego di attività sperimentali in classi troppo numerose, a causa delle scarse risorse economiche da parte delle scuole (Thornton & Sokoloff, 1998). Per ovviare a tale difficoltà è possibile creare esperimenti hands-on utilizzando materiali low-cost, di semplice reperibilità (addirittura materiali di riciclo) o di larga diffusione (Bonanno et Al., 2009a, 2009b). Se si riescono ad utilizzare come materiali didattici oggetti appartenenti alla vita quotidiana o addirittura giochi per bambini, l'interesse che questi destano nei confronti dei discenti che si apprestano ad affrontare un simile laboratorio aumenta in modo consistente, poiché richiama oggetti e contesti ludici a loro molto familiari.

Tutto questo consente da un lato di ridurre drasticamente i costi degli apparati sperimentali, in modo tale da eliminare le problematiche economiche che le scuole sono costrette ad affrontare, soprattutto quando si tratta di allestire attività finalizzate al lavoro di gruppi di studenti molto numerosi. Dall'altro lato, dispositivi così semplici possono essere utilizzati anche in classe, elemento questo importante per un migliore approccio psicologico dei discenti, come evidenziato dalla letteratura precedentemente illustrata. Infine, non ultimo per importanza, è da tenere in considerazione che molte di queste attività possono essere facilmente riprodotte a casa, consentendo agli studenti

di approfondire spontaneamente il processo di formazione in un contesto assolutamente informale quale può essere appunto quello familiare (Bonanno et Al., 2009a). Questo offre la possibilità di investigare ed eventualmente correggere il loro senso comune di interpretazione della fisica, estendendo l'investigazione ai fenomeni riscontrabili nella vita domestica (Thornton, 1987).

Non tutti i laboratori riescono però a creare i presupposti per una partecipazione attiva da parte degli studenti, elemento essenziale come si evince dall'analisi fatta nel paragrafo precedente. Spesso le attività di laboratorio non sono associate con successo ai concetti fisici ed ancora più spesso gli studenti si trovano ad affrontare dispositivi difficili da utilizzare, o esperimenti che richiedono calcoli o elaborazioni di dati troppo lunghe e noiose (Sokoloff, Laws, & Thornton, 2007). E' meglio non inserire nei corsi didattici laboratori di questo tipo, poiché rischiano di scoraggiare gli studenti, di non offrire nuove informazioni riguardanti il mondo che li circonda e potrebbero presentare un'idea sbagliata dei processi della scienza. Questo potrebbe rendere la scienza meno attrattiva e comprensibile per lo studente (Trumper, 2003) e a volte anche molto noiosa, almeno da quello che si evince dai pareri espressi dagli studenti. Problematiche di questo tipo rischiano di essere ingigantite se ad avvicinarsi alle prove sperimentali sono studenti con poca esperienza nelle pratiche laboratoriali e in generale nella fisica. Poiché tali studenti non hanno sviluppato ancora tecniche di laboratorio, abilità di investigazione o familiarità nell'analisi dei dati, è molto difficile progettare esperimenti in cui essi possano essere capaci di formulare domande e risolverle con successo. Questo è uno dei motivi per cui molte attività laboratoriali falliscono l'obiettivo principale di trasmettere il "gusto" delle scoperte empiriche alla maggior parte degli studenti impegnati (Committee of National Research Council on Undergraduate Science Education, 1997). Esperimenti troppo complicati, che richiedono l'utilizzo di manuali che scandiscono "cosa pensare, come pensare e quando pensare", perdono essenzialmente l'impatto di interesse verso lo studente (Pushkin, 1997). Anche Arons concorda con la visione secondo cui esperimenti di laboratorio rigidamente controllati e diretti sono noiosi e producono poco in termini di sviluppo dei concetti nell'apprendimento della fisica. D'altra parte, ritiene che l'altro estremo di completa libertà, in cui gli studenti svolgono le proprie ossevazioni, indagini e sintesi finali, sia sconsigliato (Arons A. B., 1993). Alcuni laboratori guidati dai metodi di Arons incoraggiano il ragionamento critico e quantitativo, altri enfatizzano dimostrazioni di principi o sviluppi di tecniche di laboratorio e altri ancora aiutano gli studenti ad accrescere il loro apprendimento dei concetti fondamentali. Come esempio più illustre basti pensare al programma "Physics by Inquiry"¹³ dell'università di Washington (McDermott et al., 1996). Il

¹³ Vedi appendice A per maggiori dettagli.

successo di laboratori come *Physics by Inquiry* è sintetizzato dalle parole di Redish (Redish, 1993): “*sono laboratori centrati sullo studente*”. Gli studenti diventano attivi partecipanti nei processi di apprendimento in cui esplorano il mondo fisico, analizzano dei dati, sviluppano delle conclusioni e generalizzano le loro nuove conoscenze scientifiche collegandole ai fenomeni appartenenti alla vita di tutti i giorni.

1.2.2 Strumenti multimediali e laboratori on-line

Le finalità dei laboratori di introduzione alla fisica sono di creare le basi per successivi studi della disciplina e contemporaneamente di stimolare l'interesse degli studenti verso questi argomenti (Sokoloff, Laws, & Thornton, 2007). Ciò nonostante, come già ribadito, l'idea più diffusa fra gli studenti è quella di una disciplina molto noiosa e tediosa (Sokoloff et Al., 2007; Bonanno et Al., 2009a; Mazur, 1997). Diventa quindi essenziale rivitalizzare sia i corsi sia i laboratori tradizionali per avere uno sviluppo a medio-lungo termine della fisica come disciplina. Per costruire quindi nuovi programmi di laboratorio, capaci di superare le problematiche illustrate, è necessario tenere in considerazione gli sviluppi raggiunti dalle nuove tecnologie e contemporaneamente le nuove conoscenze emerse da tanti anni di ricerca in didattica a livello internazionale, relative agli apprendimenti degli studenti. È ben dimostrato, infatti, che i laboratori “*RealTime*” possono condurre a risultati entusiasmanti sia in termini di apprendimento degli studenti, sia in termini di rivitalizzazione del concetto della fisica (Sokoloff, Laws, & Thornton, 2007). D'altra parte una vastissima letteratura internazionale ha mostrato i vantaggi dell'utilizzo del computer come valore aggiuntivo per insegnare la fisica (vedi per esempio Grayson & McDermott, 1996; Thornton & Sokoloff, 1990; Michelini, 1992).

Per rendere i laboratori coinvolgenti ed efficaci per lo sviluppo di un'utile intuizione scientifica, gli studenti hanno bisogno di potenti strumenti scientifici, semplici da usare, attraverso cui raccogliere dati e mostrarli in modo da essere manipolati, ricordati o su cui si può ragionare. Per permettere agli studenti di concentrarsi sull'idea scientifica, obiettivo della loro investigazione, questi strumenti devono eliminare il noioso lavoro associato alla raccolta e all'elaborazione dei dati raccolti. Per evitare di fornire dei “*ricettari*” da seguire durante l'attività di laboratorio è necessario che questi nuovi strumenti siano strutturati in modo tale da incoraggiare un approccio esplorativo verso la scienza” (Thornton, 1987).

Anche Thornton nell'articolo appena citato fa riferimento a strumenti che attingono alle nuove tecnologie, in particolare all'informatica. Si tratta di nuovi strumenti didattici che utilizzano software di elaborazione semplificati, che propongono ambienti di lavoro simili a quelli utilizzati dalla ricerca e che

semplificano notevolmente il lavoro di elaborazione degli studenti. Questo insieme di metodi e tecnologie viene indicato con l'acronimo TIC (Tecnologia dell'Informazione e della Telecomunicazione)¹⁴. La vastissima ricerca internazionale ha messo in evidenza i grandi vantaggi che le TIC introducono nei processi di insegnamento/apprendimento a vari livelli. Sono state sviluppate simulazioni, applet, esperimenti virtuali, riprese video di esperimenti reali, sistemi di acquisizione on-line e di elaborazione dati tramite software semplici da utilizzare, piattaforme on-line su cui sviluppare un intero percorso di formazione, Lavagne Interattive Multimediali (LIM) e software capaci di interagire istantaneamente con gli studenti attraverso l'uso di risponditori, ossia di telecomandi interattivi con caratteristiche molto simili ad oggetti familiari agli studenti come i telefonini (questi consentono di rispondere istantaneamente a dei questionari proposti agli studenti attraverso risposte multiple, oppure risposte aperte con tecnologia di digitazione del testo identico a quello degli sms dei telefonini, attività molto familiare ai ragazzi). Tutti questi esempi consentono di rendere più interattiva la didattica e più interessanti le attività di laboratorio. In particolar modo, gli esperimenti on-line risultano essere un supporto molto importante nell'apprendimento dei concetti fisici, poiché consentono di seguire in tempo reale l'evoluzione dei fenomeni (Michelini, 2007; Bonanno et Al., 2011; Bosio, Michelini, et Al., 1996; Gervasio, Michelini et Al., 2008; Bonanno et Al., 2009; Bonanno et Al., 2011) e di sviluppare indagini qualitative istantaneamente ed anche quantitative attraverso semplici software capaci di eliminare le problematiche relative alla difficoltà dei calcoli sperimentali, spesso complicati e noiosi (Thornton, 1987). La visualizzazione dei dati in tempo reale facilita la correlazione tra l'evoluzione del fenomeno e quella delle grandezze che lo descrivono (Michelini, 2007).

Fra questi strumenti, sono particolarmente importanti i sistemi di acquisizione dei dati on-line, basati su computer e sensori semplici da utilizzare ma che permettono di effettuare misure molto accurate di diverse grandezze fisiche (Michelini, 2007; Sokoloff, Laws, & Thornton, 2007). Il rapido sviluppo delle tecnologie ha portato a ridurre drasticamente i costi dei personal computer a punto tale da poterlo considerare un oggetto di larga diffusione, presente in quasi tutte le abitazioni dei paesi sviluppati. Per far sì che i contributi delle TIC siano più ampi possibile è necessario proporre esperienze che prevedano la sperimentazione diretta da parte degli studenti, nell'applicare quanto appreso in ambienti diversi, attraverso l'uso di software altamente interattivi che consentono un apprendimento individualizzato (Michelini, 1992). In conclusione, sebbene il computer non può sostituire i laboratori hands-on (McDermott, 1990), può aiutare a superare molte delle problematiche

¹⁴ In inglese "Information and Communication Technology – ICT)

emerse dalla ricerca internazionale precedentemente illustrate, come ben sintetizzato da Michelini già nel 1992 (Michelini, 1992):

Le motivazioni di base che orientano all'introduzione dell'elaboratore nel laboratorio scolastico sono sostanzialmente di tre ordini: sociale, metodologico-disciplinare e pratico.

Nella vita quotidiana ci stiamo sempre più abituando ad oggetti programmabili: dal riscaldamento domestico ai videoregistratori, dai forni di cucina alle automobili. La funzionalità di molti apparati di uso quotidiano è destinata ad essere ottimizzata dall'impiego dei microprocessori. E' quindi importante sul piano sociale preparare i giovani a tale continua evoluzione con informazioni ed esperienze adeguate, e soprattutto metodologie e strumenti critici per comprendere ed usare tali apparati. Nei laboratori di ricerca oggi l'elaboratore gestisce le misure e costituisce parte integrante del metodo di indagine: se si vuole dare ai giovani un'idea di cosa sia la fisica in termini di contenuti e metodi che la caratterizzano, si deve fornire loro anche esperienza di esperimenti in linea. Ciò può essere realizzato anche impiegando sistemi molto semplici, in modo da smitizzare le "scatole nere" o l'elaboratore come "strumento magico". Sul piano pratico l'esperimento in linea offre diversi vantaggi: efficienza, snellimento e guadagno di tempo nella procedura di misura, affidabilità, precisione e riproducibilità dei dati. Se viene introdotto nell'ambito di una attività gestita e controllata dalla classe o dai singoli allievi può potenziare in molti modi l'efficacia del lavoro in classe, oltre ad offrire nuove occasioni di apprendimento. L'esperimento in linea inoltre consente un parziale superamento dei problemi derivanti dalla mancanza di mezzi nelle attuali strutture scolastiche, perchè misure piuttosto raffinate diventano facilmente eseguibili a costi limitati, contemporaneamente facilita, in relazione alle caratteristiche del software di gestione, un più immediato e diretto contatto col fenomeno, prospettando un modo nuovo di concepire il laboratorio: più aperto alla personale costruzione delle idee.

E' possibile quindi fornire anche alle scuole laboratori molto complicati a basso costo, semplificando l'analisi dei dati e favorendo la riproducibilità degli esperimenti proposti. Grazie ad idee di questo tipo, è stato possibile negli anni strutturare percorsi didattici nelle scuole su argomenti che nei tempi passati non venivano nemmeno accennati agli studenti, perché troppo complicati da introdurre a causa spesso di un grande formalismo matematico necessario per la loro trattazione. A tal proposito, basti ricordare il progetto europeo SUPERCOMET (e le successive evoluzioni SUPERCOMET², MOSEM e MOSEM²)¹⁵, pensato per introdurre il tema della superconduttività nella scuola

¹⁵ Il gruppo di ricerca in didattica dell'Università della Calabria è partner ufficiale nelle ultime due versioni del progetto, MOSEM e MOSEM²

secondaria, argomento molto ostico da comprendere anche per studenti universitari di fisica con ben altro tipo di competenze.

Un altro aspetto non marginale in cui è possibile constatare i benefici derivanti dall'utilizzo dei computer emerge nell'ambito delle indagini (McDermott, 1990). Si è capito infatti che le indagini basate sull'utilizzo dei PC offrono notevoli vantaggi in quanto è possibile proporre lo stesso problema a tutti gli studenti nello stesso modo, grazie alla semplicità delle simulazioni di situazioni fisiche reali e alla loro riproducibilità. Esse infatti non richiedono grandi interventi da parte di chi conduce le indagini e questo garantisce una grande oggettività all'intervista condotta. Inoltre, i parametri possono essere cambiati molto più facilmente nelle simulazioni rispetto ad alcuni esperimenti reali e questo aiuta a superare problematiche relative alla mancanza di tempo nei corsi tradizionali oppure alla demoralizzazione e demotivazione che subentra negli studenti nel momento in cui devono effettuare diverse prove in esperimenti di per sé molto complicati da realizzare (Grayson & McDermott, 1996).

Capitolo 2: Problemi di apprendimento in elettromagnetismo

Nel primo capitolo è stata trattata la problematica relativa alle idee che gli studenti possiedono, anche prima di incominciare gli studi, su come i sistemi fisici si comportano; idee spesso differenti da quelle accettate nel mondo accademico come “*pensiero formale*”. Conseguentemente è stata espressa fortemente la necessità di stimolare gli studenti verso un cambiamento concettuale che possa, a partire dai loro preconcetti, condurli verso una visione scientifica dei fenomeni fisici. Sono state inoltre analizzate le lacune dovute ad una didattica tradizionale molto statica, in cui il discente assume un ruolo di contenitore passivo. Tali lacune, soprattutto negli anni 80' e 90', sono emerse da studi sui problemi di apprendimento riguardanti la cinematica e le leggi di Newton, conducendo ad un'approfondita conoscenza delle relative idee di senso comune degli studenti. Meno spazio è stato dedicato, soprattutto nella prima fase dello sviluppo del pensiero costruttivista, ai fenomeni relativi all'elettricità ed al magnetismo, come si evince dalla letteratura internazionale (Maloney et Al., 2001). Per questo motivo, dalla metà degli anni 90' in poi, una delle sfide principali è diventata l'analisi dei ragionamenti spontanei degli studenti sull'elettromagnetismo, su cui ben poco si conosceva¹⁶. L'elettricità ed il magnetismo, infatti, rappresentano un'area molto più ampia e si basano sulla comprensione di altri domini, quali forze, moto ed energia (Guisasola et Al., 1999; Maloney et Al., 2001). Inoltre, mentre gli studenti hanno familiarità con i fenomeni, linguaggi e concetti coinvolti nell'ambito della meccanica, lo stesso non si può dire nell'ambito dell'elettromagnetismo. Ciò introduce alla tematica del rapporto fra l'esperienza verso il fenomeno ed il formalismo, dove per formalismo si intende il modo di esprimere il concetto in termini matematici, di introdurre i principi e le relazioni (Maloney et Al. 2001). Diventa quindi

¹⁶ Per esempio, basti ricordare la ricerca condotta dal gruppo di ricercatori in didattica della fisica dell'università di Washington, agli inizi degli anni 90' (McDermott & Shaffer, 1992).

essenziale bilanciare bene questo rapporto, visto che è stato ampiamente dimostrato come l'istruzione tradizionale enfatizzi abbondantemente il formalismo al di sopra del fenomeno. L'elettromagnetismo si presta particolarmente ad una trattazione formale, visto il suo ampio raggio di concetti e principi coinvolti, spesso troppo astratti per la visione degli studenti, spingendo in molti casi docenti e discenti a focalizzare la loro attenzione solo a risolvere esercizi standard, senza giungere ad una comprensione dei fenomeni coinvolti e senza avere l'abilità di applicare correttamente gli stessi concetti in problemi o situazioni differenti da quelli utilizzati per introdurre i fenomeni¹⁷ (McDermott & Shaffer, 1992; Bagno & Eylon, 1997). Questo tipo di difficoltà emerge principalmente quando si chiede agli studenti di eseguire compiti qualitativi (Bagno & Eylon, 1997).

Quanto detto è confermato da alcuni studi specifici sui nodi concettuali relativi ad elettricità e magnetismo, dai quali emerge che alcune "misconceptions" degli studenti sull'elettricità sono diffuse anche fra coloro i quali hanno completato studi tradizionali sugli argomenti principali correlati. Alla stessa conclusione si è giunti considerando studenti provenienti da paesi differenti con sistemi di istruzione anche molto diversi fra loro (McDermott & Shaffer, 1992).

2.1 Nodi concettuali sui fenomeni magnetici

Sulla base di alcune ricerche condotte negli Stati Uniti agli inizi degli anni 90¹⁸, Bagno ed Eylon hanno condotto un'indagine su studenti di scuola secondari basata su tre aspetti legati alla rappresentazione delle conoscenze: (1) struttura delle conoscenze, (2) comprensione delle idee centrali e (3) relazione fra apprendimento concettuale e applicazione in problem solving. Da questa indagine emergono alcune difficoltà relative alla comprensione delle idee centrali (per esempio le equazioni di Maxwell, espresse qualitativamente) ed applicazione in attività di problem solving. Sebbene l'obiettivo di un corso avanzato di scuola superiore sull'elettromagnetismo dovrebbe essere quello di apprendere ed applicare concetti e relazioni astratte, questi corsi in genere coinvolgono trattazioni matematiche e sofisticate prove di attività di problem

¹⁷ Questo problema, oltre ad essere ben trattato nella letteratura internazionale più autorevole, è sperimentato da docenti impegnati nelle esercitazioni di fisica per corsi universitari (presso l'Università della Calabria). In moltissime occasioni, anche oggi, ci si è trovato di fronte a studenti con ottime abilità nella risoluzione di esercizi, ma con forti lacune concettuali, anche su principi fondamentali usati per la soluzione degli esercizi. In alcuni casi, è bastato porre il quesito in modo leggermente diverso rispetto alla formulazione standard per mettere in crisi l'abilità di risoluzione degli studenti (per esempio invece di moto circolare, in una prova di esame ritenuta molto difficile dagli studenti, si parlava di moto di un satellite artificiale intorno alla terra – prof. A. Sindona).

¹⁸ (Reif, 1995) e (McDermott & Shaffer, 1992)

solving. Alle difficoltà matematiche bisogna aggiungere il fatto che l'elettromagnetismo presenta difficoltà notevoli per gli studenti in quanto i concetti coinvolti non appartengono alle esperienze di vita quotidiana, almeno non a quelle che si possono vedere immediatamente. E' plausibile pensare, quindi, che gli studenti non formino un'adeguata rappresentazione qualitativa delle conoscenze in questo dominio e che, come risultato, possano avere difficoltà nell'usare praticamente ed assimilare le conoscenze (Bagno & Eylon, 1997).

Oltre a problemi generici sulle relazioni chiave dell'elettromagnetismo, la letteratura internazionale ha messo ben in luce alcuni nodi concettuali relativi ai campi elettrici e magnetici. Fra questi è interessante puntare l'attenzione sui problemi di apprendimento legati all'introduzione del concetto di Induzione Elettromagnetica, argomento di grande attualità ed utilità nella vita quotidiana, ma in egual misura difficile da comprendere per gli studenti.

Per esempio, gli studenti incontrano notevoli difficoltà nell'apprendere il concetto di campo inteso come una perturbazione che si propaga nel vuoto o nella materia con una velocità finita (Stefanel, 2008), oppure come proprietà dello spazio intorno ad un magnete o ad un filo percorso da corrente e non come entità fisica (Michelini & Viola, 2008) o ancora, nel riconoscere le sorgenti di campo (Michelini & Viola, 2008), prerequisito basilare per una comprensione significativa dei fenomeni elettromagnetici (Guisasola, Almudi, & Ceberio, 1999). Guisasola afferma infatti che "una buona comprensione di campo magnetico o sorgente di campo magnetico, insieme al modello unificante di sorgenti di campo magnetico (magnete o corrente elettrica), sono necessarie se vogliamo avviare gli studenti verso una visione scientifica dei fenomeni elettromagnetici" (Guisasola, Almudi, & Zubimendi, 2004). Sempre nell'ambito delle sorgenti di campo, nel riconoscere le proprietà magnetiche di un magnete gli studenti hanno spesso difficoltà a spiegare perché esso è una sorgente di campo magnetico (Guisasola, Almudi, & Ceberio, 1999). Fra le motivazioni date emerge l'idea secondo cui i poli magnetici sono delle regioni con degli eccessi o dei difetti di cariche elettriche (Maloney, 1985; Guisasola et Al., 2004) e quindi poli uguali si respingono e poli opposti si attraggono (Borges & Gilbert, 1998). Questo introduce al concetto più generico di interpretazioni dei fenomeni magnetici attraverso similitudini con il modello del campo elettrico (Maloney et Al., 2001), tematica molto diffusa per analizzare molti fenomeni. Per esempio, l'idea che una carica risente dell'azione del campo magnetico, anche se in quiete (Guisasola, Almudi, & Zubimendi, 2004), o comunque che il movimento della carica non è un fattore determinante (Maloney et Al., 2001), oppure che una carica elettrica genera un campo magnetico sia se in quiete sia se in movimento (Guisasola et Al., 2004; Borges & Gilbert, 1998), o ancora la confusione del campo elettrico con il campo magnetico, attribuiti alla stessa sorgente, o che conducono a forze della

stessa natura (la forza dovuta al campo magnetico come una forza Coulombiana centrale -Guisasola, Almudì, & Zubimendi, 2004). All'interno di questa categoria ci sono interpretazioni di fenomeni più complessi quali per esempio la magnetizzazione della materia, secondo cui è possibile spiegare l'attrazione di una graffetta metallica da parte di un magnete a causa dell'induzione elettrica. Alcuni ricercatori hanno addirittura mostrato come sia insegnati che studenti usavano l'induzione elettrica per spiegare come un magnete attira un ferromagnete (Guisasola et Al., 2004; Borges & Gilbert, 1998). Più in generale, si parla del problema di comprendere l'interazione di un campo magnetico con la materia. Fra i diversi modelli interpretativi trovati, oltre al modello elettrico (poli carichi elettricamente che interagiscono con la materia) ed all'induzione elettrica, emergono idee secondo cui un magnete è capace di attrarre degli oggetti, o è circondato da una *nuvola* o *sfera di influenza* e gli oggetti che stanno all'interno di questa *nuvola* sono attratti, o ancora attrae a causa di una relazione simile ad un campo, attraverso cui il magnete influenza i singoli dipoli presenti all'interno della materia che lo circonda (Borges & Gilbert, 1998).

Un altro nodo concettuale molto importante si incontra nell'analisi e comprensione del concetto di linee di campo, viste come grandezze reali da alcuni studenti (Thong & Gunstone, 2008). Questa concezione è simile all'idea proposta da Faraday, il quale “sembra aver attribuito molta più concretezza alle linee di campo di quanto non sia accettato oggi dalla comunità internazionale”¹⁹ (Tornkvist, Pettersson, & Transtromer, 1993). La similitudine fra gli approcci spontanei degli studenti ed il pensiero dei fisici che per primi hanno analizzato il fenomeno è un'idea che viene messa in risalto da alcuni ricercatori in didattica, a testimonianza del fatto che gli studenti si trovano a dover affrontare difficoltà simili a quelle incontrate dai fisici nell'analizzare inizialmente diversi fenomeni (Thong & Gunstone, 2008) e se è vero che il modo di risolvere i problemi fra i fisici esperti ed i ragazzi è diverso, è ragionevole anche pensare che i processi di ragionamento siano abbastanza simili (Borges & Gilbert, 1998).

Per quanto riguarda le linee di campo magnetico esse vengono confuse con le linee di forza e di conseguenza, si pensa che attraggono o respingono anche le cariche in quiete (Guisasola et Al., 2004; Tornkvist et Al., 1993). E' necessario quindi sia far comprendere agli studenti l'idea delle linee di campo come proprietà dello spazio attorno al magnete o ad un filo percorso da

¹⁹ Maxwell scrive nella “*Preface to A Treatise on Electricity and Magnetism*”(1881): “Faraday nella sua mente vedeva linee di forze attraversare tutto lo spazio in cui i matematici vedevano centri di forza attrarsi ad una certa distanza; Faraday vedeva un mezzo dove essi non vedevano niente a parte la distanza; Faraday cercava la sede dei fenomeni in azioni reali in corso nel mezzo, essi erano soddisfatti di aver trovato questo in un potere di azione a distanza impresso nei fluidi elettrici”.

corrente, sia rappresentarle graficamente in modo semplice ed adeguato, analizzandone simmetrie e caratteristiche principali (Michelini & Viola, 2008).

Un'altra categoria di studenti, che utilizza l'idea di linee di campo come grandezze reali, pensa che il loro *contatto* con una spira sia necessario per ottenere una forza elettromotrice indotta (Thong & Gunstone, 2008). Questo introduce un importantissimo nodo concettuale legato ad una delle leggi più importanti dell'elettromagnetismo, cioè la legge di Faraday-Neumann-Lenz legge dell'induzione elettromagnetica. Essa ha stimolato moltissimo l'interesse dei ricercatori in didattica della fisica a livello internazionale, sia perché offre la possibilità di numerosi collegamenti con altri rami della fisica (il più semplice è il tema della conservazione/trasformazione di energia) o di altre materie a causa delle sue più svariate applicazioni nella vita quotidiana, sia per le tante difficoltà incontrate dai discenti nell'affrontarla (Bonanno et Al., 2011; Michelini & Viola, 2008; Stefanel, 2008; Bonanno et Al., 2009). I problemi concettuali incontrati dagli studenti sono veramente tanti e di diversa natura. Oltre a quella accennata in precedenza, relativa al contatto delle linee di campo con la spira, un'idea molto diffusa è quella secondo cui una corrente è indotta a causa del moto relativo fra spira e magnete (Maloney et Al., 2001). Entrambe queste concezioni mostrano una grossa difficoltà da parte dello studente nell'identificare il ruolo centrale del flusso del campo magnetico e della sua variazione nel tempo nel fenomeno dell'induzione elettromagnetica (Bonanno et Al., 2011). Questo punto centrale, non semplice da affrontare, comporta anche altre difficoltà di apprendimento, per esempio la comprensione del segno meno nella legge di Faraday, ossia la legge di Lenz, e conseguentemente la difficoltà nello stabilire il verso della corrente indotta (Jones, 2003) o della direzione del campo magnetico indotto. Un esame dei testi scolastici più autorevoli, infatti, suggerisce frasi quali "la corrente indotta si oppone a ciò che la causa", troppo vaghe e spesso mal interpretate dagli studenti. Per esempio "opporsi al cambiamento" viene interpretato come "essere nella direzione opposta" (Bagno & Eylon, 1997; Michelini & Viola, 2008).

Un altro problema interessante da considerare è legato al concetto di forza elettromotrice indotta (*f.e.m.*). C'è grande confusione infatti fra la differenza di potenziale e la forza elettromotrice indotta (Thong & Gunstone, 2008; Peters, 1984; Michelini & Viola, 2008; Lanzara & Zangara, 1995).

Alcuni ricercatori in didattica hanno affrontato il tema del legame che esiste fra la legge di Faraday-Lenz e la forza di Lorentz. Mentre è noto in letteratura come sia possibile ricavare la *f.e.m.* nel caso di un circuito chiuso in moto all'interno del campo magnetico, sia partendo dall'applicazione della legge di Faraday-Neumann-Lenz sia dall'applicazione della forza di Lorentz (Purcell – La Fisica di Berkeley, 1994; Galili et Al., 2006), non è altrettanto semplice affrontare allo stesso modo il problema di un conduttore in moto

all'interno di un campo magnetico, come per esempio il disco di Faraday²⁰ (Galili, Kaplan, & Lehavi, 2006). Alcuni ricercatori hanno proposto un approccio di unificazione dell'elettromagnetismo pensando alla forza magnetica ed all'induzione elettromagnetica attraverso un approccio relativistico qualitativo: la forza di Lorentz ed il ruolo del flusso magnetico sono trattati in modo simile collegando i fenomeni elettrici e magnetici (Galili & Kaplan, 1997).

Sempre nell'ambito del campo magnetico, un altro problema di apprendimento consiste nella comprensione della regola della mano destra (Guisasola et Al., 1999; Maloney, 1985). Molti studenti incontrano notevoli difficoltà nel comprendere ed applicare tale regola oppure, anche se la applicano correttamente, non sempre è chiara l'interpretazione di questa relazione. Alcuni studenti infatti, affermano che il moto di una particella carica all'interno di un campo magnetico è sempre circolare; questo dovuto probabilmente al fatto che quasi tutti gli esercizi proposti riguardano particelle cariche che entrano in un campo magnetico con una velocità perpendicolare al campo stesso (Bagno & Eylon, 1997). Certamente la natura tridimensionale delle interazioni magnetiche complica notevolmente l'interpretazione visiva e conseguentemente la comprensione intuitiva dei fenomeni analizzati (Maloney, 1985).

Altri problemi di apprendimento relativi al campo magnetico sono in comune a ben noti nodi concettuali relativi al campo elettrico²¹, quali il mancato riconoscimento dell'interazione reciproca, per esempio fra due fili percorsi da corrente (Stefanel, 2008). Questo porta ad un problema più ampio, ben evidenziato in letteratura, secondo cui il terzo principio della dinamica non viene esteso a campi elettrici e magnetici (Maloney, O'Kuma, Hieggelke, & Van Heuvelen, 2001). Anche nel campo elettrico, così come in quello magnetico, si incontrano difficoltà nel visualizzare e rappresentare le sorgenti di campo e la loro natura (Stefanel, 2008). Nell'ambito delle sorgenti di campo, uno dei nodi concettuali più importanti è il principio di sovrapposizione dei campi, ben analizzato in letteratura nel caso del campo elettrico (Reinson, Transtromer, & Viennot, 1994) ma facilmente estendibile al caso magnetico, dove bisogna tenere in conto del campo magnetico terrestre o di contributi di altri campi. Più in generale, gli studenti possiedono un'idea statica del campo che risulta tra l'altro anche ben supportata dai libri di testo (Bagno & Eylon, 1997). Per esempio, nell'elettrostatica il campo elettrico è presentato come un "applicatore di forza" ed i classici problemi del tipo: "4 cariche ai vertici di un rettangolo [...]" oppure delle cariche "che muovono o entrano in una regione

²⁰Galili et Al. propongono un approccio relativistico non banale, i cui dettagli si trovano nell'articolo citato.

²¹ Alcuni ricercatori pensano infatti che i problemi di apprendimento nello studiare il magnetismo e l'elettromagnetismo siano correlati (Borges & Gilbert, 1998)

dello spazio dove è presente un campo elettrico [...]" accentuano questa idea. Infatti, in questi problemi non viene mai chiesto di stabilire cosa succede al campo elettrico che era presente prima senza la nuova carica, ma vengono solo chiesti gli effetti su quest'ultima: la velocità, l'energia, il campo elettrico totale generato da una distribuzione di cariche ecc [...] (Bagno & Eylon, 1997). Esempi simili possono essere riscontrati in altri ambiti relativi ai campi elettrici e magnetici.

Capitolo 3: Nuovi esperimenti hands-on sull'elettromagnetismo

Come accennato nel capitolo precedente è necessario scegliere le attività sperimentali semplici da utilizzare e poco costose da poter essere introdotte in classe. Infatti, le scarse risorse economiche delle scuole non consentono di allestire laboratori particolarmente sofisticati e costosi, limitando di fatto la possibilità di avviare nuovi curricula didattici. Per risolvere tale problema, sono stati allestiti diversi apparati sperimentali utilizzando materiali di semplice reperibilità (anche di riciclo), affiancati a nuove tecnologie, quali applet opportunamente strutturate, sistemi hardware di larga diffusione per l'acquisizione dei dati e software gratuiti ("*home made*", disponibili su ogni pc domestico o reperibile in rete) per l'analisi e l'elaborazione dei dati. I dispositivi prodotti, illustrati nei paragrafi seguenti, consentono di studiare ed analizzare fenomeni legati all'induzione elettromagnetica ed offrono notevoli spunti con altri domini della fisica, quali energia e sue varie forme di trasformazione, vari esempi di moto del punto materiale (moto rettilineo uniforme, moto rettilineo uniformemente accelerato e moto circolare), dinamica del punto materiale e del corpo rigido.

3.1 Turbina a vento di Savonius

L'apparato sperimentale riproduce una rudimentale turbina a vento di Savonius, storicamente uno dei primi dispositivi capaci di sfruttare l'energia del vento (turbina ad asse di rotazione verticale). La turbina a vento di Savonius è un dispositivo detto "turbina ad S" inventato nel 1922 dall'ingegnere finlandese Sigurd J. Savonius. Esso è caratterizzato da un basso impatto ambientale e di rumore ed è facilmente integrabile negli edifici senza

danneggiare l'estetica, al contrario delle normali turbine eoliche ad asse orizzontale.

Questo dispositivo consente di affrontare il tema delle energie alternative, problematica di grande attualità negli ultimi anni e presente in tantissimi dibattiti sia fra gli addetti ai lavori e sia fra le persone comuni, a causa della crisi energetica planetaria che spinge la ricerca verso nuove forme di energia (Bonanno et Al., 2009a). L'apparato consente, oltre a un'immediata applicazione e comprensione della legge di Faraday-Neumann-Lenz, di introdurre le tematiche delle energie rinnovabili a qualsiasi fascia di studenti, dalla primaria alla secondaria²².

“Il concetto di energia gioca un ruolo cruciale nella scienza ed è fondamentale in tutti i curricula didattici... Perciò, il tema delle energie pulite e rinnovabili sta assumendo un ruolo centrale nelle scuole italiane, a causa del suo impatto sociale ed economico, legato al problema energetico” (Heron, Michellini, & Stefanel, 2008).

Più in generale, consente una applicazione immediata del concetto della trasformazione dell'energia, argomento che ricopre un ruolo fondamentale nella ricerca in didattica della fisica: molti illustri ricercatori, analizzando i nodi concettuali legati all'energia (Millar, 2005; Brook & Wells, 1988; Heron et Al., 2008; Kaper & Goedhart, 2002a-b; Trumper, 1996) hanno messo in evidenza le difficoltà della didattica tradizionale nell'affrontare il tema della produzione e trasformazione di energia.

La sua semplice realizzazione consente agli studenti di verificare il funzionamento della legge dell'induzione elettromagnetica e di capire quali sono le grandezze fisiche necessarie per questo fenomeno fisico. I materiali utilizzati, vicini alla vita di tutti i giorni dei ragazzi, stimolano fortemente la loro curiosità e il loro interesse a punto tale da adattarsi bene a studenti di qualsiasi classe, a cominciare dalle scuole elementari dove i bambini sono naturalmente spinti da una grande curiosità nell'esplorare i fenomeni della vita quotidiana. Questo consente di superare uno dei problemi della didattica tradizionale, ben evidenziato dai paragrafi introduttivi, legato alle difficoltà di trovare il modo appropriato per introdurre la fisica anche nelle scuole primarie, senza aspettare di fornire agli studenti delle basi matematiche capaci di supportare formalmente i concetti fondamentali. È necessario infatti, introdurre prima possibile i concetti e le leggi più importanti, almeno qualitativamente, e legarli alla vita di tutti i giorni per poi strutturare meglio il pensiero formale e facilitare quei cambiamenti concettuali tanto acclamati dalla letteratura internazionale.

²² Al congresso SIF 2008 il dispositivo è stato presentato insieme ad altri apparati sperimentali costruiti con materiali presi in cucina, in un lavoro dal titolo “La fisica in barattolo”, premiato come secondo miglior contributo nella sessione “Storia e Didattica della Fisica”.

In questo modo, oltre ad avere una grande importanza da un punto di vista didattico, l'esperimento può aiutare a sviluppare un percorso didattico finalizzato a promuovere nelle scuole il concetto delle energie alternative, in modo che gli studenti possano essere guidati verso un atteggiamento quotidiano sensibile alle tematiche ecosostenibili.

3.1.1 Descrizione del dispositivo

La costruzione di questo semplice dispositivo, il cui fine è quello di illuminare un piccolo LED, consente un'esplorazione di differenti argomenti didattici, specialmente quelli relativi ai nodi concettuali dell'elettromagnetismo (Bonanno et Al., 2009a). L'apparato sperimentale è composto da materiali low cost di semplice reperibilità, alcuni addirittura di riciclo (Fig. 1):

- 1 ferro per la lavorazione della lana
- 1 contenitore di Pringles
- 3 tappi di bottiglia
- 3 rotoli di cerotto
- 6 Geomags
- 1 contenitore di CD
- 1 asciugacapelli

Il primo step per la costruzione della turbina è la struttura in legno (Fig. 2). Le due boccole per l'asse di rotazione sono ricavate attraverso la base del contenitore di CD (fissata sulla struttura in legno) e tramite un foro praticato sulla parte superiore della struttura in legno.



Fig. 1: Materiale Low-Cost per la costruzione della Turbina a vento ad asse verticale di Savonius

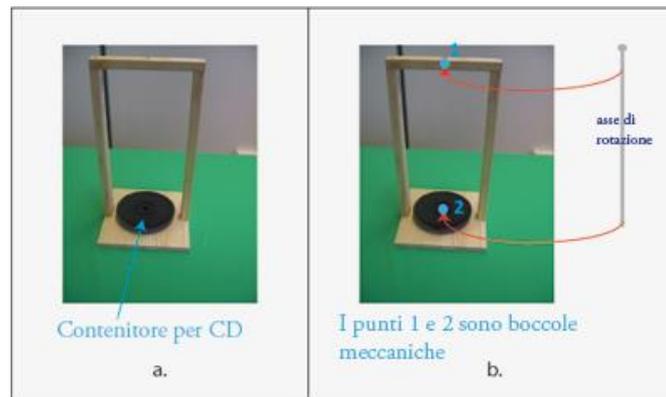


Fig. 2: Struttura di sostegno in legno. Le boccole sono costituite da un foro praticato sulla parte superiore della struttura in legno e dal fondo del contenitore di CD.

Un secondo step porta alla costruzione delle pale della turbina, attraverso l'utilizzo di un contenitore di Pringles tagliato a metà lungo la sua sezione verticale (Fig. 3a). Le due pale semicilindriche vengono fissate all'asse di rotazione (ferro per la lana – Fig. 3b) così come descritto dal modello originario di Savonius secondo cui il rapporto fra la distanza (e) fra gli estremi dei due semicilindri ed il diametro (D) del cilindro immaginario che contiene le due pale è pari ad $1/3$ (Fig. 3d).

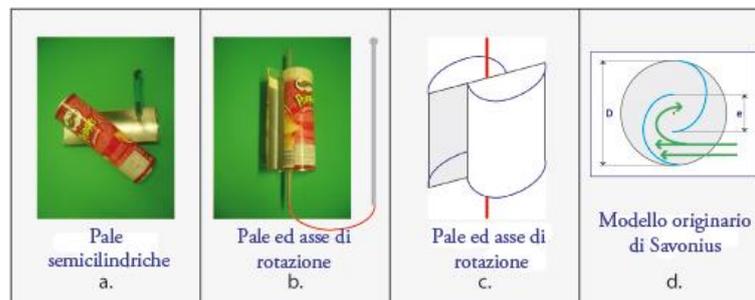


Fig. 3: Costruzione delle pale della turbina di Savonius

Il terzo step mostra come sia possibile ricavare magneti di una certa intensità tagliando dei piccoli Geomags (Fig. 4a). I piccoli magneti ricavati dai Geomags vengono incollati attraverso la colla istantanea su un tappo di bottiglia (Fig. 4b). In questa fase gli studenti possono sperimentare l'attrazione o la repulsione tra i poli magnetici, uno dei nodi concettuali ben presente in letteratura. I magneti così ottenuti sono fissati a loro volta al di sotto delle pale eoliche (Fig. 4d) attraverso un coperchio di porta CD (Fig. 4c), in modo tale da poter ruotare assieme ad esse sotto l'azione del vento.



Fig. 4: Tagliando i Geomags è possibile ricavare dei piccoli magneti (a), i quali vengono incollati ad un tappo di bottiglia per ottenere un magnete più grande (b). I magneti ottenuti sono fissati alla base delle pale eoliche (d) attraverso un coperchio di porta CD (c), in modo da poter ruotare assieme ad esse sotto l'azione del vento.

L'ultimo step prevede la costruzione delle bobine utilizzando dei rotoli di cerotto (Fig. 5a) e dei rocchetti di filo di rame (Fig. 5b). È necessario creare un numero di bobine pari al numero di magneti fissati al di sotto delle pale eoliche. Queste bobine, collegate fra di loro in serie (Fig. 5c), vengono fissate alla struttura in legno tramite la base del porta CD (Fig. 5d).

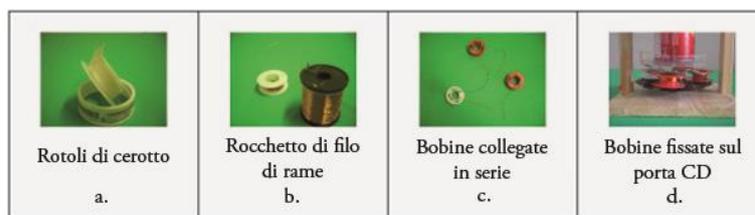


Fig. 5: le bobine sono prodotte attraverso rotoli di cerotto e dei rocchetti di filo di rame. Il numero di bobine è pari al numero di magneti fissati al di sotto delle pale eoliche. Esse sono collegate fra di loro in serie e fissate alla struttura in legno tramite la base del porta CD.

La costruzione del dispositivo è completata collocando l'asse di rotazione delle pale all'interno delle boccole della struttura portante; la turbina è così pronta a funzionare e sarà possibile accendere un piccolo LED utilizzando un asciugacapelli per mettere in moto le pale²³.

3.1.2 Esempi di applicazione

Questo dispositivo consente numerose applicazioni didattiche con diverse finalità, fra cui:

a) *PRE-TEST introduttivo sull'induzione elettromagnetica attraverso la Metodologia per Artefatti*²⁴

²³ Se si costruisce la bobina utilizzando dei magneti al niobio molto intensi, è possibile produrre una bobina capace di accendere un LED anche con il soffio umano, senza necessariamente ricorrere all'utilizzo dell'asciugacapelli.

²⁴ Nel capitolo quattro verrà illustrato in dettaglio la metodologia utilizzata ed i risultati ottenuti.

Questa attività consente di introdurre in modo semplice e diretto la legge dell'induzione elettromagnetica a studenti che non hanno mai studiato i fenomeni magnetici. La metodologia di insegnamento, abbinata al dispositivo precedentemente descritto, riesce a catturare l'attenzione degli studenti e a stimolare la curiosità ed il ragionamento personale ed è basata sul confronto fra pari. Questi elementi consentono l'introduzione di questa attività in qualsiasi tipo di classe, dalle scuole primarie alle scuole superiori, fino ad arrivare a studenti di primo anno universitario.

b) POST-TEST di verifica sull'induzione elettromagnetica attraverso la Metodologia per Artefatti

Il dispositivo si adatta bene ad essere utilizzato come test per verificare la comprensione dell'induzione elettromagnetica da un punto di vista qualitativo. La metodologia che può essere utilizzata in questo caso è sempre quella per artefatti, ottimale per esplorare il fenomeno senza dare indicazioni agli studenti, in modo tale da evidenziare il livello di comprensione o eventuali problemi di apprendimento.

c) Energie alternative

Il problema energetico è un argomento di grande attualità che domina i dibattiti televisivi come quelli di vita quotidiana. Si parla tanto infatti, della crisi energetica e della necessità di sviluppare fonti di energia alternativa, rinnovabile, pulita, anche se molte volte si ignorano i principi su cui si basa la produzione di queste forme di energia. Potrebbe essere molto utile avviare gli studenti sin da piccoli verso una più profonda comprensione del funzionamento delle centrali elettriche che sfruttano le energie alternative, sia per colmare lacune importanti su argomenti di grande attualità, sia per formare nuove generazioni sensibili a certe tematiche.

La turbina a vento di Savonius si applica molto bene a questo tipo di tematiche, consentendo di mostrare in modo semplice il funzionamento delle centrali eoliche. In questo caso può essere molto utile mostrare parallelamente altri tipi di energie alternative ed il funzionamento delle centrali elettriche corrispondenti (centrali idroelettriche o fotovoltaiche). La base è sempre quella di usare dispositivi semplici da realizzare e da utilizzare, poco costosi e prodotti con materiali appartenenti alla vita quotidiana degli studenti.

d) PCK per gli insegnanti

La letteratura internazionale ha mostrato che i nuovi curricula didattici possono essere pianificati e successivamente applicati se parallelamente ad essi viene strutturata una adeguata formazione dei docenti (McDermott, 1976; McDermott, 1990). È importante infatti conoscere le difficoltà che gli insegnanti incontrano nell'espone alcune leggi fisiche, quali sono i nodi concettuali più importanti e come affrontarli. A questo bisogna aggiungere che molti docenti di fisica delle scuole superiori provengono da studi di matematica

e quindi presentano lacune sia in termini di contenuti che in termini di abilità pratiche nello strutturare opportune attività di laboratorio.

La turbina a Vento di Savonius si presta bene ad una indagine rivolta ai docenti. È possibile strutturare un'indagine capace di mettere in luce sia gli aspetti legati ai contenuti sia quelli pedagogici associati all'induzione elettromagnetica ed alle forma di energia alternativa. In base a queste premesse, è stata strutturata una attività di tipo PCK (*Pedagogical Content Knowledge*) (vedi appendice B), che permette di analizzare sia le conoscenze degli insegnanti sia gli aspetti pedagogici, la capacità di analizzare i nodi concettuali principali legati all'induzione elettromagnetica e proporre diversi modi alternativi per affrontarli.

3.2 Motorino Elettrico

Un altro dispositivo utile per analizzare la legge di Faraday-Neumann-Lenz è il motorino elettrico²⁵. Esso consente di effettuare esperimenti quantitativi e qualitativi capaci di mettere in luce il ruolo dell'induzione elettromagnetica e di spiegare il funzionamento di semplici dispositivi appartenenti alla vita quotidiana quali, per esempio, le dinamo. Vista la completezza dell'esperimento quantitativo, si candida come esperimento finale in un percorso strutturato sull'induzione elettromagnetica, tramite il quale è possibile verificare le competenze acquisite dagli studenti.

Da sottolineare inoltre, l'importanza del dispositivo proposto a causa delle numerose connessioni con altri concetti fisici importanti, quali i circuiti elettrici, legge di Ohm e concetti di resistenze in serie e parallelo, moto rotatorio ed ovviamente trasformazione e dissipazione di energia.

Il dispositivo può essere riprodotto utilizzando materiali di riciclo e quindi estremamente economico da realizzare.

3.2.1 Esperimenti qualitativi

Gli esperimenti proposti²⁶ sono basati sull'utilizzo di un “*hand generator*”, ossia di un dispositivo manuale capace di funzionare sia come generatore di corrente che come un motorino elettrico (Fig. 6).

²⁵ Il gruppo di ricerca in didattica della fisica dell'Università della Calabria è partner ufficiale dei progetti MOSEM e MOSEM² per quanto riguarda gli esperimenti didattici relativi all'utilizzo di motorini elettrici.

²⁶Le attività proposte fanno parte del kit sperimentale allestito nell'ambito del progetto MOSEM per introdurre nelle scuole i concetti dell'induzione elettromagnetica e della superconduttività.



Fig. 6: Hand generator

Utilizzando l'*hand generator* con o senza lampadina è possibile osservare la differenza, in termini di sforzo muscolare, tra la situazione a circuito aperto e quella a circuito chiuso. Questo primo step consente di mettere in evidenza il ruolo della *f.e.m.* indotta, la quale chiudendo il circuito induce un passaggio di corrente e di conseguenza illumina la lampadina. Inoltre, si può facilmente verificare come la luminosità della lampadina dipenda dallo sforzo muscolare effettuato, ossia dalla velocità di rotazione della manovella. Ciò consente di sottolineare il ruolo della variazione del flusso del campo magnetico nel tempo. Per chiarire questo punto cruciale potrebbe essere utilizzato un semplice motorino aperto, costruito con materiali di riciclo, capace di mostrare la rotazione delle spire all'interno del campo magnetico e di conseguenza, di evidenziare la variazione del flusso di \mathbf{B} (Fig. 7).

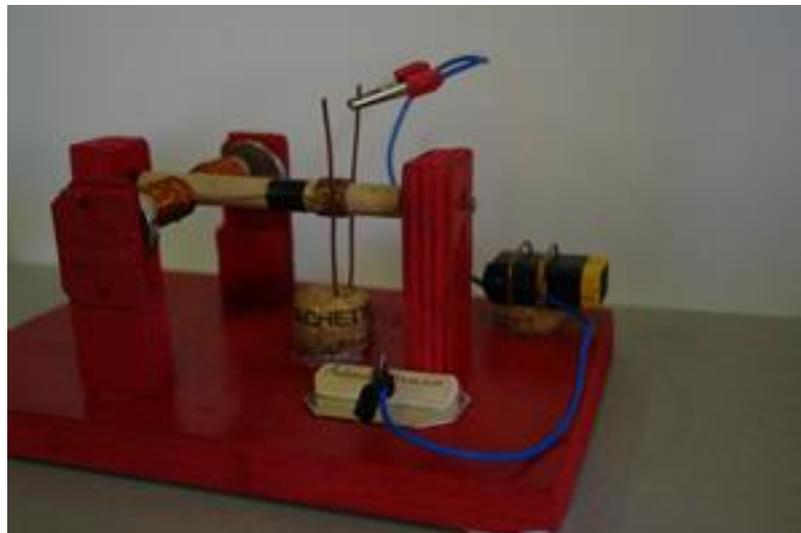


Fig. 7: Motorino elettrico aperto; consente di vedere il funzionamento delle singole parti.

L'*hand generator* può essere inserito in una sperimentazione didattica, utilizzando delle opportune schede di lavoro il cui obiettivo può essere quello di rispondere alle seguenti domande Mind-on:

- a) Hai bisogno di energia per illuminare la lampadina?

- b) Lo sforzo muscolare può essere correlato alla luce emessa dalla lampadina?
- c) Qual è la corretta sequenza dei processi fisici coinvolti (con particolare attenzione a quelli legati alla trasformazione di energia)?
- d) Cosa pensi sia successo (dopo aver utilizzato il dispositivo)?

È possibile accentuare gli effetti dovuti a diversi carichi collegati in uscita al generatore. Infatti, se si utilizzano diverse lampadine collegate in serie ed in parallelo si può direttamente osservare come cambia lo sforzo muscolare al variare della configurazione delle lampadine Fig. 8.

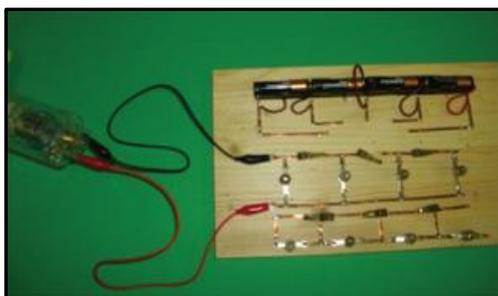


Fig. 8: Hand generator collegato a diverse lampadine in serie o in parallelo

Anche in questo caso l'obiettivo può essere quello di far riconoscere agli studenti i processi fisici coinvolti (le domande a cui dare risposta sarebbero b-c-d).

L'ultimo esperimento qualitativo prevede l'utilizzo dell'*hand generator* come motorino elettrico. Collegando infatti il dispositivo ad un generatore di tensione (delle batterie per esempio), lo si può utilizzare come motorino elettrico capace di trasformare energia elettrica (fornita dal generatore) in energia meccanica (dovuta alla rotazione della manovella). È possibile analizzare il moto di rotazione della manovella al variare della tensione applicata dal generatore. In particolare, si può collegare più batterie in serie e calcolare la velocità angolare corrispondente a ciascuna configurazione (Fig. 9a). L'esperimento è molto semplice da realizzare, poiché richiede solo l'utilizzo di un cronometro per misurare il tempo impiegato in un certo numero di giri. Riportando su un grafico il numero di giri (moltiplicato per 2π) in funzione del tempo si ottiene una retta il cui coefficiente angolare rappresenta la velocità angolare del dispositivo (Fig. 9b). Se si ripete l'esperienza al variare del numero di batterie collegate in serie si vede immediatamente la differenza nei valori della velocità angolare nelle diverse configurazioni.

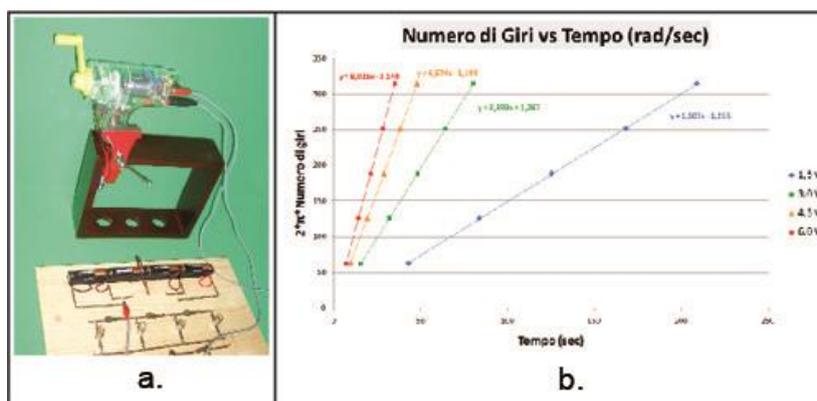


Fig. 9: (a) Hand generator come motorino elettrico; (b) se si grafica il numero di giri (moltiplicato per 2π) in funzione del tempo, è possibile ricavare la velocità angolare come coefficiente angolare della retta ottenuta.

3.2.2 Esperimento quantitativo

L'esperimento quantitativo²⁷ consiste nel determinare sperimentalmente le caratteristiche fondamentali di un motorino elettrico. L'esperimento prevede l'utilizzo di una scheda di acquisizione dati e di un software di elaborazione prodotto ad hoc utilizzando il programma LabView. La Fig. 10 mostra l'insieme dell'apparato sperimentale (più in dettaglio nella Fig. 11).

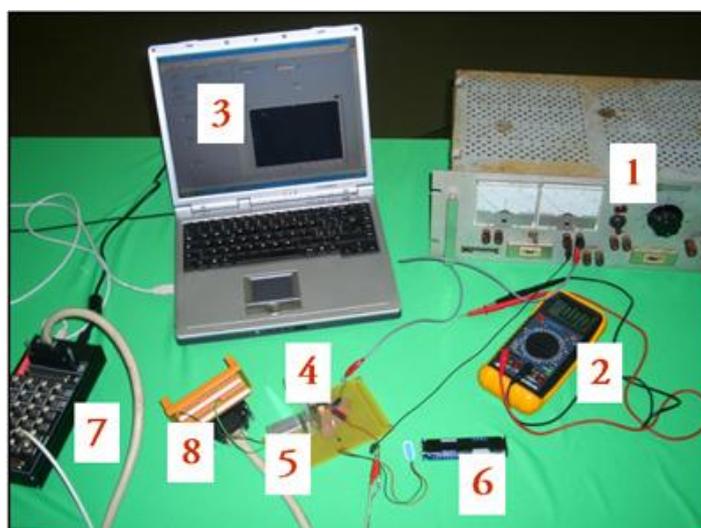


Fig. 10: Apparato sperimentale per caratterizzare il motorino elettrico: 1. generatore di tensione del motorino, 2. tester digitale, 3. software di elaborazione dati (Labview), 4. motorino elettrico, 5. contagiri, 6. Alimentazione del contagiri, 7. Scheda di acquisizione dati, 8. Connettore del contagiri

²⁷ Questo esperimento è stato presentato nel congresso internazionale MPTL14 (*Multimedia in Physics Teaching and Learning*), selezionato come "selected paper" ed in attesa di essere pubblicato.

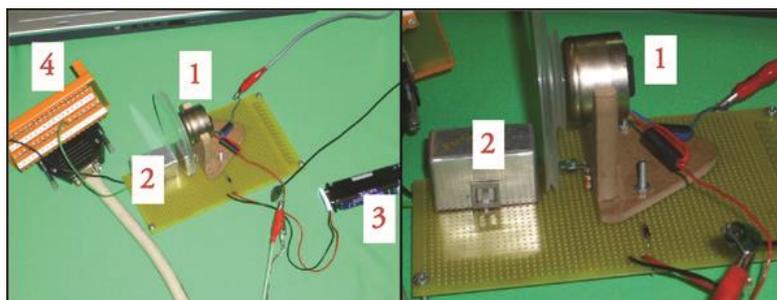


Fig. 11: Dettagli dell'apparato sperimentale: 1. Motorino elettrico, 2. Contagiri, 3. Alimentatore contagiri, 4. Connettore del contagiri

a) Caratterizzazione del motorino in condizioni stazionarie

Il circuito equivalente (Fig. 12) del motore in corrente continua è composto da una resistenza R_a (resistenza di armatura dell'indotto), da una induttanza L_a (induttanza di armatura) e da due generatori di forza contro-elettromotrice. Il primo generatore (dovuta alla rotazione delle bobine all'interno del campo magnetico \mathbf{B} generato dallo statore) fa nascere ai morsetti una forza contro-elettromotrice proporzionale alla velocità angolare ω , mentre il secondo (dovuto all'induttanza L_a) nasce alla chiusura dell'interruttore della tensione di alimentazione sull'induttanza rotorica L_a . Di conseguenza, si verrà a generare (solo nel transitorio) anche una seconda forza contro-elettromotrice proporzionale alla variazione della corrente di armatura rispetto al tempo.

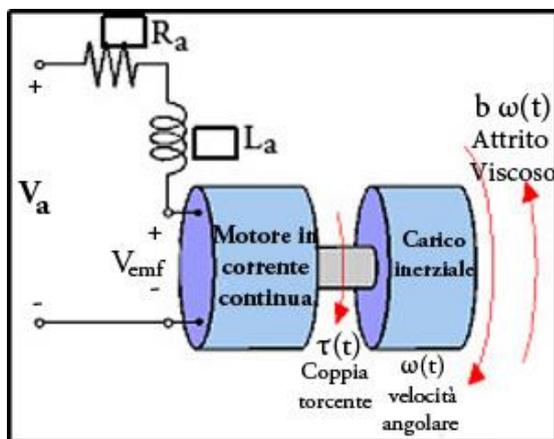


Fig. 12: Circuito equivalente di un motorino elettrico, composto da composto da una resistenza R_a (resistenza di armatura dell'indotto), da una induttanza L_a (induttanza di armatura), e da due generatori di forza contro-elettromotrice. Il primo (dovuta alla rotazione delle bobine all'interno del campo magnetico \mathbf{B} generato dallo statore) fa nascere ai morsetti una forza contro-elettromotrice proporzionale alla velocità angolare ω , mentre il secondo (dovuto all'induttanza L_a) nasce alla chiusura dell'interruttore della tensione di alimentazione sull'induttanza rotorica L_a .

L'equazione - Eq. 1 descrive il comportamento elettrico del motore, tenendo conto anche della caduta di tensione sulla resistenza delle spire dell'indotto.

$$V_a - L_a \frac{di_a(t)}{dt} = c_m \cdot \omega(t) + R_a \cdot i_a(t)$$

Eq. 1: comportamento elettrico del motore

Oltre al comportamento elettrico, occorrerà poi considerare anche quello meccanico (Eq. 2). La coppia elettrica $\tau(t)$ sviluppata dal rotore risulta proporzionale alla corrente di armatura $i_a(t)$. Ad essa si oppongono il momento della coppia di carico esterno M_{ext} , il momento inerziale (presente solo nella fase di transitorio per accelerare il rotore avente un momento di inerzia J) ed infine il momento delle forze viscoso dissipative che risulta proporzionale alla velocità angolare ω .

$$\tau(t) = K_e \cdot i_a(t) \quad \rightarrow \quad K_e \cdot i_a(t) - M_{ext} = b \cdot \omega(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt}$$

Eq. 2: Comportamento meccanico del motore

Come si vede, le due equazioni sono tra loro accoppiate e costituiscono un sistema differenziale del primo ordine, lineare nelle funzioni incognite $i_a(t)$ e $\omega(t)$. In condizioni stazionarie ($\omega(t_{st.}) = cost. = \omega_0$ ed $i_a(t_{st.}) = cost. = I_0$), trascurando gli attriti meccanici ($b \sim 0$), è possibile ricavare la coppia elettrica esercitata dal rotore $\tau(t_{st.})$ (Eq. 3).

$$\tau(t_{st.}) = M_{ext} = mgr$$

Eq. 3: Momento elettrico sviluppato dal rotore in condizioni stazionarie.

Chiudendo l'interruttore su un generatore di tensione V_a , al tempo $t=0$ si può supporre che $\omega(t) \sim 0$, cosicché nel circuito equivalente risulterà presente soltanto la forza contro-elettromotrice dovuta ad L_a e quindi la corrente di armatura crescerà gradatamente fino a raggiungere un valore massimo (detto corrente di spunto I_s) (Eq. 4).

$$\frac{di_a(t)}{dt} \approx 0 \quad \rightarrow \quad R_a = \frac{V_a}{I_s}$$

Eq. 4: Corrente di spunto I_s .

La figura riportata di seguito (Fig. 13) mostra un grafico caratteristico della corrente di armatura in funzione del tempo.

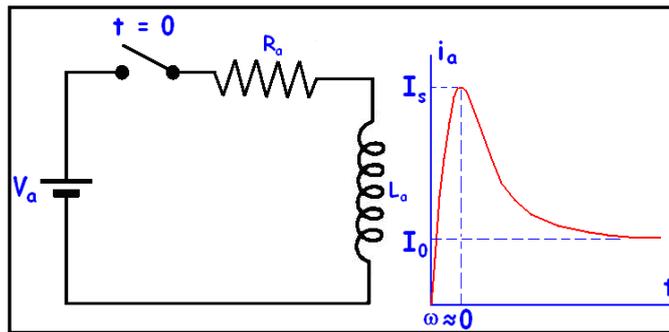


Fig. 13: Grafico caratteristico della corrente di armatura in funzione del tempo. Si distinguono la corrente di spunto I_s , e la corrente stazionaria I_0 .

Il grafico ricavato sperimentalmente rispecchia fedelmente ciò che è stato previsto teoricamente (Fig. 14).

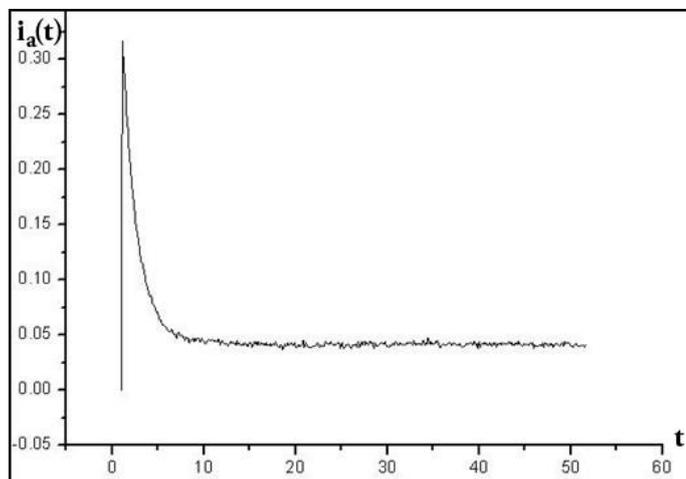


Fig. 14: Grafico sperimentale della corrente di armatura in funzione del tempo

Se si misura con un tester digitale il valore della tensione V_a (pari a 4,76 V) e valutando graficamente il valore di I_s (Fig. 15), è possibile determinare il valore della resistenza di armatura $R_a = 15,06\Omega$.

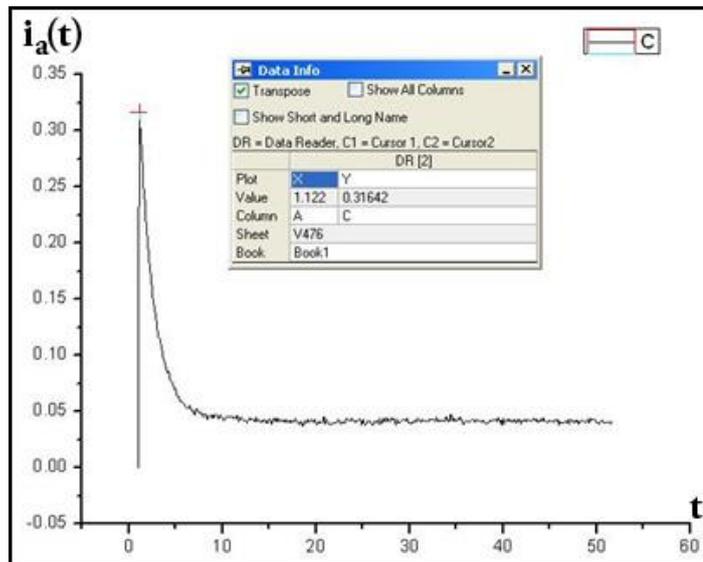


Fig. 15: Valutazione sperimentale della corrente di spunto

Dopo l'intervallo di tempo (estremamente breve) in cui si raggiunge la corrente di spunto I_s , il rotore comincerà a muoversi generando una seconda forza contro-elettromotrice proporzionale ad ω . Ciò comporterà che la *f.e.m.* netta applicata ai morsetti del motore gradatamente diminuirà facendo diminuire la corrente d'armatura fino al raggiungimento di un valore di regime (Fig. 16a). Contemporaneamente la velocità angolare del rotore aumenterà fino a raggiungere anch'essa un valore costante (Fig. 16b).

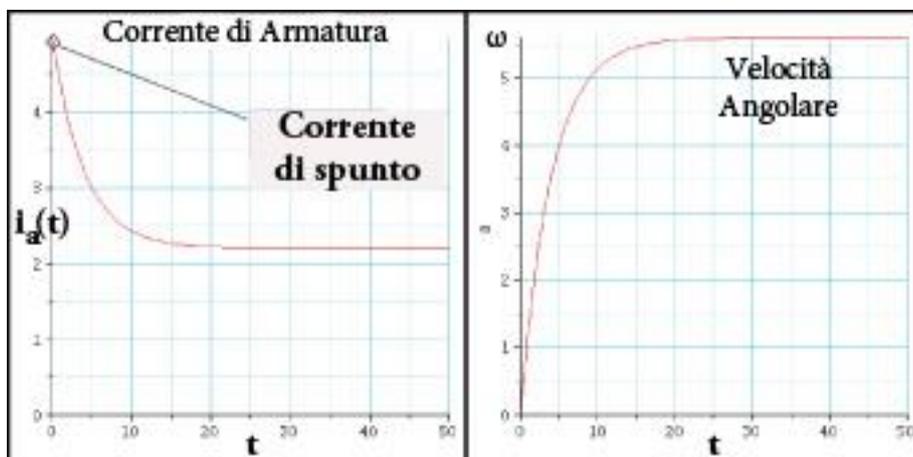


Fig. 16: corrente di armatura e velocità angolare a regime

In condizioni stazionarie, tenendo conto della relazione fra la potenza elettrica e quella meccanica (Eq. 5) senza carichi esterni ($M_{ext}=0$), è possibile ricavare le costanti caratteristiche del motorino (Eq. 6).

$$\begin{cases} P_e = V_a \cdot I_0 = (c_m \cdot \omega_0 + R_a \cdot I_0) \cdot I_0 \\ P_m = K_e \cdot I_0 \cdot \omega_0 = b \cdot \omega_0^2 \end{cases} \rightarrow P_e - R_a \cdot I_0^2 = P_m$$

Eq. 5: relazione fra la potenza elettrica P_e e la potenza meccanica P_m

$$\begin{cases} c_m = \frac{V_a - R_a \cdot I_0}{\omega_0} \\ K_e = \frac{V_a}{\omega_0} \\ b = \frac{V_a \cdot I_0}{\omega_0^2} \end{cases}$$

Eq. 6: Parametri caratteristici del motorino elettrico

Se si ricavano sperimentalmente i valori della corrente (Fig. 17) e della velocità angolare (Fig. 18) a regime, è possibile determinare numericamente i parametri caratteristici del motorino elettrico considerato (Eq. 7).

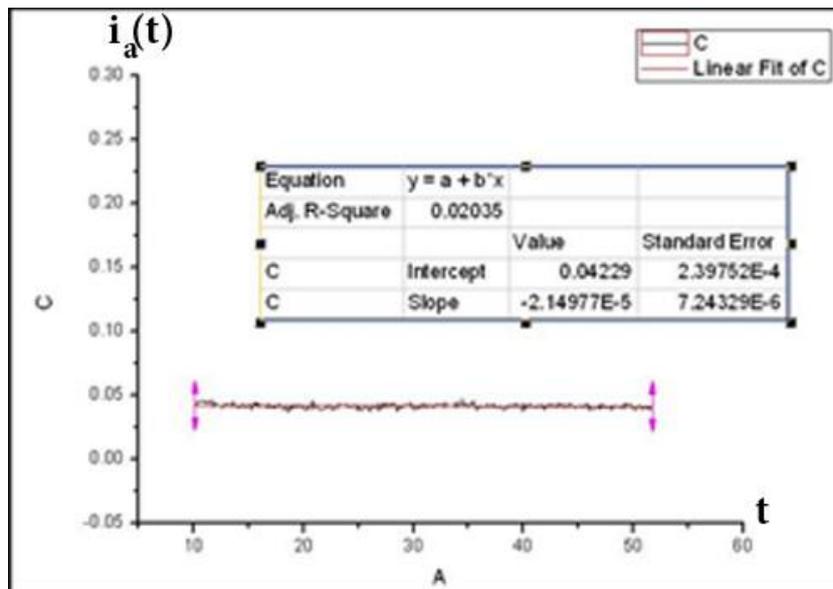


Fig. 17: Dal grafico della corrente $I_a(t)$ in funzione del tempo è possibile ricavare il valore della corrente stazionaria I_0 , nella regione lineare del grafico corrispondente al regime stazionario.

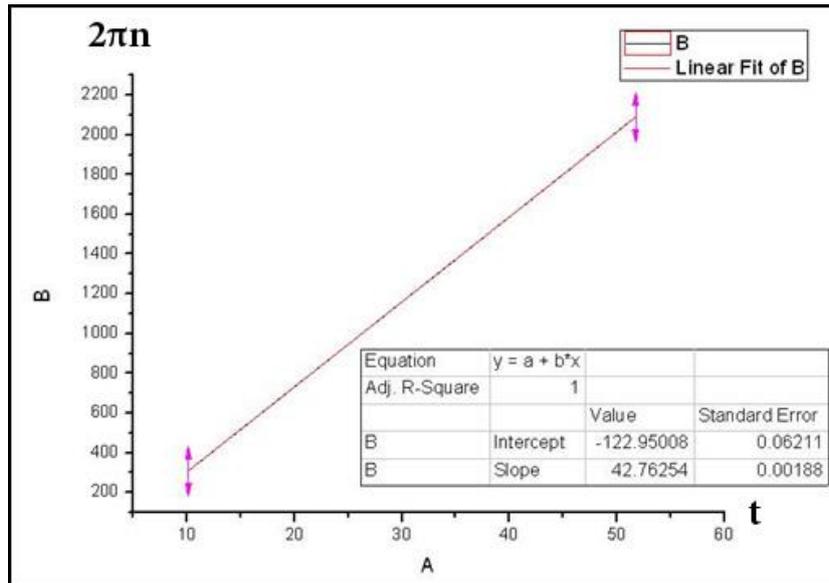


Fig. 18: Riportando su un grafico il numero di giri n (moltiplicato per 2π) in funzione del tempo è possibile ricavare la velocità angolare nella parte lineare del grafico, corrispondente alla condizione stazionaria in cui il numero di giri varia linearmente con il tempo.

$$\begin{cases} c_m = \frac{V_a - R_a \cdot I_0}{\omega_0} = 0,0964 \frac{V \cdot s}{rad} \\ K_e = \frac{V_a}{\omega_0} = 0,1113 \frac{V \cdot s}{rad} \\ b = \frac{V_a \cdot I_0}{\omega_0^2} = 1,1 \cdot 10^{-4} \frac{W \cdot s^2}{rad} \end{cases}$$

Eq. 7: Valori numerici dei parametri caratteristici del motorino

Si ottiene la condizione $c_m \approx K_e$, prevista teoricamente, all'interno dei limiti di errori (circa il 15%).

b) Calcolo del rendimento del motorino

Lo scopo di questa misura è determinare l'efficienza di conversione dell'energia elettrica in energia meccanica. A tale scopo, vengono effettuate delle misure simili a quelle descritte in precedenza, mentre il dispositivo è utilizzato per alzare piccoli pesi per un certo tratto h . Tenendo conto delle equazioni (Eq. 1) e (Eq. 2), è possibile ricavare la potenza meccanica P_m (Eq. 8) in condizioni stazionarie ($\omega(t_{st.}) = cost. = \omega$, $i_a(t_{st.}) = cost. = I$, $\tau(t_{st.}) = K_e \cdot I = \tau$),

$$P_m = M_{ext} \cdot \omega = \tau \cdot \omega = -\frac{\tau^2 \cdot R_a}{K_e} + \frac{V_a}{K_e} \tau$$

Eq. 8: Potenza meccanica a regime mentre il dispositivo è utilizzato per alzare piccoli pesi.

Il rendimento viene calcolato confrontando la potenza elettrica con quella meccanica.

$$P_e = V_a \cdot I = V_a \cdot \frac{\tau}{K_e} \quad \rightarrow \quad \eta = \frac{P_m}{P_e} = -\frac{\tau \cdot R_a}{V_a \cdot K_e} + 1$$

Eq. 9: Calcolo del rendimento η del motorino elettrico

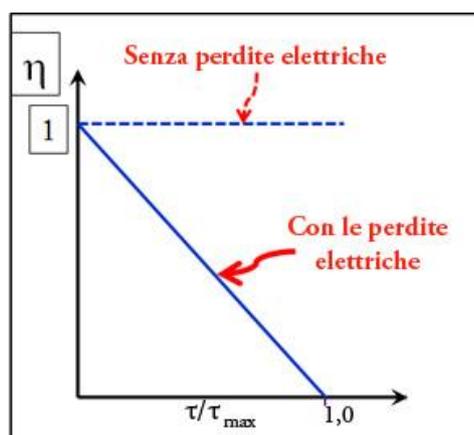


Fig. 19: Grafico teorico del rendimento η in funzione del rapporto τ/τ_{\max} , trascurando gli attriti meccanici.

Se non si trascurano gli attriti meccanici nella (Eq. 2) si ottiene un grafico caratteristico teorico rappresentato nella figura (Fig. 20), molto simile a quello ottenuto sperimentalmente (Fig. 21).

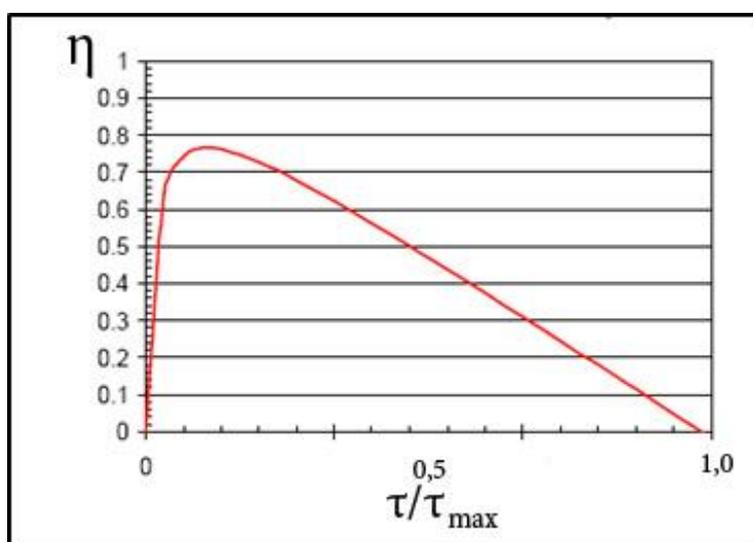


Fig. 20: Grafico teorico del rendimento η in funzione del rapporto τ/τ_{\max} , senza trascurare gli attriti meccanici.

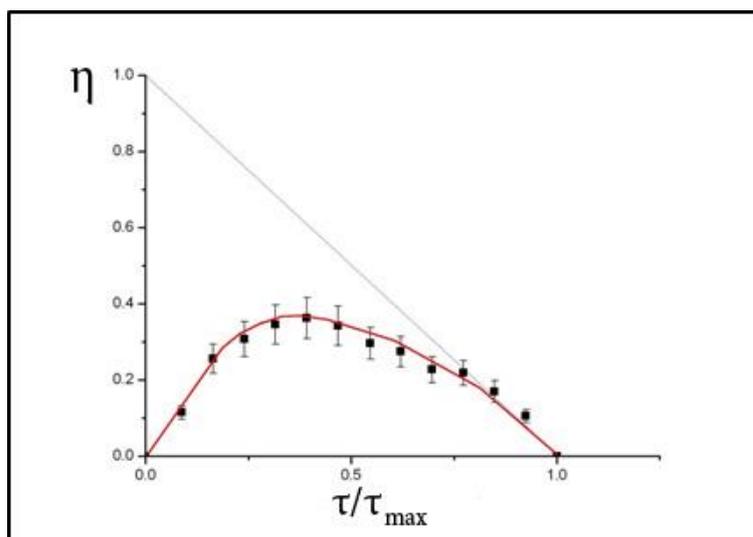


Fig. 21: Grafico sperimentale del rendimento η in funzione del rapporto τ/τ_{\max} , senza trascurare gli attriti meccanici.

3.3 Moto di un cilindro in un campo magnetico

Questo dispositivo²⁸ enfatizza l'importanza di un'adeguata strategia sperimentale per misurare la micro dissipazione per effetto delle correnti di Foucault in un cilindro di rame che rotola su due guide conduttrici in presenza di un campo magnetico. L'esperimento mostra come diversi contributi di un moto complesso possano essere discriminati mediante l'individuazione e l'analisi separata di differenti regimi di moto (Bonanno A. , Bozzo, Camarca, & Sapia, 2011).

L'attività proposta può essere introdotta a scuola come esperimento di verifica sulla legge di Faraday-Neumann-Lenz e consente, fra le altre cose, di verificare l'esistenza delle micro-correnti indotte di Foucault, calcolandone il loro effetto dissipativo. Numerose sono le possibili connessioni con altri campi della fisica, fra cui energia e sue forme di trasformazione, moto rettilineo uniforme ed uniformemente accelerato, momento di una forza e corpo rigido. L'esperimento consente infine, di apprendere il funzionamento non-standard di strumenti tecnologici di largo impiego quali PC e webcam.

3.3.1 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale (Fig. 22) è costituito da un cilindro cavo di rame (raggio esterno $R = (3,97 \pm 0,02)mm$, raggio interno $r = (1,65 \pm 0,02)mm$, lunghezza $l = (40,27 \pm 0,05)mm$ e massa $m = (9,40 \pm 0,05)g$), libero di rotolare su due guide di rame ricoperte con carta alluminio (capace di aderire

²⁸ L'apparato sperimentale è stato presentato ai congressi SIF 2010 ed AIF 2010.

maggiormente e migliorare il contatto elettrico fra cilindro e guide conduttrici) e fissate su un supporto di legno (Bonanno A. , Bozzo, Camarca, & Sapia, 2011).



Fig. 22: L'immagine, presa da un frame tipico catturato attraverso la webcam mentre riprende il moto del cilindro sulle guide, mostra alcuni dettagli dell'apparato sperimentale. Si distinguono il cilindro di rame, le guide conduttrici di rame ricoperte di carta alluminio (il quale garantisce un maggiore contatto elettrico), un tester digitale, la barra magnetica al centro delle due guide.

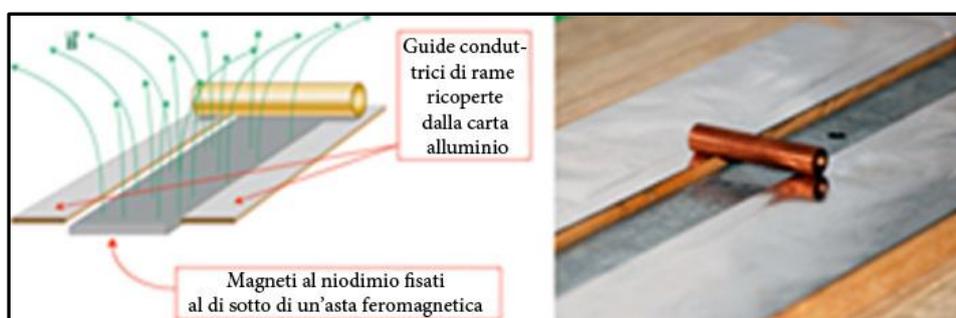


Fig. 23: Dettagli dell'apparato sperimentale. Il cilindro rotola sulle guide di rame ricoperte di carta alluminio, al di sopra di un'asta metallica sotto cui sono fissati dei magneti di grande intensità al neodimio.

In mezzo alle due guide è bloccata un'asta di ferro, sotto la quale sono stati fissati dei magneti di grande intensità al neodimio. Quest'asta, oltre a servire da supporto meccanico ai magneti, rende il campo magnetico quanto più uniforme possibile. Da osservare che nell'esperimento proposto, l'unica simmetria spaziale necessaria, per quanto riguarda il campo magnetico, è la simmetria speculare rispetto al piano passante per la retta mediana alle guide conduttrici e parallela all'asse di traslazione del cilindro. Ciò consente al cilindro di rotolare parallelamente alle guide, senza effettuare torsioni azimutali.

Un generatore di corrente è connesso agli estremi liberi delle guide, in modo da formare con esse un circuito chiuso, insieme ovviamente al cilindro di rame. In questo modo una corrente nota può circolare all'interno del cilindro.

Infine, attraverso una webcam (di risoluzione 640×480 pixel, 25 frames per secondo - fps) connessa via USB ad un personal computer e collocata al di sopra delle guide, è possibile acquisire il video del moto del cilindro.

Il moto del cilindro, quando è attraversato da una corrente, può essere studiato analizzando una successione di frames estratti dal video del suo spostamento acquisito attraverso la webcam. Ciascun frames può essere ricavato dal video utilizzando un software di larga diffusione sui comuni PC, ossia *Windows MovieMakerTM* (Fig. 24). Per ciascun frame è possibile determinare la distanza del cilindro rispetto ad un punto fisso, per esempio l'estremità sinistra delle guide. Questa distanza, misurata in pixels, deve essere convertita in centimetri attraverso un oggetto di dimensioni note, posto al lato delle guide (nella foto è rappresentato dal quadrato di colore nero). Attraverso una semplice proporzione fra le dimensioni dell'oggetto in pixel e la sua reale misura in centimetri è possibile risalire a quanti centimetri corrisponde un pixel. Per quanto riguarda la scala temporale necessaria per le misure cinematiche, è possibile utilizzare l'intervallo temporale indicato dalla webcam per acquisire due pixel successivi, ossia $1/25$ s. Questo valore nominale è stato testato acquisendo il video di un cronometro digitale in funzione, verifica che ha consentito di dimostrare che effettivamente il tempo fra un pixel ed il successivo corrisponde realmente ad $1/25$ s.

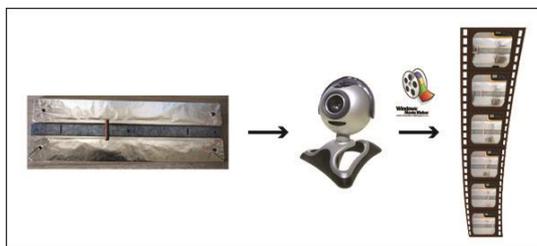


Fig. 24: Il moto del cilindro, quando è attraversato da una corrente, può essere studiato analizzando una successione di frames estratti dal video del suo moto acquisito attraverso la webcam. Ciascun frames può essere ricavato dal video utilizzando un software di larga diffusione sui comuni PC, ossia *Windows MovieMakerTM*.

3.3.2 Modellizzazione del sistema

La modellizzazione del sistema considerato tiene conto macroscopicamente dei momenti meccanici applicati al cilindro ed è finalizzata a legare le previsioni quantitative con i risultati sperimentali. L'obiettivo del modello proposto è quello di mostrare come sia meglio determinare

separatamente i parametri principali coinvolti attraverso l'analisi di differenti regimi di moto, piuttosto che considerare l'intera evoluzione spazio-temporale.

Si consideri il moto del cilindro all'interno di un campo magnetico. In questo caso è difficile determinare l'andamento delle correnti indotte all'interno del cilindro e di conseguenza, è ancora più complesso determinare le forze microscopiche derivanti dal moto roto-traslatorio del cilindro all'interno del campo magnetico. Tuttavia, da un punto di vista macroscopico il moto del cilindro può essere descritto in termini di momento torcente. Per costruire il modello, si considerino le azioni elettrodinamiche sul cilindro dovute all'interazione fra le correnti che fluiscono al suo interno ed il campo magnetico esterno. Fra queste correnti si distinguono la corrente I esterna fornita dal generatore e le correnti indotte di Foucault derivanti dal moto del cilindro conduttore in un campo magnetico esterno non omogeneo (Landau, Lifshitz, & Pitaevskii, 1993). Supponendo che il moto del cilindro sia di puro rotolamento (senza slittare)²⁹, si consideri l'effetto della corrente esterna I , nell'interazione con il campo magnetico \mathbf{B} . Poiché essa fluisce all'interno del cilindro, non è localizzata e questo non consente di applicare la formula standard dell'interazione fra una corrente localizzata ed un campo magnetico ($d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}$). Il modo corretto per esprimere le forze agenti sul cilindro sarebbe quello di considerare tutte le forze agenti sul cilindro derivanti dalla densità di corrente \mathbf{J} che fluisce in ciascun volume infinitesimo dV del conduttore e poi integrare tutti questi contributi per ottenere la forza totale agente sul cilindro.

$$\vec{F} = \int_0^{V_{cilindro}} \vec{j} \times \vec{B} dV$$

Eq. 10: Forza totale agente sul cilindro dovuta alla densità di corrente \mathbf{J} che fluisce all'interno di ciascun volume infinitesimo dV .

Sfortunatamente questo approccio non è praticabile poiché non si conosce la densità di corrente \mathbf{J} , e sarebbe ancora più complesso se si volesse applicare alle correnti aggiunte di Foucault, poiché la distribuzione della densità di queste correnti è veramente molto complessa, tanto da non poter essere espressa analiticamente come funzione delle coordinate spaziali all'interno del cilindro.

È necessario proporre quindi, un altro tipo di approccio basato sulla descrizione fenomenologica in cui gli effetti meccanici di queste interazioni, sia dovuta alla corrente I che alle correnti indotte di Foucault, possono essere espresse in termini di momenti torcenti: un momento torcente $\vec{\tau}_{ed}$ dovuto all'azione della corrente I , ed un momento $\vec{\tau}_{Fouc}$ derivante dall'azione

²⁹ Questa condizione è stata verificata analizzando il moto del cilindro con la webcam come descritto nel paragrafo precedente.

elettrodinamica sulle correnti di Foucault. Il primo ($\vec{\tau}_{ed}$) dipende soltanto dalla corrente I e dal campo magnetico \mathbf{B} , risulta indipendente dal tempo. Il momento torcente di Foucault $\vec{\tau}_{Fouc}$ invece, è linearmente dipendente dalla velocità di traslazione del cilindro v , cosicché la dissipazione dovuta alle correnti di Foucault può essere assimilata alle dissipazioni dovute agli attriti viscosi. Questa assunzione (dipendenza lineare del $\vec{\tau}_{Fouc}$ rispetto alla velocità) è suggerita dalla considerazione che la forza elettromotrice indotta, che dà origine alle correnti di Foucault, è proporzionale alla variazione del flusso del campo magnetico attraverso ciascuna linea chiusa infinitesima all'interno del cilindro conduttore (in analogia con il problema ben noto dell'anello conduttore che si muove all'interno del campo magnetico). Questa assunzione deve essere testata confrontando i risultati sperimentali con le predizioni teoriche. In aggiunta ai due momenti torcenti descritti in precedenza bisogna tenere in considerazione un terzo momento dovuto all'attrito volvente $\vec{\tau}_{volv}$, costante nelle condizioni sperimentali proposte poiché dipende solo dal peso del cilindro e dalla proprietà della superficie di contatto durante il moto di rotolamento (Doménech et Al., 1987; Brilliantov & Poschel, 1998).

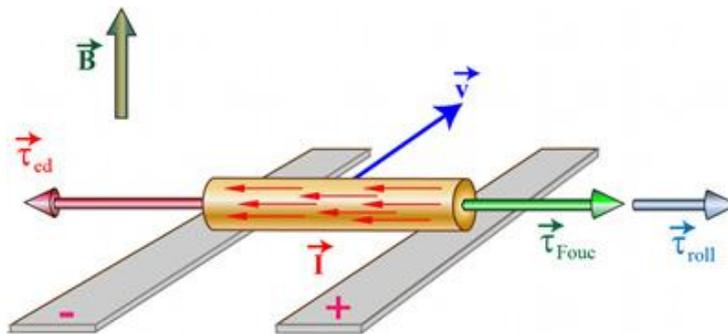


Fig. 25: Rappresentazione schematica dell'azione meccanica dei momenti torcenti sul cilindro. Il momento torcente $\vec{\tau}_{ed}$ è dovuto all'interazione della corrente I con il campo magnetico esterno; il momento di Foucault $\vec{\tau}_{Fouc}$ è un momento frenante simile alle forze di attrito viscoso, derivante dall'interazione fra le correnti di Foucault ed il campo magnetico esterno; il momento $\vec{\tau}_{volv}$ è dovuto all'attrito volvente. Da osservare che il campo magnetico, qui rappresentato per semplicità da un vettore verticale, in realtà non è omogeneo. La sua configurazione spaziale è simile a quella mostrata in Fig. 23.

La figura precedente (Fig. 25) mostra la direzione dei tre momenti descritti in precedenza. Da osservare che la descrizione in termini di momenti torcenti è corretta solo se il cilindro rotola senza slittare: solo in questa condizione possono essere trascurate esplicite considerazioni sulle forze.

Si consideri l'equazione dinamica per il moto rotazionale del cilindro (Eq. 11).

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau_{ed} - \tau_{volv} - \tau_{Fouc}$$

Eq. 11: Equazione dinamica per la rotazione del cilindro

Dove i momenti torcenti sono considerati nei loro valori assoluti, ω rappresenta la velocità angolare di rotolamento del cilindro e J il momento di inerzia rispetto all'asse di simmetria (Eq. 12).

$$J = \frac{1}{2}m(R^2 - r^2)$$

Eq. 12: Momento di inerzia del cilindro rispetto all'asse di simmetria.

Se il momento dovuto alle correnti di Foucault è proporzionale alla velocità di traslazione del cilindro ($\tau_{Fouc} = kv$), dove k rappresenta una costante arbitraria che può essere determinata sperimentalmente se necessario e tenendo in considerazione la relazione fra la velocità angolare e quella tangenziale nel moto rotatorio ($v = \omega R$), è possibile riscrivere l'equazione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** (Eq. 11) come (Eq. 13):

$$\frac{dv}{dt} + \beta v = \frac{R}{J}(\tau_{ed} - \tau_{volv}) \quad \text{con} \quad \beta = k \frac{R}{J}$$

Eq. 13: Nuova espressione dell'equazione dinamica del moto di rotolamento del cilindro

La soluzione dell'equazione differenziale **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** (Eq. 13), facilmente risolvibile sotto la condizione iniziale $v(0)=0$, può essere scritta come:

$$v(t) = \frac{1}{k}(\tau_{ed} - \tau_{volv})(1 - e^{-\beta t})$$

Eq. 14: Soluzione dell'equazione differenziale **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Se si indica con $s(t)$ la lunghezza percorsa dal cilindro rispetto al punto di partenza e si integra da ambo i lati l'equazione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** (Eq. 14), si ottiene la legge che esprime lo spazio percorso dal cilindro in funzione del tempo (Eq. 15):

$$s(t) = \frac{1}{k}(\tau_{ed} - \tau_{volv}) \left[t + \frac{1}{\beta}(e^{-\beta t} - 1) \right]$$

Eq. 15: Spazio percorso dal cilindro in funzione del tempo.

L'equazione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** può essere utilizzata per ricavare il fit dei dati sperimentali, tenendo conto dei valori opportuni di k e $(\tau_{ed} - \tau_{volv})$. Tuttavia può essere realizzata tenendo delle forme limite di $s(t)$, per piccoli e grandi valori di t (ossia per $t \ll 1/\beta$ e $t \gg 1/\beta$), attraverso una semplice espansione in serie di Taylor (Eq. 16).

$$\begin{cases} s(t \ll 1/\beta) \cong \frac{1R}{2J}(\tau_{ed} - \tau_{volv})t^2 & (a) \\ s(t \gg 1/\beta) \cong \frac{1}{k}(\tau_{ed} - \tau_{volv})t & (b) \end{cases}$$

Eq. 16: Condizioni limiti per $s(t)$.

Questo atteggiamento suggerisce di effettuare un fit esponenziale quadratico nella prima regione del moto per ottenere $(\tau_{ed} - \tau_{volv})$, visto che R e J sono già determinate sperimentalmente. Successivamente, realizzando un fit lineare nella regione coda di $s(t)$ è possibile ricavare il coefficiente $1/k(\tau_{ed} - \tau_{volv})$, ossia la velocità v .

$$v = \frac{1}{k}(\tau_{ed} - \tau_{volv})$$

Eq. 17: condizione per determinare sperimentalmente la velocità del cilindro dal fit dei dati sperimentali.

Tenendo in considerazione la definizione data relativa al momento torcente dovuta alle forze di Foucault ($\tau_{Fouc} = kv$), dalla (Eq. 17) è possibile scrivere la relazione fra i momenti torcenti (Eq. 18).

$$\tau_{Fouc} = \tau_{ed} - \tau_{volv}$$

Eq. 18: Relazione fra i momenti torcenti.

Il significato fisico dell'equazione (Eq. 18) è ovvio: in condizioni di regime lineare la velocità di traslazione (e quindi di rotazione) è costante; ciò implica l'azzeramento del momento torcente totale agente sul cilindro ($\tau_{ed} - \tau_{Fouc} - \tau_{volv} = 0$).

Dopo aver calcolato il momento torcente, è possibile ricavare la potenza dissipata P associata a ciascuno dei momenti torcenti, usando la ben nota relazione:

$$P = \tau \cdot \omega$$

Eq. 19: Potenza dissipata da ciascuno dei momenti torcenti τ , nota la velocità angolare ω .

3.3.3 Risultati sperimentali

Da un punto di vista sperimentale, diverse misure sono state effettuate al variare della corrente esterna "pilotata" seguendo le indicazioni date in precedenza. La figura seguente (Fig. 26) mostra i grafici corrispondenti a diversi valori della corrente I utilizzata.

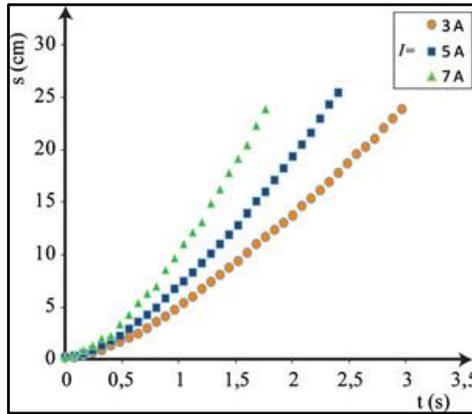


Fig. 26: Diagramma del moto del cilindro per tre differenti valori della corrente esterna (sotto la condizione iniziale $t_0=0$). Le barre degli errori non sono visibili poiché sono più piccole delle dimensioni dei simboli.

I set di dati in (Fig. 26) sono stati analizzati seguendo la procedura descritta nel paragrafo precedente.

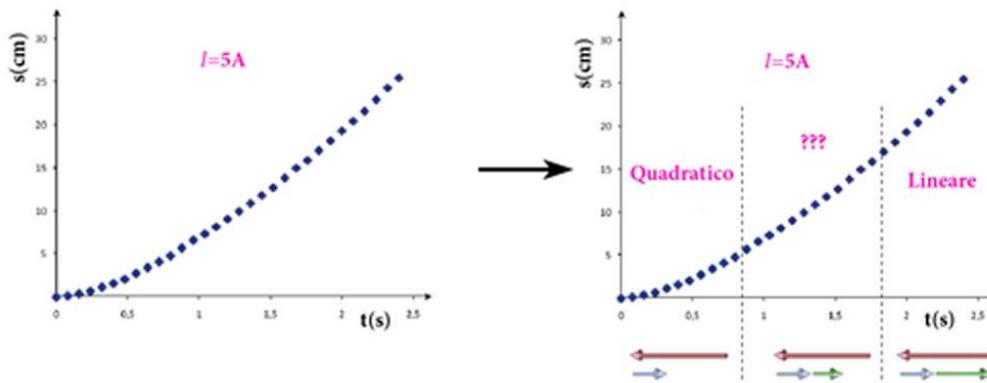


Fig. 27: Grafico tipico del moto del cilindro, quando è attraversato da una certa corrente esterna I . Nel grafico si possono distinguere tre diverse regioni, ciascuna caratterizzata dalla presenza di diversi contributi dei momenti torcenti (in rosso è indicato il τ_{ed} , in grigio il τ_{volv} , in verde il τ_{Fouc}).

In particolar modo la testa e la coda di ciascun plot di dati è stata fittata usando entrambe le condizioni limiti descritte dalla (Eq. 16). Un esempio di questa procedura è rappresentato in (Fig. 28).

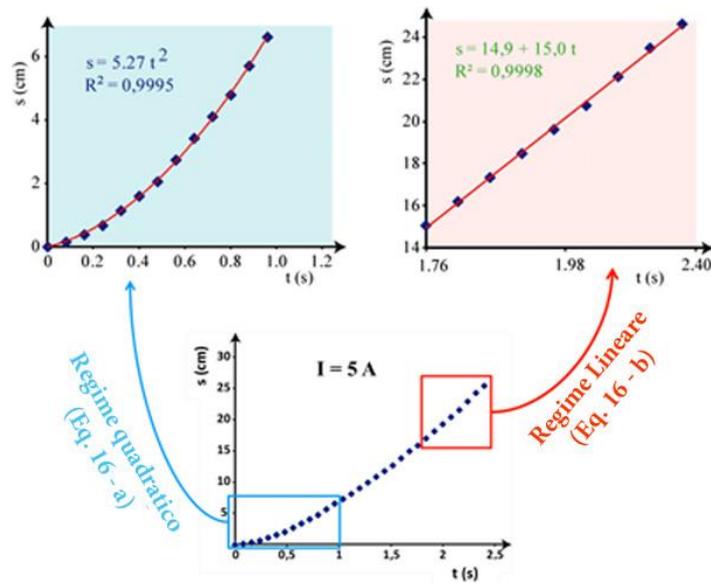


Fig. 28: Il diagramma di moto del cilindro, nella parte bassa della figura, corrisponde al valore della corrente esterna $I=5A$. La prima parte del grafico (ingrandita il alto a sinistra) e la parte finale del grafico (ingrandita in alto a destra) sono state fittate utilizzando rispettivamente le equazioni Eq. 16a ed Eq. 16b.

Dai fit dei grafici è possibile ricavare i seguenti valori:

$$\tau_{Fouc.} = \tau_{Ed} - \tau_{volv.} = (23,0 \pm 0,5) g \text{ cm}^2 s^{-2}$$

Eq. 20: Momento torcente dovuto alle correnti di Foucault, ricavato dal fit dei dati.

$$v = (15,0 \pm 0,3) \text{ cm s}^{-1}$$

Eq. 21: Velocità del cilindro, ottenuta attraverso il fit dei dati.

Ricordando la relazione fra la velocità angolare e quella tangenziale, è possibile ricavare dalla (Eq. 19) la potenza dissipata per effetto delle correnti di Foucault:

$$P_{Fouc.} = (8,6 \pm 0,4) \times 10^{-5} W$$

Eq. 22: Potenza dissipata dalle correnti di Foucault.

L'ordine di grandezza della potenza dissipata dalle correnti di Foucault deve essere confrontata con la potenza elettrica fornita al sistema dal generatore di corrente. Quest'ultimo infatti, fornisce una potenza di circa 7W, ciò implica che quasi tutta l'energia fornita viene dissipata dagli effetti resistivi termici delle guide e dei fili di connessione.

Quanto descritto dimostra che la strategia sperimentale proposta, nonostante la sua semplicità, permette di stimare la potenza dissipata dalle correnti di Foucault con una sensibilità dell'ordine di 10^{-5} , rispetto al valore della potenza tipicamente coinvolto nel sistema. Lo stesso tipo di analisi è stato effettuato con gli altri valori della corrente ed i risultati sono riportati nella tabella (Tab. 1).

I (A)	$\tau_{\text{Fouc.}}$ ($\text{g cm}^2 \text{s}^{-2}$)	$P_{\text{Fouc.}}$ (10^{-5}W)	τ_{Ed} ($\text{g cm}^2 \text{s}^{-2}$)
3	14.7 ± 0.3	4.1 ± 0.2	20.2 ± 0.6
5	23.0 ± 0.5	8.6 ± 0.3	28.5 ± 0.8
7	31 ± 1	14.7 ± 0.7	36 ± 1

Tab. 1: Momento torcente esercitato e potenza dissipata dalle correnti di Foucault (seconda e terza colonna) al variare della corrente esterna fornita dal generatore. Il momento torcente dovuto all'interazione fra quest'ultima corrente ed il campo magnetico fisso esterno è rappresentato nella quarta colonna.

Sebbene siano state effettuate solo tre misure di corrente esterna (a causa di limitazioni dovute al nostro generatore di corrente) il momento torcente prodotto dall'interazione delle correnti indotte di Foucault sembra dipendere linearmente dalla corrente esterna fornita dal generatore (Fig. 29–in alto). Il potere dissipativo corrispondente invece, sembra non seguire una relazione lineare (Fig. 29 – in basso). Quest'ultimo è un risultato prevedibile poiché, dall'equazione (Eq. 19) non possono dipendere contemporaneamente in modo lineare dalla corrente fornita dal generatore, a meno che la velocità di regime non resta invariata, ma questo non è il caso.

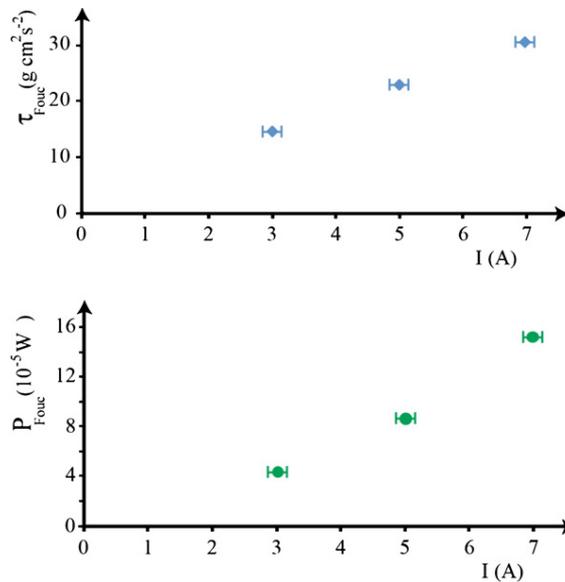


Fig. 29: Momento torcente esercitato (in alto) e la potenza dissipata (in basso) dovuta all'interazione elettrodinamica delle correnti di Foucault.

Infine, per questione di completezza, è possibile stimare il momento torcente dovuto all'attrito volvente (contributo non indispensabile per stimare la potenza dissipata per effetto di Foucault). Tale contributo può essere calcolato studiando il moto del cilindro nelle stesse condizioni precedenti, ma

senza momenti torcenti elettrodinamici, ossia con $\tau_{Ed} = \tau_{Fouc.} = 0$ (sperimentalmente si ottiene questa condizione ponendo $B=0$ ed $I=0$). Per ottenere questa condizione, l'esperimento è condotto estraendo una metà dell'asta ferromagnetica (a cui sono stati fissati i magneti) al di fuori delle guide conduttrici. In questa configurazione, la corrente esterna è utilizzata per mettere in moto il cilindro (moto accelerato) e successivamente spenta in corrispondenza del passaggio del cilindro nella regione in cui non compare più l'asta ferromagnetica. Il moto che segue, soggetto solo all'influenza dell'attrito volvente (poiché il campo magnetico e la corrente sono uguali a zero), consente facilmente di stimare l'accelerazione costante negativa a cui è soggetto il cilindro (Eq. 23).

$$a = -\frac{R}{J} \tau_{volv.}$$

Eq. 23: Decelerazione costante a cui è soggetto il cilindro, nelle condizioni in cui $B=0$ ed $I=0$.

In questo modo, determinando il valore della decelerazione a , dal fit dei dati è possibile ottenere il momento torcente dovuto all'attrito volvente (Eq. 24) e la corrispondente potenza dissipata (Eq. 25).

$$\tau_{volv.} = (5,5 \pm 0,3) g \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$$

Eq. 24: Momento torcente dovuto all'attrito volvente.

$$P_{Volv} = (2,1 \pm 0,2) \times 10^{-5} \text{ W}$$

Eq. 25: Potenza dissipata a causa dell'attrito volvente.

Una volta determinato il contributo $\tau_{volv.}$, è possibile ricavare il momento torcente (che causa l'accelerazione del cilindro) dall'equazione (Eq. 18). I valori ricavati sono riportati nell'ultima colonna della tabella (Tab. 1).

È importante sottolineare alcune accortezze usate durante la realizzazione dell'esperimento. Infatti, è necessario garantire un buon contatto elettrico fra il cilindro e le guide conduttrici (per questo motivo sono state ben ripulite dalle impurità sia il cilindro che le guide e inoltre è stata utilizzata la carta alluminio per ricoprire le guide conduttrici di rame, in modo da modellarsi meglio durante il passaggio del cilindro, vista la naturale morbidezza). È stato sperimentato, infatti, che laddove il contatto non era garantito, comparivano dei tratti appuntiti nei plot dei dati raccolti. In questa configurazione è stato sufficiente avere 1 cm di contatto fra il cilindro e ciascuna guida.

3.4 Paradosso dei Geomags

Il dispositivo sperimentale consente di visualizzare qualitativamente il comportamento di un materiale ferromagnetico in presenza di un campo

magnetico esterno ed eventualmente effettuare delle misure qualitative con una certa precisione, finalizzate a calcolare la forza di interazione fra un materiale ferromagnetico ed un magnete.

L'esperimento non riguarda direttamente l'induzione elettromagnetica, quindi apparentemente non è molto attinente con la successione di attività presentate e finalizzate tutte verso la legge di Faraday-Neumann-Lenz. Tuttavia, risulta molto importante comprendere bene il comportamento dei materiali ferromagnetici in un percorso sperimentale ben strutturato e incentrato sull'induzione elettromagnetica. Infatti, nell'ambito di una attività sperimentale, gli studenti che non hanno mai trattato il magnetismo possono cominciare ad introdurre il concetto del campo magnetico a partire da semplici esplorazioni dell'interazioni fra un magnete e materiali di diverso tipo³⁰. Diventa quindi importante saper distinguere il comportamento di un materiale ferromagnetico da un altro tipo di materiale.

L'esperimento nasce dall'analisi di un fenomeno ben preciso, ossia dell'interazione fra i poli di due Geomags. Se infatti, due poli magnetici omologhi vengono avvicinati l'uno verso l'altro senza vincoli, essi causeranno un momento torcente l'uno sull'altro fino a mettersi nelle condizioni tali da avere poli opposti l'uno di fronte all'altro. Solo in questo momento ci sarà un'attrazione reciproca fra i due magneti. Qualora avvicinassimo i due magneti, vincolando i loro movimenti (per esempio tenendoli stretti fra le dita della mano), sarà impossibile costringere due poli omologhi all'attrazione reciproca. Se si ripete l'esperienza interponendo una sferetta ferromagnetica fra i due poli omologhi (per esempio attaccata ad uno dei due), si può verificare una fase iniziale simile al comportamento precedentemente descritto per i due poli omologhi senza la sferetta, ma vincolando i Geomags, sarà possibile superare la repulsione iniziale e costringere i poli omologhi all'attrazione, fenomeno noto come "*Il paradosso dei Geomags*" (Bonanno et Al., 2009b).

3.4.1 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale, molto semplice da realizzare, è composto da una bilancia digitale di precisione (Fig. 30), un supporto in plexiglass o legno su cui può scorrere una vite (Fig. 30), due magneti (ricavati da un Geomag) incollati su due tavolette di legno (Fig. 31), in modo tale da ottenere un polo nord ed un polo sud, una piccola sferetta di ferro (contenuta nelle confezioni di Geomags).

L'esperimento consiste nel misurare la variazione del peso delle tavolette di legno (su cui sono stati incollati i magneti) al variare della distanza da un

³⁰ Nel capitolo 5 verrà discusso in dettaglio un intero percorso sperimentale, proprio a partire dall'introduzione del concetto di campo magnetico.

secondo magnete, fissato sull'estremità della vite che scorre nella struttura portante.



Fig. 30: Bilancia di precisione (a sinistra) e struttura in Plexiglass (a destra) su cui è fissato un supporto in alluminio attraverso cui può scorrere una vite in acciaio Inox.

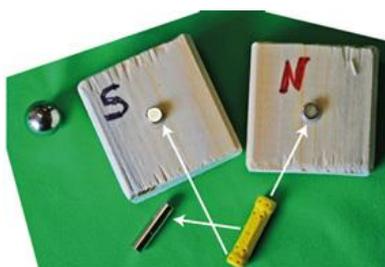


Fig. 31: due magneti (ricavati da un Geomag) incollati su due tavolette di legno, in modo tale da ottenere un polo nord ed un polo sud.



Fig. 32: Apparato sperimentale pronto per effettuare le misure.

La variazione della distanza fra i due magneti (uno fissato sulla tavoletta ed uno sulla vite) avviene grazie alla rotazione della vite stessa, meccanismo che consente una grande precisione negli spostamenti. In base al passo della vite utilizzata, si può aumentare o diminuire la sensibilità dello strumento e ricavare la distanza equivalente, in millimetri, corrispondente ad un giro completo di vite. È possibile così, ricavare dei grafici caratteristici tipici di questa interazione. In particolare modo, opponendo poli omologhi si ricava un grafico tipico di repulsione (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**-azzurro), viceversa opponendo poli eterologhi (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**-rosso).

Interazione fra poli magnetici

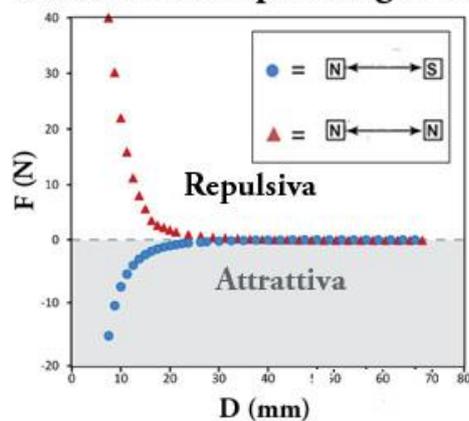


Fig. 33: Interazione fra (a) un polo nord ed un polo sud, indicata in azzurro (grafico tipico di sola attrazione) (b) fra due poli nord, indicata in rosso (grafico tipico di sola repulsione).

Se si ripete la misura utilizzando un magnete (attaccato alla vite) ed una sferetta (poggiata sulla bilancia), si ricava banalmente un grafico di attrazione, indipendentemente dal polo del magnete fisso sulla vite.

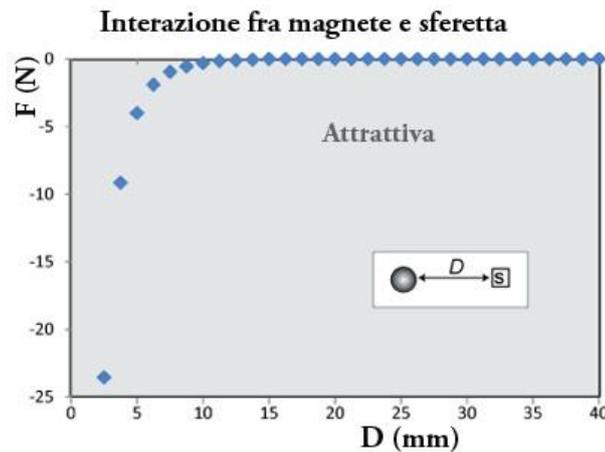


Fig. 34: Interazione fra un polo magnetico (nord o sud è indifferente) ed una sfera ferromagnetica.

Infine, se si affacciano poli omologhi o eterologhi, con una pallina ferromagnetica interposta, uno dei due grafici caratteristici (riportati in Fig. 33) cambia notevolmente. Infatti, se i poli dei magneti sono opposti il grafico è sempre attrattivo (Fig. 35 azzurro) e la pallina funge da prolungamento del polo del magnete posto sulla bilancia; se i poli sono invece uguali, si osserva una prima parte del grafico tipica della repulsione seguita, al di sotto di un valore limite della distanza fra magnete e sferetta, da un grafico tipico di attrazione (Fig. 35 rosso). Tutto questo corrisponde a ciò che si sperimenta tenendo fra le dita due Geomags (con poli uguali affacciati reciprocamente) con una pallina ferromagnetica interposta fra di essi: inizialmente avvicinandoli reciprocamente si osserva una repulsione tipica dell'interazione fra poli uguali, tuttavia forzando l'interazione fra i due, si osserva improvvisamente una attrazione.

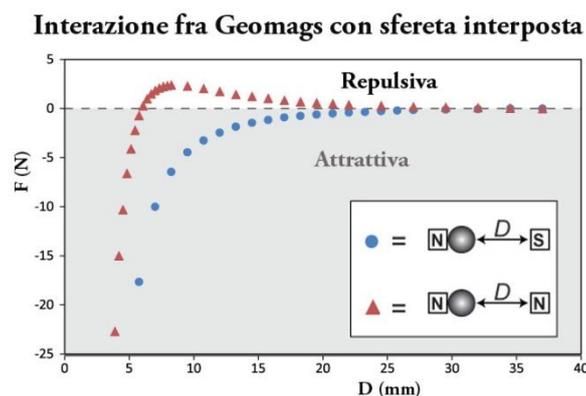


Fig. 35: Affacciando poli omologhi o eterologhi, con una pallina ferromagnetica interposta, uno dei due grafici caratteristici (riportati in Fig. 33) cambia notevolmente. Infatti, se i poli dei magneti sono opposti, il grafico è sempre attrattivo (azzurro) e la pallina funge da prolungamento del polo del magnete posto sulla bilancia; se i poli sono invece uguali, si osserva una prima parte del grafico tipica della repulsione seguita, al di sotto di un valore limite della distanza fra magnete e sferetta (nel grafico poco al di sotto di 5 mm, in corrispondenza dello zero della forza), da un grafico tipico di attrazione (rosso).

L'esperimento mostra così il comportamento dei materiali ferromagnetici, mettendo in luce il carattere locale della magnetizzazione della materia.

3.4.2 Tutorial Multimediale³¹

È possibile supportare l'esperimento quantitativo con una riproduzione virtuale fedele dell'esperimento dal punto di vista della magnetizzazione (Bonanno et Al., 2010b). È necessario prendere spunto dal metodo delle immagini per l'elettrostatica, secondo cui è possibile pensare all'interazione fra una carica Q vicino ad una sfera conduttrice isolata (Fig. 36a) come all'interazione fra tre cariche, senza alcuna sfera (Fig. 36b). È necessario imporre le stesse condizioni al contorno, ossia che la superficie tratteggiata, corrispondente alla superficie della sfera iniziale, continui ad essere equipotenziale. Il metodo delle immagini fornisce il valore delle cariche Q' e Q'' e la loro distanza reciproca, affinché i due sistemi (carica e sfera oppure tre cariche elettriche) siano equivalenti, mantenendo le condizioni al contorno invariate (superficie sferica di contorno equipotenziale).

³¹ Il dispositivo con il tutorial è stato presentato ai congressi internazionali INTED 2009, SIF 2009, GIREP 2010, MPTL14.

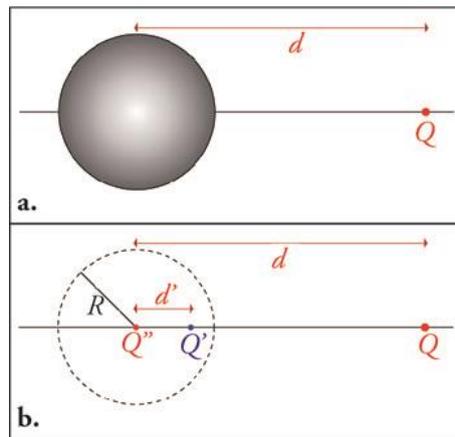


Fig. 36: Il metodo delle immagini per l'elettrostatica, secondo cui è possibile pensare all'interazione fra una carica Q vicino ad una sfera conduttrice isolata come all'interazione fra tre cariche, senza alcuna sfera. Le condizioni al contorno restano identiche, ossia che la superficie tratteggiata, corrispondente alla superficie della sfera iniziale, continui ad essere equipotenziale.

$$d' = R \frac{R}{d} \quad Q'' = -Q' = Q \frac{R}{d}$$

Eq. 26: Soluzioni per il metodo delle immagini.

In modo analogo, è possibile pensare ad un metodo delle immagini per la magnetostatica, ossia all'interazione fra un dipolo magnetico μ ed una sfera ferromagnetica (con elevato valore di permeabilità magnetica) ed fra un dipolo magnetico μ (Fig. 37a) come un'interazione fra due dipoli magnetici, senza alcuna sfera (Fig. 37b).

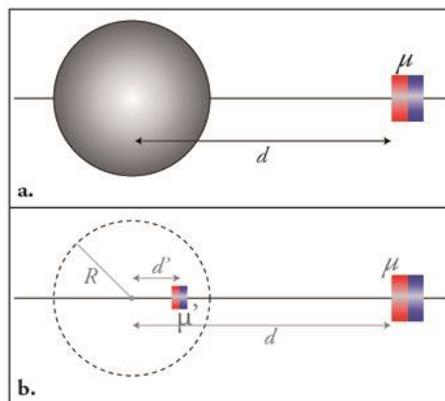


Fig. 37: Il metodo delle immagini per la magnetostatica, ossia all'interazione fra un dipolo magnetico μ ed una sfera ferromagnetica (con elevato valore di permeabilità magnetica) come un'interazione fra due dipoli magnetici, senza alcuna sfera.

$$d' = R \frac{R}{d} \quad \mu' = -\mu \frac{R}{d}$$

Eq. 27: Metodo delle immagini per la magnetostatica.

Utilizzando questi concetti ed implementando i calcoli, è possibile ottenere un tutorial multimediale, che mostra qualitativamente l'evoluzione della magnetizzazione al variare della distanza fra magnete e sferetta (Fig. 38).

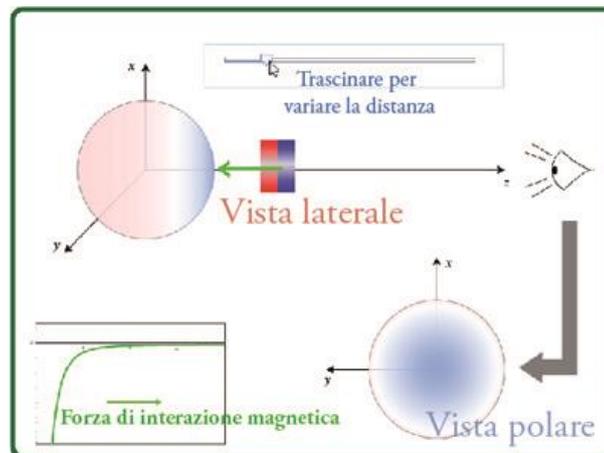


Fig. 38: Tutorial multimediale che mostra l'evoluzione della magnetizzazione all'interno della sferetta (quando essa interagisce con un magnete) al variare della distanza fra la sferetta ed il magnete.

In modo analogo, applicando il metodo delle immagini al caso di due dipoli magnetici che interagiscono con una sfera ferromagnetica (Fig. 39), è possibile creare un tutorial multimediale corrispondente (Fig. 40).

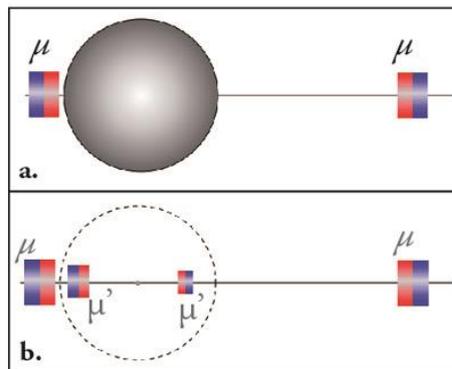


Fig. 39: Interazione fra due dipoli magnetici μ ed una sfera ferromagnetica (con elevato valore di permeabilità magnetica).

È molto interessante osservare come, dai calcoli effettuati utilizzando il metodo delle immagini (nel caso in cui si tiene conto dell'interazione di due dipoli magnetici con una sfera ferromagnetica di elevata permeabilità magnetica) è possibile derivare un grafico della forza di interazione magnetica in funzione della distanza che corrisponde perfettamente a quella ricavata sperimentalmente con il dispositivo proposto (Fig. 40).

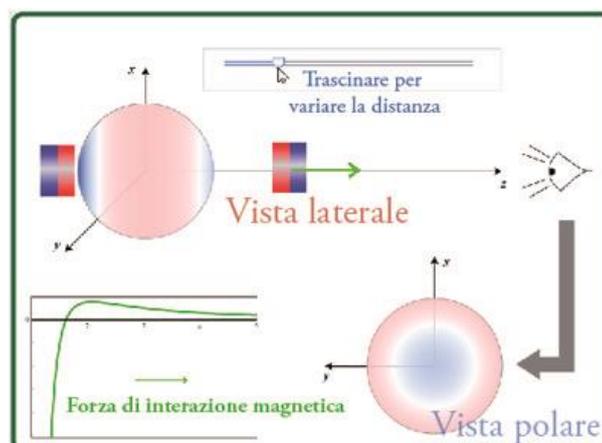


Fig. 40: Tutorial multimediale che mostra l'evoluzione della magnetizzazione all'interno della sferetta (quando essa interagisce con due magneti) al variare della distanza fra la sferetta ed uno dei magneti.

3.5 Macchina di Atwood

L'ultimo dispositivo consente di effettuare misure quantitative sull'induzione elettromagnetica, finalizzate a mettere in luce il ruolo centrale della variazione del flusso del campo magnetico. Nel secondo capitolo è stato ben evidenziato come tale problema di apprendimento sia un nodo concettuale ben presente nella letteratura internazionale e come gli studenti incontrino grandi difficoltà nel comprendere in modo significativo questo concetto.

Inoltre, questa attività consente di analizzare sperimentalmente alcuni tipi di moto, quali il moto rettilineo uniforme ed il moto uniformemente accelerato. La letteratura ha evidenziato i nodi concettuali relativi alla cinematica del punto materiale ed alla dinamica, in particolar modo è ben noto come gli studenti pensino che una forza costante implichi una velocità costante e non una accelerazione costante (Maloney et Al., 2001). La letteratura internazionale ha messo ben in evidenza la discrepanza che c'è fra la visione di senso comune e la meccanica Newtoniana (Halloun & Hestenes, 1985-1985b).

La macchina di Atwood si presta bene allo studio del moto di due corpi, in cui il moto dell'uno influenza quello dell'altro, ed è molto spesso utilizzata nei corsi di introduzione alla fisica, sia a scuola sia a livello universitario. Normalmente viene usata come esercizio, in cui l'obiettivo è quello di calcolare l'accelerazione del sistema (dei due corpi, del filo e l'accelerazione tangenziale della carrucola) e la tensione del filo (McDermott, Shaffer, & Somers, 1994). Questo dispositivo consente di variare diversi parametri (altezza iniziale di caduta dei corpi, velocità iniziale, accelerazione del sistema e quindi di conseguenza anche la velocità finale). In questo modo è possibile variare a proprio piacimento il moto del magnete e questo fattore risulta molto importante per quelle finalità che questa attività si propone di raggiungere.

3.5.1 Apparato sperimentale

L'esperimento consiste nell'utilizzare una semplice macchina di Atwood, alle cui estremità sono sospese da un lato dei piccoli pesi, variabili a piacimento, dall'altro un magnete che può attraversare, nel suo moto di caduta, una spira sospesa ad una certa altezza attraverso una struttura di supporto. Il magnete, legato al contrappeso attraverso un filo inestensibile, può scorrere all'interno di un tubo di plexiglass, in modo da facilitare il suo passaggio attraverso la bobina. Durante il moto di caduta del magnete, la variazione del flusso del campo magnetico attraverso la bobina produrrà una *f.e.m.* indotta, la quale può essere rilevata ed analizzata attraverso un sistema di acquisizione dati ed un software di elaborazione. I dispositivi di questo genere più diffusi, seppur non molto cari, non sono presenti in tutte le scuole, perché comunque abbastanza dispendiosi per quelle che sono le economie degli istituti scolastici. Per ovviare a questo problema, è stato utilizzato nell'esperimento come sistema di acquisizione l'ordinaria scheda audio di un comune PC. Prelevando infatti il segnale dalla bobina attraverso dei morsetti, collegati alla scheda audio tramite uno spinotto comune utilizzato per le cuffie, è possibile rilevare, grazie alla scheda audio, la *f.e.m.* indotta ed elaborarla utilizzando un programma reperibile gratuitamente in rete (Visual Analyser 2010 NE-XT v2.4).

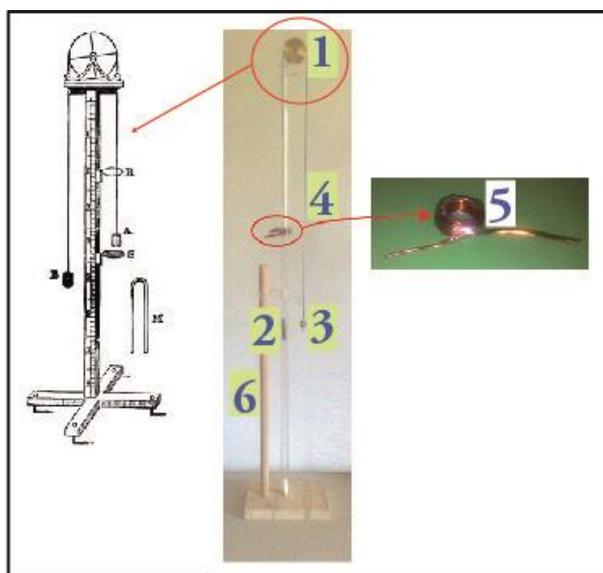


Fig. 41: Apparato sperimentale per studiare quantitativamente il ruolo della variazione del flusso di \mathbf{B} nel tempo. 1. macchina di Atwood; 2. Magnete in caduta; 3. Piccolo contrappeso; 4. Filo inestensibile che collega magnete e contrappeso; 5. Spira fatta a mano, utilizzando un filo di rame; 6. Struttura di supporto, formata da una base in legno, un'asta di legno che serve per fermare il tubo di plexiglass alla base.

La figura (Fig. 42) mostra un tipico grafico ottenuto nel moto di caduta del magnete. Nel grafico della *f.e.m.* indotta all'interno della spira si distinguono tre punti, il primo (di massimo) corrispondente all'ingresso del

primo polo del magnete all'interno della bobina, il secondo³² (in cui la *f.e.m.* è uguale a zero) corrispondente alla fase in cui il secondo polo del magnete ancora non ha superato la bobina, il terzo (di minimo) in cui il secondo polo del magnete ha attraversato la bobina.

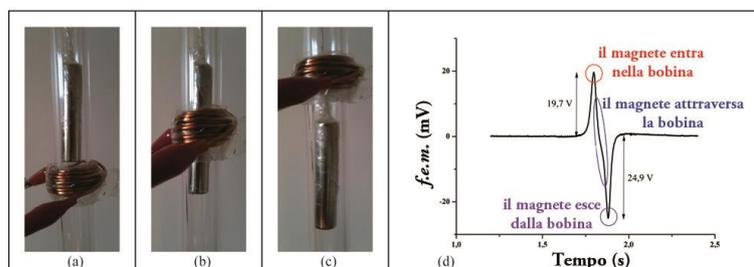


Fig. 42: Grafico tipico della *f.e.m.* indotta all'interno della spira. Nel grafico si distinguono tre punti: (a) punto di massimo corrispondente all'ingresso del primo polo del magnete all'interno della bobina; (b) Punto in cui la *f.e.m.* è uguale a zero, corrispondente alla fase in cui il secondo polo del magnete ancora non ha superato la bobina; (c) Punto di minimo, in cui il secondo polo del magnete ha attraversato la bobina. (d) Differenza fra le ampiezze dei due picchi, prese in moduli. Si può osservare come il secondo picco abbia un'ampiezza in modulo maggiore del primo picco. Ciò si spiega facilmente osservando che il moto del magnete è uniformemente accelerato, di conseguenza la sua velocità in ingresso è minore di quella in uscita..

È molto interessante osservare la differenza fra le ampiezze dei due picchi, prese in moduli (Fig. 42). Si può osservare come il secondo picco abbia un'ampiezza in modulo maggiore del primo. Ciò si spiega facilmente osservando che il moto del magnete è uniformemente accelerato, di conseguenza la sua velocità in ingresso è minore di quella in uscita. Questo comporta che la variazione del flusso del campo magnetico in ingresso è minore di quella in uscita.

L'interpretazione del grafico proposta consente di mettere in luce il ruolo fondamentale della variazione del flusso del campo magnetico. Sarebbe molto importante abbinare un'analisi delle velocità a quanto visto in precedenza. I software di elaborazione dati commerciali sono in grado di affiancare tale analisi in tempo reale al grafico della *f.e.m.* indotta, aggiungendo semplicemente un sensore di moto capace di seguire il moto del contrappeso.

In realtà i sensori commerciali non riescono a seguire bene il moto del contrappeso, poiché di dimensioni troppo piccole rispetto a quelle necessarie per far funzionare bene il sonar su cui si basano i comuni rilevatori.

Un modo alternativo per studiare il moto del magnete è identico a quello descritto nel paragrafo 3.3.1 (moto del cilindro in un campo magnetico), ossia acquisire il video del contrappeso trascinato verso l'alto dal magnete in caduta, usando una comune webcam. Utilizzando un programma di editing video, quale per esempio Windows Movie Maker (Fig43a), disponibile gratuitamente

³² In realtà questa condizione, in cui il magnete non è fuoriuscito dalla spira, non coincide con un solo punto ma con un intervallo in cui la *f.e.m.* passa rapidamente dal massimo a zero e poi tende al valore minimo.

su tutti i PC domestici o in rete, è possibile acquisire il video del moto del magnete e suddividere tale moto in una successione di immagini (frames).

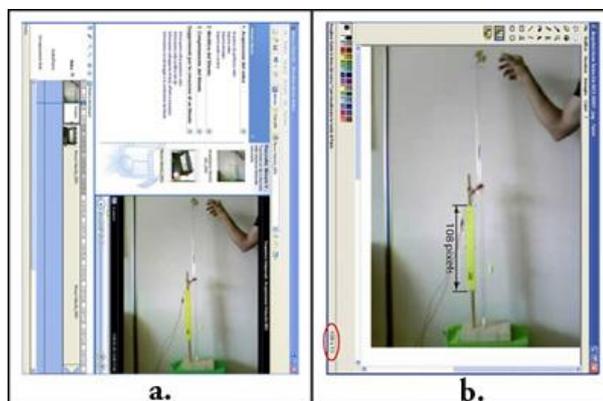


Fig. 43: Utilizzando Windows Movie Maker, disponibile gratuitamente su tutti i PC domestici, è possibile acquisire il video del moto del magnete e suddividere tale video in una successione di immagini (frames).

Ciascun frame può essere utilizzato per calcolare la distanza (misurata in pixel) del contrappeso rispetto ad un generico punto di partenza (Fig.43b), utilizzando un qualsiasi programma di editing di immagini, per esempio Paint (presente gratuitamente su tutti i PC domestici).

Resta a questo punto il problema di convertire le distanze, misurate in pixels, in centimetri. Questo procedimento di calibrazione si realizza in modo molto semplice fissando vicino all'apparato sperimentale un oggetto le cui dimensioni in centimetri sono note (nella Fig. 43 l'oggetto campione è rappresentato da un righello giallo). Successivamente, sarà possibile calcolare a quanti centimetri corrisponde un pixel, impostando una semplice proporzione fra la misura del righello in pixel e la misura del righello in centimetri.

Se si costruisce il grafico, su un foglio di calcolo Excel, delle distanze in funzione del tempo (Fig.44), assumendo come intervallo temporale fra due frames successivi quello fornito dalle caratteristiche della Webcam ($1/25\text{ s}$)³³, è possibile verificare come il moto del contrappeso (e quindi del magnete) sia tipicamente quello di un moto uniformemente accelerato ($s(t) = \frac{1}{2}at^2$).

³³ L'attendibilità di questo intervallo temporale è stata verificata nel paragrafo 3.3.1.

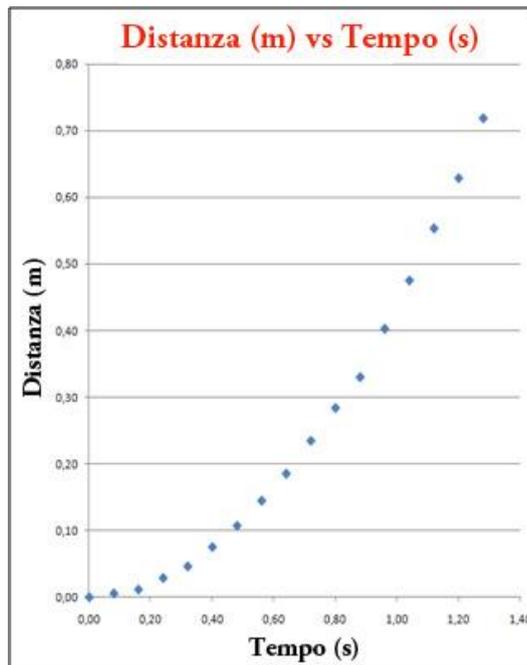


Fig. 44: Spazio percorso dal magnete in funzione del tempo. Il grafico è tipico del moto uniformemente accelerato.

Il corrispondente grafico dello spazio percorso dal magnete in funzione del tempo al quadrato (Fig. 45) consente di ricavare il valore sperimentale dell'accelerazione del sistema (Eq. 28); questa si discosta del 15% rispetto al valore teorico (vedi appendice D).

$$a_{exp} = 0,872 \frac{m}{s^2}$$

Eq. 28: Accelerazione sperimentale del sistema.

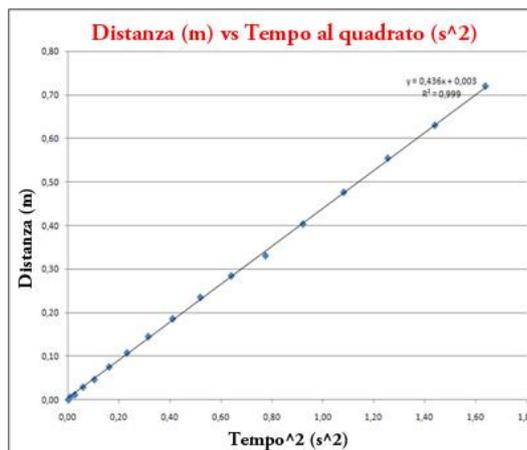


Fig. 45: Distanza vs tempo². Da questo grafico è possibile ricavare il valore sperimentale dell'accelerazione del sistema.

Nota l'accelerazione del sistema, è possibile ricavare la velocità per ciascun istante di tempo ($v = a \cdot t$) e in particolare nei due istanti corrispondenti all'ingresso del primo polo del magnete all'interno della bobina ed all'uscita del secondo polo. L'analisi delle velocità conferma quanto detto in precedenza sulle velocità in ingresso e in uscita (Fig. 46).

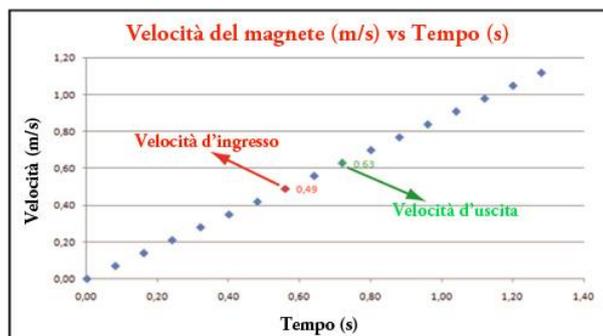


Fig. 46: Velocità del magnete in funzione del tempo. La velocità in ingresso del magnete è più piccola di quella in uscita.

3.5.2 Analisi dei dati

Seguendo il procedimento illustrato in precedenza, è possibile effettuare diverse misure, variando alcuni parametri nella macchina di Atwood. In particolar modo, si possono effettuare due tipi di misure: una variando le altezze di caduta con un contrappeso fisso e una variando i contrappesi a parità di altezza di caduta. Il primo grafico (Fig. 47) mostra come diminuendo l'altezza di caduta del magnete, diminuisce l'ampiezza e contemporaneamente aumenta la larghezza dei picchi.

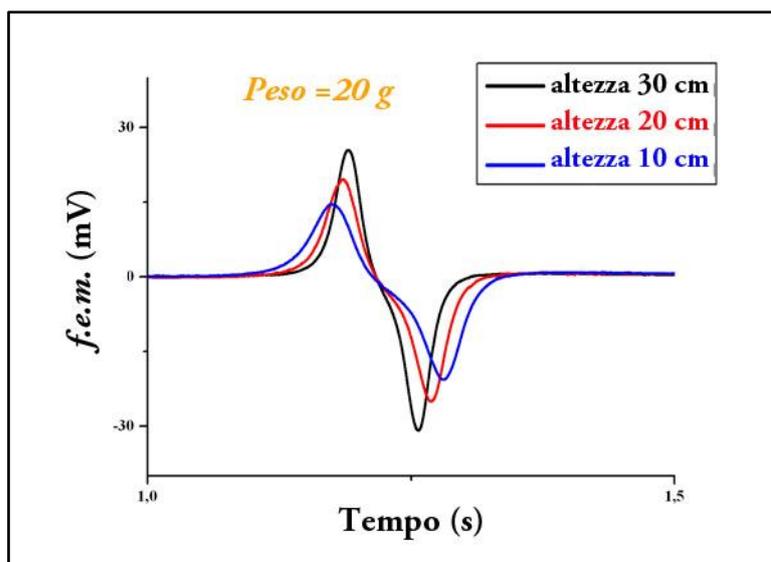


Fig. 47: Confronto fra diverse altezze di caduta, a parità di contrappeso: diminuendo l'altezza di caduta del magnete, diminuisce l'ampiezza dei picchi ed aumenta la larghezza.

Il secondo grafico (Fig. 48) mostra invece come, a parità di altezza di caduta, se diminuisce il contrappeso aumenta l'ampiezza e diminuisce la larghezza dei picchi.

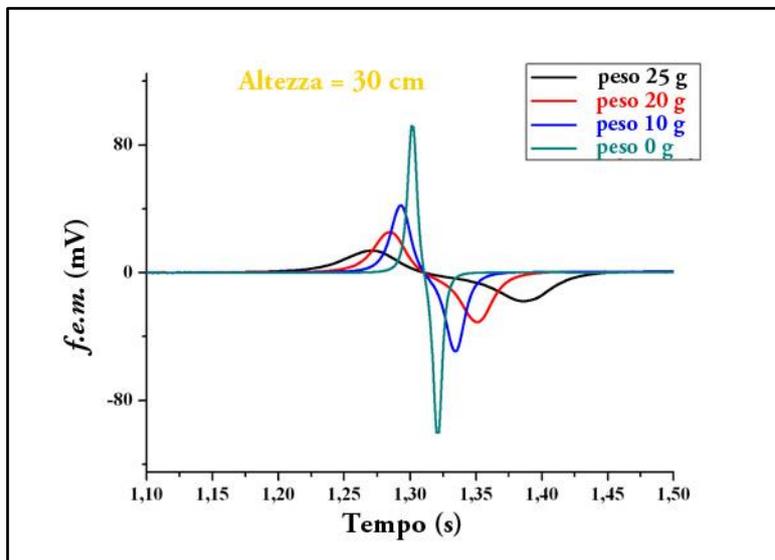


Fig. 48: Confronto fra diversi contrappesi, a parità di altezze di caduta: aumentando il contrappeso, diminuisce l'ampiezza dei picchi ed aumenta la larghezza.

I risultati ottenuti confermano quanto detto sul ruolo della variazione del flusso del campo magnetico. Variando infatti le altezze di caduta ed il contrappeso varia la velocità del magnete in ingresso ed in uscita, e di conseguenza la variazione del flusso di \mathbf{B} . Tutto questo può essere confermato dall'analisi sulle velocità, come mostrato nel sottoparagrafo precedente.

I grafici precedenti mostrano come, al variare dei parametri indicati, ad una diminuzione delle ampiezze dei picchi corrisponde un aumento delle larghezze e viceversa. Questo lascia supporre che l'area sottesa da una semicurva (per esempio dalla semicurva positiva) rimane costante. Fisicamente questo è facilmente spiegabile, visto che l'area sottesa dalla curva rappresenta il flusso del campo magnetico, che ovviamente rimane costante a parità di magnete e bobina utilizzati. Quanto detto può essere confermato dall'analisi delle aree. Il software proposto non è in grado di effettuare tale analisi. Bisogna ricorrere ad un foglio di calcolo Excel. Riportando infatti, le due colonne di dati immagazzinate attraverso il software di acquisizione, relative ai valori della *f.e.m.* indotta dei tempi, è possibile calcolare l'area sottesa dalla curva come somma delle aree dei singoli rettangoli infinitamente piccoli di base pari all'intervallo temporale ed altezza pari alla *f.e.m.* corrispondente, procedimento simile a quello utilizzato per costruire il concetto di integrazione (Fig. 49).

In questo modo è possibile calcolare le aree delle semicurve positive. L'analisi dimostra che l'area della semicurva rimane costante, a conferma che

il flusso del campo magnetico rimane sempre lo stesso, a parità di magnete e di bobina (Fig. 50).

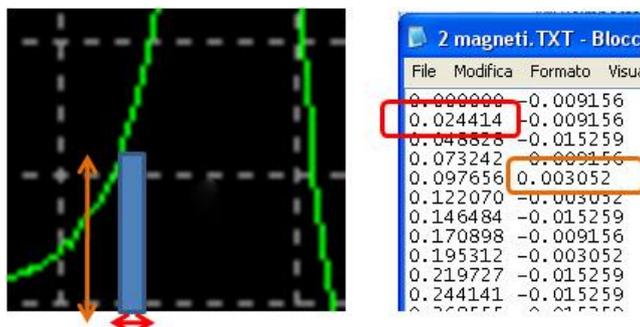


Fig. 49: Riportando, infatti, le due colonne di dati immagazzinate attraverso il software di acquisizione, relative ai valori della f.e.m. indotta dei tempi, è possibile costruire calcolare l'area sottesa dalla curva come somma delle aree dei singoli rettangoli infinitamente piccoli di base pari all'intervallo temporale ed altezza pari alla *f.e.m.* corrispondente.

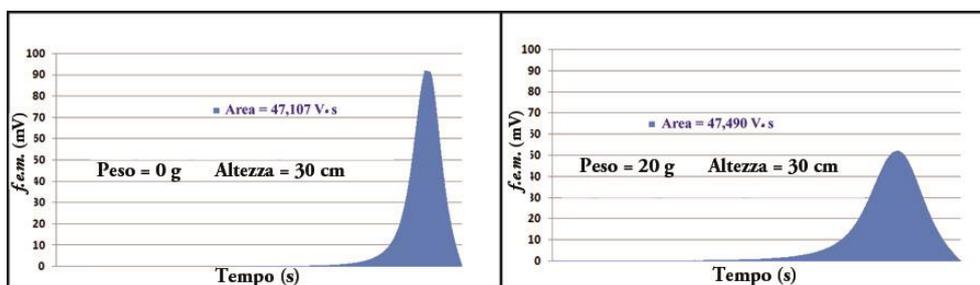


Fig. 50: L'analisi dimostra che l'area della semicurva rimane costante, a conferma che il flusso del campo magnetico rimane sempre lo stesso, a parità di magnete e di bobina.

A conferma di quanto affermato, l'area totale sottesa dalla curva è pari a zero (Fig. 51), a testimonianza che il flusso totale è nullo (ciò dimostra che le linee del campo magnetico sono chiuse e quindi il contributo al flusso totale attraverso la bobina è nullo).

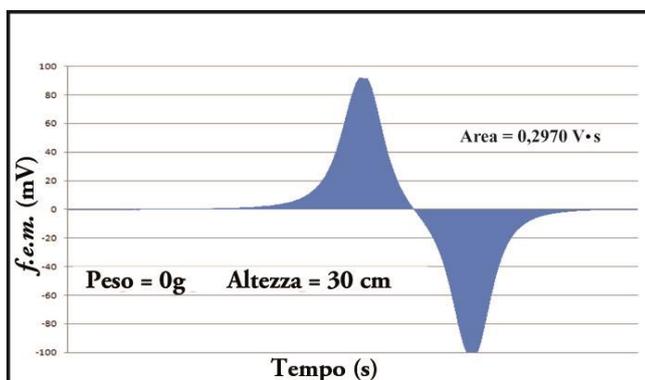


Fig. 51: l'area totale sottesa dalla curva è pari a zero, a testimonianza che il flusso totale è nullo (ciò testimonia che le linee del campo magnetico sono chiuse e quindi il contributo al flusso totale attraverso la bobina è nullo).

3.5.3 Misure alternative con la macchina di Atwood

Modificando l'apparato sperimentale è possibile analizzare la potenza dissipata per effetto delle correnti di Foucault. Il nuovo set up sperimentale prevede la sostituzione della spira con dei tubi di rame, all'interno dei quali può passare il magnete in caduta (Fig. 52).

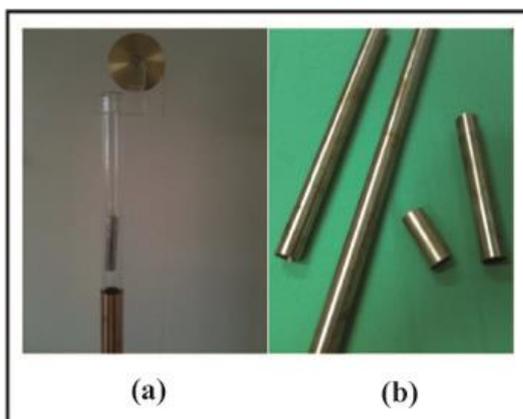


Fig. 52: Il nuovo set up sperimentale prevede la sostituzione della spira con dei tubi di rame, all'interno dei quali può passare il magnete in caduta.

Con questo nuovo dispositivo è possibile chiarire la differenza fra il moto rettilineo uniforme ed il moto uniformemente accelerato. Infatti, riportando su un grafico lo spazio percorso dal magnete in funzione del tempo, si ricava un andamento caratteristico in cui si distinguono tre regimi differenti (Fig. 53a): il primo con accelerazione costante (corrispondente alla caduta libera del magnete prima di entrare nel tubo di rame), il secondo con velocità costante (corrispondente al passaggio del magnete all'interno del tubo di rame), il terzo con accelerazione costante (corrispondente alla caduta libera del magnete al di fuori del tubo di rame).

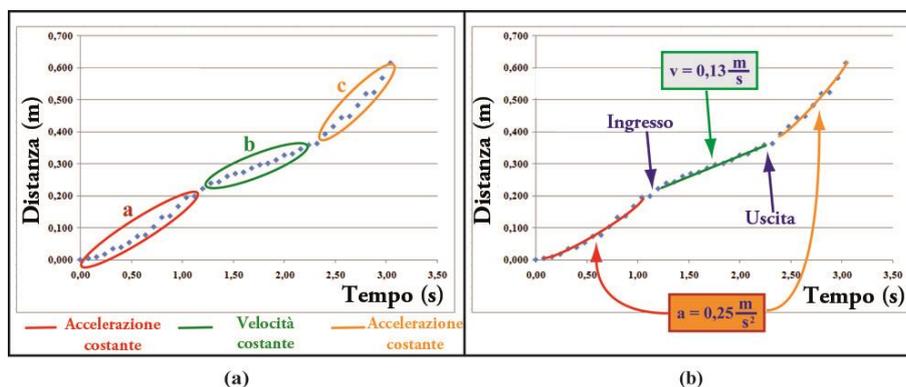


Fig. 53: (a) Grafico dello spazio percorso dal magnete in funzione del tempo: si distinguono tre regimi differenti (a) con accelerazione costante (b) con velocità costante (c) con accelerazione costante.

Gli andamenti quadratici, nella prima e nella terza regione, e lineare, nella regione intermedia, consentono di ricavare rispettivamente il valore costante dell'accelerazione e della velocità (Fig. 53b).

Da sottolineare come variando la lunghezza dei tubi di rame, varia la regione intermedia a velocità costante (Fig. 54). Interessante osservare come, pur variando la lunghezza dei tubi di rame le altezze di caduta, non varia la velocità costante nel secondo regime di moto, bensì il tempo necessario per raggiungere tale valore limite.

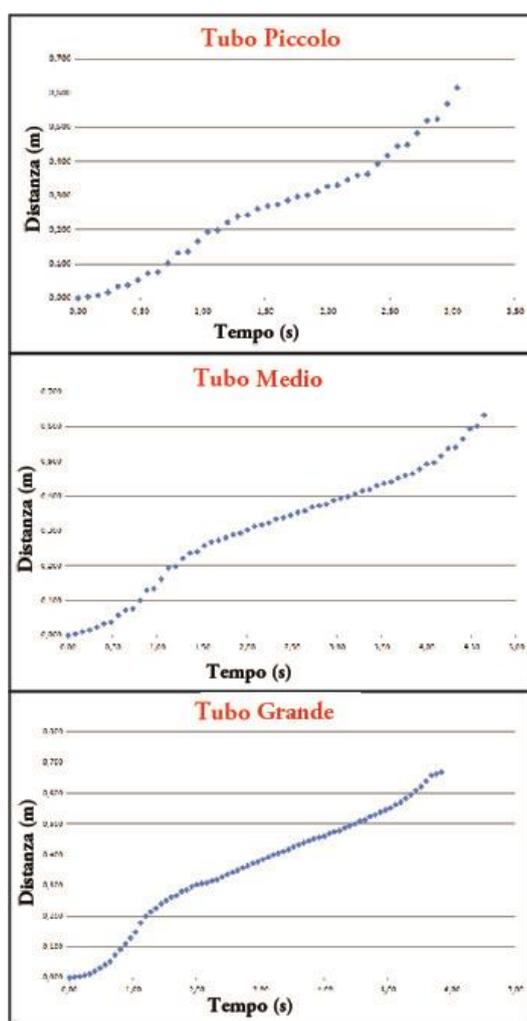


Fig. 54: Da sottolineare come variando la lunghezza dei tubi di rame, varia la regione intermedia a velocità costante. Interessante osservare come, pur variando la lunghezza dei tubi di rame le altezze di caduta, non varia la velocità costante nel secondo regime di moto, bensì il tempo necessario per raggiungere tale valore limite.

Questa velocità limite è raggiunta a causa degli effetti dissipativi dovuti a forze di tipo viscoso derivanti dalle interazioni elettrodinamiche fra il campo magnetico (del magnete in caduta) e le correnti di Foucault indotte nel tubo di rame. È possibile allora ricavare, dopo opportune sostituzioni, il valore della

forza di Foucault (Aggiungere calcoli effettuati per ottenere il risultato) e della potenza dissipata per effetto delle correnti di Foucault indotte nel tubo di rame.

$$(a) \quad F_{Fouc} = (m_1 - m_2)g = 5.8 \times 10^{-2} N$$

$$(b) \quad P_{Fouc} = F_{Fouc} \cdot v = 7.5 \text{ mW}$$

Eq. 29: (a) Forza dovuta all'interazione fra il campo magnetico del magnete in caduta e le correnti indotte nel tubo di rame; (b) potenza dissipata per effetto di Foucault.

Capitolo 4: Studi preliminari

Nel secondo capitolo sono stati analizzati diversi nodi concettuali relativi ai fenomeni magnetici e in particolar modo sono state evidenziate le difficoltà di apprendimento incontrate dallo studente nell'analizzare il fenomeno dell'induzione elettromagnetica e nell'evidenziare il ruolo della variazione del flusso nel tempo. Quest'analisi ha stimolato la produzione di diversi dispositivi hands-on (descritti singolarmente in modo dettagliato nel capitolo 3), qualitativi e quantitativi, capaci sia di rispondere alle esigenze di una nuova didattica basata su laboratori hands-on di semplice utilizzo (come descritto dall'analisi sulla letteratura effettuata nel capitolo 1), sia di fornire strumenti necessari per la comprensione di diverse sfaccettature della legge dell'induzione elettromagnetica. Ciascun dispositivo consente di mettere in luce diversi aspetti della legge di Faraday-Neumann-Lenz e di applicare differenti strategie didattiche. Un denominatore comune per tutti i dispositivi è il legame con il concetto di energia. Tutti offrono, infatti, la possibilità di trattare il tema dell'energia sotto le sue varie forme e soprattutto di analizzarne i vari tipi di conversione. Alcuni consentono di introdurre addirittura le problematiche legate alla produzione di energia (il caso più evidente è la turbina di Savonius, dispositivo che consente, tra l'altro, immediati sviluppi didattici nell'ambito delle energie alternative).

a. Turbina a vento di Savonius

La turbina a vento di Savonius mette in luce la necessità di un moto relativo fra magnete e bobina per generare una *f.e.m.* indotta capace di illuminare un piccolo diodo LED. Questo elemento, certamente importante per un primo approccio con l'induzione elettromagnetica, può condurre verso uno dei più ricorrenti nodi concettuali evidenziati dalla letteratura (si ha una *f.e.m.* indotta solo in presenza di un moto relativo) e per questo richiede una trattazione formale adeguata a chiarire tale punto cruciale. Tuttavia, consente di evidenziare il ruolo fondamentale dei magneti e delle bobine e soprattutto la loro interazione reciproca.

Da un punto di vista didattico, la sua struttura si presta molto bene ad una naturale esplorazione del dispositivo da parte degli studenti, sia da un punto di vista strutturale che del funzionamento, attraverso cui dedurre l'utilità dell'apparato o delle singole parti che lo compongono. Questo approccio didattico è tipico della metodologia per artefatti, discussa in dettaglio nell'appendice B.

b. Motorino elettrico

Gli esperimenti condotti con questo dispositivo consentono di focalizzare l'attenzione su un altro nodo concettuale molto importante legato al segno meno nella legge di Faraday: ossia la legge di Lenz. A partire dall'analisi delle trasformazioni di energia che avvengono durante il funzionamento del motorino, è possibile comprendere come l'energia elettrica associata all'induzione elettromagnetica necessita di un dispendio di altre forme di energia. In altre parole, per accendere una lampadina attraverso un *hand generator* è necessaria una certa energia meccanica (fornita a sua volta dallo sforzo muscolare). Quindi l'induzione elettromagnetica non avviene gratuitamente e ciò consente facilmente di introdurre il segno meno nella legge di Faraday.

Da un punto di vista didattico, gli esperimenti proposti si collocano naturalmente come attività di verifica in un percorso finalizzato all'analisi e comprensione dei fenomeni associati all'induzione elettromagnetica. Nel quinto capitolo verrà analizzato un tipico percorso sperimentale capace di introdurre l'induzione elettromagnetica a studenti che non hanno alcuna competenza di base sui fenomeni magnetici prima di iniziare la sperimentazione. Tale percorso può essere facilmente applicato al caso del motorino elettrico.

c. Moto di un cilindro in un campo magnetico

Questo dispositivo mette in luce gli effetti dissipativi dovuti alle correnti indotte all'interno di un conduttore. Particolarmente interessante è la strategia sperimentale utilizzata per determinare la potenza dissipata per effetto delle correnti di Foucault, tipicamente trascurabile in una trattazione macroscopica del sistema (poiché dell'ordine delle incertezze sperimentali), ma apprezzabile attraverso l'analisi di diversi regimi di moto, come illustrato nel paragrafo 3.3.

Anche questo dispositivo sperimentale può essere utilizzato come esperimento di verifica in un percorso didattico finalizzato allo studio dei fenomeni legati all'induzione elettromagnetica, in modo analogo al motorino elettrico.

d. Macchina di Atwood

L'ultimo dispositivo considerato è la macchina di Atwood. L'esperimento consente di chiarire il concetto chiave dell'induzione elettromagnetica, ossia il ruolo centrale della variazione del flusso del campo magnetico nel tempo. Questo è sicuramente uno dei nodi concettuali più

difficili da affrontare con gli studenti, poiché le grandezze coinvolte, di per sé astratte, interagiscono in maniera poco intuitiva. Da qui scaturiscono una serie di *misconceptions* ben evidenziate dalla letteratura internazionale (vedi Cap. 2) e il passaggio a una visione formale non è del tutto banale. Il dispositivo, per le sue caratteristiche, si presta fortemente all'analisi di questo nodo concettuale e se inserito in un percorso didattico ben strutturato, può condurre verso una profonda comprensione della legge di Faraday-Neumann-Lenz, soprattutto da un punto di vista qualitativo. Il quinto capitolo sarà dedicato interamente all'illustrazione di questo tipo di sperimentazione, mettendo in luce la capacità di condurre gli studenti da una visione di senso comune ad una analisi formale dei fenomeni proposti.

4.1 Studi preliminari

Durante questi quattro anni di ricerca sono stati effettuati alcuni studi preliminari finalizzati ad una prima analisi qualitativa sull'induzione elettromagnetica, prima di approdare alla progettazione di una sperimentazione didattica più articolata. Queste attività consentono di evidenziare le problematiche tipiche incontrate dagli studenti nell'affrontare l'induzione elettromagnetica e contemporaneamente di testare gli effetti derivanti dall'utilizzo di una strategia didattica fortemente coinvolgente sia da un punto di vista emotivo che mentale, quale la metodologia per artefatti. Inoltre, questo dispositivo permette di introdurre la legge di Faraday-Neumann-Lenz senza necessariamente dover fornire delle opportune basi matematiche, consentendo di iniziare a questo difficile argomento studenti di scuola secondaria inferiore o addirittura primaria, discostandosi così da quella che è stata un'impostazione tipica della didattica tradizionale. Tutto ciò avviene attraverso l'impiego di un dispositivo molto semplice da utilizzare, che non prevede alcuna difficoltà di calcolo per analizzare il suo funzionamento e soprattutto richiede costi di realizzazione bassissimi o quasi nulli.

4.1.1 Savonius come attività introduttiva sull'induzione elettromagnetica³⁴

Questa attività introduttiva è stata condotta con 83 studenti di scuola secondaria superiore di diverse città italiane (Modena, Udine, Cosenza), la maggior parte delle quali del triennio finale. Alcune classi non avevano mai studiato i fenomeni magnetici mentre altre avevano già esaminato la legge di Faraday-Neumann-Lenz. Il tempo impiegato per condurre l'indagine è stato di due ore per analizzare l'artefatto e due ore (non per tutte le classi) per costruirlo.

³⁴Questa attività è stata presentata ai congressi internazionali GIREP 2009 ed FFP12.

L'attività è stata monitorata attraverso opportune schede di lavoro utilizzate come strumento di intervista, finalizzate ad investigare gli esiti di un'attività basata sugli artefatti e sul *cooperative learning*. Agli studenti è stato chiesto di descrivere e analizzare, sia in termini di funzionamento che in termini fisici, un semplice dispositivo che riproduce una turbina a vento di Savonius.

a. Schede di lavoro

Le schede di lavoro sono strutturate in modo tale da monitorare l'evoluzione dei ragionamenti degli studenti durante lo svolgimento dell'attività (la descrizione dettagliata è riportata in appendice D1). Esse presentano una prima parte di lavoro individuale, in cui gli studenti osservano e descrivono l'artefatto senza toccarlo ma prevedendone il funzionamento (risposta alla domanda A.1), e una seconda parte in cui analizzano lo strumento da vicino, toccando il dispositivo e provando a formulare delle ipotesi di funzionamento (risposta alle domande A.2 ed A.3). Dopodiché, le schede prevedono un lavoro di gruppo, in cui ci si confronta sui diversi punti analizzati precedentemente (risposta alla domanda B1), si ipotizzano delle leggi fisiche che ne possano governare il funzionamento (risposta alla domanda B2) e infine si ipotizza la costruzione di un dispositivo diverso nel funzionamento da quello appena analizzato, ma basato sugli stessi principi (risposta alla domanda B3). In questa fase la scheda consente di seguire le dinamiche dei ragionamenti durante il confronto fra pari, metodologia questa molto utile per un apprendimento attivo e significativo. Infine, dopo la fase di lavoro di gruppo, gli studenti devono costruire il dispositivo e riportare le loro conclusioni personali sull'esperienza svolta.

b. Research questions

- RQ1. In che modo gli studenti approcciano spontaneamente alla descrizione dell'artefatto?
- RQ2. Vengono riconosciuti spontaneamente i principi di funzionamento?
- RQ3. Quali contributi provengono dall'analisi hands-on del dispositivo?
- RQ4. Viene individuato il ruolo di ogni parte dell'artefatto?
- RQ5. Quali nodi interpretativi sono espliciti nella descrizione e comprensione del processo di funzionamento?
- RQ6. Quali contributi provengono dal confronto fra pari?
 - a. per quanto riguarda l'interpretazione del funzionamento;
 - b. per quanto riguarda i principi e le leggi fisiche su cui l'artefatto si basa;

c. per quanto riguarda i modi alternativi di costruire un dispositivo simile.

RQ7. Che ruolo ricopre l'attività proposta nel costruire il ponte fra l'esperienza di senso comune e l'interpretazione fisica dei processi?

c. *Analisi dei dati*

Si farà ora vedere come analizzare le risposte date dagli studenti ai quesiti proposti.

Quesito A.1: Descrizione oggetto e ipotesi funzionamento

La descrizione del dispositivo riguarda principalmente quella delle sue parti in termini strutturali (Fig. 55). Ciascun dettaglio è raccontato secondo una visione locale, senza nessun riferimento a regole generiche (si parla di tubi di patatine tagliati a metà, di tubi di plastica, ecc.).

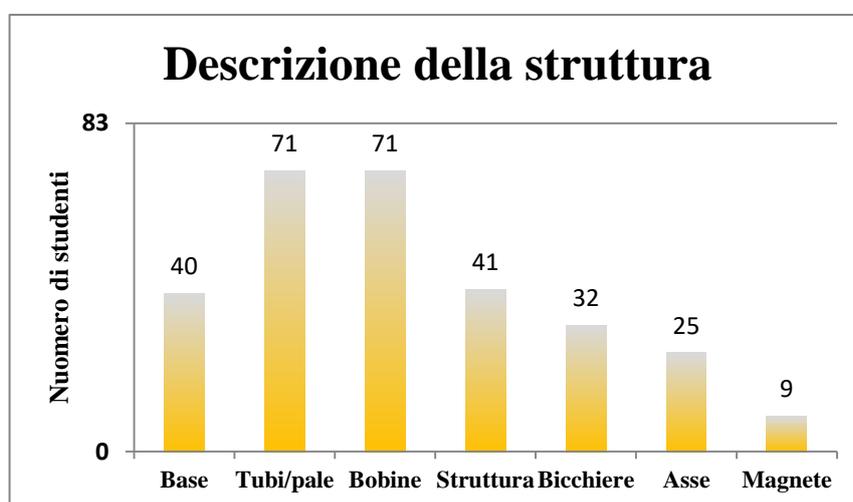


Fig. 55: Descrizione dell'artefatto da parte degli studenti.

Per quanto riguarda le ipotesi sul funzionamento (Fig. 56), solo 57 studenti su 83 forniscono una risposta nonostante sia esplicitamente richiesto. Fra queste si distinguono due categorie di ipotesi: quelle che coinvolgono elementi di movimento (“*la rotazione delle pale crea energia (36) che fa accendere la lampadina (22)*”, “*le pale eoliche (11) sfruttano l'energia del vento (6) e fa girare il secondo apparato che produce energia (1)*”) e quelle che coinvolgono principi di funzionamento (“*trasformazione di energia cinetica in elettrica (5)*” e di “*interazione fra magneti e bobina (5)*”).

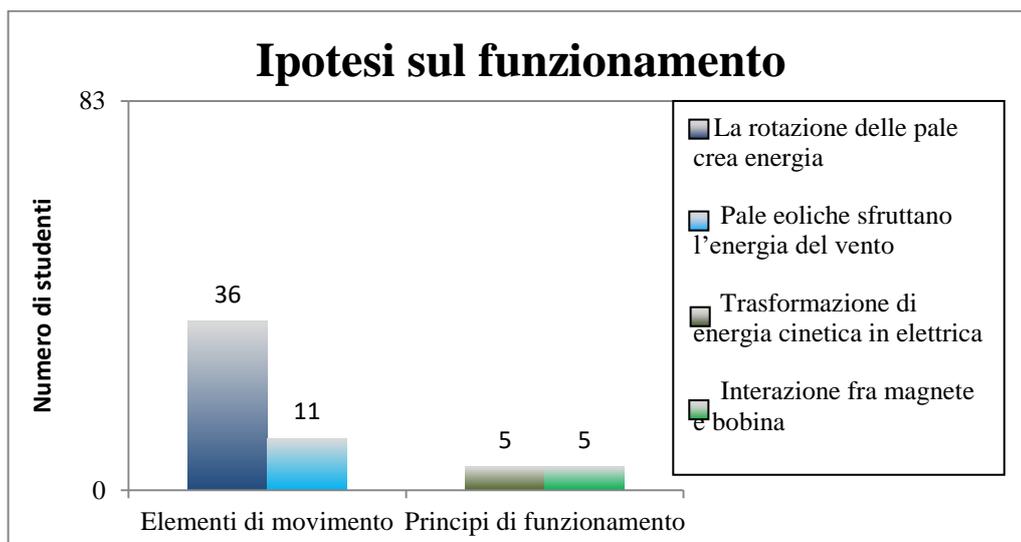


Fig. 56: Ipotesi sul funzionamento. Si distinguono due categorie di ipotesi: quelle che coinvolgono elementi di movimento (“*la rotazione delle pale crea energia (36) che fa accendere la lampadina*” (22), “*le pale eoliche (11) sfruttano l’energia del vento (6) e fa girare il secondo apparato che produce energia (1)*”) e quelle che coinvolgono principi di funzionamento (“*trasformazione di energia cinetica in elettrica (5)*” e di “*interazione fra magneti e bobina (5)*”).

È da sottolineare la presenza di *misconceptions* quali: l’energia fluisce oppure è trasmessa attraverso i fili (11), creata dal nulla o confusa con l’elettricità.

A.2: analisi hands-on del dispositivo

Dopo l’analisi hands-on diminuisce notevolmente il numero di studenti che descrive il dispositivo in termini delle singole parti, fatta eccezione per i magneti visibili solo da vicino o a contatto con il dispositivo (Fig. 57).

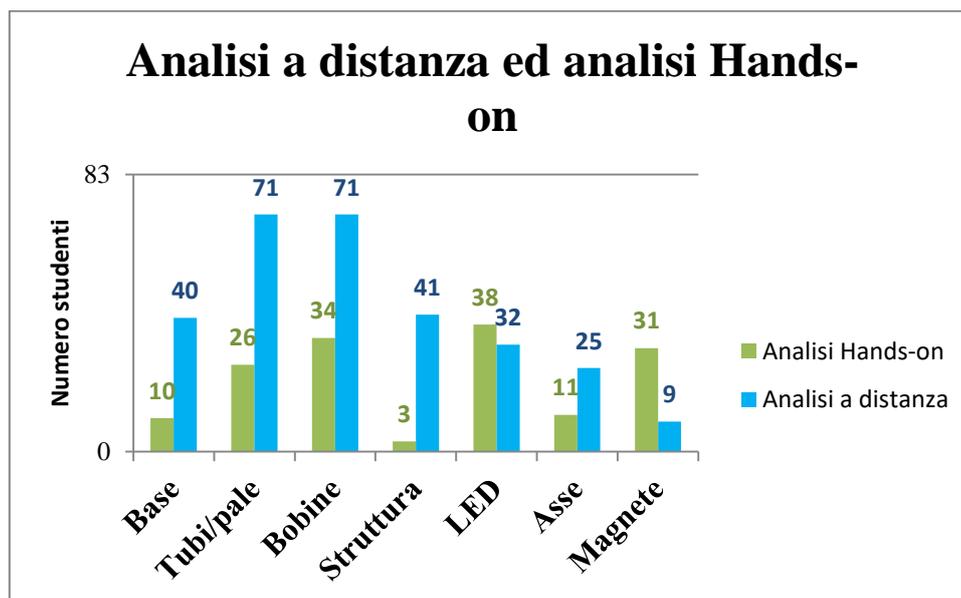


Fig. 57: confronto fra la descrizione del dispositivo fatta a distanza o hands-on. Si osserva una netta diminuzione delle descrizioni dettagliate delle singole parti. Solo la descrizione dei magneti aumenta notevolmente (da 9 a 31 studenti).

L'analisi del funzionamento aumenta notevolmente (Fig. 58): ora sono 56 gli studenti che individuano la rotazione delle pale e 22 di essi vedono tale rotazione come fonte diretta di energia necessaria ad accendere il LED. Per quanto riguarda i principi fisici, 15 studenti sottolineano il ruolo dei magneti per produrre energia elettrica (senza fare riferimento all'induzione EM), mentre per altri 11 l'accensione del LED dipende dalla velocità di rotazione delle pale.

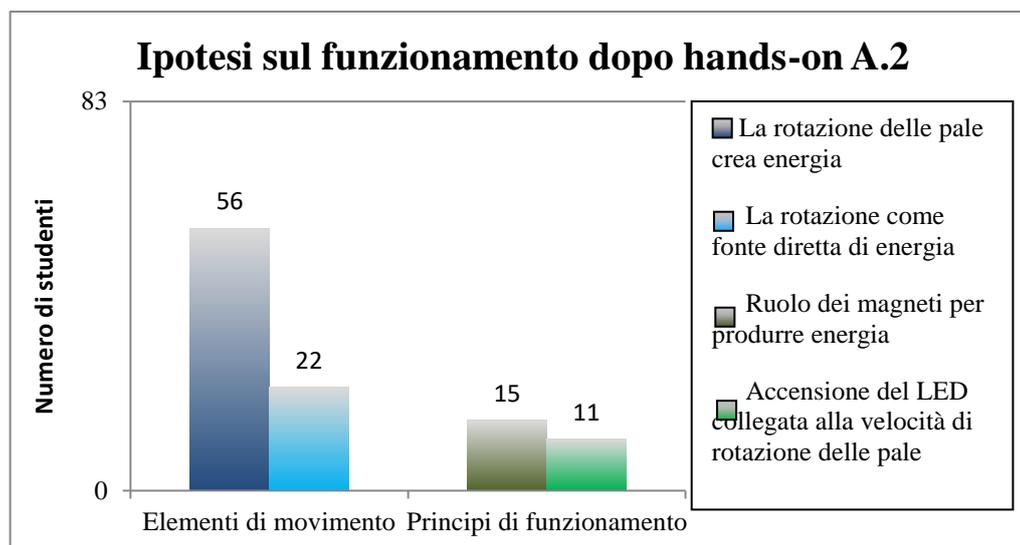


Fig. 58: L'analisi del funzionamento aumenta notevolmente (Fig. 58): ora sono 56 gli studenti che individuano la rotazione delle pale e 22 di essi vedono tale rotazione come fonte diretta di energia necessaria ad accendere il LED. Per quanto riguarda i principi fisici, 15 studenti sottolineano il ruolo dei magneti per produrre energia elettrica (senza fare riferimento all'induzione EM), mentre per altri 11 l'accensione del LED dipende dalla velocità di rotazione delle pale.

A.3: ruolo delle singole parti del dispositivo.

Dopo la richiesta esplicita di identificare il ruolo di ciascuna parte del dispositivo, gli studenti descrivono nuovamente le singole parti, azzardando delle ipotesi di funzionamento da un punto di vista locale (dei singoli elementi) senza una visione globale di una possibile regola generale (Fig. 59).

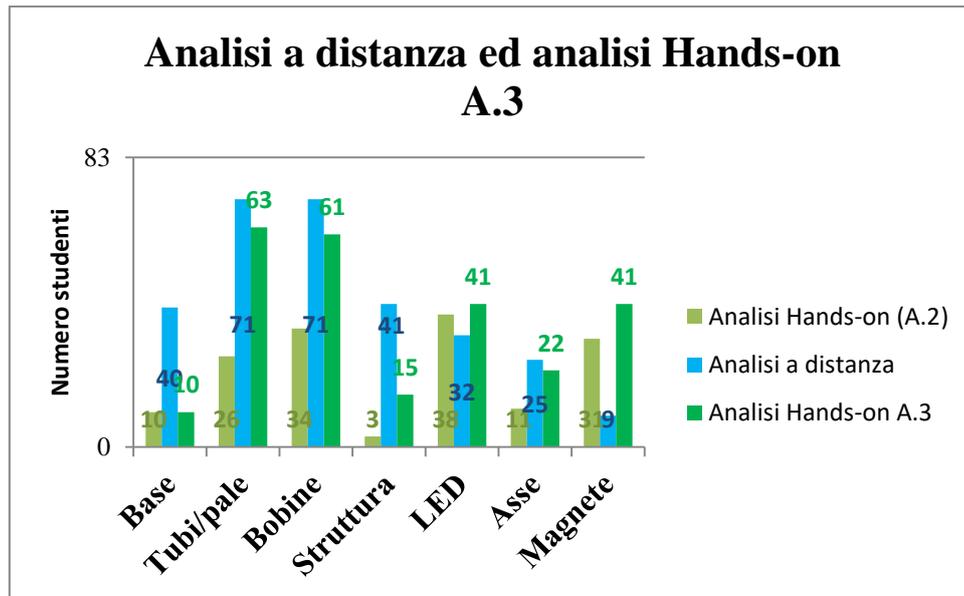


Fig. 59: Confronto fra l'analisi a distanza (A.1) e l'analisi hands-on (a.2 e A.3).

Le due parti più analizzate sono le pale (63) e le bobine (61). Le prime necessarie per la rotazione (26), per alcuni viste come generatori di energia (25), le seconde conduttrici di energia (27) e di corrente (20). L'elettricità è così identificata con l'energia stessa, generata dalla rotazione delle pale (25).

Interessante porre l'attenzione sui magneti (41), necessari per trasferire energia al rame (20), per produrre campi elettrici e magnetici (15) o per produrre/trasportare/trasformare energia (5).

B.1: confronto ipotesi di funzionamento.

Dal confronto delle ipotesi sul funzionamento sono stati evidenziati i seguenti aspetti:

- a cosa serve?

Dopo il confronto fra pari emergono considerazioni sull'utilizzo del dispositivo (39/83) (Fig. 60), visto come un generatore di corrente (7) (per alcuni la corrente è alternata) oppure come un generatore di energia (16) (uno di essi afferma "che trasforma l'energia del vento in energia elettrica", un altro studente invece "oltre a generare energia produce corrente elettrica").

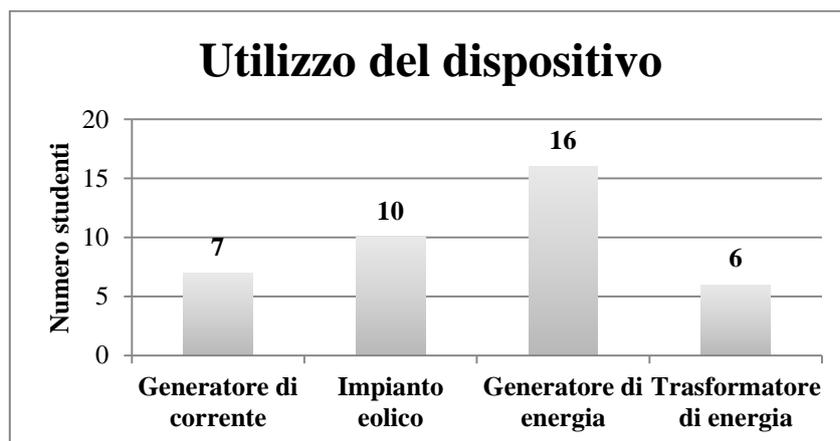


Fig. 60: Dopo il confronto fra pari emergono considerazioni sull'utilizzo del dispositivo.

- funzionamento

Per quanto riguarda il funzionamento, 48 studenti si cimentano in questo tipo di analisi dopo il confronto di gruppo. Fra questi emerge principalmente un'analisi in termini dei prodotti finali: la rotazione delle pale (31/83) produce energia elettrica (8), elettricità (5), trasformazione di energia (9). Fra le trasformazioni indicate, quella maggiormente considerata è la trasformazione dell'energia cinetica in energia elettrica o elettricità (6).

Per quanto riguarda le cause, il diagramma che segue (Fig. 61) illustra le principali indicate dagli studenti.

Solo in sette fanno riferimento alle pale eoliche.

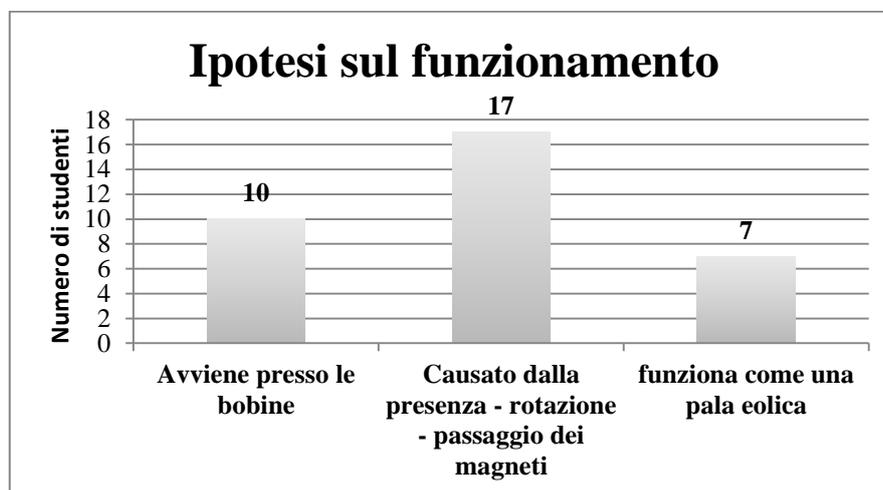


Fig. 61: Ipotesi di funzionamento. Pochi rispondono sul funzionamento in termini di cause: il fenomeno avviene presso le bobine (10), è causato dalla presenza/rotazione/passaggio dei magneti (17) funziona come una pala eolica (7).

Infine, è da sottolineare come la discussione di gruppo abbia chiarito alcuni nodi concettuali: solo tre studenti, infatti, parlano dell'energia come

qualcosa che fluisce attraverso i fili e solo 5 specificano che la rotazione delle pale genera direttamente l'energia che consente di accendere la lampadina.

- fasi di funzionamento

Poco più della metà degli studenti si cimenta a esplicitare le fasi del funzionamento (44/83). Fra questi, 34 partono dalla rotazione delle pale con conseguente passaggio di energia da/attraverso il magnete (21) e quindi alle bobine (14). Solo 6 di questi ultimi specificano che il passaggio avviene se il magnete passa sopra la bobina. Infine, attraverso il rame (15) si ha l'accensione delle lampadine (28).

Un numero ristretto afferma che il passaggio di energia dai magneti al rame avviene a causa del contatto fra i due (3/83).

B.2: individuazione principi e leggi fisiche generali.

Il grafico che segue illustra i principi fisici o le leggi che sono state identificate dai discenti (Fig. 62). Fra le descrizioni date emergono la legge di Faraday (4), la legge dell'induzione (4) e la legge che dipende dalla velocità di rotazione delle pale eoliche (4). Il campo magnetico/magnetismo è la grandezza fisica più citata, anche se non è accompagnato da una spiegazione del suo reale utilizzo.

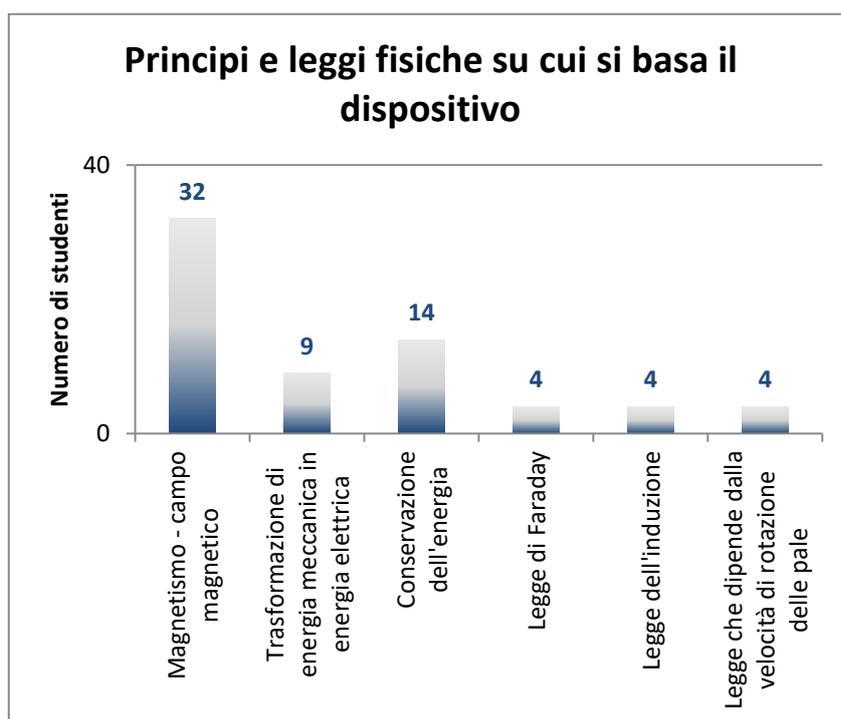


Fig. 62: Principi e leggi fisiche individuate dagli studenti. fra esse, la legge di Faraday (4), la legge dell'induzione (4) e la legge che dipende dalla velocità di rotazione delle pale eoliche (4).

B.3: costruzione dispositivo alternativo.

Nell'analizzare i dati relativi ai modi alternativi per costruire un dispositivo analogo, le proposte non si discostano molto da quello analizzato (40/83). La maggior parte propone un dispositivo basato sullo stesso principio di funzionamento, cambiando solo la fonte energetica, per esempio idrica (6), ingranaggi a catena (7), forza umana (3), energia meccanica (2), criceto che ruota (3). Fra questi alcuni propongono di mettere in rotazione i magneti (3), altri di avere un dispositivo in rotazione capace di produrre energia (9).

d. Conclusioni

La descrizione del dispositivo viene fatta in termini osservativi piuttosto che funzionali; infatti, poco più della metà degli studenti raccoglie la sfida di esporre ipotesi sul funzionamento e tra questi un quarto si limita alla denominazione dell'artefatto. La richiesta di una descrizione risulta tuttavia efficace nello stimolare gli studenti all'identificazione di parti strutturali (38/83) o funzionali (4/83) del dispositivo, per passare da un'analisi in termini di azione ad una descrizione in termini fisici (RQ1).

Inizialmente, gli studenti tendono a descrivere l'oggetto da un punto di vista locale, cioè le singole parti vengono semplicemente descritte senza che venga fatta alcuna ipotesi di funzionamento e mettendo in evidenza i dettagli strutturali (per esempio si parla di “*tubi tagliati a metà*” o “*scatole di patatine tagliate a metà*”, senza alcun riferimento al fatto che siano pale eoliche) (RQ2).

L'analisi hands-on ha spostato maggiormente l'attenzione degli studenti verso il funzionamento del dispositivo. Diminuisce, infatti, il numero di coloro i quali descrivono le singole parti e fra questi si denota la tendenza ad aggiungere nuovi dettagli riguardanti oggetti che prima non erano stati osservati a distanza (quali per esempio magneti e diodo LED). Contemporaneamente, si denota un netto aumento di studenti che propone delle ipotesi sul funzionamento del dispositivo. La rotazione è vista genericamente come fonte di energia per quasi tutti gli studenti (78/83), mettendo in evidenza come essi focalizzino l'attenzione su elementi di movimento piuttosto che su leggi o principi fisici fondamentali. Tuttavia, un numero non trascurabile di studenti fa delle ipotesi che coinvolgono concetti fisici (“*i magneti sono necessari per produrre energia*” (15/83), “*l'accensione del LED è collegata alla velocità di rotazione delle pale*” (11)) (RQ3).

Il ruolo di ciascuna parte dell'artefatto è analizzato dalla maggior parte degli studenti soprattutto dopo l'analisi hands-on. Nonostante emerga la necessità di chiarire alcuni concetti base legati al ruolo dei magneti e delle pale eoliche, si può concludere che gli elementi strutturali fondamentali siano stati ben identificati. Resta certamente da migliorare il linguaggio specifico, poco formale e troppo spesso ancorato a concetti di senso comune (RQ4).

Le descrizioni spontanee degli studenti mettono in luce alcuni nodi concettuali molto interessanti, per esempio la creazione di energia (dalla rotazione delle pale) o il suo passaggio attraverso i fili conduttori. L'energia viene vista come qualcosa creata dal nulla, che fluisce attraverso i fili, confusa direttamente con l'elettricità oppure trasferita direttamente dai magneti alla bobina. L'esperienza mette, quindi, in evidenza come sia necessario rivedere i concetti legati alla produzione di energia e trasformazione nelle sue varie forme. Accanto ai concetti elencati, emergono tutte le difficoltà concettuali ben note in letteratura, relative all'induzione elettromagnetica. Questo in parte è giustificato dal fatto che la maggior parte degli studenti coinvolti non aveva

mai trattato prima i fenomeni magnetici e, di conseguenza, non aveva mai analizzato il fenomeno dell'induzione elettromagnetica. Nonostante un numero consistente di studenti individui il ruolo centrale dei magneti nella produzione dell'energia necessaria ad accendere il LED (i magneti sono per lo più riconosciuti come gli artefici del passaggio di energia alle bobine), oppure focalizzi l'attenzione sul legame fra la velocità di rotazione delle pale e la luminosità del LED, è molto chiara la difficoltà di legare il fenomeno osservato all'induzione elettromagnetica (RQ5).

Il confronto fra pari introduce un nuovo modo di guardare al funzionamento del sistema, adesso ancorato all'osservazione degli output fenomenologici e della loro descrizione in termini fisici: non si parla più di un generico generatore di energia (da cui emergeva una mancanza di definizione del termine energia ed una difficoltà di analisi delle trasformazioni di energia nelle sue varie forme) ma di un generatore di corrente elettrica (l'utilità del dispositivo è individuata con la definizione operativa dei suoi prodotti) (RQ6a).

Sempre dal confronto fra pari emerge un dato molto importante relativo ai principi o alle leggi fisiche citate dai ragazzi come responsabili del funzionamento del dispositivo. Mentre nelle risposte individuali non emergevano riferimenti alle leggi fisiche coinvolte, dalle risposte successive al confronto fra pari emergono riferimenti molto interessanti al magnetismo/campo magnetico (32/83), alla trasformazione di energia meccanica in energia elettrica (9/83), alla legge di Faraday (4/83), alla legge dell'induzione (4/83) e infine, alla legge che dipende dalla velocità di rotazione delle pale (4/83), quest'ultima già presente nelle risposte individuali. Pochi sono i modi di guardare di senso comune, per tali soggetti risulta necessaria un'ulteriore rielaborazione a livello individuale. (RQ6b).

Il ruolo di ciascuna legge fisica è stato assimilato in modo differente dagli studenti. Infatti, nel rispondere alla domanda esplicita relativa alla costruzione di un dispositivo analogo basato sulle stesse leggi o principi fisici, la maggior parte si limita a sostituire la fonte di energia (31/83) e solo pochi propongono una modifica strutturale basata sul moto relativo dei magneti rispetto alle bobine (8/83) (RQ6c).

I contributi dati dall'attività proposta sono molteplici. Innanzi tutto è possibile osservare l'efficacia delle attività hands-on, attraverso cui è possibile stimolare il coinvolgimento mentale degli studenti, accrescere la capacità di osservazione e analisi in termini funzionali piuttosto che descrittivo-strutturali. Numerosi sono inoltre i contributi dovuti al confronto fra pari, sia in termini di comprensione del funzionamento sia in termini di identificazione dei principi o delle leggi fisiche su cui l'artefatto si basa. L'attività proposta consente, quindi, di passare da una descrizione del tutto locale del fenomeno osservato (basata su concetti di senso comune) a un pensiero che incomincia a usare concetti più formali, legati a principi e leggi fisiche bene identificate. Resta la necessità di

chiarire il ruolo di ciascuna legge individuata, o di migliorare il linguaggio formale certamente poco sviluppato. Tuttavia, è possibile affermare l'efficacia della metodologia proposta (oltre che del dispositivo utilizzato) nel costruire quel ponte fra la visione di senso comune del mondo che ci circonda e il pensiero formale accettato dal mondo accademico, tanto citato nella letteratura internazionale (RQ7).

4.1.2 Savonius come PCK per gli insegnanti³⁵

“Il successo nell'implementazione di nuovi programmi dipende dalla capacità degli insegnanti di farne un uso proprio, abilità che non è stata incentivata, nella maggior parte dei casi, dall'istruzione che essi hanno ricevuto prima di prestare servizio a scuola. Diverse esperienze condotte con gli insegnanti hanno mostrato che aggiornamenti rivolti a docenti in servizio, basati sulla presentazione e dimostrazione di nuovi materiali, non è sufficiente per aiutarli in modo adeguato ad implementare i nuovi curricula. Anche per gli insegnanti, così come per gli studenti, informazioni verbali o calcoli scritti relativi agli argomenti su cui strutturare i nuovi curricula risultano essere non efficaci. Per la maggior parte di loro l'esperienza diretta attraverso un'attività sperimentale, per un periodo di tempo più esteso, sembra essere necessaria al miglioramento del loro insegnamento” (McDermott, 1976).

Difficoltà simili si riscontrano non solo nei docenti di scuola secondaria superiore, ma anche in quelli di scuola primaria o secondaria di primo grado. Troppo spesso, infatti, si incontrano docenti di ogni livello che presentano lacune nella preparazione di base, soprattutto per quanto riguarda la fisica. Inoltre, essi insegnano con poco entusiasmo e partecipazione e questo conferisce alla scienza in generale (in particolar modo alla fisica) un connotazione molto noiosa, diversa da quella che dovrebbe realmente essere. Questo condiziona notevolmente gli studenti che successivamente non scelgono fisica per gli studi universitari. Dunque, la preparazione degli insegnanti dovrebbe essere parte integrante di un programma di ricerca finalizzato allo sviluppo di nuovi curricula (McDermott, 1990).

Le considerazioni appena fatte hanno stimolato la progettazione di uno studio dedicato al nodo dell'induzione elettromagnetica rivolto ai docenti attraverso un'attività di PCK³⁶. Tale studio è stato basato sull'utilizzo della metodologia per artefatti, sull'analisi del valore didattico che gli insegnanti hanno attribuito all'esperienza proposta, sugli obiettivi didattici e culturali e,

³⁵Questa attività è stata presentata al congresso internazionale STE2009 – Modena (New Trends in Science and Technology Education) e selezionato fra i Selected Papers (vedi bibliografia (Bozzo, Michelini, & Viola, 2010)

³⁶ Una breve descrizione del PCK (Pedagogical Content Knowledge) è riportata nell'appendice B.

infine, sulla pianificazione di un nuovo percorso didattico volto ad affrontare i relativi nodi concettuali (Bozzo, Michelini, & Viola, 2010).

L'attività, svolta con 7 insegnanti delle scuole di Modena e Bari durante i seminari di formazione per gli insegnanti nell'ambito del progetto Europeo MOSEM, è stata basata sulla metodologia per artefatti (vedi appendice A). Gli insegnanti, oltre ad esaminare la turbina a vento di Savonius (paragrafo 4.1.1), così come descritto per gli studenti, dovevano completare l'analisi effettuata attraverso lo studio dei nodi concettuali coinvolti nell'esperienza. In appendice D2 sono riportate le schede di lavoro proposte ai docenti.

Il tempo impiegato per condurre l'indagine è stato di due ore per analizzare l'artefatto e due ore per costruirlo.

a. Schede di lavoro

La prima parte del lavoro proposto è identico a quello descritto prima per l'attività rivolta agli studenti (parte A, B, C). Ciò che cambia è la parte del PCK, relativa all'analisi dei nodi concettuali. I docenti dovevano analizzare gli aspetti salienti di questa esperienza da un punto di vista didattico (D1) ed indicare in che modo avrebbero utilizzato questa attività in classe (D2). A questo punto gli insegnanti dovevano strutturare un percorso didattico (D3), specificarne i vari passi (D4) ed individuare i nodi concettuali coinvolti e loro possibili soluzioni (D5).

b. Research questions

Le principali domande di ricerca sono:

(dal punto di vista delle conoscenze)

RQ1. Vengono riconosciuti i principi di funzionamento?

RQ2. Viene individuato il ruolo di ogni parte dell'artefatto?

(dal punto di vista pedagogico)

RQ3. Viene riconosciuto il valore didattico dell'attività?

RQ4. Con quali obiettivi culturali, di conoscenza ed educativi l'insegnante introdurrebbe questa attività nella sua classe?

RQ5. Quali caratteristiche e passi presenta il percorso progettato dall'insegnante per implementare l'attività?

RQ6. Quali nodi concettuali l'insegnante riconosce come coinvolti in questa attività?

c. Analisi dei dati

A.1 Descrivere dispositivo e ipotesi di funzionamento

I docenti descrivono il dispositivo principalmente in termini strutturali, evidenziando le singole parti in modo dettagliato (Fig. 63).

In particolar modo, un docente ipotizza che “*i quattro magneti fissati sul tappo di bottiglia, sono disposti a forma di quadrupolo*”. Un altro docente afferma che le tre bobine sono “*collegate in serie ad un LED*”.

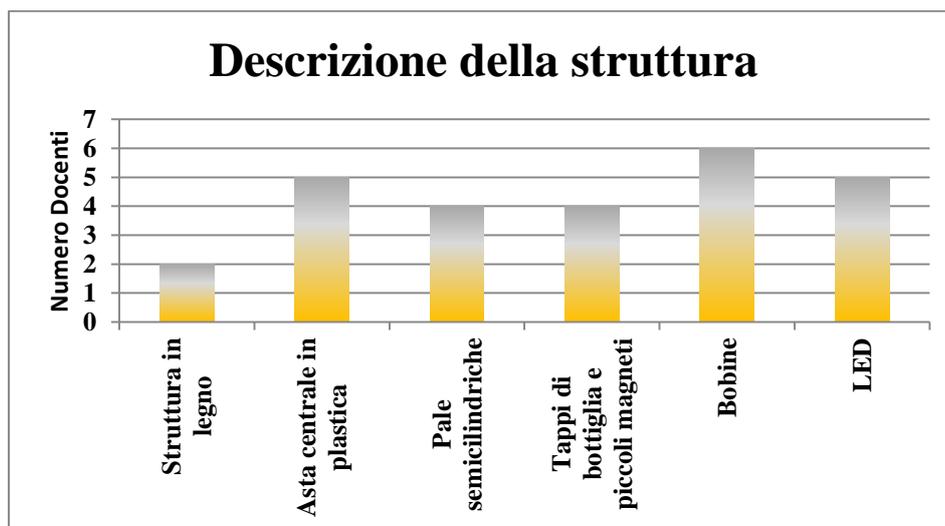


Fig. 63: Descrizione dell'artefatto da parte dei docenti. La descrizione è locale, dettagliata. L'attenzione dei docenti si focalizza principalmente sulle bobine, sull'asse di rotazione e sul LED.

Per quanto riguarda il funzionamento, si distinguono alcune ipotesi che coinvolgono elementi di movimento (“*si ipotizza un effetto rotatorio della struttura centrale*” (2), “*l’elica gira e si accende un LED*” (1)) da altre che coinvolgono i principi di funzionamento (“*Penso si sfrutti l’induzione per farlo girare*” (1), “*è un generatore eolico (1), ci soffio sopra per farlo girare e si accende un LED grazie all’induzione elettromagnetica*” (1), “*facendo ruotare il sistema barattolo velocemente si possono generare variazioni di flusso del campo magnetico*” (1)) (Fig. 64).



Fig. 64: Ipotesi sul funzionamento del dispositivo.

Ipotesi che coinvolgono gli elementi di movimento: “*si ipotizza un effetto rotatorio della struttura centrale*” (2), “*l’elica gira e si accende un LED*” (1).

Ipotesi che coinvolgono i principi di funzionamento (la variazione di flusso del campo magnetico, ottenuto facendo ruotare le eliche, come condizione per generare una corrente indotta): “*Penso si sfrutti l’induzione per farlo girare*” (1), “*è un generatore eolico, ci soffio sopra per farlo girare e si accende un LED grazie all’induzione elettromagnetica*” (1), “*facendo ruotare il sistema barattolo velocemente si possono generare variazioni di flusso del campo magnetico*” (1).

È interessante osservare, fra le ipotesi che coinvolgono i principi di funzionamento, come alcuni insegnanti richiamino le forze generate dai campi magnetici dei magneti o delle correnti: “*I magneti originano forze che generano un momento meccanico al barattolo*” (1), “*le bobine generano dei campi che invadono l’area con i magneti*” (1).

A.2: analisi hands-on dispositivo

I docenti aggiungono nuove considerazioni dell’artefatto dopo una diretta osservazione del funzionamento (toccando il dispositivo, rotando le pale ed osservando gli effetti da vicino). L’analisi hands-on sposta la loro attenzione sui fenomeni fisici (Fig. 65).

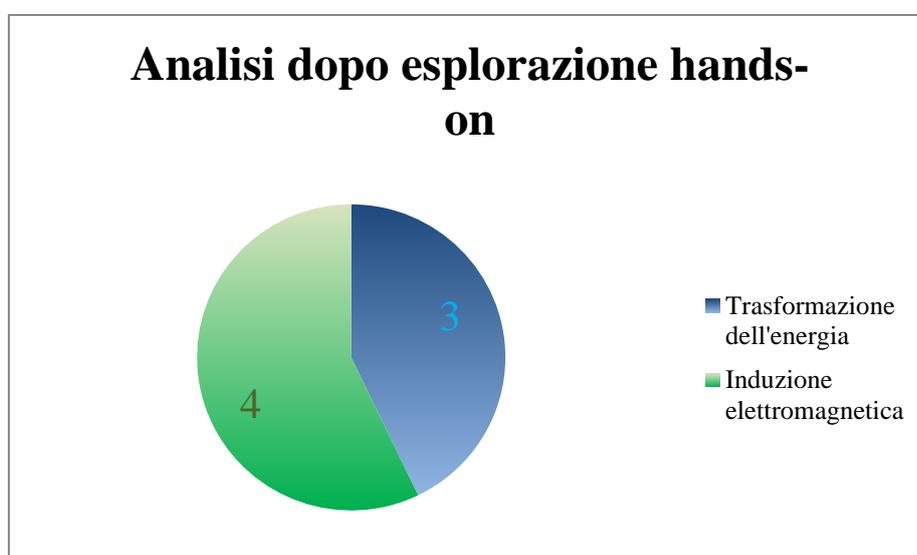


Fig. 65: L’analisi dopo l’esplorazione hands-on da parte dei docenti sposta completamente la loro attenzione verso i fenomeni fisici. In tre casi si parla di trasformazione dell’energia In 4 casi c’è il riconoscimento dell’induzione elettromagnetica nel funzionamento dell’artefatto.

Il grafico riportato in figura (Fig. 65) mostra i risultati in seguito all’analisi hands-on. In 3 casi si parla di trasformazione di energia (“*con un phon si crea energia che trasformata fa accendere la lampadina tramite la corrente generata per effetto della variazione del flusso*”, “*l’energia prodotta dal vento si trasforma in energia elettrica che fa accendere un LED*”, “*Con un phon si fa muovere il sistema trasformando l’energia eolica in energia di movimento che viene trasformato in segnale luminoso (accensione del LED) per effetto della variazione del flusso di campo magnetico e delle correnti indotte*”). In quattro casi c’è il riconoscimento del ruolo dell’induzione magnetica nel funzionamento dell’artefatto (“*facendo ruotare i magneti si induce una corrente nei fili e si accende il LED*” (2)).

Da osservare come si attribuisca il passaggio della corrente elettrica e quindi l’accensione del LED alla rotazione dei magneti senza che però ci sia il riconoscimento del principio alla base del fenomeno: “*l’elica comincia a girare*

e si produce energia elettrica che si evidenzia con l'accensione del LED" (1), "sugli avvolgimenti girano dei magneti il cui campo attraversa gli avvolgimenti" (1).

Infine, è interessante sottolineare le considerazioni fatte su bobine e magneti. Infatti, in due casi viene osservato che le bobine sono collegate in serie ma non viene riconosciuto il ruolo che tale ipotesi ha sull'intensità della corrente indotta. In un caso solo si registra una considerazione sull'orientazione della polarità dei magneti: "i magneti devono essere orientati allo stesso modo, altrimenti i contributi si annullano".

A.3: ruolo singole parti del dispositivo

Nel chiarire il ruolo di ciascuna parte del dispositivo per il suo funzionamento, i docenti pongono l'accento in particolar modo sul ruolo dei magneti e delle bobine (Fig. 66). Anche la descrizione di altri elementi è indirizzata verso i magneti e le bobine. Per esempio l'asta serve per "la rotazione dei magneti al di sopra delle bobine conduttrici" (2).

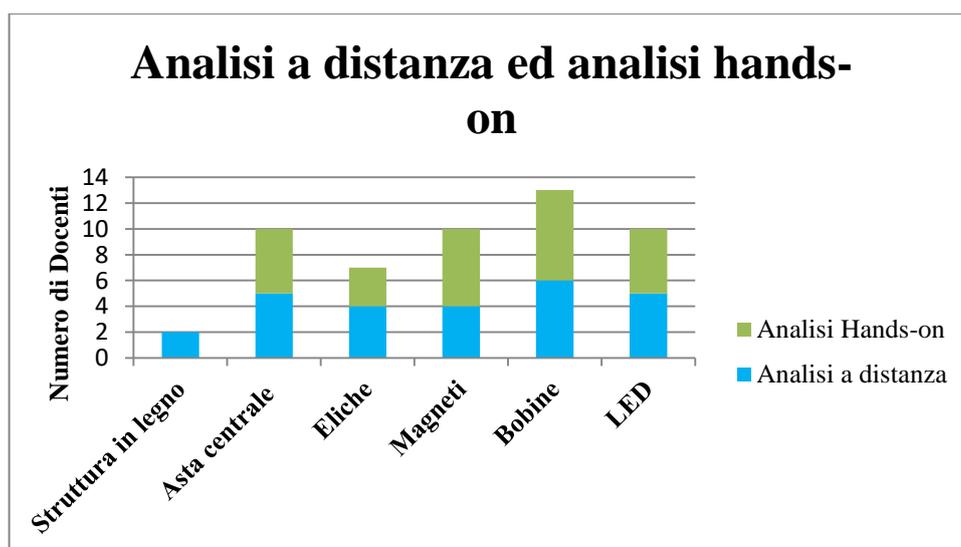


Fig. 66: Confronto fra l'analisi a distanza (A.1) e l'analisi hands-on (a.3). I docenti pongono l'accento in particolar modo il ruolo dei magneti e delle bobine.

Il grafico che segue (Fig. 67) mostra le idee dei docenti sul ruolo dei magneti, i quali sono visti come fonti di campo magnetico (3) o di linee di campo concatenate agli avvolgimenti (1). Da sottolineare la prima risposta (in alto nel grafico) in cui è evidente la difficoltà nell'interpretare il fenomeno dell'induzione in termini di variazione del flusso e non di moto relativo fra magnete e bobina come variabile responsabile del fenomeno dell'induzione.

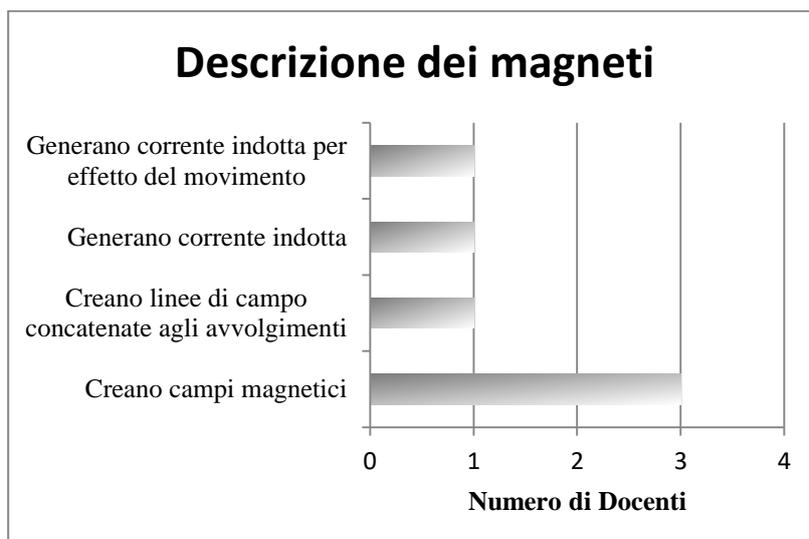


Fig. 67: Il grafico mostra le idee dei docenti sul ruolo dei magneti. I docenti mettono in risalto il ruolo di fonte di campo magnetico (3) o di linee di campo (1).

La figura successiva mostra invece le considerazioni fatte sul ruolo delle bobine. Solo in due casi sono legate alla variazione del flusso e in un solo caso viene accentuata la necessità di un loro collegamento in serie senza darne una motivazione.

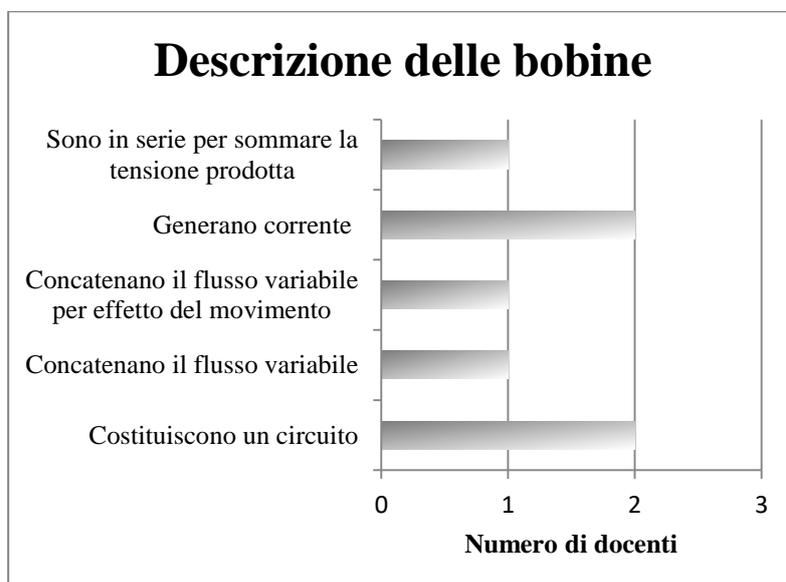


Fig. 68: Descrizione delle bobine. Si registra una considerazione di tipo giustificativo del fatto che gli avvolgimenti sono collegati in serie: “sono in serie per sommare la tensione prodotta”.

Infine le eliche servono solo per la trasformazione di energia (“*hanno la forma per consentire il movimento*” (1), “*catturano il vento*” (1), “*catturano l’energia eolica*” (1)).

B.1: confronto ipotesi di funzionamento

Dopo la discussione di gruppo sull'ipotesi di funzionamento, tutti gli insegnanti indicano l'induzione elettromagnetica come principio su cui si basa il dispositivo, a cui attribuiscono diverse cause (Fig. 69).

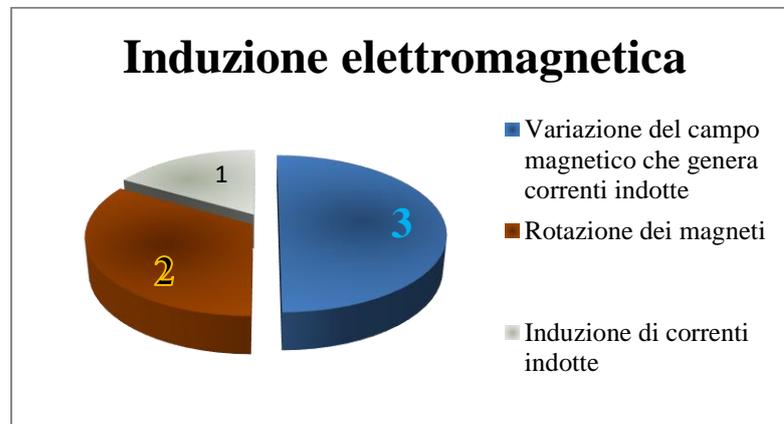


Fig. 69: L'induzione elettromagnetica è generata dalla variazione del campo magnetico che genera correnti indotte (3), dalla rotazione dei magneti (2).

In particolare si focalizza l'attenzione sulla variazione del campo magnetico che genera correnti indotte (3), sulla rotazione dei magneti (2), *“per indurre correnti indotte il cui scorrimento è visualizzato da un LED”* (1).

Si registra inoltre una considerazione sul verso di avvolgimento delle bobine e sulla polarità affacciata dei magneti, senza che però questo sia giustificato da alcuna ipotesi: *“le spire degli avvolgimenti hanno tutte lo stesso senso ed i magneti hanno tutti la stessa polarità affacciata”* (1).

Inoltre, dopo il confronto di gruppo, la trasformazione di energia non è più menzionata.

B.2: individuazione principi e leggi fisiche generali

Il grafico mostra le leggi e i principi fisici citati dopo il confronto di gruppo.

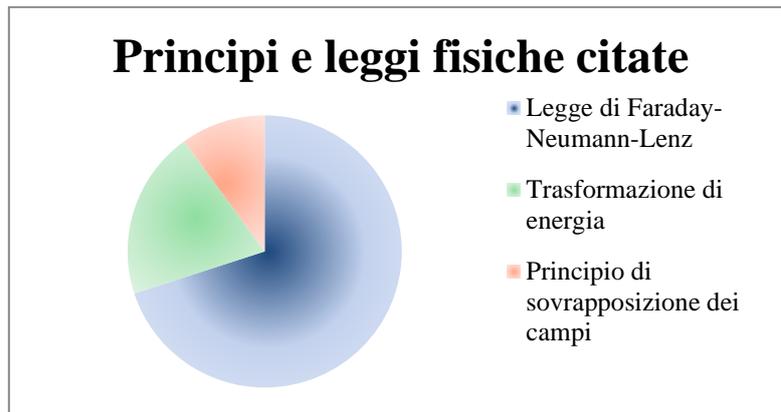


Fig. 70: Leggi e principi fisici citati dopo il confronto di gruppo.

B.4: costruzione dispositivo alternativo.

Le proposte di modi alternativi per ottenere un dispositivo analogo, basato sullo stesso processo fisico, si dividono due categorie: a) proposte di dispositivi già in commercio, quali generatore a manovella, turbina ad acqua, generatore cranky (1) ; b) proposte di dispositivi originali, in cui si fanno girare le bobine invece che i magneti, anche se c'è la consapevolezza che è più difficile da realizzare (2).

D.1: punti didatticamente salienti

Da un punto di vista didattico, emergono le seguenti considerazioni:

- le parti individuali relative ai punti A risultano interessanti perché stimolano l'osservazione diretta supportata dall'analisi hands-on e sviluppano la capacità di fare ipotesi e riflessioni personali da confrontare o confutare nei punti B (1);
- la parte B.4 risulta interessante perché è uno stimolo a creare, ideare (1);
- la parte C.1 risulta interessante perché costituisce un ulteriore momento di riflessione e sottolinea l'importanza dei contesti sperimentali (1).

Nel complesso è ritenuta importante sia perché tramite l'attività per artefatti (2) è possibile raggiungere diversi obiettivi (Fig. 71) sia perché facilmente realizzabile poiché prodotta con materiale povero di semplice reperibilità (2).

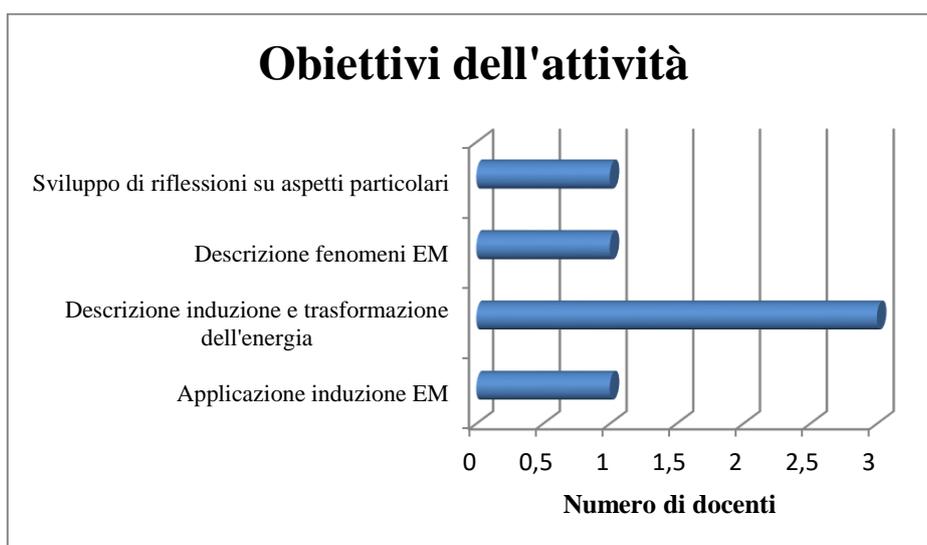


Fig. 71: Obiettivi che possono essere raggiunti attraverso l'attività proposta.

D.2: finalità del dispositivo in un percorso didattico

I due grafici che seguono rappresentano gli obiettivi culturali/conoscitivi (Fig. 72) e quelli educativi (Fig. 73) indicati dagli insegnanti.

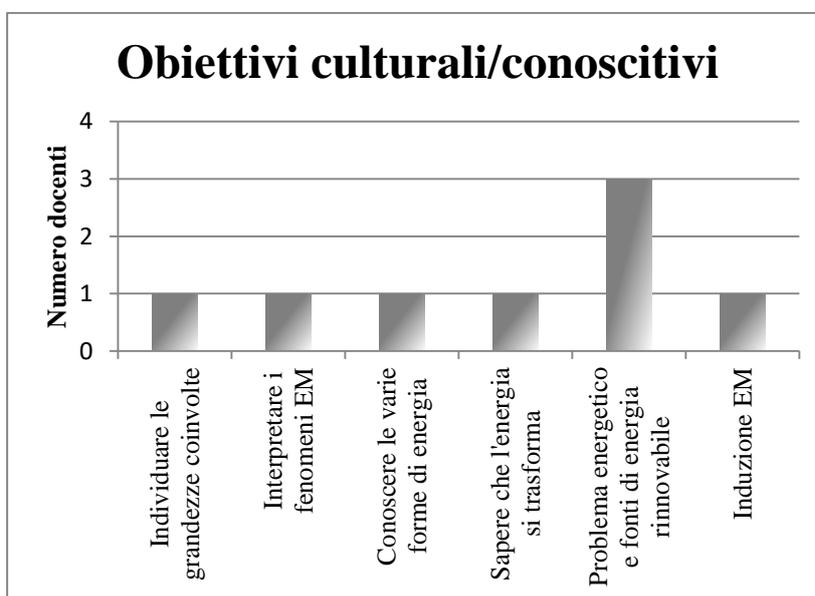


Fig. 72: Obiettivi culturali/conoscitivi.

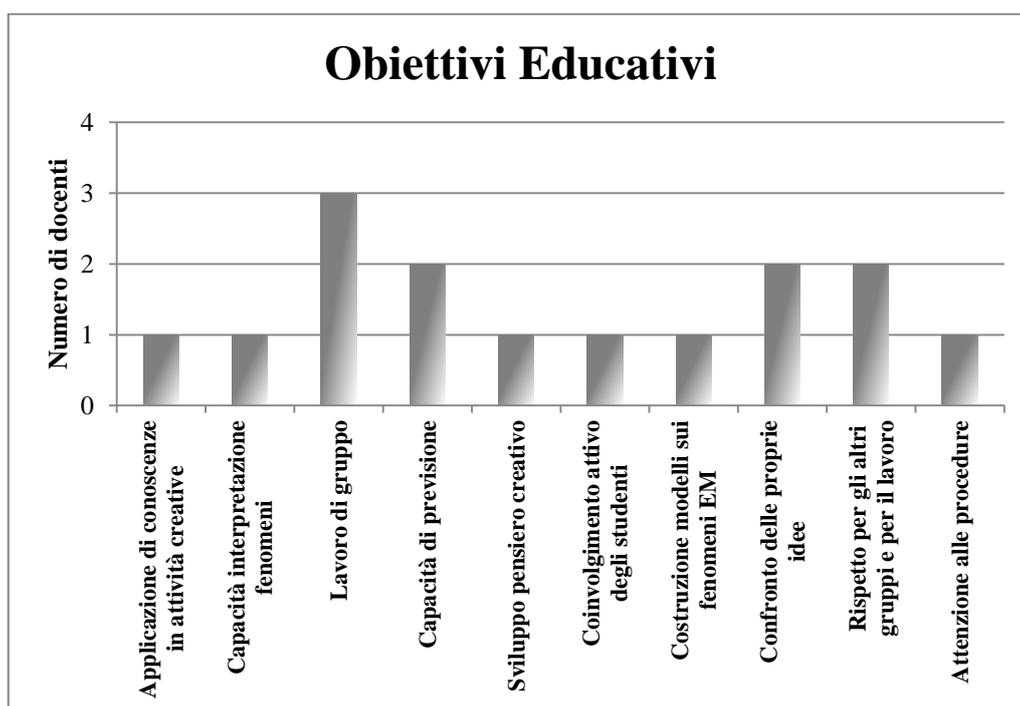


Fig. 73: Obiettivi educativi.

D.3: tipo di percorso

Dall'analisi delle proposte di percorsi in cui questa esperienza potrebbe essere inserita, emerge la tendenza degli insegnanti coinvolti a progettare moduli di intervento ancora troppo "tradizionali". Per esempio, in due casi indirizzati a classi di triennio di liceo scientifico, l'attività è stata pensata come verifica successiva ad una trattazione tradizionale della legge sull'induzione elettromagnetica attraverso lezioni frontali. In un altro caso, sempre indirizzato al triennio di liceo scientifico, l'attività viene vista come introduzione all'induzione elettromagnetica. In tutti e tre i casi non compare una rielaborazione personale dell'esperienza realizzata che verrebbe riproposta così come è stata vissuta.

Ancora, fra le proposte, per una prima e terza classe a indirizzo meccanico, c'è di inserire l'artefatto dopo la trattazione delle problematiche legate al lavoro, per introdurre le varie forme di energia e loro trasformazione (2) e come stimolo per aprire una discussione sui problemi energetici delle fonti rinnovabili (1).

d. Conclusioni

Da un punto di vista delle conoscenze, la maggior parte degli insegnanti riconosce la trasformazione dell'energia e l'induzione elettromagnetica come principi di funzionamento dell'artefatto (RQ1), anche se emerge la necessità di migliorare il linguaggio specifico. In un solo caso, è evidente la difficoltà di

interpretazione del fenomeno dell'induzione. Queste potrebbero essere delle informazioni per i futuri corsi di formazione.

Il ruolo di ciascuna parte dell'artefatto è correttamente riconosciuto (RQ2) (bobine, magneti, asse di rotazione, ecc.): emerge la necessità di chiarire il collegamento delle bobine (in serie e non in parallelo) e la polarità dei magneti (tutti con la stessa polarità affacciata alle bobine).

Dal punto di vista pedagogico (RQ3), il fatto che l'apparato sia composto da materiali a basso costo è visto come un punto di forza dell'attività che diventa coinvolgente per gli studenti. Il suo maggior valore didattico sta nell'offrire la possibilità di discutere il problema della trasformazione dell'energia e di osservare direttamente un'applicazione dell'induzione elettromagnetica.

Gli insegnanti implementerebbero l'attività nelle loro classi con i seguenti obiettivi (RQ4):

- 1) culturali - sviluppare capacità interpretative, capire come una forma di energia pulita e rinnovabile (energia del vento) possa essere convertita in energia elettrica per mezzo di un dispositivo meccanico relativamente semplice;
- 2) educativi - sviluppare la capacità di fare previsioni e costruire modelli, lavorare in gruppo e, quindi, argomentare le proprie idee e ascoltare gli altri per confrontarsi, sviluppare il pensiero creativo e stimolare il personale coinvolgimento del soggetto nell'oggetto di studio.

I percorsi pianificati dagli insegnanti (RQ5) mostrano, nella maggior parte dei casi, un uso dell'artefatto come attività di stimolo per gli studenti:

- 1) nel biennio di scuole secondarie superiori, per cominciare a pensare all'energia, ai suoi diversi tipi ed alle sue trasformazioni, dopo aver trattato il tema del lavoro;
- 2) nel triennio di scuole secondarie superiori, sia per scoprire a livello qualitativo la legge di Faraday-Neumann-Lenz sia per trattare il tema dell'energia.

Gli insegnanti individuano come nodi di apprendimento coinvolti nell'attività (RQ6) la trasformazione di energia e la variazione di flusso del campo magnetico come responsabile del fenomeno dell'induzione.

L'esperienza mette in luce alcune problematiche ben note nella letteratura internazionale. In primo luogo, seguendo l'evoluzione dei ragionamenti fatti dai docenti attraverso le schede di raccolta dati, è possibile osservare che il loro grado di analisi dell'artefatto aumenta man mano che essi procedono con l'analisi hands-on del dispositivo. Ciò conferma quanto affermato in letteratura, ossia la necessità di far eseguire esperienze pratiche agli insegnanti durante i corsi di formazione. Inoltre, il fatto che alcuni elementi importanti vengano individuati da tutti solo dopo la discussione di

gruppo (per esempio il riconoscimento della legge di Faraday-Neumann-Lenz come legge su cui si basa il funzionamento dell'artefatto) testimonia la valenza di questa strategia didattica.

L'esperienza dimostra, nonostante il piccolo campione di persone coinvolte, quanto sia necessario inserire la formazione degli insegnanti all'interno di attività di ricerca didattica, se si vuole pensare di costruire e adottare nuovi curricula finalizzati a migliorare la qualità dell'apprendimento delle future generazioni di studenti.

4.1.3 Savonius e percorso sulle energie alternative³⁷ (*POST-TEST di verifica sull'induzione elettromagnetica attraverso la Metodologia per Artefatti*)

Il tema delle energie rinnovabili merita molta attenzione sia da un punto di vista di sensibilità verso l'ambiente che ci circonda sia di politica economica. Didatticamente la sua trattazione consente di introdurre diverse questioni legate alle trasformazioni di energia nelle sue varie forme (gravitazionale, elettrica, cinetica, e così via) in tutti i livelli scolastici, a partire da un approccio qualitativo (più adatto per la scuola primaria o secondaria inferiore) fino ad arrivare ad una trattazione quantitativa (appropriata per la scuola secondaria o per un livello universitario).

In questa sezione è discussa una proposta didattica progettata ed eseguita con una classe di scuola primaria della provincia di Potenza composta da 21 alunni, i quali erano già stati coinvolti in un progetto sperimentale basato sulla metodologia CLIL, mirato ad introdurre i fenomeni elementari del magnetismo: interazioni fra magneti, esplorazione dello spazio attorno ad un magnete attraverso una bussola, rappresentazione del concetto di campo magnetico e introduzione del concetto di linee di campo, campo magnetico di un filo percorso da corrente ed infine, campo magnetico di una spira percorsa da corrente.

Il percorso sperimentale proposto può essere suddiviso in tre parti differenti per un totale di sei ore di attività: una fase iniziale finalizzata a introdurre il principio dell'induzione elettromagnetica attraverso una attività esplorativa di problem solving (2 ore), una fase centrale basata sull'analisi della turbina a vento come applicazione della legge dell'induzione attraverso la metodologia per artefatti (2 ore) e una fase finale mirata a mostrare il funzionamento altri sistemi di conversione energetica (fra cui le centrali idroelettriche) in una lezione frontale multimediale (2 ore).

Fase iniziale: Attività di Problem Solving

³⁷ Lavoro presentato al congresso internazionale GIREP-MPTL-ICPE 2010 tenuto a Reims (22-27 agosto 2010) in collaborazione con l'università della Basilicata **Specificata fonte non valida..**

Agli studenti è chiesto di risolvere il seguente problema:

“abbiamo visto che un filo percorso da corrente produce un campo magnetico e che due fili percorsi da corrente si attraggono o si respingono. Esploriamo gli effetti di un campo magnetico su un gomitolo di filo di rame (bobina). Riusciamo a produrre una corrente che circola nel filo senza utilizzare nessuna batteria? Possiamo utilizzare un gomitolo di filo, un sensore per la corrente e un magnete” (Fig. 74).



Fig. 74: Materiale utilizzato per l'attività di problem solving.

L'attività è suddivisa in parti individuali e lavori di gruppo:

- prima parte individuale di analisi del problema, di comprensione dell'obiettivo e di pianificazione dell'attività da eseguire (10 minuti);
- seconda parte in cui si discutono all'interno dei gruppi di lavoro le considerazioni personali in merito agli obiettivi e alle strategie pensate individualmente, per poi sceglierne una o più di una (10 minuti);
- terza parte in cui il docente si assicura che ciascun gruppo di lavoro abbia focalizzato il problema principale proposto, attraverso una breve discussione di gruppo (10 minuti);
- quarta parte in cui gli studenti risolvono materialmente il problema e annotano le considerazioni personali più importanti su un diario di bordo (40 minuti);
- quinta parte in cui viene affrontata una discussione di classe sulle prove effettuate da ciascun gruppo e sui risultati ottenuti (30 minuti);
- ultima fase utilizzata per scrivere un report sull'intera esperienza.

Fase centrale: Attività per Artefatti

La parte centrale consiste nell'analisi della turbina a vento di Savonius attraverso una attività per artefatti. Le schede di lavoro utilizzate per seguire l'evoluzione dei ragionamenti spontanei dei ragazzi è stata opportunamente semplificata e resa comprensibile per studenti di scuola primaria (vedi appendice D). Sidistingue una parte A individuale finalizzata a mettere in luce

le descrizioni e le ipotesi di funzionamento da parte degli studenti, prima e dopo l'analisi hands-on, e una parte di gruppo mirata a confrontare le idee sia sul funzionamento in piccoli gruppi sia sulle descrizioni dettagliate. Infine l'attività si conclude con la stesura di un rapporto concordato per ciascun gruppo e con il confronto dei lavori realizzati da tutti i gruppi.

L'attività per artefatti in questo caso svolge la doppia funzione di introdurre il tema delle energie rinnovabili attraverso un semplice dispositivo e di verificare la legge dell'induzione elettromagnetica. Le principali research questions sono:

- RQ1. In che modo gli studenti approcciano spontaneamente alla descrizione dell'artefatto?
- RQ2. Vengono riconosciuti spontaneamente i principi di funzionamento?
- RQ3. Quali contributi provengono dall'analisi hands-on del dispositivo?
- RQ4. Quali contributi provengono dal confronto fra pari?
 - per quanto riguarda l'interpretazione del funzionamento;
 - per quanto riguarda la descrizione del dispositivo simile.
- RQ5. Che ruolo ricopre l'attività proposta nel costruire il ponte fra l'esperienza di senso comune e l'interpretazione fisica dei processi?

Dall'analisi dei dati si evince che la descrizione del dispositivo viene affrontata sia in termini descrittivi che funzionali (RQ1). In particolare, tutti gli studenti forniscono una descrizione dettagliata delle singole parti e fra esse l'attenzione ricade maggiormente sulle bobine, riconosciute come elementi fondamentali per il funzionamento del dispositivo. Tuttavia, la descrizione è affrontata da un punto di vista locale ("*una scatola di patatine tagliate a metà*") e ciò aiuta a legare l'attività al senso comune.

Per quanto riguarda l'analisi funzionale, più della metà degli studenti (14/21) propone un'analisi sul funzionamento del dispositivo (contrariamente a quanto visto per gli studenti di scuola secondaria, dove le risposte relative al funzionamento prima dell'analisi hands-on erano inferiori alla metà degli studenti coinvolti), focalizzando l'attenzione soprattutto sulla rotazione dell'apparato. Inoltre l'utilità del dispositivo risulta chiara per quasi tutti gli studenti (17/21): "*serve per creare energia elettrica*" (11/21) o "*corrente elettrica*" (6/21). Anche questo dato è molto significativo, se si tiene conto che gli studenti di scuola superiore giungono a conclusioni del genere solo dopo aver effettuato la discussione di gruppo.

L'analisi hands-on del dispositivo ha stimolato i bambini a descrivere il dispositivo con maggiori dettagli e proporre ipotesi di funzionamento di ciascuna parte (RQ3). Da un punto di vista descrittivo l'attenzione si è spostata

sui magneti, prima individuati solo dal 3 di ragazzi e ora riconosciuti dal 15 studenti su 21 come necessari per “*trasmettere energia alle bobine*” o “*creare energia*”. Le ipotesi di funzionamento sono utili per evidenziare ancora una volta i problemi di apprendimento che coinvolgono l’energia, vista come “*qualcosa che è creata, trasformata e che fluisce lungo i fili con l’elettricità*”. Per quanto riguarda l’utilità del dispositivo, tutti gli studenti riconoscono che si tratta “di un dispositivo che è usato per creare corrente elettrica” (14/21) o che “produce energia elettrica” (7/21).

Il confronto fra pari porta a una totale comprensione del funzionamento del dispositivo (RQ5). L’utilità del dispositivo emerge dalla definizione operativa dei suoi prodotti. Infatti, tutti i bambini riconoscono che la rotazione delle pale è dovuta al vento (“*il vento muove il contenitore di patatine*” oppure “*il vento muove il tubo di pringles*”) e comprendono che l’energia elettrica è generata dall’interazione fra magneti e bobine (“*sotto il contenitore di CD ci sono dei magneti che ruotano e producono energia attraverso le bobine*”, oppure “*l’energia è dentro le bobine perché ci sono i magneti vicino*” o ancora “*i magneti si muovono e le bobine producono energia*”).

Fase finale: lezione frontale per introdurre altre forme di energia

Nell’ultimo incontro gli studenti possono analizzare il funzionamento di un’altra forma di energia rinnovabile, ossia una centrale idroelettrica. Attraverso la turbina di Savonius essi hanno esaminato una prima applicazione della legge di Faraday-Neumann-Lenz: se un magnete scorre al di sopra di una bobina induce all’interno della bobina una corrente elettrica. Gli studenti possono adesso analizzare una seconda applicazione della legge dell’induzione, basata sulla rotazione di una bobina all’interno di un campo magnetico fisso. Essi avevano già sperimentato questo secondo caso durante l’attività di problem solving. Per focalizzare meglio il fenomeno proposto è stato molto utile mostrare un’applet (Fig. 75) esplicativa capace sia di destare l’attenzione e la curiosità degli studenti sia di far comprendere a livello qualitativo questo secondo fenomeno proposto.

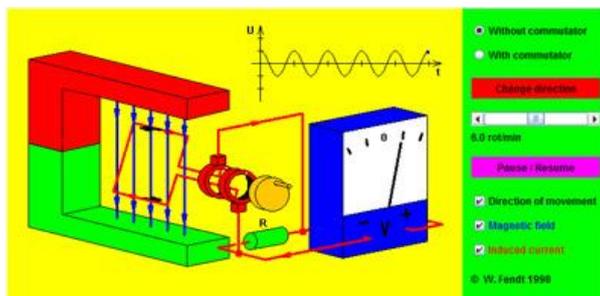


Fig. 75: L’applet reperibile in rete mostra un secondo caso di induzione elettromagnetica dovuto alla rotazione di una bobina all’interno di un campo magnetico fisso.

Diventa così molto semplice far capire ai bambini che la rotazione delle pale del generatore idroelettrico comporta la rotazione di una bobina all'interno di un campo magnetico e quindi una corrente indotta al loro interno.

IL dispositivo è stato realizzato utilizzando materiali di riciclo: un motorino di una stampante in disuso, dei cucchiaini di plastica come pale ed un motorino di acquario per simulare il corso d'acqua di un fiume (Fig. 76).

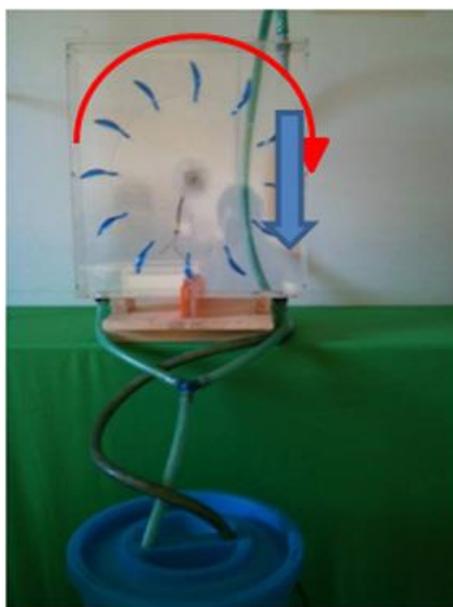


Fig. 76: La centrale idroelettrica è stata realizzata utilizzando materiali di riciclo: un motorino di una stampante in disuso, dei cucchiaini di plastica come pale ed un motorino di acquario per simulare il corso d'acqua di un fiume.

Dopo l'analisi di dispositivi capaci di illustrare casi differenti di induzione elettromagnetica, è possibile mostrare altre forme di energia alternativa utilizzando giochi per bambini disponibili in commercio. Il caso più importante e semplice da analizzare è l'energia solare, visti in numerosi giochi che prevedono l'utilizzo di piccoli pannelli fotovoltaici. In realtà nel percorso didattico illustrato non è stato possibile completare questa fase per mancanza di tempo.

In conclusione, l'intero percorso permette di verificare l'importanza di diversi metodi di apprendimento, ciascuno dei quali consente di sviluppare abilità e conoscenze differenti:

- l'attività di problem solving consente di introdurre il fenomeno dell'induzione elettromagnetica a studenti di scuola primaria oltre che di sviluppare abilità nell'affrontare e risolvere problemi anche complicati;
- l'attività per artefatti attira l'attenzione dei bambini, stimolando la loro curiosità e creatività;

- l'attività hands-on del dispositivo ha stimolato i ragazzi a descrivere il dispositivo con maggior cura dei dettagli e ad azzardare ipotesi sul funzionamento;
- il confronto fra pari ha condotto ad una totale comprensione del funzionamento dell'artefatto;
- la lezione frontale conclusiva ha contribuito a migliorare la comprensione dei fenomeni legati all'induzione elettromagnetica, attraverso l'uso di materiale multimediale.

4.1.1 Conclusioni

Gli esempi illustrati consentono un riscontro oggettivo rispetto a diversi elementi messi in luce dalla letteratura internazionale. Infatti, dall'analisi dei dati emergono tutti i vantaggi derivanti dalle attività hands-on e dai lavori di gruppo, così come risulta evidente il grande apporto da un punto di vista emotivo dell'utilizzo di materiali poveri, ricavati da oggetti appartenenti alla vita di tutti i giorni degli studenti.

Un altro aspetto molto importante è legato alla fascia di età degli discenti che possono essere coinvolti in questa attività. Infatti, nel primo capitolo è stato evidenziato uno dei limiti della didattica tradizionale, legato all'introduzione di alcuni principi o leggi fisiche solo dopo aver fornito agli studenti opportune basi matematiche. L'esperienza molto interessante (illustrata nel paragrafo 4.1.3) condotta con gli studenti di scuola primaria, mostra invece come sia possibile introdurre anche a ragazzi così piccoli concetti particolarmente difficili da comprendere quali l'induzione elettromagnetica. Infatti, i risultati mettono in evidenza la naturale tendenza all'esplorazione dei fenomeni da parte dei bambini, con conseguenti riscontri nelle risposte fornite. Se si confrontano i dati riportati nei paragrafi 4.1.1 e 4.1.3 si può osservare come i bambini di scuola elementare riescano a intuire il funzionamento del dispositivo in anticipo rispetto agli studenti di scuola superiore (tenendo ovviamente conto dei rispettivi livelli di formalizzazione dei contenuti).

È interessante osservare i risultati emersi dalla sperimentazione con i docenti, da cui emerge da un lato la necessità di far eseguire materialmente esperimenti qualitativi e quantitativi agli insegnanti in formazione durante i corsi di aggiornamento e dall'altro il valore di alcune strategie didattiche (quali per esempio il confronto fra pari) anche quando a essere coinvolti sono proprio i docenti in formazione.

Numerosi sono i nodi concettuali evidenziati dalle attività proposte, fra cui si distinguono principalmente le problematiche legate alla comprensione del ruolo della variazione del flusso del campo magnetico nella legge di Faraday e le concezioni alternative degli studenti sul tema dell'energia (soprattutto sull'idea che l'energia è qualcosa che fluisce attraverso i fili come la corrente elettrica o che è creata dal nulla). Non è un caso che dall'analisi del

PCK per gli insegnanti emerga come il prototipo di turbina a vento di Savonius sia visto principalmente come strumento da utilizzare per evidenziare il concetto di energia e sue trasformazioni ancor prima di semplice applicazione della legge dell'induzione. Probabilmente queste considerazioni testimoniano quanto sia difficile trattare il tema dell'energia e della trasformazione nelle sue varie forme con gli studenti di qualsiasi livello; il tutto è confermato dalle considerazioni fatte dagli studenti sugli aspetti energetici coinvolti dell'esperienza per artefatti proposta nei paragrafi precedenti.

In ultima analisi, le schede di lavoro aiutano gli studenti coinvolti (di ogni livello) nel passaggio da una visione di senso comune verso un pensiero formale ma non consentono di ottenere un alto livello di formalizzazione dei concetti fisici analizzati. Questo suggerisce di strutturare un percorso più articolato sull'induzione elettromagnetica (all'interno del quale eventualmente inserire una delle attività descritte) finalizzato al raggiungimento di un livello di comprensione maggiore dei fenomeni da un punto di vista qualitativo e di conseguenza un migliore grado di formalizzazione. Per esempio, sebbene il dispositivo consenta di visualizzare il fenomeno dell'induzione in modo immediato, è pur vero che esso mostra solo un'applicazione d'induzione elettromagnetica legato al moto relativo fra magneti e bobine (uno dei nodi concettuali più importanti emersi dalla letteratura). Ciò suggerisce di accompagnare l'uso dell'artefatto con un'attività capace di evidenziare il ruolo del flusso del campo magnetico nella legge di Faraday-Neumann-Lenz.

Capitolo 5: Una proposta didattica

Nel capitolo precedente sono stati illustrati diversi studi preliminari sull'induzione elettromagnetica, che se da un lato confermano le problematiche di apprendimento degli studenti relative a questo importante concetto della fisica dall'altro propongono nuove strategie di approccio e di soluzione. I risultati confermano la valenza didattica delle attività progettate e contemporaneamente suggeriscono come strutturare un percorso di apprendimento più articolato capace di creare completamente un ponte fra la visione di senso comune e il pensiero formale. Queste considerazioni hanno portato alla costruzione di un nuovo percorso didattico attraverso cui analizzare l'induzione elettromagnetica a partire dalle nozioni basilari del magnetismo fino ad arrivare ad esperimenti quantitativi capaci di mettere in evidenza il ruolo fondamentale del flusso del campo magnetico e della sua variazione nel tempo nella legge di Faraday-Neumann-Lenz.

In questo capitolo verrà descritto dettagliatamente il percorso e verranno analizzate le sperimentazioni condotte con gli studenti.

5.1 Struttura del percorso didattico

Il percorso didattico è finalizzato a introdurre la legge di Faraday-Neumann-Lenz a partire dai concetti base del magnetismo, utilizzando solo attività sperimentali per definire le grandezze fisiche coinvolte. Accanto ai singoli esperimenti sono state create anche delle schede di lavoro (implementando le attività sperimentali “dell'*Inquiring Based Learning*” – vedi Appendice A) attraverso cui analizzare i processi di apprendimento ed evidenziare i cambiamenti concettuali degli studenti.

L'idea alla base del percorso didattico consiste nel proporre agli studenti un approccio di ricerca guidato³⁸, sotto forma di indagine personale o di gruppo. Si incentiva così l'attività in piccoli gruppi di tre o quattro persone la cui utilità da un punto di vista didattico è stata ampiamente dimostrata nei capitoli precedenti. L'apprendimento fra pari è possibile se le attività sono immediatamente comprensibili per gli studenti e per raggiungere un tale obiettivo gli esperimenti quantitativi sono stati concepiti cercando di sfruttare quanto più possibile le nuove tecnologie e in particolar modo sistemi di acquisizione on-line semplici da utilizzare e analizzare. Gli studenti vengono attivamente coinvolti attraverso dei cicli di apprendimento fondati su tre fasi: *Previsione, Esperimento e Confronto* (ciclo PEC). La letteratura internazionale ha mostrato la grande valenza didattica di questo tipo di strategia nei processi di apprendimento (Thornton & Sokoloff, 1998; Borges & Gilbert, 1998), sia per quanto riguarda il coinvolgimento attivo degli studenti sia per il livello di comprensione che si riesce ad ottenere usandola. Per ciascun ciclo gli studenti devono fare una previsione di quello che immaginano possa succedere, realizzare l'esperimento e quindi confrontare le loro idee con i risultati sperimentali: in questo modo è possibile mettere a fuoco le loro idee spontanee e seguirne l'evoluzione. Tale metodologia è stata utilizzata sia a livello individuale sia per i lavori di gruppo e i risultati ottenuti in entrambi i casi sono interessanti.

Accanto a questo metodo di indagine sono state affiancate alcune attività di Problem Solving, la cui valenza didattica è indiscussa per tutti i maggiori ricercatori al mondo (Watts, 1991). "Fra i vari tipi di attività di problem solving il *Popular Problem Solving* (PPS) risulta particolarmente degno di nota [...] poiché sviluppa capacità creative, progettuali, organizzative e decisionali [...]. A partire dal PPS è stata strutturata una metodologia per attività di orientamento formativo (PSO) che mutua fasi di lavoro individuale a fasi di cooperative learning [...]" (Bosio, Michelini et Al., 1999).

L'attività di problem solving utilizzata nella sperimentazione è stata pianificata seguendo fedelmente la struttura teorica del PSO: è stato necessario ridefinire i tempi delle singole fasi previste dal PSO in quanto quest'ultimo prevede sei ore di lavoro con gli studenti mentre il tempo massimo concesso dalle scuole coinvolte per effettuare l'intera sperimentazione non superava le dieci ore per classe.

5.2 Contesto

Il percorso sperimentale è stato sottoposto a dieci classi del triennio di scuole secondarie calabresi (nello specifico solo licei scientifici): tre di esse del

³⁸ La fisica viene vista come indagine, prendendo spunto dall'inquiring learning.

primo anno del triennio (terzo liceo scientifico) comprendevano studenti di età media di 15-16 anni mentre le restanti sette dell'ultimo anno del triennio (quinto liceo scientifico) comprendevano studenti di 17-18 anni. Tutte le classi coinvolte non avevano mai trattato prima i fenomeni magnetici e quindi di conseguenza la legge dell'induzione elettromagnetica. La tabella 1 mostra l'elenco delle scuole coinvolte nella sperimentazione.

a.s.	Istituto	Città	Classe (età)
2010-2011	Liceo Scientifico Statale "E. Fermi"	Cosenza	5 (17-18)
	Liceo Scientifico Statale "G.B. Scorza"	Cosenza	1 (17-18)
	Liceo Scientifico Statale "G.B. Scorza"	Cosenza	1 (15-16)
	Liceo Scientifico Statale "E. Fermi"	Catanzaro	1 (15-16)
	Liceo Scientifico Statale "Pitagora"	Rende	1 (17-18)
	Liceo Scientifico Statale "S. Patrizi"	Cariati	1 (15-16)

Tabella 1: Elenco delle scuole coinvolte nella sperimentazione.

Complessivamente il numero di studenti che hanno preso parte all'attività è circa di 200, tutti impegnati durante le attività curriculari. L'attività proposta ha impegnato ciascuna classe per circa **dieci** ore di lavoro, numero certamente importante per condurre una attività didattica sperimentale ma allo stesso tempo limitato per fare quanto visto nei capitoli tre e quattro in modo dettagliato.

Fra le dieci classi coinvolte quattro sono state monitorate completamente durante la sperimentazione, sei invece sono state coinvolte con monitoraggio parziale e ciò ha permesso di mettere a punto definitivamente la sperimentazione e di apportare ulteriori modifiche (sia sugli apparati sperimentali sia sulle schede didattiche) in seguito a un primo test con gli studenti.

L'intera attività è iniziata a ottobre 2010 e si è conclusa a maggio 2011, con una media di quattro incontri settimanali, distribuiti su tutto l'intero periodo. Per ogni appuntamento della sperimentazione sono stati allestiti dei mini laboratori direttamente in classe (compito questo che ha portato non poche problematiche da un punto di vista organizzativo), utilizzando materiali forniti dal dipartimento di fisica dell'Università della Calabria. Tutti gli

incontri con gli studenti sono stati realizzati con la collaborazione dei docenti di fisica, supporto sempre molto utile e costruttivo.

5.3 Struttura dell'attività sperimentale

L'attività proposta, realizzata interamente in classe in dieci ore curriculari, è stata progettata per analizzare la legge dell'induzione elettromagnetica seguendo il seguente ordine concettuale:

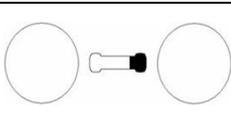
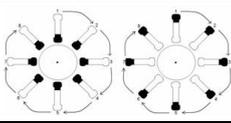
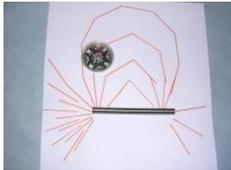
- contestualizzazione dei concetti fisici fondamentali del campo magnetico, per condurre gli studenti verso una più profonda comprensione dei concetti di campo e di linee di campo magnetico;
- esplorazione di casi differenti dell'induzione elettromagnetica attraverso un'attività di problem solving;
- esecuzione di esperimenti quantitativi attraverso cui analizzare la legge di Faraday-Neumann-Lenz ed in particolar modo evidenziare il ruolo centrale della variazione del flusso del campo magnetico.

L'obiettivo principale era quello di sviluppare il pensiero formale a partire dall'esperienza di tutti i giorni, collegando le idee di senso comune con il modello scientifico dei fenomeni. Per ottenere tale risultato il percorso sperimentale può essere suddiviso in sei parti legate ai nodi concettuali principali dell'elettromagnetismo e per ciascuno di essi è stato chiesto agli studenti di affrontare, analizzare e risolvere differenti situazioni sperimentali (Tabella 2). Le parti A e B richiedono complessivamente due ore di attività, mentre tutte le altre (C, D, E ed F) richiedono ciascuna due ore di lavoro in classe.

Parte	Descrizione
A	Magnete come sorgente di campo magnetico
B	Bussola come esploratore
C	Linee di campo magnetico
D	Campo magnetico prodotto da un filo percorso da corrente
E	Problem Solving e strategia PEC sull'induzione elettromagnetica
F	Esperimento della macchina di Atwood

Tabella 2: Il percorso sperimentale è stato suddiviso in sei parti concettuali legate ai nodi concettuali principali dell'elettromagnetismo. Le parti A e B richiedono complessivamente due ore di attività, tutte le altre (C, D, E ed F) richiedono ciascuna due ore di lavoro in classe.

Ognuna di esse presenta una situazione ben precisa e per ciascuna situazione sono state individuate delle Reserach Questions finalizzate ad affrontare i principali nodi concettuali evidenziati in letteratura; la tabella 3 riporta tutte le situazioni proposte agli studenti e le rispettive domande di ricerca. Lo studio proposto prende in parte spunto da altri studi condotti in letteratura sui campi magnetici e induzione elettromagnetica finalizzati alla superconduttività (Michelini & Viola, 2008), implementando tali studi con nuovi esperimenti Hands-on, nuove schede di lavoro e nuove metodologie didattiche per poter affrontare il difficile nodo concettuale legato al ruolo della variazione del flusso del campo magnetico nel tempo durante i fenomeni legati alla legge di Faraday-Neumann-Lenz.

Situazione	Descrizione	Reserach Questions
	S.1 Magne come sorgente di campo magnetico.	Interazione fra due Geomags con poli indistinguibili, tenuti stretti fra le dita.
	S.2 Magne come sorgente di campo magnetico.	Interazione fra due Geomags con poli distinguibili, uno tenuto fra le dita ed uno poggiato sul banco.
	S.3 Bussola come esploratore.	Interazione fra un Geomag ed una bussola posta a destra e sinistra.
	S.4 Bussola come esploratore.	Interazione fra un Geomag ed una bussola che ruota intorno ad esso.
	S.5 Linee di campo magnetico	Rappresentazione delle linee di campo magnetico usando la bussola come esploratore.

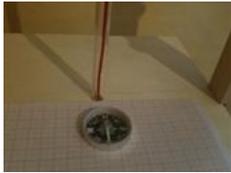
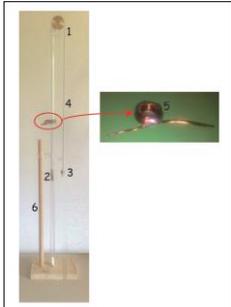
			locale? RQ7. Gli studenti riconoscono una simmetria globale tridimensionale?
	S.6. Campo magnetico di un filo percorso da corrente.	Esplorazione del campo magnetico di un filo percorso da corrente attraverso una bussola e calcolo del rapporto $\frac{B_{Filo}}{B_{Terra}} \propto \frac{i}{r}$	RQ8. Gli studenti riconoscono la configurazione delle linee di campo magnetico come somma del campo magnetico prodotto dal filo percorso da corrente e del campo magnetico terrestre? RQ9. Gli studenti ricavano il rapporto B_{Filo}/B_{Terra} come funzione della corrente I e della distanza r ?
	S.7. Problem solving sull'induzione EM	Problem solving sull'induzione EM (materiali: 1. magneti, 2. bobine, 3. galvanometro.	RQ10. Gli studenti riconoscono che una <i>f.e.m.</i> può essere prodotta in una bobina senza utilizzare generatori? RQ11. Gli studenti individuano le varie situazioni che generano una <i>f.e.m.</i> ?
	S.8. Strategia PEC sull'induzione EM	Strategia PEC di indagine dei vari casi di induzione elettromagnetica.	RQ12. Gli studenti riconoscono il ruolo della variazione del flusso del campo magnetico nel fenomeno dell'induzione elettromagnetica?
	S.9. Esperimento con la macchina di Atwood.	Analisi di un tipico grafico ottenuto nell'esperimento della macchina di Atwood.	RQ13. Quali sono i modelli interpretativi usati per spiegare il grafico ottenuto sperimentalmente con la macchina di Atwood? RQ14. Gli studenti indentificano tutti i parametri che fanno variare il grafico della <i>f.e.m.</i> indotta?
	S.10. Esperimento con la macchina di Atwood.	Esperimento della macchina di Atwood variando parametri differenti (altezza e contrappeso).	RQ15. Gli studenti riconoscono il ruolo della variazione del flusso del campo magnetico dopo aver realizzato l'esperimento?

Tabella 3: La tabella riassume le singole situazioni presentate agli studenti e le Reserach Question corrispondenti a ciascuna situazione.

Le situazioni S.1 ed S.2 sono finalizzate a indagare sull'interazione fra due Geomags e a mostrare come la repulsione si verifica solo quando entrambi i magneti sono vincolati fra le dita delle mani, altrimenti si ottiene sempre un'attrazione fra i due magneti (diretta se si affacciano poli opposti oppure in seguito alla rotazione del Geomag sul tavolo se si affacciano poli uguali). L'indagine è finalizzata a verificare l'approccio spontaneo degli studenti nel descrivere queste semplici esplorazioni: è interessante verificare se gli studenti riconoscono una regola generale oppure parlano solo di interazione fra i poli magnetici.

Le due situazioni S.3 ed S.4 sono mirate al riconoscimento della bussola come esploratore del campo magnetico. Ci si chiede anche in questo caso se gli studenti riconoscono una regola generale oppure descrivono soltanto l'interazione fra il magnete e la bussola.

La situazione S.5 mette in luce le proprietà dello spazio intorno ad un magnete. Infatti, dopo aver individuato le proprietà dei magneti e le loro interazioni e riconosciuto la bussola come un ottimo esploratore di campo magnetico, agli studenti viene proposto di esplorare lo spazio intorno a un magnete utilizzando la bussola e di rappresentare le orientazioni dell'ago della bussola. Si ottiene così una definizione empirica delle linee del campo magnetico identificate con le linee di orientazione dell'aghetto della bussola. A questo punto è molto interessante considerare l'analisi elaborata dagli studenti delle configurazioni disegnate ed in particolar modo le loro considerazioni sulle simmetrie/asimmetrie e le loro descrizioni in termini di regole generali o di visione locale del sistema.

La situazione S.6 è mirata a mostrare come anche un filo percorso da corrente generi un campo magnetico. Per raggiungere questo obiettivo agli studenti viene chiesto di ricavare la dipendenza del rapporto $\mathbf{B}_{\text{Filo}}/\mathbf{B}_{\text{Terra}}$ rispetto alla corrente che circola nel filo e alla distanza r dal filo.

Prima di passare all'induzione elettromagnetica è necessario mostrare l'interazione fra due fili percorsi da corrente in modo tale da mettere in evidenza una totale corrispondenza fra i fili percorsi da corrente ed i magneti: un magnete è una sorgente di campo magnetico così come lo è un filo percorso da corrente, due magneti interagiscono fra di loro così come succede a due fili percorsi da corrente. Vista la difficoltà di terminare la sperimentazione in dieci ore, gli esperimenti preparati sull'interazione fra due fili percorsi da corrente sono stati sostituiti con delle Applet mostrate agli studenti dopo l'analisi della situazione S.6.

La situazione S.7 è progettata per introdurre l'induzione elettromagnetica, sfruttando tutti gli elementi visti fino a ora. Dopo aver visto che un filo percorso da corrente genera un campo magnetico e interagisce a sua volta con un campo magnetico esterno, agli studenti viene sottoposto un problem solving mirato a verificare la possibilità di generare una corrente

all'interno di una bobina senza utilizzare un generatore, bensì servendosi di un campo magnetico. In questo modo si propone l'ultima interazione possibile fra magnete e filo: ossia un magnete che interagisce con un filo che inizialmente non è percorso da nessuna corrente. In questa fase ci si chiede se gli studenti riconoscono che è possibile indurre una *f.e.m.* all'interno di una bobina.

La situazione S.8 è finalizzata a indagare sui modi possibili di indurre una *f.e.m.* utilizzando lo stesso magnete e la stessa bobina. Ci si chiede in realtà se gli studenti riconoscono il ruolo della variazione del flusso o se invece riconducono tutto al moto relativo fra magnete e bobina.

La situazione S.9 serve semplicemente a introdurre l'esperimento della macchina di Atwood, ad analizzarne il grafico tipico ottenuto e a verificare quali siano i modelli interpretativi utilizzati dagli studenti per spiegare i grafici ottenuti.

Infine la situazione S.10 è progettata per analizzare la variazione dei grafici tipici della macchina di Atwood in funzione della variazione di due parametri: altezza di caduta e contrappeso del magnete. Tali parametri influenzano fortemente la velocità di ingresso del magnete nella bobina, l'accelerazione totale del sistema e la velocità di uscita del magnete dalla bobina e di conseguenza il grafico corrispondente a ciascuna configurazione sperimentale ottenuta. In questo modo è possibile legare il grafico ottenuto alla variazione del flusso inteso come variazione del numero di linee di campo che attraversano la superficie delimitata dalla bobina e quindi ricondurre l'induzione elettromagnetica alla variazione del flusso del campo magnetico.

Il percorso sperimentale potrebbe essere implementato con le attività proposte nel capitolo 4, visto che le applicazioni della turbina a vento di Savonius si adattano perfettamente alla natura e ai contenuti della sperimentazione con la macchina di Atwood sull'induzione elettromagnetica. Tuttavia, la turbina di Savonius è stata esclusa per la mancanza di tempo necessario per la sua sperimentazione, sebbene la disponibilità dei docenti sia stata enorme nel concedere dieci ore di lezione per realizzare l'intera esperienza.

5.4 Risultati e analisi dei dati.

Di seguito sono analizzate le risposte di **87 studenti** relative alle situazioni presentate nel paragrafo precedente.

Situazione S.1

Come si può osservare dalle conclusioni personali, i ragionamenti degli studenti sono in termini di interazione fra magneti piuttosto che in termini di regola generale (Fig. 77). Il 70% degli studenti afferma che queste sono dovute all'interazione fra i poli magnetici e solo il 18% guarda alla natura dei poli (guarda quindi allo stato dei poli).

Da osservare come sia presente un numero consistente di studenti che guarda i fenomeni magnetici in analogia con i fenomeni elettrici (nodo concettuale ben evidenziato in letteratura), facendo riferimento alle cariche dei poli magnetici. Poche sono le analisi del fenomeno in termini interpretativi di attrazione/repulsione (5%) e altrettanto poche sono in termini descrittivi di allontanamento/avvicinamento (7%).

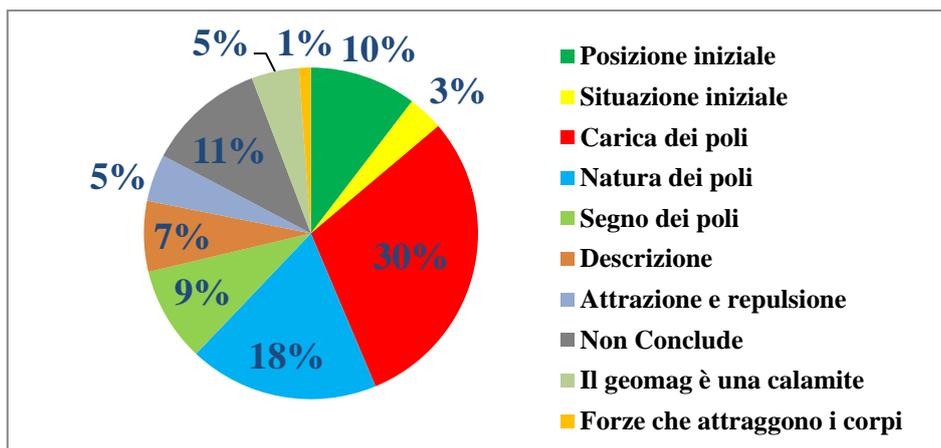


Fig. 77: Conclusioni personali degli studenti. I dettagli mostrano come tutta l'attenzione degli studenti sia focalizzata sull'interazione fra i poli piuttosto che sull'individuazione di una regola generale.

È molto interessante osservare come dopo la discussione di gruppo l'attenzione degli studenti si sposti completamente verso un'analisi interpretativa dei fenomeni per giustificare le ipotesi in merito a quali poli vengono affacciati. Infatti, sebbene il numero di studenti che non esprime nessuna conclusione sia aumentato notevolmente (41% contro l'11% della fase precedente), più di 2/3 dei restanti analizzano il fenomeno in termini di attrazione e repulsione (Fig. 78).

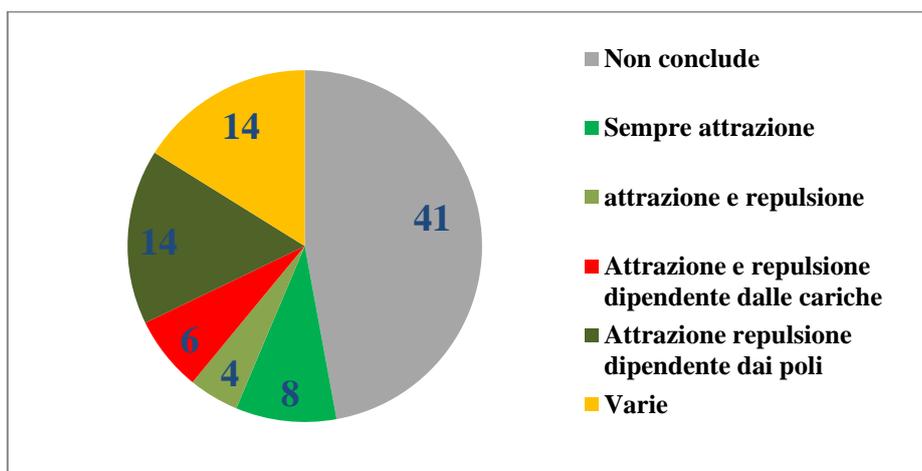


Fig. 78: Conclusione degli studenti in seguito alla discussione di gruppo. Più dei 2/3 degli studenti analizza il fenomeno in termini interpretativi di attrazione e repulsione.

Situazione S.2

La maggior parte degli studenti descrive l'esito dell'interazione prevalentemente in termini di attrazione/repulsione (20%) o di attrazione/rotazione-attrazione (39%), mentre un numero notevolmente minore descrive l'interazione in termini di allontanamento.

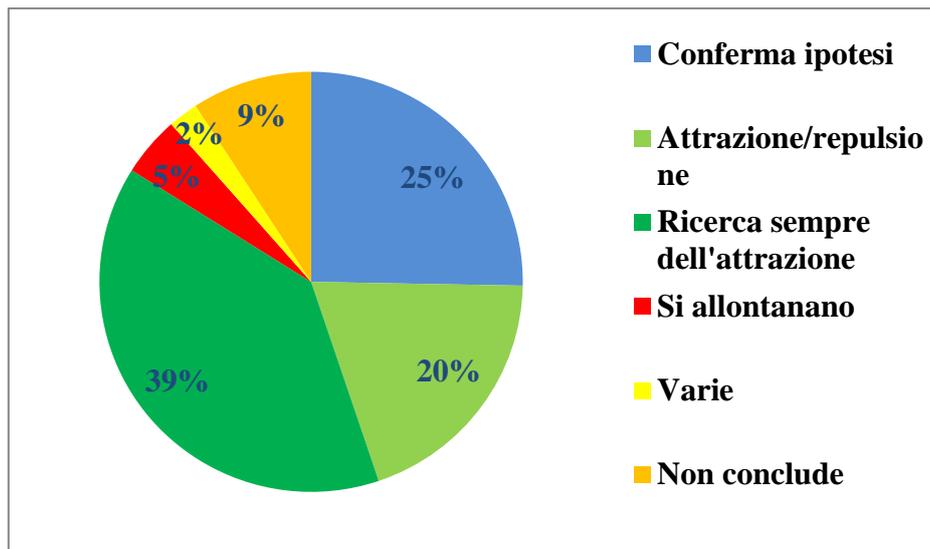


Fig. 79: Conclusioni individuali degli studenti. La maggior parte delle risposte sono in termini di attrazione/repulsione (20%) o di ricerca sempre di attrazione (39%).

Il grafico seguente mostra le cause delle interazioni previste (Fig. 80), da cui si evince come l'attenzione degli studenti sia rivolta ancora una volta sul ruolo dei poli magnetici.

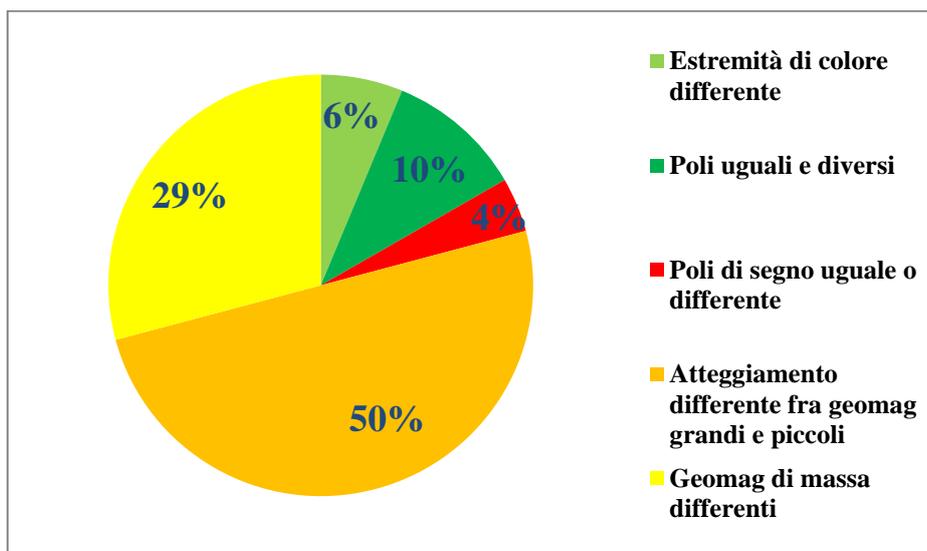


Fig. 80: Conclusioni personali degli studenti. I dettagli mostrano come tutta l'attenzione degli studenti sia focalizzata sull'interazione fra i poli piuttosto che sull'individuazione di una regola generale.

La maggior parte dei ragazzi (79%) pone l'attenzione sul differente atteggiamento dei Geomags più piccoli rispetto a quelli più grandi: poggiando infatti sul tavolo un Geomag più lungo e successivamente uno più corto si può osservare come nel primo caso il Geomag viene respinto e nell'altro caso subisce una rotazione e una successiva attrazione. Gli studenti attribuiscono questa differenza ad un *“maggiore attrito incontrato dal Geomag più grande”* o genericamente ad una *“maggiore massa”*.

La discussione di gruppo introduce ancora una volta elementi molto interessanti, come si evince dai grafici riportati di seguito, in conseguenza della quale poco più dei 2/3 di studenti (68%) mette in evidenza un atteggiamento sempre di attrazione dei due Geomags (*“tendenza sempre all'attrazione”, “rotazione del Geomag sul tavolo”, “la repulsione si nota solo se i Geomags sono vincolati”*). L'attrazione e repulsione viene indicata ora solo dal 2% di studenti.

Interessanti sono alcune risposte tipiche degli studenti relative al caso in cui i Geomags tendono sempre ad attrarsi reciprocamente:

- *“che essendoci due poli si verificherà una rotazione causata dalla coppia di forze”;*
- *“il geomag reagisce con una doppia forza, il polo opposto tende ad avvicinarsi e lo stesso polo si allontana. Tutto questo aiuterà il geomag a compiere una rotazione, ma il geomag più grande posto su un piano è ostacolato dall'attrito e si allontanerà semplicemente”;*
- *“nel campo magnetico si hanno sempre due forze, a differenza del campo elettrico”.*

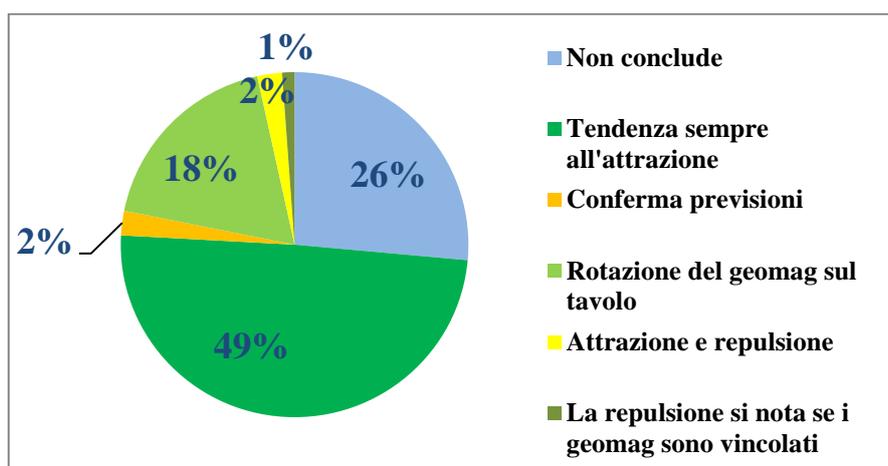


Fig. 81: Dopo la discussione di gruppo poco più dei 2/3 di studenti (68%) mette in evidenza un atteggiamento sempre di attrazione dei due Geomags (“tendenza sempre all’attrazione”, “rotazione del Geomag sul tavolo”, “la repulsione si nota solo se i Geomags sono vincolati”).

Il confronto fra pari contribuisce al processo formativo degli studenti anche per quanto riguarda le cause dell’interazione. Sparisce quasi completamente la “visione elettrica” del campo magnetico (2%), secondo cui i poli magnetici sono delle porzioni di materiale con un accumulo di cariche elettriche (“Si attraggono se dotati di cariche elettriche opposte. Si respingono se dotati di uguali cariche”). Tuttavia gli studenti continuano a guardare il fenomeno proposto da un punto di vista locale senza provare a individuare una regola generale capace di descrivere le interazioni analizzate.

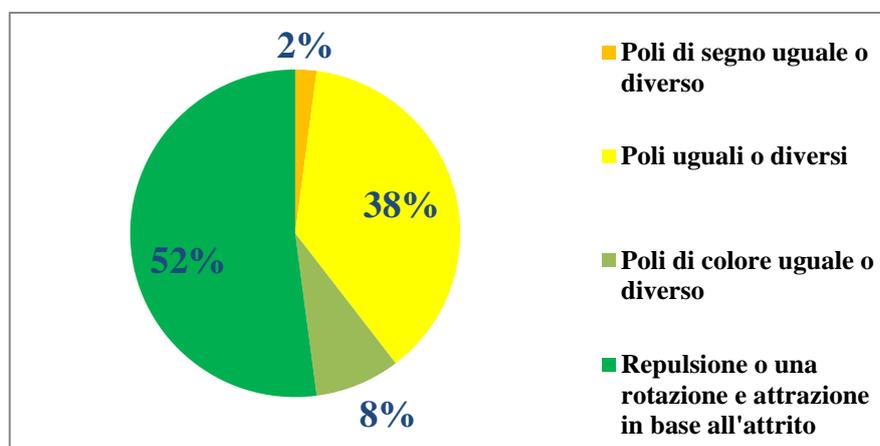


Fig. 82: Dopo il confronto fra pari gli studenti continuano ad osservare il fenomeno da un punto di vista locale; tuttavia sparisce quasi completamente l’idea dei poli magnetici visti come porzioni di un materiale con un accumulo di cariche elettriche (2%).

Situazioni S.3 ed S.4

La bussola è considerata un esploratore poiché è “attratta dai magneti” e l’ago della bussola è identificato dalla quasi totalità di studenti come un magnete, senza proporre alcun modello interpretativo (Fig. 83). E’ presente,

quindi, l'idea di proprietà attorno al magnete, ma solo in termini di azione a distanza su un esploratore (bussola)³⁹.

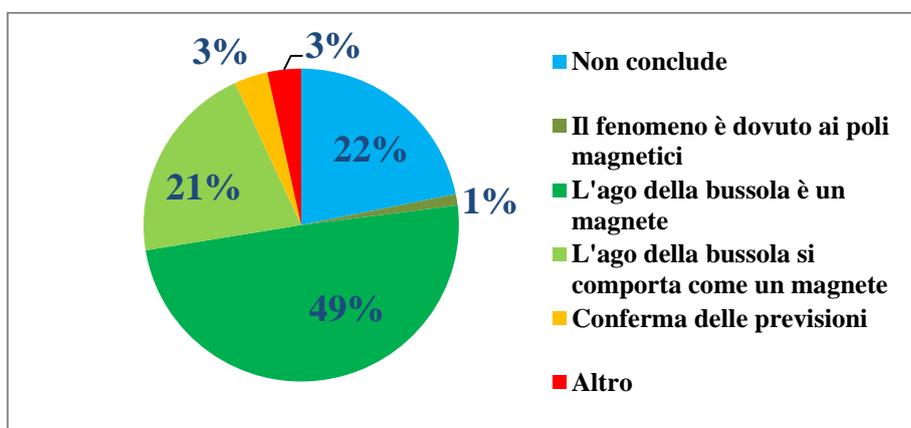


Fig. 83: La bussola è identificata con un magnete dal 71% di studenti, senza però proporre un modello interpretativo per spiegare tale affermazione.

La metà degli studenti analizza nello specifico ciascuna bussola (“*la parte bianca associata alla parte A dell’ago*” e ancora “*L’aghetto della bussola A è attratto dal polo bianco, l’aghetto della bussola B va verso il polo rosso*”), mentre 1/3 dei ragazzi riconosce una regola generale (“*il geomag indica sempre la stessa direzione dell’aghetto della bussola. Portando la bussola da un lato e dall’altro del geomag hanno la stessa posizione*”). Ciò significa che il pensiero degli studenti si sta spostando pian piano verso una visione globale in cui vengono guardate le regole generali, leggi e i principi piuttosto che il comportamento dei singoli elementi coinvolti.

Situazione S.5

Fra i grafici riportati dagli studenti (Fig. 84) possiamo distinguere quattro categorie (Tabella 4): a) segmenti senza nessun raccordo fra di loro, b) segmenti raccordati senza simmetrie o andamenti globali, c) linee disegnate con grande dettaglio ai poli e con marcate simmetrie nord-sud (meno marcate le simmetrie assiali), d) configurazioni globali e ricerca di simmetrie globali.

³⁹ Questo risultato è concorde con altri ricavati da studi simili e presenti in letteratura (Michelini & Viola, 2008).

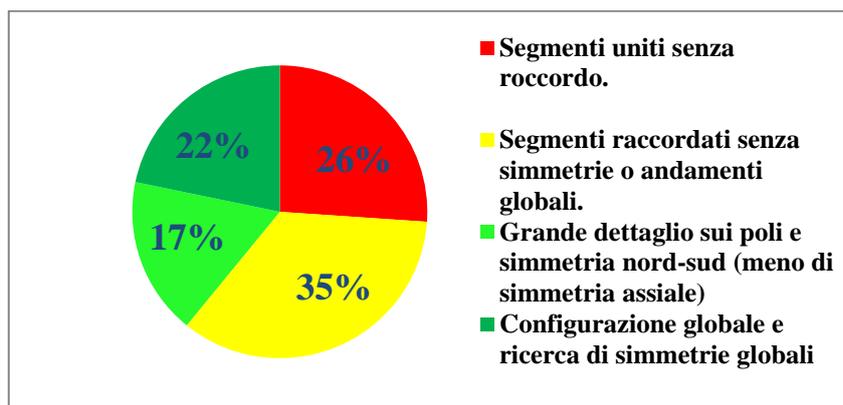


Fig. 84: Fra i grafici riportati dagli studenti possiamo distinguere quattro categorie: a) segmenti senza nessun raccordo fra di loro, b) segmenti raccordati senza simmetrie o andamenti globali, c) linee disegnate con grande dettaglio ai poli e con marcate simmetrie nord-sud (meno marcate le simmetrie assiali), d) configurazioni globali e ricerca di simmetrie globali.

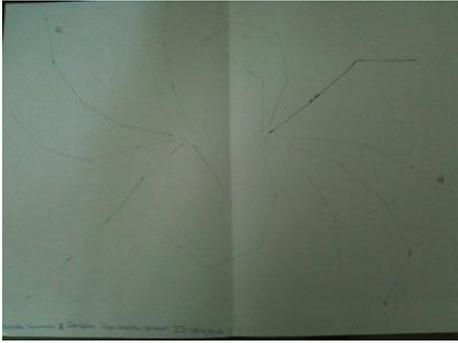
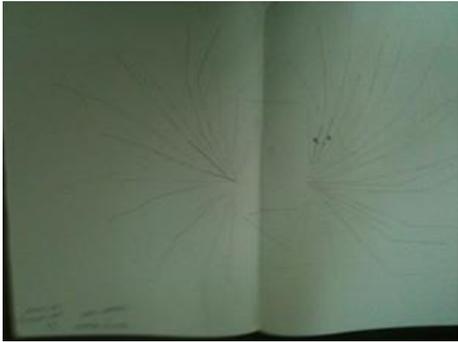
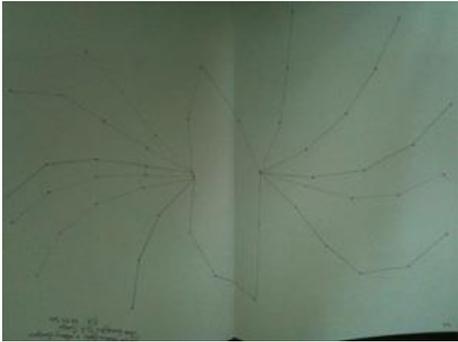
<p style="text-align: center;">Grafico di tipo a.</p> 	<p style="text-align: center;">Grafico di tipo b.</p> 
<p style="text-align: center;">Grafico di tipo c.</p> 	<p style="text-align: center;">Grafico di tipo d.</p> 

Tabella 4: Esempi dei quattro tipi di grafici riportati in figura 84.

Per quanto riguarda le descrizioni date dagli studenti, quasi la metà si esprime in modo dettagliato, guardando la figura sul piano descrittivo (24%), mentre più della metà di studenti guarda sotto forma di regole generali (22%)

(es. “sono simmetriche nel complesso”) e riconosce che le linee sono chiuse (37%).

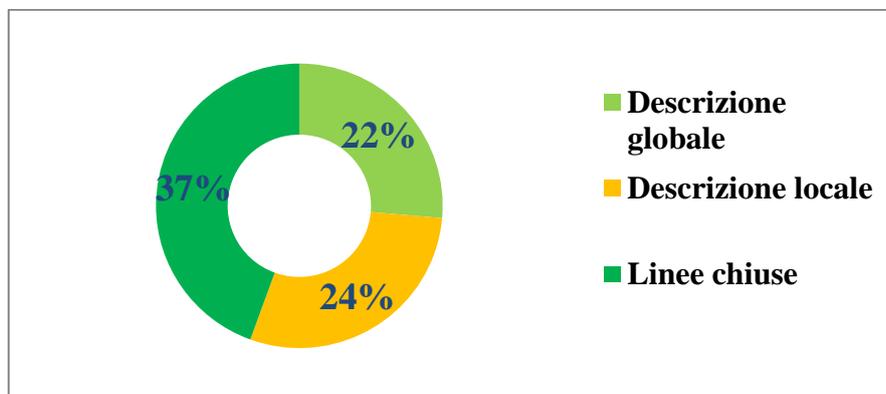


Fig. 85: Descrizione dei grafici da parte degli studenti.

Con molta cura vengono descritte le figure ottenute e in molti casi risultano essere più ricche di dettagli di quanti non siano riconoscibili nei disegni. La maggior parte dell’attenzione in questa fase è dedicata a descrivere ciò che succede vicino ai poli. Particolarmente interessanti sono gli studenti che a partire dai poli individuano una certa asimmetria nelle figure realizzate: per essi non è chiara la sovrapposizione del campo magnetico terrestre con quello prodotto dal magnete.

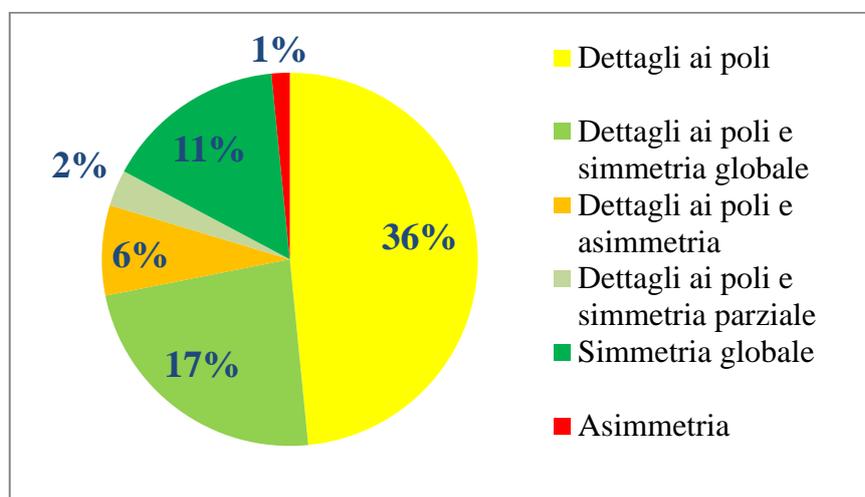


Fig. 86: Descrizione dei grafici - la maggior parte dell’attenzione in questa fase è dedicata a descrivere ciò che succede vicino ai poli.

Da sottolineare infine, come tutti gli studenti riconoscano che la configurazione ottenuta gode di una simmetria spaziale e risulta quindi indipendente dal piano usato per realizzare il disegno, sebbene nessuna interpretazione venga data per giustificare tale affermazione.

Situazione S.6

Tutti gli studenti riconoscono che un filo percorso da corrente produce un campo magnetico, poiché esso devia la direzione dell'aghetto della bussola quando è attraversato da una certa corrente.

Nel calcolare il rapporto $B_{\text{Filo}}/B_{\text{Terra}}$ tutti ricavano sperimentalmente che tale rapporto è direttamente proporzionale alla corrente (i) e inversamente proporzionale alla distanza (r). Il calcolo è stato eseguito su un foglio di lavoro Excel, in seguito gli studenti hanno ricopiato i dati sulle schede di lavoro.

$$\frac{B_{\text{Filo}}}{B_{\text{Terra}}} \propto \frac{i}{r}$$

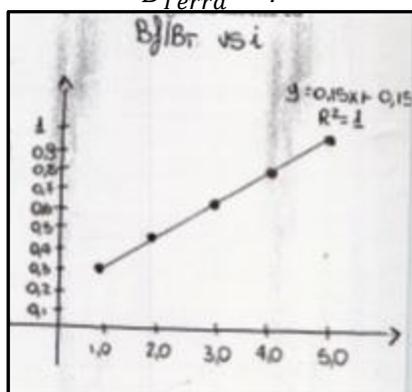


Fig. 87: Proporzionalità diretta del rapporto $B_{\text{Filo}}/B_{\text{Terra}}$ dalla corrente.

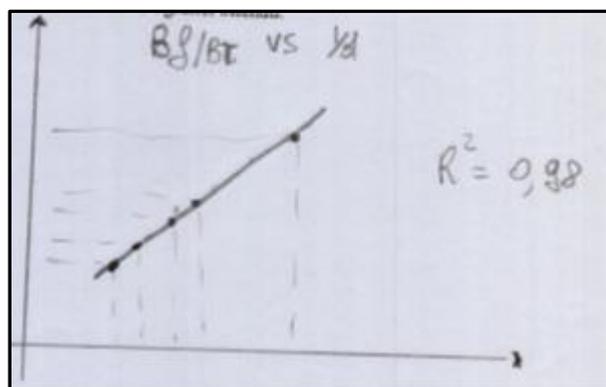


Fig. 88: Proporzionalità diretta del rapporto $B_{\text{Filo}}/B_{\text{Terra}}$ rispetto a $1/r$.

Situazione S.7

Nel risolvere il problem solving proposto, gli studenti mettono in evidenza principalmente il ruolo del movimento reciproco fra magnete e bobina (76%).

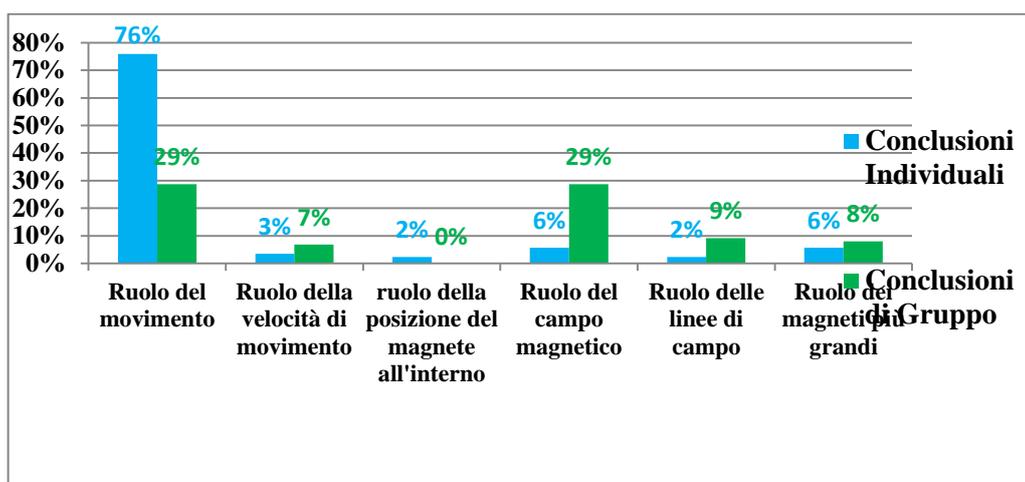


Fig. 89: Categorie individuate dagli studenti come responsabili dell'induzione elettromagnetica.

Principalmente prevale l'idea del movimento del magnete rispetto alla bobina: “avvicinare il magnete”, “inserire il magnete”, “magnete sotto o vicino la bobina”, “magnete all'interno della bobina” o “in movimento rispetto alla bobina” (Fig. 89).

Ciò nonostante, emergono alcune risposte molto interessanti, le quali legano il fenomeno dell'induzione alla velocità di movimento, alle dimensioni dei magneti o al ruolo delle linee di campo.

La discussione di gruppo sposta l'attenzione sul ruolo del campo magnetico, delle linee di campo e sul ruolo della velocità di movimento. Diminuisce notevolmente invece il modo di guardare al fenomeno seguendo il moto relativo fra magnete e bobina. Ciò facilita il passaggio verso un pensiero strutturato che possa riconoscere l'induzione elettromagnetica come qualcosa che è causata dalla variazione del flusso del campo magnetico nel tempo e non associata al moto di un magnete o di una bobina.

L'induzione di un segnale all'interno della bobina è riconosciuta attraverso l'analisi dei suoi prodotti (Fig. 90): si ha la produzione di corrente, di energia o un'oscillazione dell'ago del galvanometro.

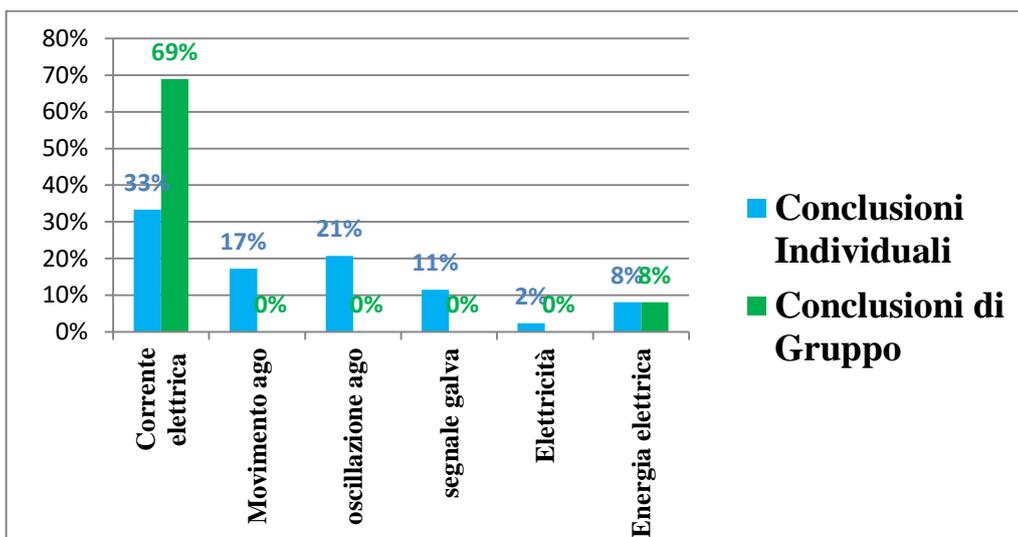


Fig. 90: L'induzione di un segnale all'interno della bobina è riconosciuta attraverso l'analisi dei suoi prodotti: si ha la produzione di corrente, di energia o un'oscillazione dell'ago del galvanometro.

Ancora una volta molto significativo l'intervento della metodologia del cooperative learning che spinge gli studenti a passare dall'osservazione di dettagli descrittivi (movimento dell'ago, oscillazione dell'ago, segnale del galvanometro) al riconoscimento del ruolo cruciale svolto dalle grandezze fisiche quali la corrente e l'energia elettrica.

Infine, alcuni studenti riconoscono che è possibile invertire il segnale indotto (corrente o differenza di potenziale) in diversi casi, come mostrato dal grafico che segue (Fig. 91).

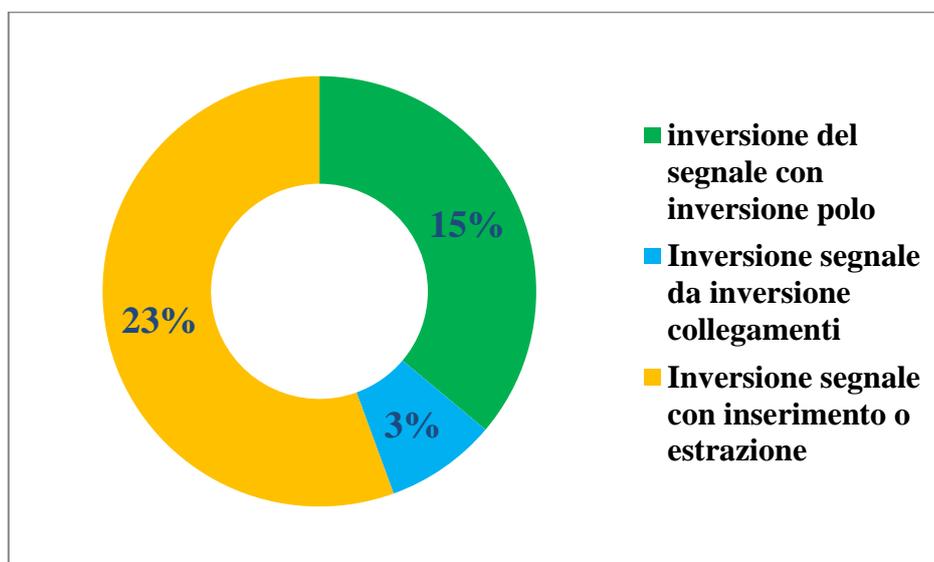


Fig. 91: Alcuni studenti riconoscono che è possibile invertire il segnale indotto (corrente o differenza di potenziale) in diversi casi.

Situazione S.8

Gli studenti dopo aver effettuato tutte le prove sperimentali proposte, deducono che un ruolo fondamentale in questo fenomeno è dovuto alle linee di campo (23%), alla variazione del campo magnetico (13%) o alla sua interazione con la bobina (18%) (Fig. 92).

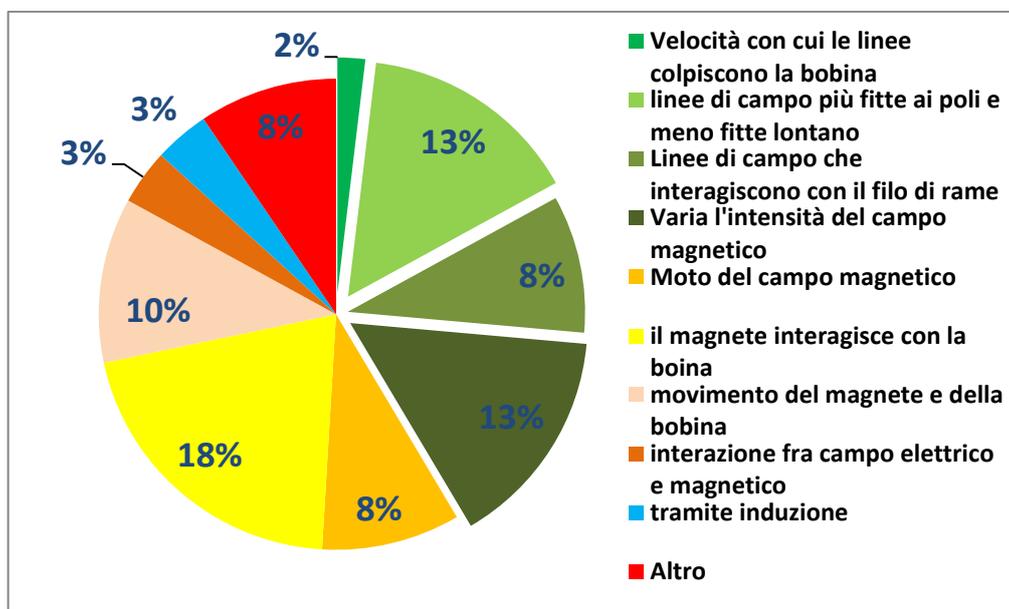


Fig. 92: Gli studenti dopo aver effettuato tutte le prove sperimentali proposte, deducono che un ruolo fondamentale in questo fenomeno è dovuto alle linee di campo (23%), alla variazione del campo magnetico (13%) o alla sua interazione con la bobina (18%).

Da osservare l'idea di pochi studenti secondo cui l'induzione è dovuta alla velocità con cui le linee di campo colpiscono la bobina (2%) oppure interagiscono con il filo di rame (8%).

È interessante osservare come sia stata quasi del tutto abbandonata la visione generica secondo cui l'induzione elettromagnetica è causata dal moto relativo fra magneti e bobina (10%).

Per quanto riguarda le grandezze fisiche coinvolte, l'attenzione ricade maggiormente sulla corrente elettrica, sul campo magnetico e sulla velocità. Uno studente in particolare evidenzia la variazione del flusso del campo magnetico (Fig. 93).

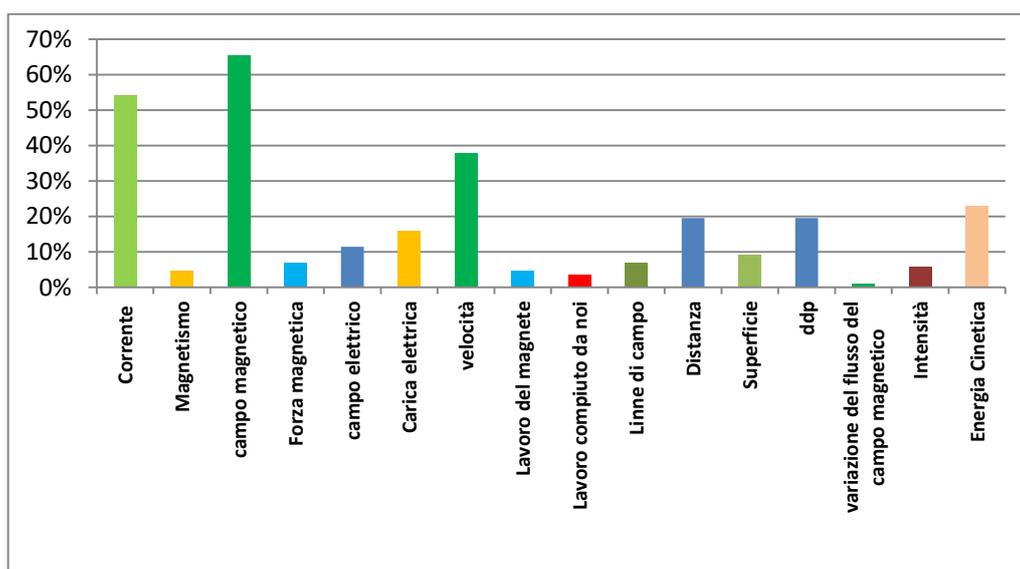


Fig. 93: Per quanto riguarda le grandezze fisiche coinvolte, l'attenzione ricade maggiormente sulla corrente elettrica, sul campo magnetico e sulla velocità. Uno studente in particolare mette in evidenza la variazione del flusso del campo magnetico.

La discussione di gruppo introduce come sempre elementi molto interessanti (Fig. 94). Un numero importante di studenti riconosce come cause dell'induzione elettromagnetica “*la variazione delle linee e quindi la variazione del flusso del campo magnetico*” (28%), “*la variazione del flusso del campo magnetico*” (7%) o ancora la “*variazione del campo magnetico*” (3%). Altri intuiscono il ruolo del flusso del campo magnetico ma non intuiscono che è necessaria una sua variazione nel tempo per indurre una *f.e.m.* all'interno della bobina (“*variazione del flusso delle cariche nel tempo*”, “*deviazione del flusso del campo magnetico*” o “*differenza del flusso del campo magnetico*”).

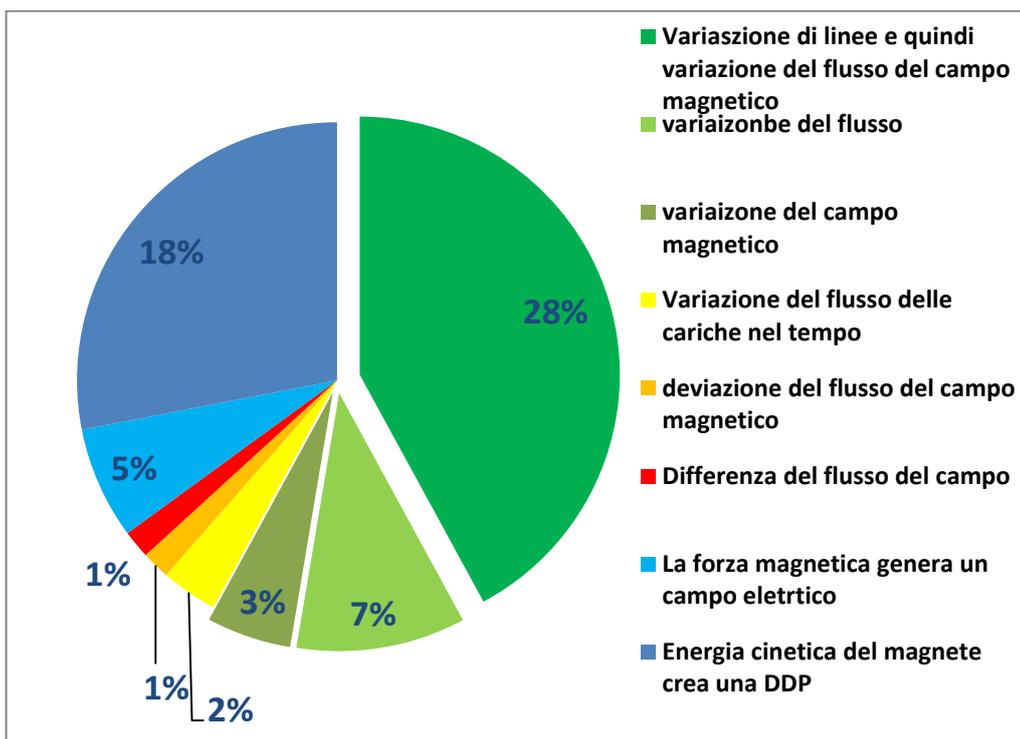


Fig. 94: Dopo la discussione di gruppo un numero importante di studenti riconosce come cause dell'induzione elettromagnetica "la variazione delle linee e quindi la variazione del flusso del campo magnetico" (28%), "la variazione del flusso del campo magnetico".

Situazione S.9

La figura (Fig. 95) che segue mostra la rappresentazione dei grafici ipotizzata dagli studenti.

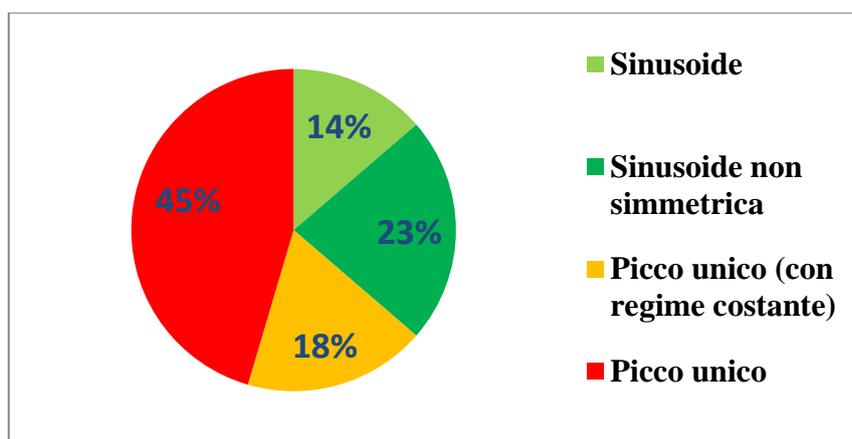


Fig. 95: La figura che segue mostra la rappresentazione dei grafici ipotizzata dagli studenti.

Nella figura 96 è possibile apprezzare i dettagli relativi alle quattro categorie di grafici rappresentate in precedenza. Molti studenti affermano che "si ottiene un picco quando un polo magnetico attraversa la spira, poiché le linee di campo magnetico sono più intense vicino ai poli".

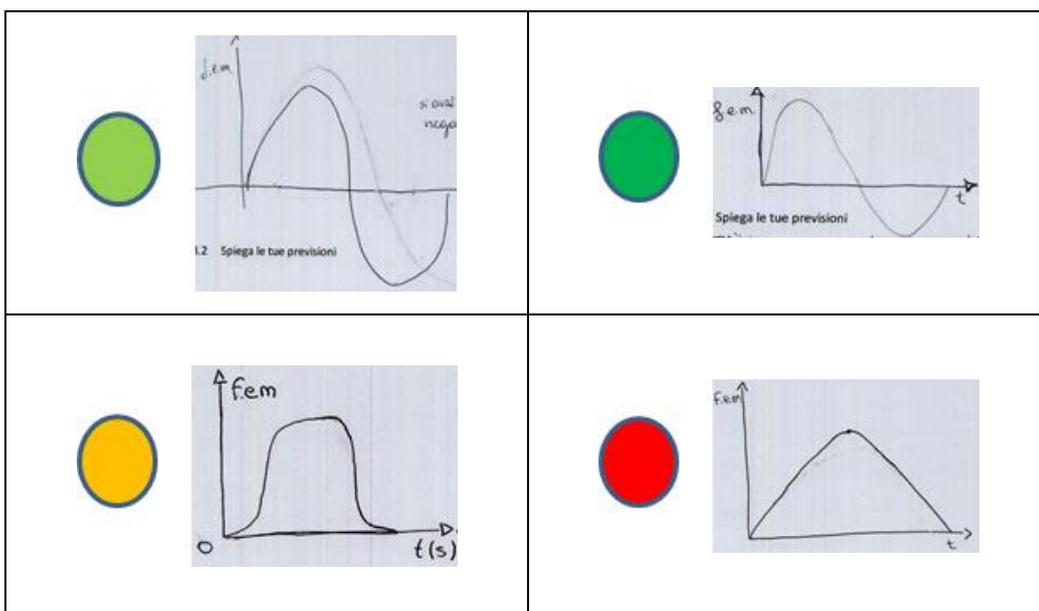


Fig. 96: I quattro grafici mostrano i dettagli relativi alle categorie di rappresentazioni.

Il gran numero di previsioni di grafici ad un picco sottolinea il fatto che molti studenti non hanno ancora compreso la natura delle linee di campo magnetiche chiuse e non aperte. Questo risultato è in accordo con le descrizioni fatte dagli studenti sulle linee di campo (Fig. 85), in cui solo il 37% di loro riconosce che “*le linee di campo sono linee chiuse e vanno da un polo all’altro*”.

Situazione S.10

Quasi tutte le conclusioni individuali degli studenti sottolineano la dipendenza dei picchi del segnale ottenuto dalla velocità di ingresso e di uscita del magnete all’interno della bobina, oltre che dall’altezza di caduta e dal contrappeso (Fig. 97).

Da sottolineare fra tutte le risposte date che la *f.e.m.* descritta come “*inversamente proporzionale al tempo*” (5%), oppure che “*al variare della velocità variano le altezze e quindi le linee di campo*” (9%). Il 49% di studenti parla genericamente della variazione dell’altezza di caduta e del contrappeso, i cui effetti sono schematizzati nel grafico corrispondente (Fig. 98).

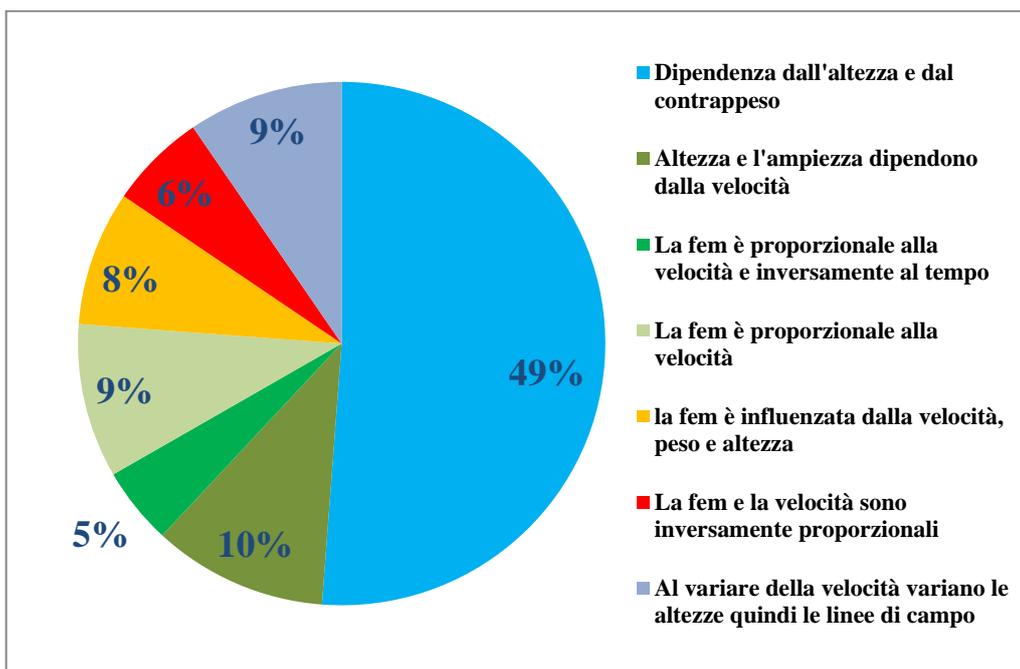


Fig. 97: Quasi tutte le conclusioni individuali degli studenti sottolineano la dipendenza dei picchi del segnale ottenuto dalla velocità di ingresso e di uscita del magnete all'interno della bobina.

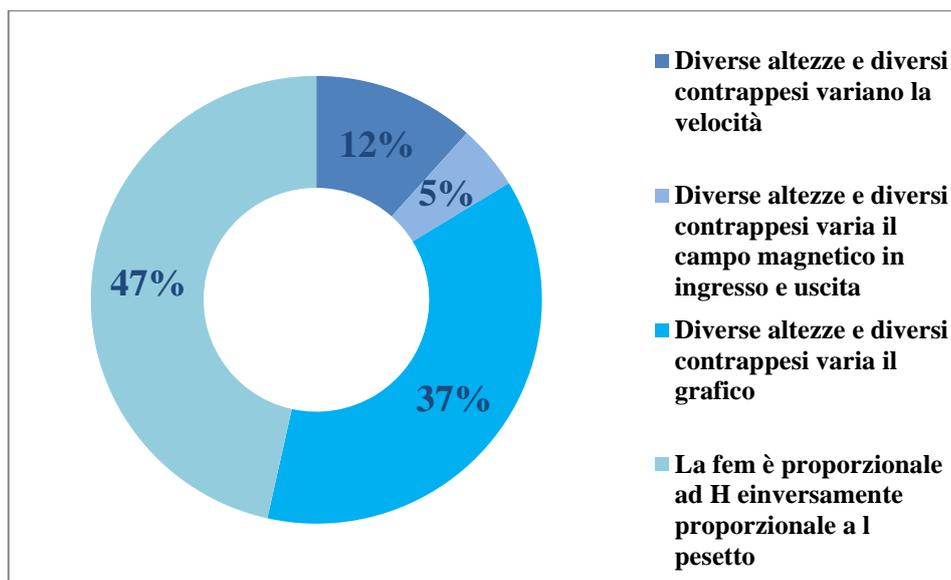


Fig. 98: Il grafico riassume dettagliatamente gli effetti della variazione dall'altezza di caduta e dal contrappeso.

Anche in questo caso finale la discussione di gruppo introduce elementi molto interessanti (Fig. 99). Viene infatti riconosciuta “*la variazione delle linee di campo*” (33%) o del flusso del campo magnetico (13%). La parte restante di studenti (55%) si limita a riferire le casistiche analizzate relative all'evoluzione della *f.e.m.* misurata rispetto alla variazione dell'altezza di caduta e del contrappeso.

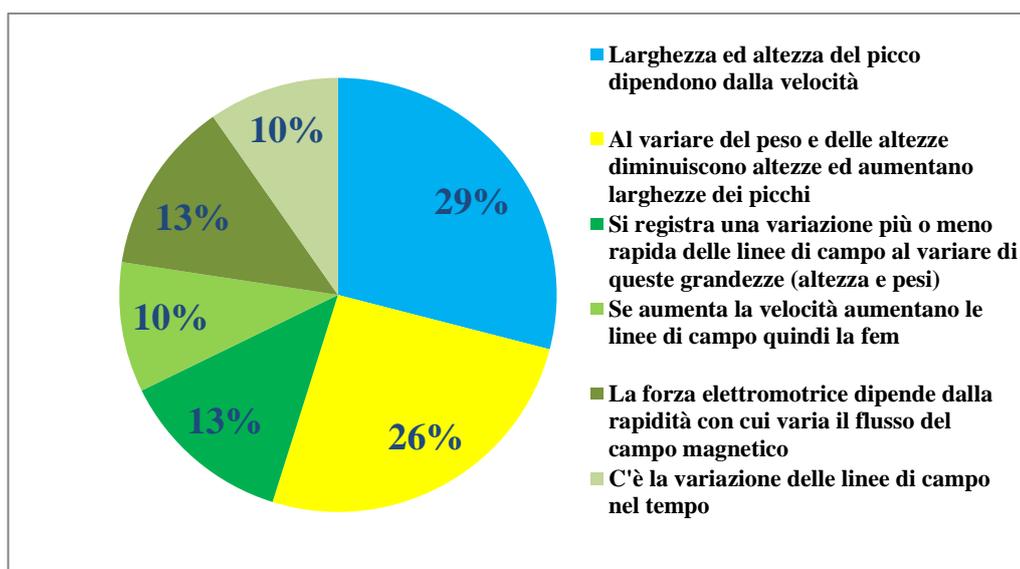


Fig. 99: Anche in questo caso finale la discussione di gruppo introduce elementi molto interessanti. Viene infatti riconosciuta “la variazione delle linee di campo” (33%) o del flusso del campo magnetico (13%). La parte restante di studenti (55%) si limita a riferire le casistiche analizzate relative all’evoluzione della f.e.m. misurata rispetto alla variazione dell’altezza di caduta e del contrappeso.

Infine, è importante sottolineare le considerazioni (nate spontaneamente) fatte dagli studenti in merito all’area sottesa dalla curva (Fig. 100). La tendenza a legare l’aumento dell’ampiezza del segnale con la diminuzione della larghezza e viceversa ha indotto gli studenti a legare l’area sottesa dalla curva alla variazione del flusso (e ciò è avvenuto senza alcuna domanda posta nelle schede di lavoro che potesse indurre una considerazione del genere). Come si vede dai grafici corrispondenti, gli studenti affermano che:

- “il flusso totale è dato dall’area sottesa dalla curva”;
- “la variazione totale del flusso è zero”;
- “l’area della curva è la variazione del flusso nel tempo”;
- “Il flusso delle linee di campo entranti sarà quantitativamente lo stesso dell’uscente. Infatti, graficamente, le aree del grafico saranno le stesse”;
- “l’area rimane uguale perché il flusso rimane costante, poiché è lo stesso magnete e le stesse linee di campo rimangono invariate”;
- “che la somma delle aree dell’ampiezza sono uguali ma di segno opposto è uguale”.

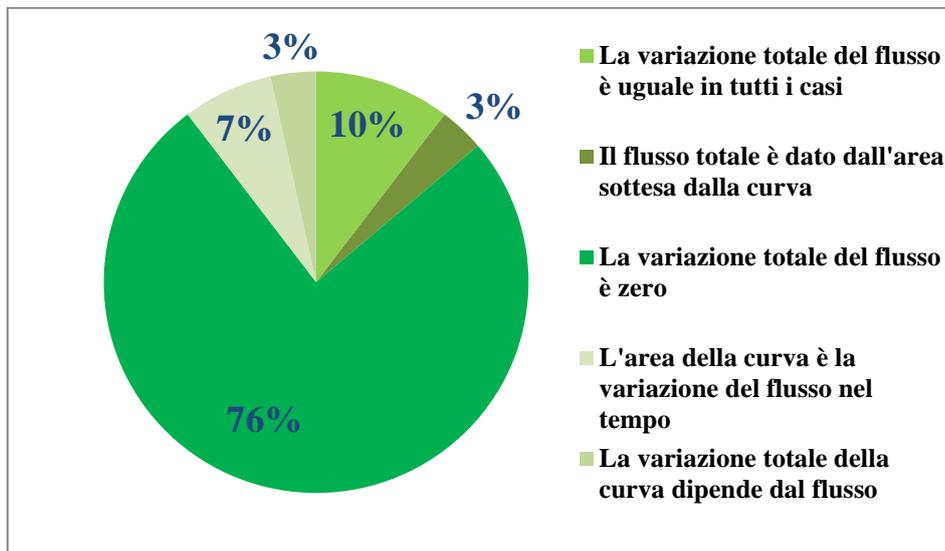


Fig. 100: La tendenza a legare l'aumento dell'ampiezza del segnale con la diminuzione della larghezza e viceversa ha indotto gli studenti a legare l'area sottesa dalla curva alla variazione del flusso.

Per completare questo discorso, gli alunni sottolineano come l'area di una semicurva (positiva o negativa non importa) è sempre la stessa perché “*la quantità di linee è sempre la stessa*” (Fig. 101).

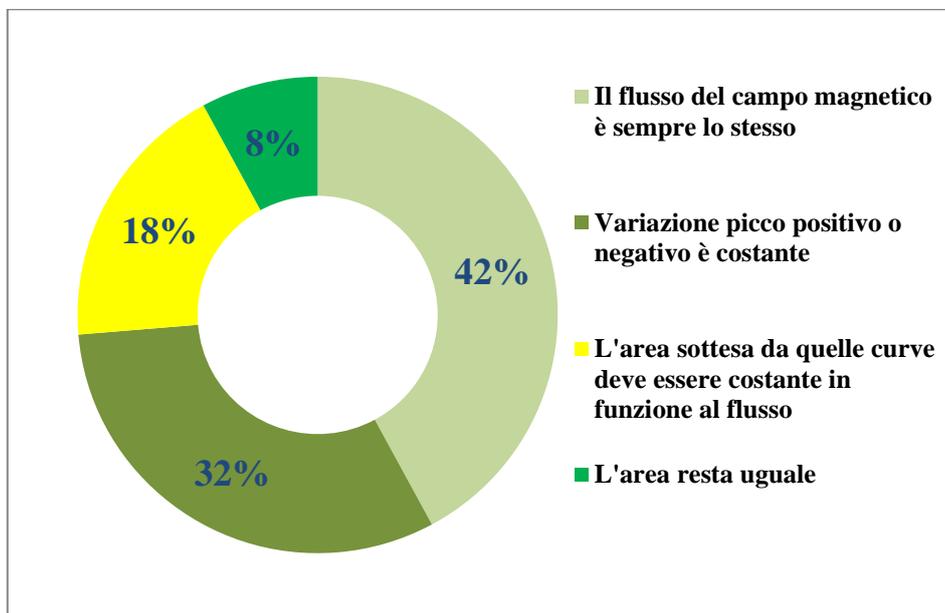


Fig. 101: Considerazioni fatte dagli studenti sull'area delle semicurve.

Come si vede dai grafici corrispondenti, gli studenti affermano che:

- “*Infatti, graficamente, le aree del grafico saranno le stesse*”;
- “*Il flusso è sempre lo stesso, le quantità di linee è sempre la stessa*”;

- *“l'area rimane uguale perché il flusso di corrente essendo sempre lo stesso magnete e le linee di campo rimangono invariate”.*

5.5 Conclusioni

A questo punto è possibile rispondere alle domande di ricerca poste all'inizio della sperimentazione.

RQ1. *Gli studenti riconoscono regole generali o descrivono il fenomeno osservato in termini di interazione fra due poli?*

Gli studenti inizialmente analizzano le interazioni fra i Geomags solo da un punto di vista locale senza il riconoscimento di una regola generale, ponendo la loro attenzione principalmente sui poli magnetici. Un ampio numero di risposte fa emergere il nodo concettuale dei poli magnetici in chiave di lettura del campo elettrico, secondo cui essi sono un accumulo di cariche in eccesso o in difetto. La discussione di gruppo sposta completamente l'attenzione sull'analisi interpretative dei fenomeni in termini di attrazione e repulsione, sempre però finalizzate a giustificare le ipotesi fatte senza alcun riconoscimento di una regola generale.

La seconda esplorazione conferma la tendenza a descrivere i fenomeni da un punto di vista locale seguendo la chiave di lettura interpretativa in termini di attrazione/repulsione o attrazione/rotazione. Molto interessante osservare la drastica diminuzione del numero di studenti che fa riferimento ai poli magnetici come oggetti carichi elettricamente. Ancora una volta si può evidenziare la valenza didattica del confronto fra pari, poiché spinge quasi tutti gli studenti a comprendere che nella seconda interazione i due Geomags possono sperimentare un'attrazione o una rotazione e conseguente attrazione (“che essendoci due poli si verificherà una rotazione causata dalla coppia di forze” oppure “nel campo magnetico si hanno sempre due forze, a differenza del campo elettrico”).

RQ2. *Gli studenti riconoscono la bussola come esploratore?*

La bussola è considerata un esploratore poiché “attrae dai magneti” ed è riconosciuta dalla quasi totalità degli studenti come un magnete, senza però che sia stato proposto alcun modello interpretativo. Genericamente gli studenti presentano l'idea di una proprietà dello spazio intorno ad un magnete, esplicitata dall'azione a distanza sulla bussola esploratrice.

RQ3. *Gli studenti riconoscono una regola generale nel descrivere l'interazione fra il Geomag e la bussola?*

Solo un terzo degli studenti riconosce una regola generale nell'analizzare le due situazioni proposte, ad indicare un graduale progresso rispetto alle due situazioni precedenti in cui gli studenti analizzavano il problema solo da un punto di vista locale.

RQ4. *Gli studenti considerano il contributo del campo magnetico terrestre nell'orientazione delle bussole?*

Gli studenti non riconoscono la sovrapposizione del campo magnetico terrestre con quello prodotto dal magnete nel descrivere le asimmetrie riconosciute nei loro grafici. Bisogna quindi rinforzare tale concetto con altre esperienze (per esempio l'esperimento riferito alla situazione S.6 sarebbe perfetto per questo obiettivo se si costruisse una scheda di lavoro opportunamente concepita, aspetto non considerato in questa sperimentazione vista la mancanza di tempo).

RQ5. *Gli studenti descrivono le linee e/o le confrontano nelle varie situazioni?*

Le descrizioni delle linee sono affrontate dagli studenti principalmente da un punto di vista globale: più della metà degli studenti riconosce delle regole generali (64%). Tuttavia fra queste regole solo 1/3 degli studenti riconosce che le linee del campo magnetico sono chiuse (37%).

RQ6. *Gli studenti riconoscono una simmetria globale o descrivono le configurazioni ottenute da un punto di vista locale?*

Le descrizioni dei grafici sono molto dettagliate al punto tale da fornire più dettagli di quanti se ne vedano analizzando direttamente il grafico. La descrizione è concentrata principalmente a verificare cosa succede attorno ai poli. Solo nel 40% delle descrizioni fornite viene riconosciuta una certa simmetria.

RQ7. *Gli studenti riconoscono una simmetria globale tridimensionale?*

Tutti gli studenti riconoscono invece che la configurazione tracciata gode di una simmetria tridimensionale, ossia il disegno realizzato è indipendente dal piano di lavoro utilizzato.

RQ8. *Gli studenti riconoscono la configurazione delle linee di campo magnetico come somma del campo magnetico prodotto dal filo percorso da corrente e del campo magnetico terrestre?*

Gli studenti nel realizzare l'esperimento sono costretti a verificare gli effetti dovuti al campo magnetico terrestre e alla fine dell'esperienza mostravano di aver assimilato l'esistenza della sovrapposizione dei due campi. Tuttavia sarebbe stato opportuno inserire qualche quesito specifico per supportare tale affermazione con dei dati statistici, ma purtroppo il tempo non era sufficiente a realizzare tale indagine.

RQ9. *Gli studenti ricavano il rapporto $B_{\text{Filo}}/B_{\text{Terra}}$ come funzione della corrente I e della distanza r ?*

Tutti gli studenti hanno ricavato sperimentalmente con una certa precisione (coefficienti di correlazione dei dati molto vicini all'unità) che il rapporto fra il campo magnetico di un filo percorso da corrente e quello terrestre è direttamente proporzionale alla corrente che circola nel filo ed inversamente proporzionale alla distanza dal filo stesso.

RQ10. *Gli studenti riconoscono che una f.e.m. può essere prodotta in una bobina senza utilizzare generatori?*

Tutti gli studenti identificano che una corrente può essere prodotta in una bobina senza usare un generatore. È molto interessante osservare in classe che questo risultato emerge dopo pochissimi minuti dall'inizio dell'attività di problem solving.

RQ11. *Gli studenti individuano le varie situazioni che generano una f.e.m.?*

Se si analizzano le risposte date rispetto alle varie esplorazioni proposte, risulta che tutte le situazioni realizzabili in classe con la strumentazione a disposizione sono state evidenziate dagli studenti stessi.

RQ12. *Gli studenti riconoscono il ruolo della variazione del flusso del campo magnetico nel fenomeno dell'induzione elettromagnetica?*

In questa fase gli studenti non giungono ad un livello formale tale da riconoscere il ruolo del flusso del campo magnetico e soprattutto della sua variazione nel tempo. Tuttavia, passano dall'idea principale secondo cui il moto relativo fra magneti e bobine è indispensabile per indurre una f.e.m. all'interno della bobina a una visione più formale che individua il ruolo centrale delle linee di campo e della velocità di movimento del magnete o della bobina. Ciò permette sia di costruire gradatamente il concetto di linee di campo sia di condurre lo studente progressivamente verso la costruzione del pensiero formale, obiettivo principale di tutta la sperimentazione. Un altro tassello importante che porta al riconoscimento del ruolo del flusso di B è legato alle considerazioni fatte in merito all'inversione del segno della corrente indotta sotto particolari condizioni (se si inverte per esempio la polarità o il moto dei magneti).

RQ13. *Quali sono i modelli interpretativi usati per spiegare il grafico ottenuto sperimentalmente con la macchina di Atwood?* e **RQ15.** *Gli studenti riconoscono il ruolo della variazione del flusso del campo magnetico dopo aver realizzato l'esperimento?*

Il modello principale per spiegare i grafici ottenuti dagli studenti è coerente con le conclusioni fatte alla fine dell'analisi dell'induzione elettromagnetica attraverso la strategia PEC. I discenti attribuiscono la presenza di un picco in corrispondenza dell'ingresso del polo magnetico all'interno della bobina, sostenendo che "si ottiene un picco quando un polo magnetico attraversa la spira, poiché le linee di campo magnetico sono più intense ai poli". Non tutti gli studenti però riescono a prevedere un grafico con un picco positivo ed uno negativo e ciò è coerente con il fatto che solo 1/3 degli studenti ha dedotto che le linee di campo sono chiuse nella situazione analizzata precedentemente.

Dopo la discussione di gruppo aumenta il numero di studenti che afferma come sia necessaria una variazione del numero di linee di campo per indurre

una corrente (33%) e qualcuno lega questo concetto al flusso del campo magnetico, affermando che “la forza elettromotrice dipende dalla rapidità con cui varia il flusso del campo magnetico”.

RQ14. *Gli studenti indentificano tutti i parametri che fanno variare il grafico della f.e.m. indotta?*

Gli studenti riconoscono i parametri che influenzano i grafici della f.e.m. ottenuti, ossia l'altezza di caduta, il contrappeso e la velocità (questa legata a sua volta all'accelerazione totale del sistema) e analizzano in dettaglio come cambiano i grafici nelle varie situazioni proposte. Proprio queste considerazioni spingono gli studenti a riconoscere sia il valore costante dell'area sottesa da una semicurva (sia da quella positiva che da quella negativa) sia che la somma di tali aree è uguale a zero; ciò ha portato a identificare spontaneamente l'area sottesa dalla curva con la variazione totale del flusso del campo magnetico, senza alcuna domanda specifica posta durante l'attività.

Capitolo 6: Conclusioni

La ricerca prodotta in questo periodo di dottorato ha portato dei risultati molto interessanti, sotto vari punti di vista.

In primo luogo dall'analisi della letteratura internazionale sono state individuate sia tutte le problematiche generali relative alla didattica tradizionale e al suo modo di progettare percorsi didattici (analizzate in dettaglio nel capitolo 1), sia tutti i problemi di apprendimento relativi a un nodo concettuale specifico molto importante: cioè la legge di Faraday-Neumann-Lenz. Ciò mi ha spinto ad abbracciare questo campo di ricerca e a dedicare la maggior parte delle energie nell'affrontare le principali difficoltà di apprendimento da parte degli studenti.

Un primo risultato è stato quello di costruire nuovi apparati sperimentali con i quali effettuare esperimenti reali sull'induzione elettromagnetica, utilizzando materiali poveri, semplici da maneggiare e integrabili con le nuove tecnologie quali PC e schede di acquisizione dati per gli esperimenti on-line. Questo ha condotto ad allestire apparati sperimentali con i quali effettuare esperimenti qualitativi e quantitativi molto efficaci, sia da un punto di vista del coinvolgimento degli studenti, sia da un punto di vista di apprendimento. Sul primo elemento di guadagno basti pensare all'entusiasmo con cui gli studenti partecipavano durante la sperimentazione in classe, oppure agli apprezzamenti dei docenti, i quali osservavano come anche gli studenti genericamente più distaccati rispetto allo studio della fisica fossero molto coinvolti in attività di questo genere.

Gli apparati sperimentali sono stati testati attraverso una serie di studi preliminari, i quali hanno messo in luce da un lato la valenza didattica dei dispositivi ideati e dall'altro tutte le difficoltà già evidenziate e studiate in letteratura. Inoltre, tali studi hanno permesso di testare l'efficacia di alcune strategie didattiche da un punto di vista dell'apprendimento: per esempio gli studi effettuati attraverso l'impiego della turbina a vento di Savonius hanno

permesso di testare la validità della *strategia per Artefatti*, dei lavori di gruppo, delle attività di problem solving e infine le indagini PCK per gli insegnanti.

Dopo aver completato questi studi preliminari, è stato possibile strutturare una proposta didattica sperimentale, capace di mettere lo studente nelle migliori condizioni psicologiche di apprendimento e capace di affrontare i nodi concettuali più delicati legati all'induzione elettromagnetica. Tali percorsi, prima nuovamente testati con alcune classi-campione, sono state definitivamente sottoposte ad un numero consistente di studenti per verificarne l'efficacia da un punto di vista pedagogico. I risultati sono stati entusiasmanti, se si prendono come riferimento le principali ricerche internazionali, da un punto di vista dei nodi concettuali. In particolar modo la sperimentazione ha permesso di costruire gradatamente il concetto di linee di campo e loro rappresentazione, di introdurre il concetto di flusso del campo magnetico e avviare gli studenti a comprendere come la sua variazione nel tempo possa produrre una *f.e.m.* all'interno di una bobina. Questi due concetti non sono assolutamente banali da trattare e richiedono un periodo di lavoro piuttosto lungo per una completa comprensione; tuttavia la sperimentazione ha mostrato come sia possibile ottenere risultati dignitosi anche dopo solo dieci ore di lavoro con gli studenti.

La sperimentazione ha permesso inoltre di verificare l'importanza di utilizzo di alcune strategie didattiche. In primo luogo il ciclo PEC ha mostrato tutti i suoi vantaggi, sia in termini di coinvolgimento psicologico che mentale degli studenti; queste abbinate alle attività sperimentali hands-on e alle nuove tecnologie hanno costruito l'ambiente di lavoro ottimale per una partecipazione attiva degli studenti, difficile da raggiungere con la didattica tradizionale. Oppure le attività di problem solving, la cui utilità è ben nota in letteratura. Ma soprattutto la sperimentazione ha permesso di evidenziare la grande importanza dei confronti fra pari, i quali consentono di apportare contributi incredibili sotto tutti i punti di vista (partecipazione, attenzione, contenuti).

Tuttavia, il risultato più interessante che emerge dagli studi preliminari e soprattutto dal percorso sperimentale riguarda il passaggio dalla visione di senso comune al pensiero formale. Questo passaggio è stato parzialmente evidenziato negli studi relativi alla turbina a vento di Savonius e completamente mostrato attraverso la sperimentazione didattica. Si è visto come gli studenti avessero avuto grosse difficoltà nell'interpretare i primi esperimenti del percorso da un punto di vista delle regole generali e globali, per poi giungere nella parte finale al riconoscimento delle cause dell'induzione elettromagnetica (variazione del numero di linee di campo o del flusso del campo magnetico) in termini di grandezze fisiche astratte e certamente non appartenenti alla vita di tutti i giorni, ma coinvolti attraverso relazioni del tutto formali. La sperimentazione consente quindi di costruire quel ponte concettuale fra il mondo comune e quello accademico.

La descrizione appena fatta sull'attività svolta in questi quattro anni di ricerca è indicata in letteratura come il modo standard con cui un ricercatore in didattica della fisica dovrebbe approcciare ai problemi per poter ottenere dei risultati significativi.

È da sottolineare che gli stessi procedimenti sono stati seguiti per utilizzare gli altri dispositivi sperimentali descritti nel terzo capitolo. Per tutti quanti sono stati messi a punto i percorsi didattici in modo analogo a quanto visto per la macchina di Atwood, per alcuni di essi sono stati solo realizzati gli studi preliminari, per altri sono in corso le sperimentazioni didattiche sia con studenti di scuola secondari sia con studenti universitari.

Le attività proposte lasciano in eredità numerosi sviluppi futuri. Oltre a dover completare le sperimentazioni già avviate con studenti delle scuole calabresi o dell'Università della Calabria, sono in corso studi paralleli avviati con alcuni ricercatori a livello europeo per poter confrontare i dati raccolti e i risultati ottenuti. Inoltre, tutti gli studi effettuati sull'induzione elettromagnetica portano spontaneamente gli studenti verso un approccio energetico nell'interpretazione dei fenomeni proposti; ciò suggerisce la possibilità di avviare studi paralleli capaci sia di chiarire i principali nodi concettuali legati alla definizione di energia, alla conservazione e alla trasformazione nelle sue varie forme, sia di rivisitare i fenomeni elettromagnetici in chiave energetica, compito quest'ultimo non semplice ma contemporaneamente molto affascinante.

Appendice A

Physics by Inquiry program

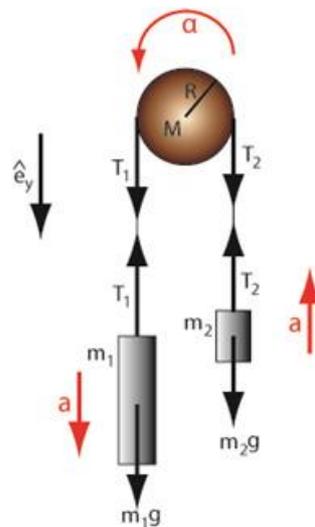
Appendice B

Strategia didattica per artefatti

Appendice C

Trattamento teorico della macchina di Atwood

Il valore sperimentale può essere confrontato con quello teorico. La figura che segue rappresenta una schematizzazione del sistema composto da magnete, carrucola, filo inestensibile e contrappeso.



Applicando la seconda legge di Newton ai corpi di massa m_1 ed m_2 , e la seconda legge cardinale (per la rotazione della carrucola), si ricava il seguente sistema di equazioni (trascurando gli attriti della carrucola, ed imponendo che il filo sia inestensibile):

$$\begin{cases} m_1 g \hat{e}_y - T_1 \hat{e}_y = m_1 a \hat{e}_y \\ m_2 g \hat{e}_y - T_2 \hat{e}_y = -m_2 a \hat{e}_y \\ \vec{R} \times \vec{T}_1 - \vec{R} \times \vec{T}_2 = \frac{d}{dt} (I \vec{\omega}) \end{cases}$$

Con I si intende il momento di inerzia della carrucola, pari $\frac{1}{2} MR^2$. Da questo sistema è possibile ricavare il valore dell'accelerazione teorico:

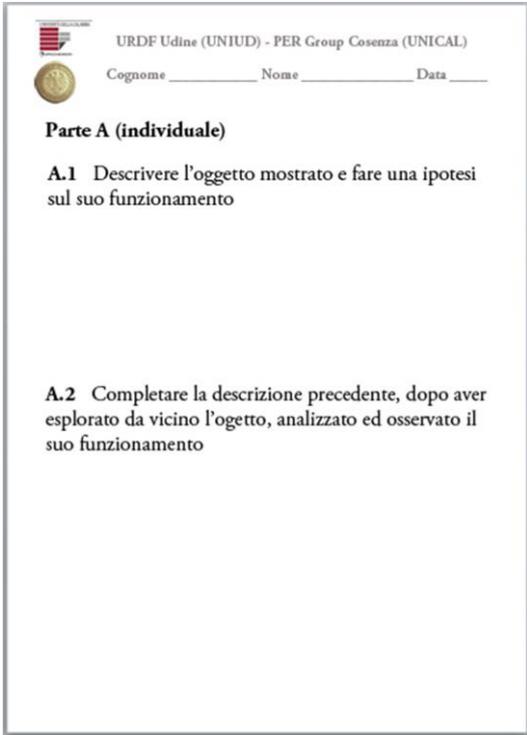
$$a_{th} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2 + M} g = 1,028 \frac{m}{s^2}$$

Nonostante le approssimazioni teoriche (sono stati trascurati gli attriti ed è stato utilizzato il momento di inerzia I di un disco omogeneo ed uniforme), il valore ottenuto sperimentalmente differisce da quello teorico di circa il 15%.

Appendice D

D.1 Scheda di lavoro S1: metodologia per artefatti come PRE-TEST.

Le prime tre domande individuali consentono di analizzare il dispositivo, partendo da ciò che viene percepito a livello visivo ed intuitivo (A.1), fino ad arrivare ad una analisi più dettagliata delle sue parti e del suo funzionamento (A.2) che consenta di scoprire qual è il ruolo di ciascuna parte nel funzionamento complessivo dell'artefatto (A.3).



URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)

Cognome _____ Nome _____ Data _____

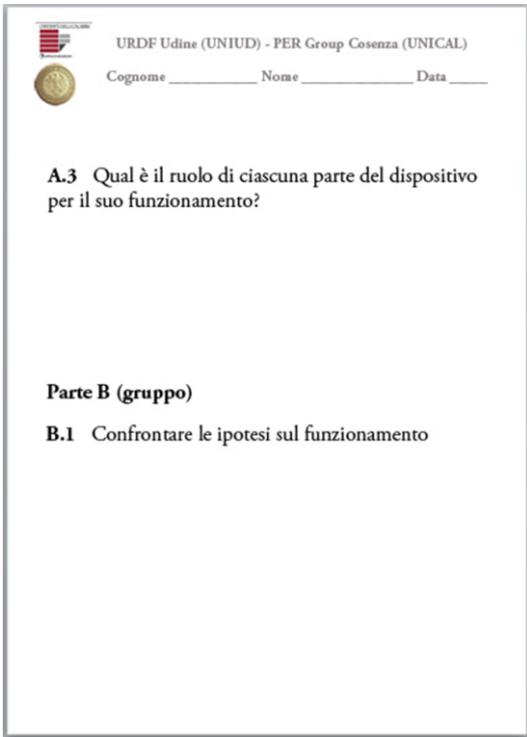
Parte A (individuale)

A.1 Descrivere l'oggetto mostrato e fare una ipotesi sul suo funzionamento

A.2 Completare la descrizione precedente, dopo aver esplorato da vicino l'oggetto, analizzato ed osservato il suo funzionamento

Fig. D1 Le prime tre domande individuali consentono di analizzare il dispositivo. La domanda A.1 serve ad analizzare ciò che viene percepito a livello visivo ed intuitivo, la domanda A.2 è finalizzata all'analisi (hands-on) più dettagliata delle sue parti e del suo funzionamento.

La domanda B.1 chiede di confrontare le ipotesi fatte nei punti A e di riportare le considerazioni personali dopo un confronto fra pari.



URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)

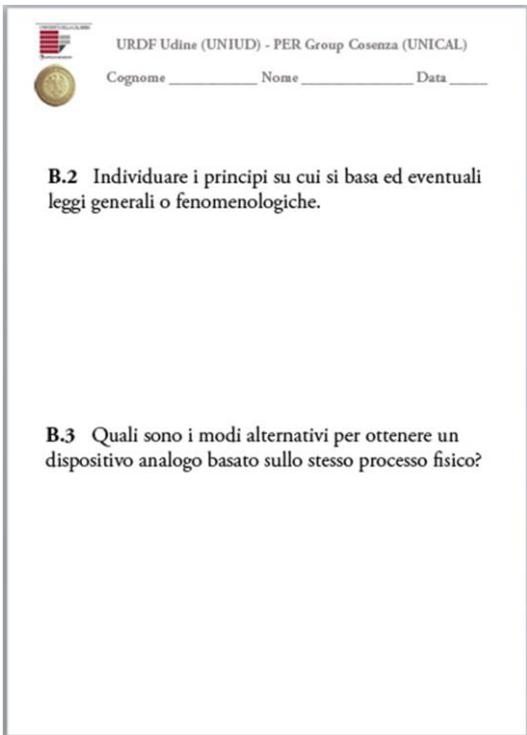
Cognome _____ Nome _____ Data _____

A.3 Qual è il ruolo di ciascuna parte del dispositivo per il suo funzionamento?

Parte B (gruppo)

B.1 Confrontare le ipotesi sul funzionamento

Fig. D2 La domanda A3 consente di scoprire qual è il ruolo di ciascuna parte nel funzionamento complessivo dell'artefatto. La domanda B1 chiede di confrontare le ipotesi fatte nei punti A e di riportare le considerazioni personali dopo un confronto fra pari.



URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)

Cognome _____ Nome _____ Data _____

B.2 Individuare i principi su cui si basa ed eventuali leggi generali o fenomenologiche.

B.3 Quali sono i modi alternativi per ottenere un dispositivo analogo basato sullo stesso processo fisico?

Fig. D3 La domanda B2 spinge gli studenti ad analizzare il dispositivo da un punto di vista fisico, cercando di individuare i principi o le leggi fisiche che stanno alla base. La domanda B3, chiede un modo alternativo per costruire il dispositivo, in modo tale da evidenziare il grado di comprensione da parte degli studenti.



 URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)
 Cognome _____ Nome _____ Data _____

Parte C (gruppo)

C.1 Costruire l'aggetto illustrato.

Parte D (individuale)

D.1 Quali sono le parti più importanti e quali commenti fate rispetto a questa esperienza dal punto di vista didattico?

Fig. D4 Il punto C1 consiste nella costruzione del dispositivo, il punto D1 chiede agli studenti le conclusioni personali sull'esperienza, cercando di mettendo in luce quelli che ritengono essere gli elementi più importanti appresi, soprattutto da un punto di vista didattico

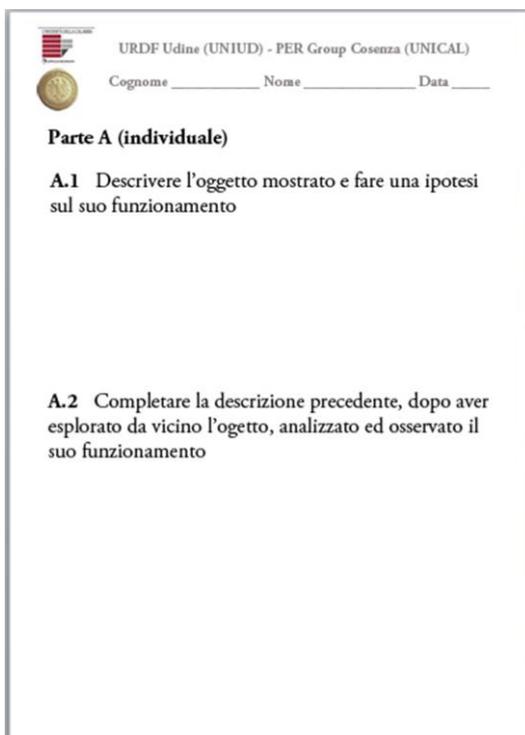
La domanda B.2 spinge gli studenti ad analizzare il dispositivo da un punto di vista fisico, cercando di individuare i principi o le leggi fisiche che stanno alla base. Molto interessante è la domanda B.3, attraverso cui si verifica il grado di comprensione degli studenti. Infatti, nel chiedere un modo alternativo per costruire il dispositivo, si può indagare sul livello di comprensione raggiunto: chi ha compreso riesce a pensare ad un modello alternativo, viceversa per chi non ha intuito le leggi che governano il funzionamento dell'artefatto.

Dopo la costruzione del dispositivo, gli studenti concludono individualmente, mettendo in luce quelli che ritengono essere gli elementi più importanti appresi, soprattutto da un punto di vista didattico.

D.2 Scheda di lavoro S2: metodologia per artefatti come PCK per insegnanti.

Le prime 5 domande sono identiche a quelle descritte nel paragrafo precedente. Ciò che cambia, rispetto alle schede realizzate per gli studenti, è la parte relativa ai nodi concettuali. I docenti devono analizzare gli aspetti salienti di questa esperienza da un punto di vista didattico (D1) ed indicare in che modo utilizzerebbero questa attività in classe (D2). A questo punto gli insegnanti devono strutturare un percorso didattico (D3), specificarne i vari

passi (D4) ed individuare i nodi concettuali coinvolti e loro possibili soluzioni (D5).



URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)

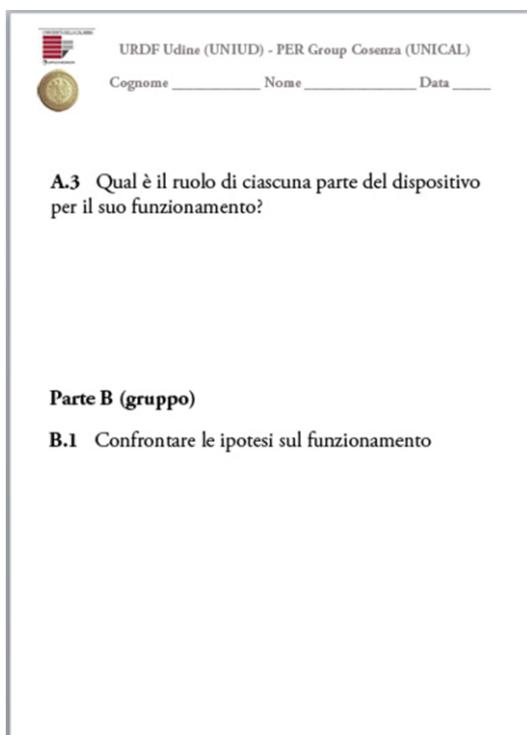
Cognome _____ Nome _____ Data _____

Parte A (individuale)

A.1 Descrivere l'oggetto mostrato e fare una ipotesi sul suo funzionamento

A.2 Completare la descrizione precedente, dopo aver esplorato da vicino l'oggetto, analizzato ed osservato il suo funzionamento

Fig. D1 Le prime tre domande individuali consentono di analizzare il dispositivo. La domanda A.1 serve ad analizzare ciò che viene percepito a livello visivo ed intuitivo, la domanda A.2 è finalizzata all'analisi (hands-on) più dettagliata delle sue parti e del suo funzionamento.



URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)

Cognome _____ Nome _____ Data _____

A.3 Qual è il ruolo di ciascuna parte del dispositivo per il suo funzionamento?

Parte B (gruppo)

B.1 Confrontare le ipotesi sul funzionamento

Fig. D2 La domanda A3 consente di scoprire qual è il ruolo di ciascuna parte nel funzionamento complessivo dell'artefatto. La domanda B1 chiede di confrontare le ipotesi fatte nei punti A e di riportare le considerazioni personali dopo un confronto fra pari.

 URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)
 Cognome _____ Nome _____ Data _____

B.2 Individuare i principi su cui si basa ed eventuali leggi generali o fenomenologiche.

B.3 Precisare il ruolo ed i principi alla base di una delle ipotesi di funzionamento.

Fig. D3 La domanda B2 spinge gli studenti ad analizzare il dispositivo da un punto di vista fisico, cercando di individuare i principi o le leggi fisiche che stanno alla base. La domanda B3, chiede di individuare i principi che stanno alla base di una delle ipotesi di funzionamento.

 URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)
 Cognome _____ Nome _____ Data _____

B.4 Quali sono i modi alternativi per ottenere un dispositivo analogo basato sullo stesso processo fisico?

Parte C (gruppo)
C.1 Costruire l'oggetto illustrato.

Fig. D4 La domanda B4 chiede un modo alternativo per costruire il dispositivo, in modo tale da evidenziare il grado di comprensione da parte dei docenti

 URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)
 Cognome _____ Nome _____ Data _____

Parte D (individuale)

D.1 Quali sono le parti più importanti e quali commenti fate rispetto a questa esperienza dal punto di vista didattico?

D.2 Con quali obiettivi lo inseriresti in una classe (obiettivi culturali/conoscitivi ed obiettivi educativi).

Fig. D5 La domanda D1 chiede di evidenziare le parti salienti dell'esperienza effettuata. La domanda D2 indaga sugli aspetti pedagogici attribuiti all'esperienza dai docenti coinvolti.

 URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)
 Cognome _____ Nome _____ Data _____

D.3 In quale percorso lo inseriresti?

D.4 Quali sono i passi del percorso?

Fig. D6 Le domande D3 e D4 chiedono come dovrebbe essere strutturato un percorso didattico finalizzato all'utilizzo di un simile artefatto.

Quali sono i nodi concettuali coinvolti in questa attività?

A) Nodi	B) Come li affronteresti con i ragazzi in classe
N1 _____	N1 _____
_____	_____
N2 _____	N2 _____
_____	_____
N3 _____	N3 _____
_____	_____
N4 _____	N4 _____
_____	_____
N5 _____	N5 _____
_____	_____
_____	_____

Si utilizzi il retro del foglio per argomentare le scelte.

URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)

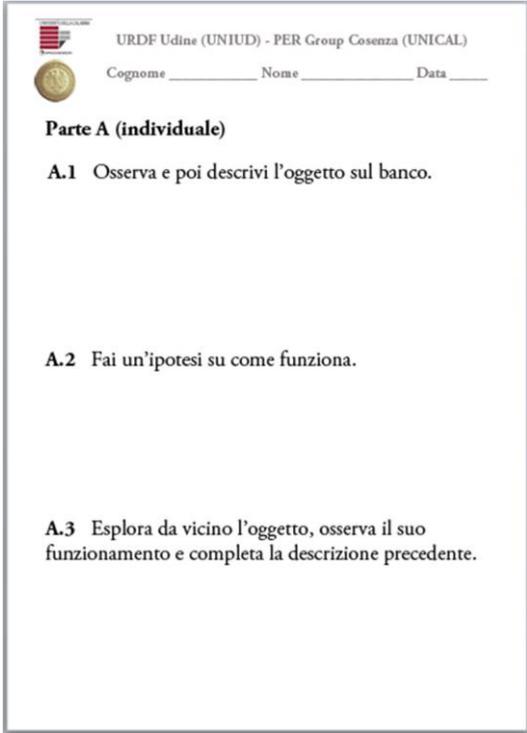
Cognome _____ Nome _____ Data _____

Fig. D7 La domanda analizza i nodi concettuali coinvolti nella sperimentazione proposta e la soluzione pensata per affrontare tali nodi concettuali.

D.3 Scheda di lavoro S3: metodologia per artefatti come attività di verifica sull'induzione elettromagnetica nel percorso energetico.

Le schede presentate nel paragrafo D.1 possono essere utilizzate sia come test di verifica sia come test introduttivo.

Tuttavia, è necessario riadattare le schede di lavoro se si vuole proporre l'attività a studenti di scuola primaria o secondaria inferiore, mantenendo la stessa cronologia di lavoro del punto D.1 e semplificando il lessico usato per esporre i vari punti. È conveniente escludere alcuni punti della scheda S1, quali il punto B.2 relativo ai principi o leggi fisiche, il punto C.1 relativo alla costruzione del dispositivo (se pur semplice risulta poco appropriato a ragazzi di questa età) e infine, il punto D.1 sostituito con una fase di conclusioni inserita nella parte di gruppo B (ossia il punto B.3).



URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)

Cognome _____ Nome _____ Data _____

Parte A (individuale)

A.1 Osserva e poi descrivi l'oggetto sul banco.

A.2 Fai un'ipotesi su come funziona.

A.3 Esplora da vicino l'oggetto, osserva il suo funzionamento e completa la descrizione precedente.

Fig. D1 Le prime tre domande individuali consentono di analizzare il dispositivo. La domanda A.1 serve ad analizzare ciò che viene percepito a livello visivo ed intuitivo, la domanda A.2 è finalizzata al suo funzionamento. La domanda A.3 chiede di completare la descrizione del dispositivo dopo l'analisi hands-on.


 URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)


 Cognome _____ Nome _____ Data _____

Parte A (individuale)

A.4 Che cosa è? A cosa serve?

A.5 Individua le parti dell'oggetto che hai esplorato. Scrivile o disegna sul foglio.

A.6 Cerca di descrivere ciascuna parte che hai individuato.

Fig. D3 La domanda A.4 spinge i ragazzi a esplicitare le loro idee relative all'utilità del dispositivo (successive all'analisi hands-on). La domanda A.5 chiede di individuare ciascuna parte del dispositivo in modo dettagliato (dopo l'analisi hands-on), aiutandosi eventualmente anche con un disegno. La domanda A.6 è finalizzata a descrivere ciascuna parte individuata.


 URDF Udine (UNIUD) - PER Group Cosenza (UNICAL)


 Cognome _____ Nome _____ Data _____

Parte B (gruppo)

B.1 Confronta con i compagni del tuo gruppo le ipotesi che hai scritto sul funzionamento dell'oggetto.

B.2 Confronta con i compagni del tuo gruppo le descrizioni delle parti dell'oggetto che hai individuato.

B.3 Dopo aver ascoltato le ipotesi dei compagni del tuo gruppo, concorda una descrizione sul funzionamento dell'oggetto.

Fig. D4 I punti B.1 e B.2 chiedono di confrontare rispettivamente le ipotesi fatte individualmente sul funzionamento del dispositivo e le descrizioni delle singole parti precedentemente illustrate. La domanda B.3 invita ciascun gruppo a concordare una descrizione dell'oggetto.

Bibliografia

- AAPT. (1997). Goals of the Introductory Physics Laboratory. *The Phy. Teach.*, 35(9), 546.
- AAPT. (1998). Goals of the Introductory Physics Laboratory. *Am. J. Phys.*, 66(6), 483-485.
- Anderson, D., Lucas, K. B., & Ginns, I. S. (2003). Theoretical Perspectives on Learning in an Informal Setting. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(2), 177-199.
- Arons, A. (1983). Achieving Wider Scientific Literacy. *Daedalus*, 112(2), 91.
- Arons, A. B. (1993). Guiding insight and inquiry in the introductory physics laboratory. *The Physics Teacher*, 31(5), 278.
- Bagno, E., & Eylon, S. (1997). Form problem solving to a knowledge structure: An example from the domain of electromagnetism. *Am. J. Phys.*, 65(8), 726-736.
- Bonanno, A., Bozzo, G., Camarca, C., & Sapia, P. (2011). Using a PC and external media to quantitatively investigate electromagnetic induction. *Phys. Educ.*, 46(4), 385-394.
- Bonanno, A., Bozzo, G., Camarca, M., & Sapia, P. (2009). An on line experiment on electromagnetic. *Multimedia in Physics Teaching and Learning Int. Conf., MPTL 14*. Udine: www.fisica.uniud.it/URDF/mptl14/contents.htm.
- Bonanno, A., Bozzo, G., Camarca, M., & Sapia, P. (2009b). Weighting magnetic interactions. *Phys. Educ.*, 44(6), 570-572.
- Bonanno, A., Bozzo, G., Camarca, M., & Sapia, P. (2010b). Magnetic interactions: A multimedia interactive tutorial. *Il Nuovo Cimento*, 33(3), 131-136.
- Bonanno, A., Bozzo, G., Camarca, M., & Sapia, P. (2011). Foucault dissipation in a rolling cylinder: a webcam quantitative study. *Eur. J. Phys.*, 32, 419-429.
- Bonanno, A., Bozzo, G., Camarca, M., Fasano, M., Sapia, P., & Simone, B. (2010). An experimental learning path to introduce clean energy in the primary school. *GIREP-ICPE-MPTL Conference 2010*. Reims.
- Bonanno, A., Bozzo, G., Camarca, M., Oliva, A., & Sapia, P. (2009a). Four physics jars. *Il Nuovo Cimento*, 31 C(4), 601-615.

- Borges, A. T., & Gilbert, J. K. (1998). Models of magnetism. *Int. J. Sci. Educ.*, 20(3), 361-378.
- Borges, A. T., & Gilbert, J. K. (1998). Models of magnetism. *Int. J. Sci. Educ.*, 20(3), 361-378.
- Bosio, S., Capocchiani, V., Michelini, M., & Santi, L. (1996). Computer on-line to explore thermal properties of matter. In M. Michelini, S. Pugliese, & D. Cobai (Ed.), *GIREP - Icpe 1995: Teaching the Science of Condensed Matter and New Materials* (p. 351). Udine: Forum.
- Bosio, S., Michelini, M., Pugliese, S., Sartori, C., & Stefanel, A. (1999). A research on conceptual change processes in the context of an informal educational exhibit. In M. Bandiera, S. Caravita, E. Torracca, & M. Vicentini, *Research in science education in Europe*. Kluwer Academic Publishers.
- Bosio, S., Michelini, M., Schiavone, T., & Vogric, F. (1999). *Problem solving per l'orientamento in ambito disciplinare: metodica, esempi, formazione degli insegnanti*. Udine: Forum.
- Bozzo, G., Michelini, M., & Viola, R. (2010). Students and perspective teachers interpreting simple situation of induction phenomena. In L. M. Santoro (Ed.), *New Trends in Science and Technology Education - selected papers. 1*, pp. 354-363. Bologna: CLUEB.
- Brilliantov, N. V., & Poschel, T. (1998). Rolling friction of a viscous sphere on a hard plane. *Europhys. Lett.*, 42, 511-516.
- Brook, A. J., & Wells, P. (1988). Conserving the Circus? An Alternative Approach to Teaching and Learning about Energy. *Phys. Edu.*, 23(2), 80-85.
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *Am. J. Phys.*, 50(1), 66-71.
- Committee of National Research Council on Undergraduate Science Education. (1997). *Science Teaching Reconsidered: A Handbook*. Washington: National Academy Press.
- Corni, F., Michelini, M., & Stefanel, A. (2003). Strategies in formative intervention modules for physics education of primary schools teachers: a coordinated research in Reggio Emilia and Udine. In M. Michelini (Ed.), *Quality Development in the Teacher Education and Training - Girep book of selected papers*. Udine: Forum.

- Doménech, A., Doménech, T., & Cebrià, J. (1987). Introduction to the study of rolling friction. *Am. J. Phys.*, *55*, 231-235.
- Duit, R. (2006). Science Education Research - An Indispensable Prerequisite for Improving Instructional Practice. *ESERA Summer School*. Braga.
- Duit, R., Komorek, M., & Wilbers, J. (1997). Studies on educational reconstruction of chaos theory. *Research in Science Education*, *27*(3), 339-357.
- Edwards, D., & Mercer, N. (1987). *Common Knowledge - The development of understanding in classroom*. London: Methuen & Co.
- Galili, I., & Kaplan, D. (1997). Changing approach to teaching electromagnetism in a conceptually oriented introductory physics course. *Am. J. Phys.*, *65*(7), 657-667.
- Galili, I., Kaplan, D., & Lehavi, Y. (2006). Teaching Faraday's law of electromagnetic induction in an introductory physics course. *Am. J. Phys.*, *74*(4), 337-343.
- Gervasio, M., Michelini, M., & Viola, R. (2008). Sensors as extension of senses via USB: three case studies on thermal, optical and electrical phenomena. *Konferencja Laboratoria Fizyczne Sterowane Komputerowo*. Toruń: http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/komputery/pliki/Articolo_Torun_v2.pdf.
- Goffredo, M., Albanese, M., Infante, D., & Bozzo, G. (2009). Teaching Physics in a CLIL/Blended Learning Environment at Primary School. *MPTL14 Conference 2009*. Udine.
- Goldberg, F. M., & McDermott, L. (1987). An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or converging mirror. *Am. J. Phys.*, *55*(2), 108-119.
- Grayson, D. J., & McDermott, L. (1996). Use of the computer for research on student thinking in physics. *Am. J. Phys.*, *64*(5), 557-565.
- Guisasola, J., Almudi, J. M., & Ceberio, M. (1999). Students' ideas about the source of magnetic field. *ESERA*, (pp. 89-91). Kiel - Germany.
- Guisasola, J., Almudi, J. M., & Zubimendi, J. L. (2004). Difficulties in Learning the Introductory Magnetic Field Theory in the First Years of University. *Sci. Educ.*, *88*(3), 443-464.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985). The initial knowledge state of college physics students. *Am. J. Phys.*, *53*(11), 1043-1055.

- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985b). Common sense concepts about motion. *Am. J. Phys.*, 53(11), 1056-1065.
- Heron, P., Michelini, M., & Stefanel, A. (2008). Teaching and learning the concept of energy in primary school. *GIREP 2008 - Physics Curriculum Design, Development and Validation*. Cyprus.
- Hewson, P. W., & Hewson, M. G. (1984). The role of conceptual conflict in conceptual change and the design of science instruction. *Instructional Science*, 13, 1-13.
- Hofstein, A., & Rosenfeld, S. (1996). Bridging the Gap Between Formal and Informal Science Learning. *Studies in Science Education*, 28, 87-112.
- Jones, C. (2003). Understanding and using the minus sign in Faraday's law. *Phy. Edu.*, 38(6), 525-530.
- Kaper, W. H., & Goedhart, M. J. (2002). 'Forms of energy', an intermediary language on the road to thermodynamics? *Int. J. Sci. Educ.*, 24(2), 119-137.
- Kaper, W. H., & Goedhart, M. J. (2002). 'Forms of energy', an intermediary language on the road to thermodynamics? Part I. *Int. J. Sci. Educ.*, 24(1), 81-95.
- Keys, W. (1987). *Aspects of science education in English schools*. NFER-Nelson Pub. Co.
- Kohlmyer, M. A., Caballero, M. D., Catrambone, R., Chabay, R. W., Ding, L., Haugan, M. P., et al. (2009). Tale of two curricula: The performance of 2000 students in introductory electromagnetism. *Phys. rev. ST Phys. Educ. Res.*, 5, 020105-1 - 020105-10.
- Landau, L. D., Lifshitz, E. M., & Pitaevskii, E. M. (1993). *Electrodynamics of Continuous Media* (2nd Edition ed.). Oxford: Elsevier.
- Lanzara, E., & Zangara, R. (1995). Potential difference measurements in the presence of a varying magnetic field. *Phys. Edu.*, 30(2), 85-89.
- Lasry, N., Mazur, E., & Watkins, J. (2008). Peer instruction: From Harvard to the two-year college. *Am. J. Phys.*, 76(11), 1066-1069.
- Lawson, A. E., Abraham, M. R., & Renner, J. W. (1989). *A Theory of Instruction: Using the Learning Cycle to Teach Science Concepts and Thinking Skills*. Monograph Number One. NASRT.
- Maloney, D. P. (1985). Charged poles. *Phys. Educ.*, 20, 310-316.

- Maloney, D. P., O'Kuma, T., Hieggelke, C., & Van Heuvelen, A. (2001). Surveying students' conceptual knowledge of electricity and magnetism. *Am. J. Phys., Suppl.* 69(7), S12-S23.
- Mason, L. (1996). An Analysis of Children's Construction of New Knowledge through Their Use of Reasoning and Arguing in Classroom Discussions. *International journal of qualitative studies in education*, 9, 411-433.
- Mazur, E. (1996). *Education*. Retrieved from Mazur Group: <http://mazur.harvard.edu/research/detailspage.php?ed=1&rowid=8>
- Mazur, E. (1997). *Peer Instruction: a user's manual*. Upper Saddle River, New Jersey (USA): Prentice Hall, Inc.
- McDermott, L. C. (1976). Teacher education and the implementation of elementary science curricula. *Am. J. Phys.*, 44(5), 434-441.
- McDermott, L. C. (1990). A perspective on teacher preparation in physics and other sciences: The need for special science courses for the teachers. *Am. J. Phys.*, 58(8), 734-742.
- McDermott, L. C. (1990). Research and computer-based instruction: Opportunity for interaction. *Am. J. Phys.*, 58(5), 452-462.
- McDermott, L. C. (1991). Millikan lecture 1990: What we teach and what is learned - closing the gap. *Am. J. Phys.*, 59(4), pp. 301-315.
- McDermott, L. C. (1993). How we teach and how students learn - A mismatch? *Am. J. Phys.*, 61(4), 295-298.
- McDermott, L. C., & Shaffer, S. (1992). Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. *Am. J. Phys.*, 60(11), 994-1003.
- McDermott, L. C., Rosenquist, M. L., & van Zee, E. H. (1983). Strategies to improve the performance of minority students in the sciences. *New Directions for Teaching and Learning*, 1983(16), 59-72.
- McDermott, L. C., Shaffer, P. S., & Rosenquist, M. L. (1996). *Physics by inquiry*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- McDermott, L. C., Shaffer, P. S., & Somers, M. D. (1994). Research as guide for teaching introductory mechanics: An illustration in the context of the Atwood's machine. *Am. J. Phys.*, 62(1), 46-55.

- Merrill, M. D. (1992). Constructivism and instructional design. In T. M. Duffy, & D. H. Jonassen, *Constructivism and technology of instruction*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Michelini, M. (1992). L'elaboratore nel laboratorio didattico di fisica: nuove opportunità per l'apprendimento. *Giornale di Fisica*, 23(4), 269.
- Michelini, M. (2007). Educazione scientifica ed approcci di ricerca in didattica della fisica. La fisica nel processo formativo. *Seminario di studi "Cultura Scientifica e Ricerca Didattica"*. Reggio Emilia: Unità di Ricerca in Didattica della Fisica.
- Michelini, M., & Cobal, M. (2002). *Developing Formal Thinking in Physics*. Rome: Forum.
- Michelini, M., & Stefanel, A. (2006). Informal training of primary school teachers on magnetic phenomena. In G. Planinsic, & A. Mohoric (Ed.), *Informal Learning and Public Understanding of Physics*, (pp. 392-398). Lubiana.
- Michelini, M., & Viola, R. (2008). A proposal for a curricular path about electromagnetic induction. *Proceedings of GIREP 2008 International Conference, to be published*.
- Michelini, M., & Viola, R. (2008). *Conceptual knots, learning questions and curricular path in MOSEM Project teacher seminars*. Retrieved from Research Unit in physics education of Udine:
http://www.fisica.uniud.it/mosem/PDF/WS_Mosem_Girep_08.pdf
- Millar, R. (2005). *Teaching about Energy - Research paper 2005/11*. York City: The University of York - Department of Educational Studies.
- Morris, C. (1990). Importing 'hands-on' science into schools: the Light Works van programme. *Phys. Educ.*, 25, 263-266.
- Novak, J. D. (2002). Meaningful learning: The Essential Factor for Conceptual Change in Limited or Inappropriate Propositional Hierarchies Leading to Empowerment of Learners. *Sci. Edu.*, 86(4), 548-571.
- Peters, P. C. (1984). The role of induced emf's in simple circuits. *Am. J. Phys.*, 52(3), 208-211.
- Pope, M., & Gilbert, J. (1983). Personal experience and the construction of knowledge in science. *Sci. Edu.*, 67(2), 193-204.
- Psillos, D., Niedderer, H., & Vicentini, M. (1999). Case Studies on Innovative Types of Labwork in Science Education. In M. Bandiera, S. Caravita, E. Torracca, & M.

- Vicentini, *Research in Science Education in Europe* (p. 201). Kluwer Academic Publishers.
- Purcell, E. M. (1994). *La Fisica di Berkeley - Elettività e Magnetismo (parte seconda)*. Bologna: Zanichelli.
- Pushkin, D. B. (1997). Where Do Ideas for Students Come From? *Journal of College Science Teaching*, 26(4), 238-242.
- Redish, E. F. (1993). *Physics Department*. Retrieved from University of Maryland: <http://www.physics.umd.edu/perg/papers/redish/resnick.html>
- Reif, F. (1995). Millikan Lecture 1994: Understanding and teaching important scientific thought processes. *Am. J. Phys.*, 63(1), 17-32.
- Reinson, S., Transtromer, G., & Viennot, L. (1994). Students' understanding of superposition of electric fields. *Am. J. Phys.*, 62(11), 1026-1032.
- Sokoloff, D. R., Laws, P. W., & Thornton, K. R. (2007). RealTime Physics: active learning labs transforming the introductory laboratory. *Eur. J. Phys.*, 28, S83-S94.
- Stefanel, A. (2008). Disciplinary knots and learning problems in electromagnetism . In B. G. Sidharth, F. Honsell, O. Mansutti, K. R. Sreenivasan, & A. De Angelis, *Frontiers of Fundamental and Computational Physics - 9th International Symposium Udine and Trieste, Italy, 7-9 January 2008* (pp. 231-235). New York: Springer.
- Thong, W. M., & Gunstone, R. (2008). Some Student Conceptions of Electromagnetic Induction. *Res. Sci. Educ.*, 38(1), 31-44.
- Thornton, R. K. (1987). Tools for scientific thinking - microcomputer-based laboratories for physics teaching. *Phys. Educ.*, 22, 230-238.
- Thornton, R. K., & Sokoloff, D. R. (1990). Learning motion concepts using real-time microcomputer based laboratory tools. *Am. J. Phys.*, 58(8), 858-870.
- Thornton, R. K., & Sokoloff, D. R. (1998). Assessing student learning of Newton's laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the Evaluation of Active Learning Laboratory and Lecture Curricula. *Am. J. Phys.*, 66(4), 338-352.
- Tornkvist, S., Pettersson, K. A., & Transtromer, G. (1993). Confusion by representation: On Student's comprehension of the electric field concept. *Am. J. Phys.*, 61(4), 335-338.

- Trumper, R. (1996). Teaching about energy through a spiral curriculum: guiding principles. *Journal of Curriculum and Supervision*, 12(1), 66-75.
- Trumper, R. (2003). The Physics Laboratory - A Historical Overview and Future Perspectives. *Science & Education*, 12, 645-670.
- Viennot, L. (1985). Analyzing students' reasoning: Tendencies in interpretation. *Am. J. Phys.*, 53(5), 432-436.
- Viennot, L. (2001). *Reasoning in Physics. The part of Common Sense*. Kluwer Academic Publishers.
- Viennot, L. (2003). *Teaching Physics*. Kluwer Academic Publishers.
- Vosniadou, S. (2001). *How Children learn* (Vol. Educational practicesseries 7). International Academy of Education (IAE) and International Bureau of Education (UNESCO).
- Vosniadou, S. (2008). *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York: Taylor & Francis.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in Society - The Development of Higher Psychological Processes*. Cambridge: President and Fellows of Harvard College.
- Watts, M. (1991). *The science of problem solving: a practical guide for science teachers*. London: Cassell education.
- Welch, W. W., Harris, L., & Anderson, R. (1984). How many are enrolled in science? *Sci. Teach.*, 51(9), 14-19.
- Wellington, J. (1990). Formal and informal learning in science: the role of the interactive science centres. *Phys. Educ.*, 25, 247-252.
- Woolnough, B. E. (1979). The role of laboratory in physics education. *Phys. Educ.*, 14, 70-74.