

DOTTORATO DI RICERCA
in
Storia e Didattica delle Matematiche, della Fisica,
e della Chimica

Ciclo XX, 2005/2006

Consorzio tra Università Bologna, Università Catania, Università di Bratislava (Slovacchia),
Università Nitra (Slovacchia), Università di Napoli "Federico II", Università di Alicante (Spagna),
Università di Pavia, Università di Palermo, CIRE (Centro Interdipartimentale Ricerche Educative,
Università di Palermo)

SEDE AMMINISTRATIVA: UNIVERSITÀ DI PALERMO

Angelo Bonura

**“Modelli della conduzione elettrica e connessioni
tra livelli di descrizione: aspetti metodologici e
dinamiche d’apprendimento”**

Tutor Dott. Claudio Fazio

TESI DI DOTTORATO DI RICERCA

Palermo, 2008

Indice

Capitolo 1. Introduzione

1.1 Motivazioni, finalità e obiettivi della ricerca.....	1
1.2 Panoramica sui metodi e criteri di ricerca adottati	2
1.3 Panoramica sull'impianto progettuale e fasi di sviluppo della ricerca	5
1.4 Formulazione delle domande di ricerca	6
1.5 Per orientarsi	7

Capitolo 2. Fissiamo le regole del gioco: il sistema di riferimento teorico, metodologico e progettuale

2.1 Scelte epistemologiche.....	12
2.1.1 Le dimensioni del costruttivismo	13
2.1.2 Quale costruttivismo? Prospettiva epistemologica adottata in questa tesi	14
2.2 L'apprendimento secondo Piaget e Vygotsky ed elementi rilevanti per la ricerca	17
2.2.1 Piaget e la prospettiva psico - cognitiva.....	17
2.2.2 Il costruttivismo sociale di Vygotsky	18
2.2.3 In che modo le due prospettive contribuiscono alla ricerca	19
2.3 Individuazione della prospettiva pedagogica	21
2.3.1 Concezioni alternative e ostacoli d'apprendimento.....	21
2.3.2 Conflitto cognitivo e strategie pedagogiche	23
2.3.3 Aspetti generali dell'approccio pedagogico utilizzato in questa ricerca	25
2.3.4 Risorse cognitive elementari e classi di coordinazione come strumenti d'analisi	27
2.4 Modelli mentali, modelli scientifici e modelling	30
2.4.1 Modelli mentali	30
2.4.2 Caratteristiche strutturali e funzionali dei modelli mentali	31
2.4.3 Modelli scientifici	32
2.4.4 Approccio al modelling utilizzato in questa ricerca	34
2.4.5 Precisazione dell'approccio pedagogico e dei criteri d'analisi alla luce delle ricerche sui modelli.....	36
2.4.6 Strumenti didattici per il modelling	38
2.5 Metodologia di ricerca	39

2.5.1 La ricerca basata su progetti	40
2.5.2 Le teaching/learning sequences.....	42
2.5.3 Requisiti di progetto e definizione della metodologia di ricerca	44
2.5.4 Fasi della ricerca e dimensioni operative	47
2.5.5 Criteri di flessibilità e focalizzazione sul prodotto didattico	48
2.5.6 Esiti dipendenti dal contesto ed esiti generalizzabili	51
2.5.7 Definizione di un glossario minimo	52
2.6 La dimensione progettuale	54
2.6.1 Educational reconstruction	54
2.6.2 Ingegneria didattica	55
2.6.3 Definizione del metodo di progettazione e fasi progettuali.....	57
2.7 La dimensione della verifica	60
2.7.1 Struttura del sistema di controllo e fasi della verifica	62
2.7.2 Un duplice criterio di classificazione fenomenografica.....	65
2.7.3 Strumenti d'analisi e statistica implicativa	67

Capitolo 3. La dimensione progettuale: progettazione dell'ambiente didattico e adattamento educativo

3.1 Analisi storico – epistemologica e studi precedenti	71
3.1.1 Origini e sviluppo della teoria elettronica.....	72
3.1.2 Considerazioni epistemologiche e conseguenze didattiche.....	82
3.1.3 Studi educativi precedenti riguardanti i modelli microscopici dei solidi e i fenomeni di conduzione elettrica	84
3.1.4 Problemi aperti e prospettive di ricerca	90
3.2 Ipotesi pedagogiche, scelte didattiche e strategie educative	91
3.2.1 Significatività educativa e ipotesi pedagogiche	92
3.2.2 Scopi educativi e contenuti disciplinari.....	93
3.2.3 Nodi didattici e potenziali difficoltà d'apprendimento.....	95
3.2.4 Strategie pedagogiche e ciclo didattico.....	96
3.3 Analisi fenomenologica	100
3.3.1 Osservazioni qualitative.....	101
3.3.2 Andamento della resistività di conduttori e semiconduttori con la temperatura.....	102
3.4 Approcci microscopici e strumenti per il computer modelling	108
3.4.1 Un ambiente virtuale per la conduzione nei metalli.....	109
3.4.2 Approfondimenti teorici sulla teoria a bande dei solidi	119
3.4.3 Approcci didattici per la teoria a bande	124
3.4.4 Generatore di bande: uno strumento didattico per la teoria a bande.....	133
3.5 Dall'elettrostatica all'elettrodinamica mediante un'analogia gravitazionale	141

Capitolo 4. Esperimento pilota: contesto sperimentale, fasi d'indagine, implementazione dell'ambiente didattico

4.1 Il contesto sperimentale e gli obiettivi dell'indagine	145
4.1.1 Caratterizzazione del contesto sperimentale	145
4.1.2 Obiettivi della sperimentazione e domande di ricerca	148
4.2 Fasi della sperimentazione e rationale della ricerca	150
4.2.1 Fase 1: indagini d'ingresso.....	151
4.2.2 Fase 2: calibrazione del progetto didattico.....	153
4.2.3 Fase 3: realizzazione degli interventi.	155
4.2.4 Fase 4: indagini d'uscita.....	156
4.2.5 Fase 5: analisi e valutazione.....	156
4.3 Caratteristiche e struttura del percorso formativo.....	158
4.3.1 Motivazioni didattiche e obiettivi pedagogici	158
4.3.2 Percorso concettuale e articolazione in sequenze dell'iter formativo	160
4.3.3 Le sequenze nel dettaglio	163

Capitolo 5. Esperimento pilota: metodologie d'analisi ed esiti dell'indagine

5.1 Analisi d'ingresso: metodi, strumenti, esiti	178
5.1.1 Variabili cognitive e strumenti d'indagine	179
5.1.2 Criteri d'analisi e classificazione delle conoscenze	180
5.1.3 Conoscenze di base.....	181
5.1.4 Caratteristiche strutturali e funzionali dei modelli spontanei	183
5.1.5 Correlazioni tra conoscenze di base, struttura e funzionalità dei modelli individuali.....	191
5.1.6 Correlazioni tra competenze interpretative e livelli di descrizione dei fenomeni	194
5.1.7 Modelli mentali, modelli microscopici e aspetti critici delle conoscenze spontanee.....	197
5.1.8 Sintesi dei risultati e ulteriori commenti.....	200
5.2 Monitoraggio in itinere e profili d'apprendimento.....	202
5.2.1 Evoluzione dei modelli microscopici.....	202
5.2.2 Analisi di casi particolari in termini di reti semantiche e classi di coordinazione	208
5.2.3 Competenze d'interpretazione quantitativa.....	216
5.2.4 Valutazione degli esiti delle sequenze 2 e 3	217
5.2.5 Esiti delle sequenze 4 e 5	221
5.3 Indagini d'uscita	225
5.3.1 Analisi delle variabili cognitive in uscita e confronto ingresso-uscita	226
5.3.2 Analisi di fenomeni elettrici transitori.....	231
5.3.3 Il punto di vista dei discenti sull'esperienza formativa	235

5.4 Sintesi dei risultati e valutazione finale	236
5.4.1 Risposta alla prima domanda di ricerca	237
5.4.2 Risposta alla seconda domanda di ricerca.....	238
5.4.3 Risposta alla terza domanda di ricerca	239
5.4.4 Risposta alla quarta domanda di ricerca	239
5.4.5 Valutazione della correttezza del presupposto pedagogico fondamentale e ulteriori osservazioni	244

Capitolo 6. Revisione del progetto didattico e seconda fase di verifica

6.1 Contesto sperimentale, obiettivi dell'indagine e revisione del progetto didattico.....	247
6.1.1 Caratterizzazione del contesto sperimentale	248
6.1.2 Obiettivi della sperimentazione e domande di ricerca.....	249
6.1.3 Il percorso didattico	250
6.2 Situazione d'ingresso e confronto con gli esiti dell'esperimento pilota	252
6.2.1 Conoscenze di base e modelli spontanei della conduzione elettrica	252
6.2.2 Correlazioni tra conoscenze di base, struttura e funzionalità dei modelli individuali.....	255
6.2.3 Competenze interpretative, livelli di descrizione dei fenomeni e aspetti critici delle conoscenze	257
6.3 La situazione d'uscita e confronto con gli esiti dell'esperimento pilota	260
6.3.1 Modelli microscopici evidenziati in uscita e confronto ingresso/uscita.....	260
6.3.2 Confronto con gli esiti dell'indagine pilota	262
6.3.3 Esiti relativi all'analisi dei fenomeni transitori	266
6.4 Alcuni elementi emersi dalle indagini in itinere.....	267
6.4.1 Sequenza 1: analogia gravitazionale della conduzione elettrica.....	267
6.4.2 Esiti del segmento didattico costituito dalle sequenze 1 e 2	269
6.5 Sintesi dei risultati e valutazione	271
6.5.1 Risposta alla prima domanda di ricerca	271
6.5.2 Risposta alla seconda domanda di ricerca.....	275
6.5.3 Risposta alla terza domanda di ricerca	276

Capitolo 7. Considerazioni conclusive

7.1 Visione d'insieme	279
7.2 Sintesi dei risultati e risposta alle domande di ricerca	286
7.2.1 Elementi emersi in relazione alla prima domanda di ricerca.....	286

7.2.2 Elementi emersi in relazione alla seconda domanda di ricerca	293
7.2.3 Elementi emersi in relazione alla terza domanda di ricerca.....	294
7.2.4 Elementi emersi in relazione alla quarta domanda di ricerca	295

Bibliografia	297
---------------------------	------------

Ringraziamenti	309
-----------------------------	------------

APPENDICI.....	310
-----------------------	------------

APPENDICE P1	311
--------------------	-----

APPENDICE P2	313
--------------------	-----

APPENDICE P3	317
--------------------	-----

APPENDICE A1	318
--------------------	-----

APPENDICE A2.....	323
-------------------	-----

APPENDICE M1.....	325
-------------------	-----

APPENDICE MQ1	333
---------------------	-----

APPENDICE MQ2.....	338
--------------------	-----

Capitolo 1. Introduzione

1.1 Motivazioni, finalità e obiettivi della ricerca

Le modalità con le quali gli studenti costruiscono, modificano e utilizzano modelli a scala microscopica per interpretare i fenomeni naturali non sono state oggetto di studio estensivo sia in didattica della fisica che, più in generale, nella ricerca in didattica scientifica. Analoghe carenze si riscontrano in letteratura in relazione alla definizione di strategie, strumenti, materiali didattici, di percorsi e indicazioni curriculari che possano supportare la costruzione e lo sviluppo di appropriate conoscenze in tale ambito.

Il progetto di ricerca discusso in questa tesi si propone di colmare, almeno in parte, tale carenza di studi, focalizzando l'attenzione sul problema della connessione tra i modelli microscopici dei solidi e le proprietà elettriche della materia, con l'obiettivo generale di formulare e validare un progetto didattico che sia concretamente spendibile in contesti classe naturalistici e variabili. Per contesti naturalistici si intende contesti le cui caratteristiche d'ambientazione e gruppi di allievi coinvolti non siano selezionati preventivamente, sulla base di opportuni requisiti funzionali all'intervento o agli obiettivi della ricerca, ma fanno parte della realtà scolastica così come essa è. La variabilità (i cui limiti saranno meglio precisati in seguito) è legata sia al grado d'istruzione (che può variare dal IV anno di liceo classico o scientifico fino all'istruzione universitaria e post universitaria, in particolare la Scuola di Specializzazione all'Insegnamento Secondario (SSIS)), sia alla natura degli allievi.

Considerata la relativa carenza di studi precedenti sull'argomento, ma anche l'ambizione pragmatica e le esigenze di flessibilità della ricerca, il problema non può che essere affrontato in modo globale, tentando cioè di ricavare informazioni sui diversi aspetti didattici e pedagogici legati all'apprendimento dei

modelli microscopici della conduzione elettrica e alle connessioni che esso ha sulle competenze di analisi macroscopica dei fenomeni elettrici. I principali problemi affrontati dalla ricerca, la cui soluzione rappresenta gli obiettivi che essa intende conseguire, possono essere così sintetizzati:

1. individuazione dei modelli mentali e concezioni spontanee degli allievi sui modelli microscopici della conduzione elettrica e loro variabilità (anche per allievi di diversa età e livello d'istruzione);
2. individuazione di correlazioni significative tra aspetti microscopici e macroscopici delle conoscenze degli allievi;
3. individuazione e verifica sperimentale di ipotesi pedagogiche che possano orientare la progettazione didattica;
4. progettazione e verifica sperimentale di materiali, strumenti didattici, strategie pedagogiche miranti a favorire il cambiamento concettuale e l'evoluzione dei modelli mentali e delle prestazioni cognitive dei discenti;
5. individuazione di criteri di classificazione delle conoscenze, metodi d'indagine e strumenti di analisi che permettano di caratterizzare le traiettorie d'apprendimento degli allievi e far emergere le correlazioni tra le componenti degli ambienti educativi progettati e sviluppo delle conoscenze e competenze disciplinari dei discenti.

1.2 Panoramica sui metodi e criteri di ricerca adottati

La natura e l'ampiezza dei problemi da affrontare e risolvere impone la necessità di individuare un metodo ricerca che sia compatibile con le finalità del progetto, risulti efficiente, eviti il rischio di un'eccessiva dispersione e contribuisca a mantenere fisso il timone della ricerca. A tal fine, a partire da un'attenta analisi, si è definito un approccio metodologico che adatta e integra gli elementi che caratterizzano due metodologie di ricerca che si inseriscono nel solco tracciato dalla Ricerca Azione: la *ricerca basata su progetti (Design Based Research: DBR)* (Collins et al, 2004, Design-Based Research Collective, 2003) e

la ricerca orientata alla produzione di *sequenze d'insegnamento/apprendimento* (*teaching/learning sequences: TLS*) (Méheut e Psillos, 2004).

In particolare, di questi due approcci si è condiviso l'apporto pragmatico che si sostanzia attraverso un forte orientamento verso la formulazione di un prodotto didattico, cui, però, è affidata una duplice funzione: quella di diffondere innovazione nel campo dell'educazione e istruzione scientifica e quella di contribuire alla crescita delle conoscenze teoriche nel campo ricerca educativa. Dalla DBR mutuiamo la consapevolezza della complessità delle interazioni implicate dal processo d'insegnamento/apprendimento. Ciò ha stimolato la progettazione di un ampio e diversificato sistema di verifica e controllo e l'utilizzo di strumenti d'analisi che consentano di gestire le numerose variabili in gioco. Della ricerca basata sulle TLS condividiamo, invece, il tentativo di coniugare le esigenze dell'istruzione disciplinare con le esigenze cognitive degli allievi. Da entrambe le metodologie mutuiamo, infine, il carattere evolutivo e flessibile della ricerca, che si concretizza attraverso il susseguirsi ciclico di tre fasi: progettazione, applicazione e revisione.

Le caratteristiche e i presupposti su cui si basa il metodo di ricerca adottato nel presente studio saranno discussi ampiamente nel capitolo 2, per il momento osserviamo che l'utilizzazione di tale approccio metodologico ha permesso di soddisfare le finalità e le principali esigenze della progetto di ricerca argomento di questa tesi. In particolare, tale metodo ha permesso di focalizzare la ricerca sulla produzione di ambienti didattici orientati verso l'innovazione e finalizzati all'applicazione a complessi contesti naturalistici; ha consentito, inoltre, di affrontare i problemi d'insegnamento-apprendimento in modo globale e interconnesso e di raggiungere gli obiettivi (in termini sia di produzione di percorsi e strumenti formativi che di avanzamento di conoscenze teoriche) in modo efficiente.

Al fine di chiarire ulteriormente i presupposti e la filosofia che animano il metodo di ricerca, concludiamo questo paragrafo con una argomento laterale, nella fattispecie con un'analogia. L'analogia si riferisce ad un contesto sportivo e riguarda, in particolare, la Formula 1.

Lo scopo principale che orienta il lavoro di un team di Formula 1 è quello di progettare e costruire un prototipo competitivo che implementa soluzioni innovative. Il veicolo viene progettato sulla base di ricerche e ipotesi teoriche (analoghe alle ipotesi teoriche su cui si basa un progetto didattico) fondate sui risultati dell'ingegneria meccanica, su principi fisici, chimici e via dicendo, ma anche sulla base della ricerca empirica precedente (equivalente agli studi sperimentali della ricerca in didattica); tutto ciò conduce a soluzioni progettuali e costruttive che vengono utilizzate, integrandole, in un prototipo. Lo strumento principale mediante il quale viene verificata la correttezza delle ipotesi e delle conseguenti soluzioni progettuali e costruttive è la partecipazione ai gran premi: gli esiti della competizione e i dati relativi al comportamento della vettura in gara, opportunamente correlati con le numerose altre variabili che caratterizzano il sistema (condizioni climatiche in cui si è svolta la gara, particolarità del circuito, perizia dei piloti e del team di meccanici, competitività delle altre vetture etc.), sono, infatti, utilizzati per valutare la correttezza delle soluzioni, per modificare il progetto e migliorare le prestazioni della vettura. Sebbene gli sforzi del team siano concentrati sulla progettazione e la costruzione di un prototipo competitivo, tuttavia, i risultati conseguiti non sono limitati ad un buon piazzamento della vettura, le innovazioni che passano il vaglio della verifica possono essere, infatti, utilizzate per migliorare la sicurezza, le prestazioni e i costi delle vetture destinate al mercato globale dell'automobile, essi, inoltre, possono stimolare la ricerca di base in campo ingegneristico.

In termini più generali, focalizzare gli sforzi sul progetto di un prototipo (una vettura di Formula 1 o un prodotto didattico) e la sua implementazione finalizzata alla verifica in contesto, permette di conseguire risultati applicabili contesti diversi e molto più ampi di quello in cui tali risultati sono stati generati.

Sul metodo utilizzato in questa ricerca si tornerà più diffusamente in seguito, facendo ancora uso dell'analogia con la Formula 1, approfondendola ed estendendone le corrispondenze, per chiarire alcuni aspetti critici della ricerca.

1.3 Panoramica sull'impianto progettuale e fasi di sviluppo della ricerca

Il percorso progettuale si è sviluppato passando attraverso diversi cicli di progettazione, verifica, valutazione e ottimizzazione (revisione). Una panoramica generale dell'iter progettuale e delle diverse fasi di sviluppo della ricerca sono schematizzati in figura 1.1. Le diverse fasi della ricerca sono situabili in due diverse, ma interconnesse, dimensioni operative: la dimensione progettuale, che caratterizza l'evoluzione del progetto didattico, e la dimensione della verifica, relativa alle sperimentazioni effettuate in contesti formativi diversi. Nel seguito le motivazioni, le modalità di attuazione e gli esiti delle singole fasi verranno descritte con adeguato dettaglio, per il momento osserviamo che si sono effettuate due diverse fasi di verifica (implementazione in contesto), ciascuna delle quali perseguita un duplice scopo: produrre e valutare le modificazioni indotte dagli interventi nel contesto formativo ed estrarre informazioni utili sia per la revisione delle diverse componenti del ambiente didattico progettato sia per la realizzazione degli altri obiettivi di ricerca.

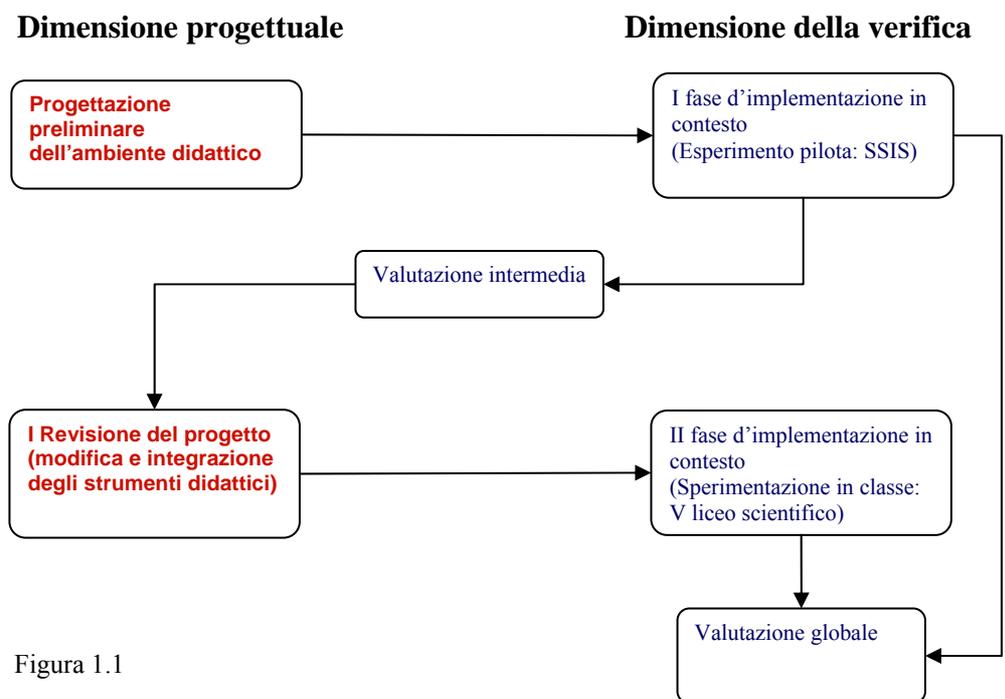


Figura 1.1

La prima fase d'implementazione (esperimento pilota) è stata realizzata nell'ambito del Laboratorio di Termodinamica attivato presso la SSIS di Palermo e rivolto a studenti iscritti al I anno del corso di specializzazione per l'insegnamento secondario, per il conseguimento dell'abilitazione in Matematica e Fisica. La seconda fase d'implementazione è stata realizzata in una V classe del Liceo Scientifico "Galileo Galilei" di Palermo.

1.4 Formulazione delle domande di ricerca

Le domande cui la ricerca intende fornire una risposta sono una diretta conseguenza degli obiettivi riportati nel precedente par. 1.1 e possono essere così formulate:

1. *Quali sono e come sono distribuiti i modelli spontanei e le concezioni degli allievi relativi ai modelli microscopici della conduzione elettrica? E quali sono le evidenze circa la loro variabilità in funzione dell'età e del livello d'istruzione?*
2. *Quali sono le evidenze che la ricerca fornisce circa le connessioni tra aspetti microscopici e macroscopici delle conoscenze evidenziate dagli allievi?*
3. *Quali sono le ipotesi e i presupposti fondamentali di cui si deve tener conto al fine di favorire e facilitare l'apprendimento dei modelli della conduzione elettrica e lo sviluppo di competenze interpretative?*
4. *In che misura e sotto quali condizioni i materiali, gli strumenti e i processi didattici attivati favoriscono un'adeguata evoluzione delle conoscenze e competenze disciplinari degli allievi?*

A tali domande si fornirà una risposta conclusiva nel capitolo 7, sulla base delle evidenze raccolte durante le diverse fasi di sviluppo della ricerca.

1. 5 Per orientarsi

La tesi è articolata su tre diversi livelli: il primo livello riguarda la definizione di un quadro di riferimento teorico, di tipo pedagogico, metodologico e progettuale; il secondo livello è relativo alla dimensione operativa legata alla progettazione dell'ambiente didattico; il terzo livello attiene, infine, alla verifica sperimentale delle componenti dell'ambiente didattico progettato, delle scelte, delle strategie e delle soluzioni didattiche implementate, delle ipotesi e dei presupposti pedagogici che ne hanno ispirato la progettazione.

Al fine di render più agevole la lettura, in ciò che segue si fornirà una descrizione dei principali argomenti affrontati nei capitoli seguenti.

Il capitolo 2 è dedicato alla definizione delle componenti del quadro di riferimento teorico e metodologico che delimitano i confini della ricerca e da cui conseguono tutte le scelte operative che la caratterizzano. Il primo dei problemi affrontati riguarda le scelte epistemologiche di fondo. Tali scelte sono state operate sulla base di un'analisi critica retrospettiva delle diverse posizioni che hanno caratterizzato l'epistemologia costruttivista, nell'ambito della quale la presente ricerca si colloca. Sulla base di tale analisi viene adeguatamente motivata la posizione epistemologica adottata nella ricerca. Essa coniuga, integrandole, diverse prospettive di tipo costruttivista e, principalmente, quelle vicine al pensiero espresso da tre diversi studiosi: Popper, Piaget e Vygotsky. Diretta conseguenza della prospettiva epistemologica sono le ipotesi di fondo che ispirano gli approcci pedagogici adottati. Essi sono improntati ad esigenze pragmatiche e coniugano la dimensione *psico - cognitiva* (di derivazione Piagetiana), che enfatizza le potenzialità didattiche che derivano dal confronto tra risorse dell'allievo e le informazioni che provengono dal mondo materiale, con approcci pedagogici di tipo *epistemico*, maggiormente centrati sulle relazioni tra sapere

disciplinare (costruito socialmente) e realtà naturale. L'individuazione di strette analogie (in termini sia strutturali che funzionali) tra modelli scientifici e modelli mentali permette di precisare, da un lato, gli aspetti che caratterizzano la prospettiva pedagogica, dall'altro la definizione di una originale metodologia di analisi e di classificazione fenomenografica (Marton, 1981, 1994; Entwistle, 1997) delle conoscenze degli allievi. Si affronta, dunque, il problema della definizione della metodologia di ricerca, i cui elementi essenziali sono stati anticipati nel precedente paragrafo 1.2. Gli ultimi due paragrafi del capitolo sono dedicati rispettivamente, alla precisazione della metodologia di progettazione didattica (dimensione progettuale) e alle metodologie d'indagine sperimentale (dimensione della verifica). In particolare, il metodo di progettazione didattica condivide molti degli elementi che caratterizzano due modelli progettuali noti come *ingegneria didattica* (Artigue, 1988) e *educational reconstruction* (Kattmann et al, 1995). Analogamente a tali approcci, esso è basato su una duplice analisi a priori: un'analisi disciplinare, di tipo storico ed epistemologico, e un'analisi pedagogica e cognitiva, finalizzata a individuare conoscenze spontanee e potenziali difficoltà d'apprendimento. Tuttavia, tali analisi sono integrate con ulteriori informazioni, ricavate empiricamente, finalizzate ad adattare il progetto didattico alle realtà formative cui esso concretamente è rivolto.

In relazione alla dimensione della verifica vengono esplicitati i principali metodi e strumenti d'analisi del processo formativo e di validazione dell'ambiente didattico. Viene illustrato, inoltre, il razionale che ha ispirato la progettazione e la struttura di un articolato sistema di controllo del processo d'insegnamento/apprendimento. Viene, infine, introdotta una metodologia di classificazione e di analisi fenomenografica delle conoscenze degli allievi e alcuni degli strumenti per l'analisi statistica delle variabili cognitive.

Nel capitolo 3 vengono esplicitati i diversi elementi e le ipotesi che hanno contribuito e hanno orientato la progettazione didattica e si descrivono le componenti dell'ambiente didattico predisposto. Seguendo la metodologia di progettazione illustrata nel capitolo 2, la definizione progetto didattico si basa su un duplice tipo di analisi: un'analisi di tipo storico – epistemologico, riguardante

l'evoluzione della teoria elettronica dei solidi e una analisi psico-pedagogica fondata sui risultati principali emersi dagli studi precedenti relativi alle problematiche didattiche connesse con l'argomento disciplinare oggetto della ricerca. Sulla base di una sintesi delle informazioni tratte da tali analisi, vengono, dunque, introdotte le ipotesi e i presupposti fondamentali su cui si basa l'intero progetto e che hanno ispirato la ricostruzione educativa dei contenuti, le scelte e le soluzioni didattiche che lo caratterizzano. Dopo una dettagliata disamina delle strategie pedagogiche e del ciclo didattico che organizza le diverse componenti del percorso, si descrivono i principali aspetti che caratterizzano l'adattamento didattico dei contenuti disciplinari selezionati e i principali strumenti (relativi alle attività sperimentali e alle attività di modellizzazione) progettati al fine di supportare l'apprendimento e l'insegnamento.

I capitoli 4, 5, e 6 sono dedicati all'analisi delle due fasi di verifica sperimentale: i capitoli 4 e 5 riguardano l'esperimento pilota, il capitolo 6 la seconda fase di verifica.

In particolare, il capitolo 4 è dedicato alla progettazione dell'esperimento d'insegnamento. In esso si descrivono le caratteristiche del contesto sperimentale, si esplicitano gli obiettivi e le domande di ricerca sperimentali, si illustrano le diverse fasi in cui si articola l'indagine e le modalità d'implementazione didattica dell'ambiente formativo. In questo capitolo si descrive, inoltre, il percorso concettuale sotteso dall'iter formativo e si descrivono le caratteristiche e i criteri di progettazione delle sequenze d'insegnamento/apprendimento in cui si articola il percorso didattico.

Nel capitolo 5 vengono descritte nel dettaglio la struttura e le caratteristiche del sistema di controllo del processo d'insegnamento/apprendimento, gli strumenti di verifica delle conoscenze, le metodologie d'analisi dei dati raccolti e gli strumenti e le procedure mediante le quali è stata fornita una risposta alle domande sperimentali e valutati gli esiti della sperimentazione. In particolare, vengono riportati gli esiti di tre diversi momenti d'indagine: indagini d'ingresso, monitoraggio in itinere, indagini d'uscita. Vengono, infine, riportati i risultati globali emersi dalla sperimentazione e viene

effettuata una valutazione relativa all'efficacia delle componenti dell'ambiente didattico implementato e alla correttezza delle ipotesi pedagogiche che ne hanno ispirato la progettazione.

Nel capitolo 6 si descrivono, gli obiettivi, le caratteristiche e gli esiti della seconda fase di verifica, realizzata in una V classe di un Liceo Scientifico. In particolare, in questo capitolo vengono illustrate le principali caratteristiche dell'ambiente didattico, mettendo in evidenza le differenze rispetto alla sperimentazione pilota e le motivazioni che hanno giustificato le modifiche apportate al progetto didattico. Si riportano, inoltre, alcuni dei risultati dell'indagine effettuata, confrontandoli con gli esiti dell'esperimento pilota. Dal confronto tra gli esiti delle due diverse indagini sperimentali emergono delle differenze, ma anche delle significative regolarità che confermano, ampliandone la base statistica, alcuni dei principali risultati conseguiti nell'ambito della prima fase sperimentali. Pertanto, essi si configurano come risultati generali della presente ricerca.

Nel capitolo 7, a partire dagli esiti delle diverse fasi in cui si articola la ricerca, si traggono le conclusioni, se ne discutono i principali risultati, correlandoli con gli obiettivi dell'indagine, e si fornisce una risposta alle domande di ricerca.

Capitolo 2. Fissiamo le regole del gioco: il sistema di riferimento teorico, metodologico e progettuale

La figura 2.1 rappresenta le componenti principali del sistema di riferimento teorico, metodologico e progettuale cui è ancorata la presente ricerca.

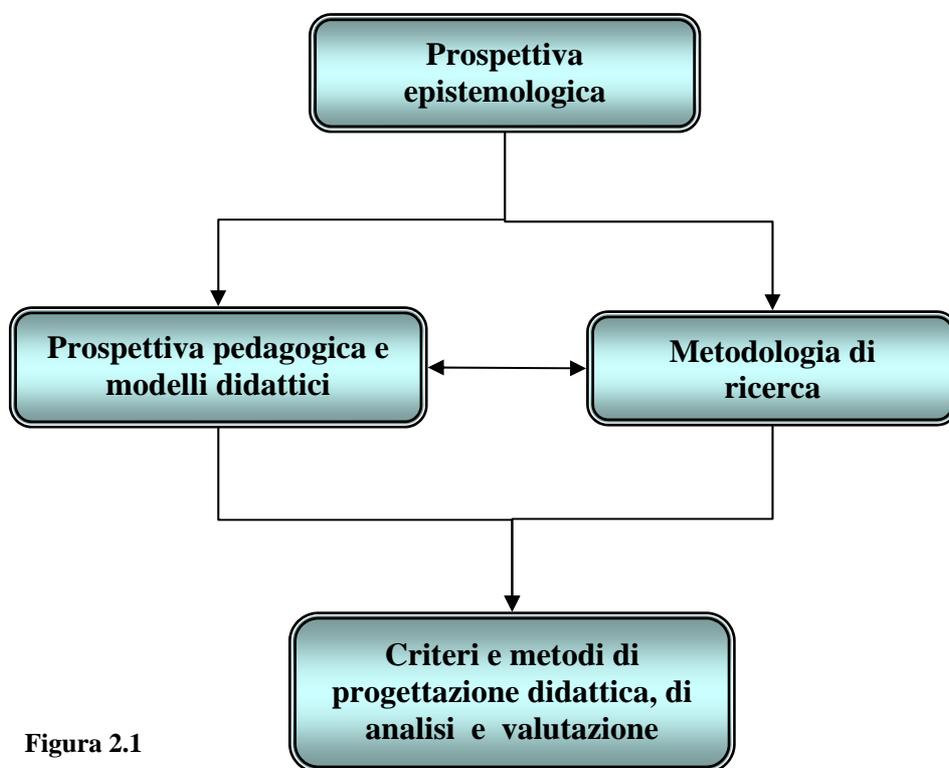


Figura 2.1

Questo capitolo è dedicato all'esplicitazione dei diversi elementi che hanno contribuito alla costruzione di tale quadro di riferimento e alla precisazione delle reciproche relazioni. Contestualmente saranno analizzati e descritti i criteri, gli strumenti operativi e i metodi che discendono da tale sistema concettuale e che caratterizzano e hanno orientato la presente ricerca.

2.1 Scelte epistemologiche

I principali modelli d'apprendimento che ispirano l'insegnamento delle discipline scientifiche (dalla seconda metà del secolo scorso fino ad oggi) derivano da due diverse e nettamente contrapposte teorie psico-cognitive: il comportamentismo ed il costruttivismo.

Secondo Cohen (1987) l'idea centrale del comportamentismo è che “i pensieri, i sentimenti e le intenzioni, che sono tutti processi mentali, non determinano ciò che facciamo. Il nostro comportamento è il frutto del nostro condizionamento. Noi siamo macchine biologiche e non agiamo in modo cosciente, ma reagiamo agli stimoli”.

Le applicazioni didattiche del comportamentismo si basano principalmente sulla teoria di Skinner (1953), secondo la quale la mente può essere riguardata come un vaso vuoto, una *tabula rasa*, che va riempita con informazioni, un recipiente all'interno del quale conservare le idee che provengono dall'esperienza. Il modello d'insegnamento che deriva dal comportamentismo mira soltanto a produrre dei cambiamenti nei comportamenti e non si occupa dei cambiamenti delle conoscenze “interne” degli allievi ne, tanto meno, dei processi che connettono lo “stimolo” alla “risposta”. Nella versione più estrema, secondo il modello comportamentista, la mente non produce idee ma risponde ad opportuni condizionamenti. Date queste premesse, è evidente che il ruolo principale dell'insegnante è quello di predisporre i condizionamenti e gli stimoli che consentono agli allievi di modificare i propri comportamenti. La didattica che ne consegue è pertanto una didattica di tipo trasmissivo. Sebbene il modello comportamentista abbia mostrato chiaramente i suoi limiti, ciononostante l'insegnamento delle discipline scientifiche è ancora pervaso da pratiche che si richiamano a tale modello.

In netto contrasto con il modello comportamentista, il modello d'apprendimento che discende dal costruttivismo, proposto da Bruner (1966), presuppone che l'apprendimento sia un processo di costruzione di conoscenze che provengono dalle esperienze esterne e che si verifica grazie all'interazione con

l'ambiente. L'apprendimento, dunque, consiste nella costruzione di nuove conoscenze e competenze e/o nella modifica delle conoscenze e competenze già esistenti. Inoltre, le conoscenze effettivamente costruite o modificate sono influenzate in modo significativo da quelle già possedute. In questo modello il ruolo principale dell'insegnante non è quello di trasmettere conoscenze, quanto piuttosto quello di creare le condizioni che possano facilitare il processo di costruzione delle conoscenze.

2.1.1 Le dimensioni del costruttivismo

Bisogna, tuttavia, sottolineare, che il costruttivismo, e con esso i modelli e le applicazioni pedagogiche che da tale teoria derivano, si è sviluppato sotto diverse forme ed ha assunto varie connotazioni. Al fine di descrivere i diversi e complessi aspetti su cui l'epistemologia costruttivista ha focalizzato la sua attenzione, Phillips (1995) propone una rappresentazione basata sull'introduzione di tre diverse dimensioni (fig. 2.2). La prima dimensione riguarda il possesso delle conoscenze. A tale dimensione Phillips conferisce l'etichetta "psicologia individuale contro disciplina pubblica". Ad un estremo di tale dimensione (psicologia individuale) si collocano alcuni costruttivisti il cui interesse generale riguarda le modalità mediante le quali gli individui costruiscono le proprie conoscenze interagendo con l'ambiente. Piaget e Vygotsky, ad esempio, sono collocabili in corrispondenza di questo estremo, sebbene le loro idee differiscano in relazione ai meccanismi che stanno alla base del processo di costruzione delle conoscenze: Piaget evidenzia la natura biologica e psicologica di tali meccanismi, mentre Vygotsky enfatizza i fattori sociali che influenzano l'apprendimento. All'altro estremo dell'asse si trovano alcuni costruttivisti per i quali i problemi connessi all'apprendimento individuale sono poco rilevanti: il loro interesse è concentrato sulla costruzione della conoscenza umana in generale e, in particolare, sulla costruzione delle conoscenze disciplinari condivise dalle comunità di scienziati. Tra questi due estremi si trovano, tuttavia, diversi studiosi i cui interessi abbracciano entrambi i poli e le cui teorie correlano la costruzione individuale delle conoscenze con le modalità mediante le quali le comunità umane

hanno costruito il corpo di conoscenze pubbliche cui ci riferiamo come saperi disciplinari.

La seconda dimensione riguarda la creazione delle conoscenze e attiene le relazioni tra esseri umani e natura. Tale dimensione, che può essere indicata come “esseri umani creatori contro natura istruttore”, caratterizza in modo marcato “l’essere costruttivista”. Ad un estremo (Esseri umani) si trovano gli studiosi che ritengono che la conoscenza sia un costrutto umano e che essa non esiste al di fuori della mente dell’uomo. L’altro estremo (Natura) corrisponde all’idea che la conoscenza sia imposta dall’esterno e aspetti di essere assorbita e interiorizzata, in modo più o meno passivo. In altri termini, tale dimensione rappresenta la domanda: la conoscenza (sia individuale che pubblica) è costruita o scoperta? E’ evidente che muovendosi verso il polo “Natura”, oltre una certa posizione lungo l’asse, si cessa di essere costruttivisti per transitare nell’ambito dell’empirismo.

La terza dimensione riguarda, infine, il processo d’apprendimento e contrappone la “conoscenza come costruzione rispetto alla conoscenza come trasmissione”. Ad un estremo dell’asse (trasmissione) vi è “la teoria dello spettatore” (si veda, per esempio, Dewey 1960), secondo la quale il discente riceve informazioni passivamente e, senza un eccessivo sforzo, le internalizza. All’altro estremo dell’asse si colloca, invece, la prospettiva che guarda all’apprendimento come un processo dinamico, in cui colui che apprende è attivamente impegnato nella costruzione della conoscenza.

Risulta evidente, da questa breve panoramica, che le posizioni assunte rispetto alle tre diverse dimensioni utilizzate per descrivere il variegato mondo del costruttivismo, influenza in modo significativo le modalità con cui si affrontano i problemi connessi alla ricerca educativa e alla progettazione didattica.

2.1.2 Quale costruttivismo? Prospettiva epistemologica adottata in questa tesi

Al fine di esplicitare la prospettiva teorica che ispira la ricerca discussa in questa tesi, è utile riferirsi alla figura 2.2. Essa rappresenta le tre dimensioni introdotte da Phillips per caratterizzare i diversi approcci al costruttivismo. Il punto riportato in figura specifica prospettiva adottata in questa tesi.

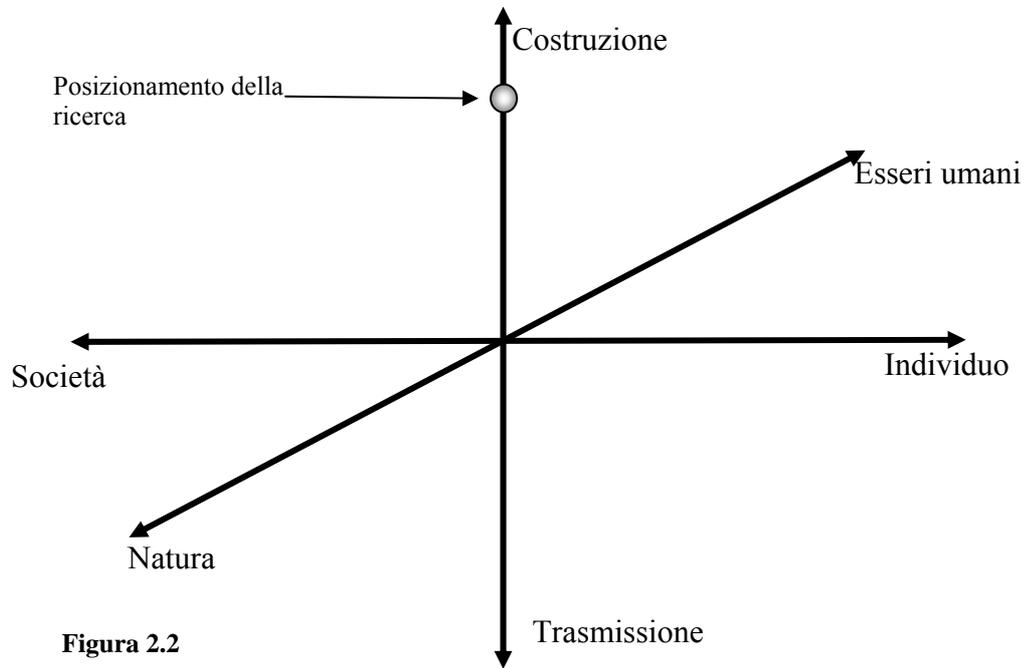


Figura 2.2

In particolare, in relazione alla prima dimensione, riguardante la natura individuale o sociale della conoscenza, pensiamo che i due poli d'interesse non siano in contraddizione. Infatti, sebbene riteniamo che la creazione della conoscenza sia un'attività individuale di costruzione di significati a partire dall'interazione con l'ambiente, riteniamo anche che tale attività sia influenzata e orientata dall'interazione con il contesto socio-culturale, che è una delle componenti dell'ambiente cui l'individuo appartiene: tale contesto agisce, infatti, come meccanismo selettivo e adattativo per le conoscenze individuali. D'altra parte, le relazioni tra conoscenza individuale e conoscenza condivisa e accettata dalla comunità sociale - e, in particolare, dalla comunità scientifica - riveste notevole importanza nell'ambito dell'educazione, in generale, e di quella scientifica, in particolare. In questa tesi, in relazione al dominio disciplinare d'interesse (modelli della conduzione elettrica), sarà dedicata grande attenzione all'analisi di entrambe le dimensioni epistemologiche (quella individuale e quella collettiva), ciò al fine di individuare soluzioni didattiche e strategie utili a colmare

la distanza tra conoscenze spontanee e conoscenze scientifiche, che possano favorire, cioè, l'istruzione scientifica degli allievi.

In relazione alla seconda dimensione introdotta da Phillips (quella relativa alla creazione della conoscenza) rigettiamo le posizioni radicali¹ secondo le quali la conoscenza è una pura costruzione umana, con scarse, o del tutto assenti, connessioni con la realtà naturale. La distanza da queste posizioni non è, tuttavia, determinata da pregiudizi ideologici, ma dalla constatazione che le conseguenze pedagogiche di tali posizioni possono condurre ad uno "spontaneismo" educativo che ha mostrato parecchi limiti. Noi, al contrario, propendiamo per un'idea di creazione e funzione della conoscenza più vicina al pensiero di Karl Popper, secondo cui, sebbene i "fatti" siano impregnati di "teoria", sono i fatti e le informazioni che provengono dal mondo naturale che ci permettono di individuare e correggere gli errori nelle conoscenze che abbiamo su di esso. Sul fronte della conoscenza individuale esprimiamo una posizione prossima al pensiero di Piaget (riassunto nel paragrafo seguente) secondo cui lo sviluppo cognitivo è il frutto di una continua negoziazione (non priva di distorsioni) tra rappresentazioni mentali e strutture interne di conoscenza e "realtà" esterna.

In altri termini, riteniamo che la conoscenza sia prodotta dall'uomo e che le strutture di conoscenza (ad esempio, le teorie fisiche o i modelli mentali) servano ad organizzare il mondo delle esperienze sensibili, svolgendo una funzione adattativa ed evolutiva, e, sebbene esse non abbiano necessariamente un'assoluta corrispondenza con il mondo materiale, soltanto il confronto con quest'ultimo permette di modificare ed evolvere tali strutture (sia quelle individuali che quelle collettive). Come si vedrà in seguito, tale posizione epistemologica ha una diretta e significativa influenza su alcune delle scelte progettuali e metodologiche adottate nella presente ricerca.

Per ciò che riguarda, infine, la terza dimensione (conoscenza come costruzione attiva o come trasmissione) sottoscriviamo decisamente l'idea che la

¹ Esempi di una tale "costruttivismo radicale" sono i membri del cosiddetto "programma forte" in sociologia della conoscenza (si veda ad esempio Barnes 1974 e Collins 1985). Per la dimensione individuale e pedagogica si veda inoltre von Glasersfeld (1991, 1993).

conoscenza sia il frutto di un processo di costruzione che presuppone un impegno attivo di chi apprende.

2.2 L'apprendimento secondo Piaget e Vygotsky ed elementi rilevanti per la ricerca

Nell'ambito delle scienze cognitive Piaget e Vygotsky sono gli studiosi le cui idee hanno maggiormente influenzato le applicazioni didattiche del costruttivismo. Mentre Piaget si occupa prevalentemente delle relazioni tra evoluzione delle conoscenze individuali e mondo dell'esperienza, Vygotsky focalizza l'attenzione sul ruolo della mediazione sociale nel processo d'apprendimento. In ciò che segue illustreremo sinteticamente il pensiero dei due studiosi, focalizzando l'attenzione sugli elementi di maggior interesse per la presente ricerca.

2.2.1 Piaget e la prospettiva psico - cognitiva

Il modello d'apprendimento individuale proposto da Piaget si fonda su due principi generali (organizzazione e adattamento) che guidano lo sviluppo cognitivo e biologico dell'individuo e su alcuni concetti chiave (schema mentale, assimilazione, accomodamento, equilibrio) utili a comprendere i meccanismi mediante i quali tali principi si realizzano.

In particolare, Piaget suggerisce l'idea che la mente sia organizzata secondo strutture complesse e integrate. La struttura di livello più semplice è lo *schema*, definito da Piaget come una rappresentazione mentale di un definito insieme di percezioni, idee e/o azioni. In altri termini, gli schemi sono le componenti di una più generale struttura di conoscenza che consentono di correlare la conoscenza dell'individuo con il mondo (Piaget 1964), ovvero sistemi organizzati di azioni o pensieri che ci permettono di rappresentare o pensare agli oggetti e agli eventi (Woolfolk, 2001).

Secondo Piaget, affinché gli individui possano sopravvivere è necessario un processo di adattamento tra la rappresentazione dell'ambiente (gli schemi) e

l'ambiente stesso. Il processo di costruzione di nuove conoscenze coincide, dunque, con il processo di modifica degli schemi preesistenti diventati inadeguati. Pertanto, per Piaget, l'apprendimento assolve essenzialmente una funzione adattativa. Lo scopo dell'adattamento è quello di mantenere l'equilibrio tra rappresentazione mentale e realtà esterna (Eggen and Kauchak, 2004). Vi sono due processi mediante i quali si verifica l'adattamento: l'*assimilazione* e l'*accomodamento*.

L'assimilazione si verifica quando una nuova conoscenza viene incorporata in uno schema preesistente, senza una sostanziale riorganizzazione delle strutture mentali. L'assimilazione, spesso, implica il tentativo di comprendere qualcosa di nuovo utilizzando le conoscenze che già possediamo. In alcuni casi ciò può implicare una distorsione della nuova informazione al fine di adattarla agli schemi preesistenti. Laddove la nuova informazione non può essere assimilata negli schemi preesistenti, si verifica uno *squilibrio*. In questo caso è necessaria una modifica più sostanziale degli schemi; ciò implica una riorganizzazione delle strutture mentali attraverso il processo di accomodamento.

Il processo di adattamento degli schemi mentali introduce l'idea di *cambiamento concettuale* che rappresenta uno dei presupposti fondamentali della didattica costruttivista.

2.2.2 Il costruttivismo sociale di Vygotsky

Per Vygotsky (1978) l'apprendimento deriva direttamente dalle interazioni sociali. Uno dei concetti fondamentali introdotti da Vygotsky è la nozione di Zona di Sviluppo Prossimale (Zone of Proximal Development, ZPD). Nelle parole di Vygotsky:

“La Zona di Sviluppo Prossimale è la distanza tra l'effettivo livello di sviluppo, determinato tramite la risoluzione autonoma di un problema, ed il livello potenziale di sviluppo, determinato attraverso la risoluzione di un problema sotto la guida di un adulto o di pari più capaci.”

In termini più semplici, la ZPD è la zona che separa le “cose” che un discente conosce già o che può fare da solo, dalle “cose” che egli non può

imparare (anche con l'assistenza di un istruttore)². Se, in relazione a un dato compito, il discente si trova all'interno della ZPD, egli riuscirà ad eseguire il compito con l'assistenza di un istruttore e, successivamente, ad *internalizzarlo*. A tale attività di assistenza, laddove essa sia strutturata e sistematica, Bruner (1966) si riferisce con il termine "scaffolding" (impalcatura), cui noi preferiamo riferirci con il termine "supporto".

In termini didattici tale supporto è costituito dall'insieme delle attività di mediazione, dei materiali, degli strumenti, degli artefatti predisposti dall'insegnante al fine di favorire l'apprendimento.

2.2.3 In che modo le due prospettive contribuiscono alla ricerca

Ciascuna delle due prospettive discusse sopra focalizza diversi ma altrettanto importanti aspetti dell'insegnamento e dell'apprendimento. Le caratteristiche più evidenti che accomunano le due prospettive sono: il riconoscimento dell'importanza dell'apprendimento attivo e il fatto che la costruzione di nuove conoscenze sia influenzata dalle conoscenze già possedute. Però, mentre Piaget analizza l'apprendimento in termini di processo cognitivo individuale, che si verifica nella mente del discente, attraverso la manipolazione di oggetti reali o mentali, Vygotsky analizza l'apprendimento in termini di relazioni dell'individuo che apprende con altri individui che influenzano e determinano l'apprendimento.

Nonostante la differenza tra i due diversi approcci, vi sono elementi complementari delle due prospettive che possono essere efficacemente combinati ai fini dell'orientamento della presente ricerca. In tal senso condividiamo il contributo pragmatico di Cobb (2005), secondo cui, sebbene l'apprendimento possa essere attribuito a diversi tipi di meccanismi, socio – culturali, secondo Vygotsky, psico-motori e concettuali, secondo Piaget, tuttavia l'appropriazione della nuova conoscenza presuppone un processo d'internalizzazione che implica una riorganizzazione, più o meno profonda, delle strutture mentali preesistenti.

² Interpretando il pensiero di Vygotsky, bisogna sottolineare, che, al di sotto di un certo livello di complessità, un dato compito deve essere appreso come un tutt'uno e non può essere appreso separandolo in compiti più semplici.

Inoltre, le due prospettive forniscono contributi complementari ma egualmente importanti alla didattica: il costruttivismo socio-culturale fa luce “sulle condizioni e i vincoli che rendono possibile l’apprendimento”, la prospettiva psico-cognitiva chiarisce “alcuni dei processi che è opportuno innescare per favorire l’apprendimento”.

In particolare, adattando le idee di Vygotsky all’ambito educativo, possiamo affermare che la ZPD rappresenta la distanza tra il set di conoscenze e competenze iniziali dell’allievo (relative ad una dato settore fenomenologico) ed il set di conoscenze e competenze che egli può sviluppare grazie alla guida di un *mediatore* esperto (l’insegnante o un allievo che ha già internalizzato la conoscenza). A nostro parere, dunque, il successo di un intervento formativo dipenda da tre fattori interdipendenti: lo stato cognitivo iniziale dell’allievo, le mete educative che si intendono raggiungere (le conoscenze e competenze che si vuole l’allievo acquisisca), le attività di guida e di supporto per l’apprendimento predisposte e implementate. Se il percorso che lo studente deve coprire per passare dalle conoscenze iniziali a quelle che si vuole egli apprenda si trova all’interno della sua ZPD, allora egli, opportunamente guidato e supportato, potrà acquisire le nuove conoscenze.

Ottenere una chiara e dettagliata rappresentazione del livello cognitivo iniziale dei singoli allievi è, pertanto, un aspetto di fondamentale importanza, in quanto tale stima, che individua la *domanda formativa* espressa dagli allievi (Buty e Tiberghien A, 2004), influenza sia la strutturazione e la calibrazione delle attività di supporto, sia il grado di sviluppo delle conoscenze che possiamo attenderci in uscita. Il modo in cui è stato affrontato tale problema sarà illustrato nei capitoli seguenti.

Per quanto riguarda il contributo di Piaget, la traduzione pedagogica dei meccanismi spontanei di assimilazione e accomodamento che caratterizzano l’adattamento secondo Piaget, suggerisce efficaci strategie didattiche, in particolare il *conflitto cognitivo*, che, come vedremo, è una delle strategie che caratterizza il progetto didattico discusso in questa tesi.

2.3 Individuazione della prospettiva pedagogica

Come si è detto, l'idea di cambiamento concettuale è una diretta conseguenza del modello psico-cognitivo di Piaget e rappresenta uno dei principali elementi attorno cui ruota la pedagogia costruttivista.

Nell'ambito della didattica della fisica, la ricerca sul cambiamento concettuale si è sviluppata secondo due diverse e complementari linee di sviluppo. Una ricerca finalizzata ad individuare le concezioni alternative e le difficoltà d'apprendimento degli allievi e a mettere a punto soluzioni didattiche che possano favorire il cambiamento concettuale. Parallelamente, sul versante teorico, si è sviluppato un settore di ricerca relativo alla formulazione di modelli per l'analisi dei processi cognitivi implicati nell'apprendimento della fisica.

In questo paragrafo saranno presentati alcuni dei risultati emersi da tali studi e saranno evidenziate le relazioni con l'approccio pedagogico che caratterizza il progetto didattico discusso in questa tesi.

2.3.1 Concezioni alternative e ostacoli d'apprendimento

In passato il concetto "misconcezione" ha dominato le scene dei dibattiti sugli stili cognitivi e le difficoltà d'apprendimento. Il termine "misconcezione" (Novak, 1977; Viennot, 1979) si riferisce alle conoscenze degli allievi considerate "erronee", in quanto in conflitto con le conoscenze scientifiche. Tali conoscenze alternative sono spesso robuste e difficili da modificare, almeno mediante le pratiche didattiche tradizionali. Esse possono essere il frutto dell'istruzione precedente (Vosniadou, 2002) o il frutto di una costruzione spontanea dell'allievo (Hewson, 1981).

L'uso del termine "misconcezione", tuttavia, nasconde l'idea che le conoscenze pre-istruzione degli allievi abbiano in sé qualcosa di "cattivo" e che il compito principale dell'insegnante sia quello di sostituirle con le "buone" conoscenze scientifiche. In tempi più recenti, diversi ricercatori (Magnusson, Templin and Boyle, 1997; Smith, diSessa and Roschele, 1993; Hammer, 1996) hanno rilevato che l'idea di misconcezione, intesa come elemento che interferisce e che deve essere soppresso e rimpiazzato, ignora la base costruttivista

dell'apprendimento. Secondo questi ricercatori le misconcezioni sono il prodotto di un modo ragionevole e personale di dare senso alle cose e che esse possono evolversi e modificarsi (avvicinandosi alle conoscenze scientifiche) se l'insegnante predispone strategie didattiche che tengano conto di tali conoscenze e che le utilizzino come punto di partenza per l'istruzione. Per tali ragioni la tendenza recente è quella di riferirsi a tali conoscenze con termini più neutri, quali conoscenze spontanee, conoscenze alternative o conoscenze pre – istruzione. Come vedremo più avanti, tale idea è coerente con gli studi teorici sui meccanismi cognitivi che stanno alla base del manifestarsi delle conoscenze spontanee.

Le conoscenze alternative degli studenti non rappresentano, tuttavia, l'unico fattore che può ostacolare il cambiamento concettuale. L'apprendimento può essere, infatti, ostacolato da fattori che dipendono, più che dalle strutture di conoscenza possedute dagli allievi, da elementi interni alla disciplina. Alcuni di tali ostacoli (*ostacoli epistemologici* Brousseau, 1983; D'amore, 1999) derivano da nodi intrinseci della disciplina che hanno richiesto un travagliato processo storico per essere accettati e sistemati teoricamente dalla stessa comunità degli scienziati. In relazione ad alcuni contenuti di fisica, ad esempio, l'apprendimento può risultare difficile in quanto i concetti implicati sono astratti e le loro relazioni con l'esperienza percettiva degli allievi sono scarse, o del tutto assenti. In questo caso, allora, viene a mancare uno dei termini (la realtà esterna) del processo d'adattamento, descritto da Piaget, necessari per lo sviluppo delle conoscenze.

Riteniamo che l'apprendimento dei modelli microscopici implichi tale tipo di difficoltà. Come vedremo, al fine di favorire l'apprendimento, sono state progettate strategie didattiche, caratterizzate da un percorso di costruzione e di graduale revisione dei modelli microscopici della conduzione elettrica, il più possibile ancorato ad informazioni tratte dall'esperienza sensibile, o da "simulacri" di quest'ultima. Ciò, in particolare, si è concretizzato attraverso tre diversi elementi:

1. utilizzando, come punto di partenza per la costruzione dei modelli, le informazioni tratte dall'osservazione dei fenomeni macroscopici;

2. facendo scaturire il processo di revisione e di sviluppo dei modelli dal confronto con la realtà dei fenomeni macroscopici;
3. supportando il processo d'apprendimento attraverso l'uso di modelli analogici (dei modelli e dei processi microscopici), sia virtuali (simulazioni e visualizzazioni dinamiche) sia costituiti da artefatti fisici (si veda "piano inclinato ad ostacoli" par. 3.5).

Nel contesto della fisica moderna, ad esempio la meccanica quantistica, gli ostacoli cognitivi assumono una natura ancora più profonda, in quanto presuppongono il superamento di barriere che attengono categorie di pensiero, quali il principio di causalità, profondamente radicate nella mente di ciascuno (anche degli scienziati). E' questo un altro dei problemi che affronteremo in questa ricerca.

Un ultimo ostacolo connesso alla disciplina riguarda i problemi relativi all'uso delle rappresentazioni matematiche per l'analisi e le deduzioni quantitative. In relazione a tale problema, uno dei risultati emersi dalle indagini sperimentali condotte (i cui esiti saranno illustrati nei capitoli seguenti) è che un'adeguata comprensione qualitativa dei modelli microscopici favorisce, in modo significativo, la capacità di elaborazione quantitativa del modello matematico.

2.3.2 Conflitto cognitivo e strategie pedagogiche

Si è già detto che dal lavoro di Piaget discende uno dei principali strumenti operativi, il *conflitto cognitivo*, che ha caratterizzato la ricerca sulle strategie didattiche atte a favorire il cambiamento concettuale. La strategia del conflitto cognitivo o *dissonanza cognitiva* (Festinger, 1957) intende indurre negli allievi la consapevolezza dell'inadeguatezza delle loro concezioni e renderli così disponibili a riconsiderare i propri punti di vista. Tale consapevolezza (Poster et al, 1982) dovrebbe fungere da fattore trainante per la ricostruzione delle concezioni degli allievi.

Al fine di facilitare il cambiamento concettuale sono stati proposti diversi modelli d'istruzione basati sulla strategia del conflitto cognitivo (Cosgrove and Osborne, 1985; Chinn and Brewer, 1993; Park, 2006). Tali modelli articolano,

tipicamente, l'istruzione in diverse fasi: individuazione delle concezioni spontanee, attivazione del conflitto cognitivo, risoluzione del conflitto, riconoscimento delle idee modificate.

Notiamo, tuttavia, che sebbene alcuni studi evidenzino l'efficacia di tale strategia (Guzetti et al., 1993), tale conclusione non è pienamente condivisa. Alcuni autori, infatti, ritengono che non sempre il conflitto cognitivo conduce al cambiamento concettuale (Chan, C., J. Burtis, et al., 1997; Chinn and Brewer, 1993; Posner et al, 1982). Nussbaum (1989), ad esempio, analizzando gli esiti di tale strategia d'insegnamento, sostiene che "gli studenti mantengano sostanziali elementi delle vecchie concezioni". Andando più a fondo alla questione, H. Schwedes and D. Schmidt (1992), P. Scott, H. Asoko and R. Driver (1992) si occupano delle modalità mediante le quali gli allievi percepiscono tali "conflitti programmati" e di come rispondono ad essi (Chinn and Brewer, 1993). Da tali studi emergono due importanti aspetti. Il primo è che ciò che al ricercatore appare essere una situazione di conflitto non è necessariamente tale per l'allievo (Psillos et al, 1987; Koumaras et al 1997). Il secondo aspetto riguarda, invece, la metodologie d'analisi. In particolare, in molti casi, le metodologie di raccolta dei dati tendono a valutare l'efficacia globale di un intervento didattico, non permettendo un'analisi dettagliata degli effetti di uno specifico conflitto.

In questa tesi dedichiamo grande attenzione ai problemi connessi all'utilizzazione del conflitto cognitivo come strategia didattica, sia in termini di pianificazione delle attività centrate su tale strategia, sia in termini di analisi delle modalità di risposta degli allievi. In particolare, riteniamo che, in relazione al problema della lettura del conflitto da parte dell'allievo, essa sia criticamente dipendente dalle sue conoscenze pregresse. Per tale ragione, riteniamo che la pianificazione degli interventi didattici, volti ad attivare uno specifico conflitto, deve basarsi su un'attenta analisi dello stato delle conoscenze (e competenze) iniziali degli allievi cui l'intervento è concretamente rivolto (e non soltanto sugli esiti di precedenti studi sperimentali sulle concezioni spontanee). In relazione ai problemi relativi all'analisi della risposta degli allievi alle situazioni di conflitto programmate, è stato predisposto ed implementato un articolato sistema di

monitoraggio e di analisi del processo d'apprendimento, focalizzato da un lato sull'analisi delle modalità mediante le quali classi di studenti con caratteristiche simili reagiscono al conflitto cognitivo, dall'altro su una dettagliata analisi (di tipo qualitativo) di casi particolari significativi.

2.3.3 Aspetti generali dell'approccio pedagogico utilizzato in questa ricerca

Gli approcci didattici basati sul conflitto cognitivo sono fortemente centrati sull'allievo. Essi implementano una prospettiva psico-cognitiva (di derivazione Piagetiana) dell'insegnamento – apprendimento che enfatizza le potenzialità didattiche che derivano dal confronto tra risorse dell'allievo e le informazioni che provengono dal mondo materiale, ma che rivolge poca attenzione ai contenuti e alla struttura della disciplina (Méheut e Psillos, 2004).

D'altronde, come osservato nel paragrafo 2.3.1, l'argomento disciplinare oggetto di questa ricerca presuppone, tra le altre, difficoltà d'apprendimento di tipo epistemologico, che attengono, cioè, i rapporti tra conoscenze dell'allievo e le conoscenze disciplinari (la cui distanza gli interventi progettati si prefiggono di ridurre).

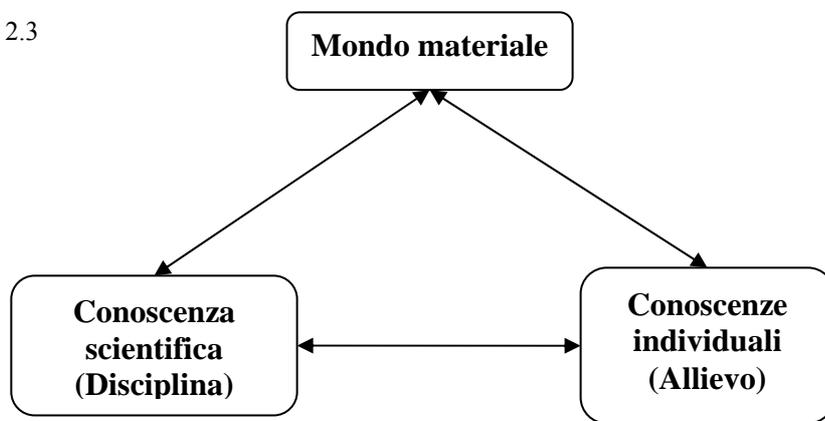
Come, peraltro, confermato dagli esiti delle sperimentazioni effettuate, riteniamo che la strategia del conflitto cognitivo da sola non sia sufficiente a permettere un adeguamento autonomo (coerente con le esigenze dell'istruzione in Fisica) delle conoscenze degli allievi. Tale strategia va affiancata e potenziata tramite la predisposizione di ulteriori attività di supporto e di rinforzo, finalizzate, da un lato a facilitare la risoluzione dei conflitti, dall'altro a promuovere un graduale avvicinamento tra conoscenze degli allievi e sapere scientifico.

Ciò ha reso necessario coniugare le strategie di tipo psico – cognitivo, descritte prima, ad altri approcci pedagogici, di tipo *epistemico*, maggiormente centrati sui contenuti e su gli aspetti procedurali della disciplina. Tali tipi di approccio utilizzano come fattori trainanti per l'apprendimento aspetti delle conoscenze scientifiche. L'aspetto disciplinare utilizzato per favorire

l'apprendimento sono le procedure centrate sulla costruzione e sull'uso dei modelli (modelling).

Come rappresentato schematicamente in figura 2.3, l'approccio pedagogico utilizzato in questa tesi coniuga, dunque, la prospettiva psico – cognitiva, focalizzata sulle relazioni tra conoscenza individuale e mondo materiale, con la prospettiva epistemica, focalizzata sulle relazioni tra sapere scientifico e mondo naturale.

Figura 2.3



In tale approccio il riferimento alla realtà dei fenomeni (attuato tramite osservazioni qualitative ed esperimenti quantitativi) costituisce il tramite mediante il quale *attivare* il processo di avvicinamento tra conoscenze individuali e conoscenze scientifiche. Tale processo viene, dunque, *attuato* tramite l'uso delle strategie di modelling.

In particolare, come sarà meglio precisato in seguito, sulla base di tali premesse, è stato progettato un ciclo didattico caratterizzato, da un lato, da una graduale attività di costruzione di modelli, basata sulle informazioni derivate dalle osservazioni sperimentali, dall'altro, da una graduale modifica di tali modelli, motivata dalla necessità di ricomporre i conflitti tra conseguenze del modello ed osservazioni sperimentali via via effettuate. In tal senso, le strategie ed il ciclo didattico che caratterizzano il progetto possono essere riguardate come una diretta conseguenza della teoria dell'adattamento di Piaget integrata con attività di supporto e mediazione di derivazione Vygotskiana: esso, infatti, implementa il

processo sviluppo della conoscenza descritto da Piaget, processo che si verifica grazie al continuo confronto tra strutture interne di conoscenza (modello “mentale” microscopico della conduzione) e le informazioni che provengono realtà (osservazioni sperimentali + attività di mediazione e supporto), intesa non soltanto come realtà naturale ma anche sociale.

2.3.4 Risorse cognitive elementari e classi di coordinazione come strumenti d'analisi

L'attenzione al processo d'apprendimento che caratterizza la pedagogia costruttivista, ha stimolato la ricerca sui meccanismi di ragionamento e sulle risorse cognitive implicati nell'apprendimento della Fisica.

Abbiamo visto che nel campo della ricerca educativa grande enfasi è stata posta ai problemi connessi con l'individuazione delle difficoltà d'apprendimento. Queste sono state caratterizzate in diversi modi, misconcezioni, conoscenze spontanee, difficoltà di tipo ontologico (Chi, 1992; Reiner et al. 2000), o di tipo epistemologico (Vosniadou et al, 2002). Nonostante l'importanza fondamentale che tali ricerche hanno avuto e continuano ad avere al fine di orientare lo sviluppo di più efficaci modalità di istruzione, tuttavia esse mostrano diversi limiti. Innanzitutto, tali studi sono prettamente descrittivi e non permettono di interpretare le risorse procedurali e i meccanismi cognitivi che gli allievi usano per attivare la comprensione. Inoltre, non permettono di spiegare la dipendenza dal contesto dei ragionamenti e delle interpretazioni degli allievi (Hammer, 1996; Smith, diSessa and Roschelle, 1993), per esempio, il fatto, dedotto da studi empirici, che domande equivalenti, poste in modo diverso ad uno stesso allievo, possono indurre risposte sostanzialmente diverse (Steinberg and Sabella, 1997).

Al fine di colmare le lacune dei modelli descrittivi (quale l'idea di misconcezione), in tempi più recenti, sono stati proposti modelli esplicativi per l'interpretazione dei processi cognitivi implicati nell'apprendimento. Tali modelli tentano d'interpretare i processi cognitivi utilizzando diversi e più profondi livelli di descrizione. Al livello di descrizione più basso è stata introdotta l'idea di *blocco elementare di conoscenza*, ovvero risorse cognitive di basso livello, molto più delimitate (ma, al tempo stesso, utilizzate in modo meno specifico) delle

misconcezioni. Tali blocchi elementari sono stati caratterizzati in vario modo; ad esempio, *p-primes* (phenomenological primitives) (diSessa, 1993), *facet of knowledge* (sfaccettature di conoscenza) (Minstrell, 1992), regole intuitive (Tirosh et al., 1998), *reasoning resources* (risorse di ragionamento) (Hammer, 2000). Mentre le misconcezioni sono componenti relativamente complesse di una struttura cognitiva non coerente col sapere esperto, i blocchi elementari di conoscenza sono posseduti sia dagli esperti che dagli individui non esperti. Un blocco elementare non è di per sé né corretto, né errato, in quanto la sua l'adeguatezza dipende dal contesto in cui viene usato.

In particolare, per descrivere lo sviluppo della conoscenza intuitiva degli allievi in Fisica, diSessa (1993) propone una teoria di “conoscenza in pezzi”. Tale teoria introduce ipotetiche strutture di conoscenza, chiamate primitive fenomenologiche o p-prims. Le p-prims sono le più piccole e indivisibili unità di ragionamento che possono essere richiamate da un individuo. L'attributo fenomenologico, usato per descrivere queste unità, intende indicare che esse sono create e rinforzate dall'esperienza e non attraverso il ragionamento astratto.

Una delle *p-prim* individuate da diSessa è stata nominata *closer means more* (più vicino significa di più). Tale blocco primitivo è adeguato se usato per descrivere l'intensità luminosa al variare della distanza dalla sorgente, ma risulta inadeguato, ad esempio, se usato per prevedere la distanza tra la Terra e il Sole in estate (Redish, 2004). Ciò che distingue un esperto da un non esperto è, dunque, il tipo di p-prims attivate e il modo in cui queste vengono coordinate in relazione ad un dato contesto fenomenologico.

Una p-prims che ha rilevanza in relazione alla presente ricerca è la cosiddetta *p-prim di Ohm* (*Ohm's p-prim*). Tale primitiva consta di tre elementi un impetus (sforzo), una resistenza e un risultato. La rete causale sottesa da questa primitiva è: più sforzo implica più risultato, più resistenza implica meno risultato. Tale primitiva può essere applicata non soltanto a circuiti elettrici ma anche a diversi contesti fenomenologici, ad esempio, all'attrito. Come vedremo, l'attivazione da parte di alcuni allievi di tale p-prim, nel contesto dell'interpretazione microscopica dei fenomeni di conduzione, conduce all'idea

che la resistenza elettrica è una forza d'attrito (idea rinforzata dal fatto che così come in un conduttore si dissipa energia, anche la forza d'attrito dissipa energia).

Mentre le p-prims rappresentano risorse cognitive elementari (di dimensione più piccola possibile), diSessa, nel tentativo di fornire una definizione operativa del concetto di “concetto fisico”, introduce un'altra struttura di conoscenza, più complessa, denominata “classe di coordinazione” (diSessa e Sherin, 1998). Le classi di coordinazione rappresentano sistemi complessi che costituiscono modelli di un certo tipo di concetto scientifico (quale, ad esempio, quello di forza, di attrito, di sostanza) definiti, piuttosto che in termini di relazioni semantiche con elementi esterni (altri concetti), in termini di elementi che ne caratterizzano la struttura interna.

Il termine coordinazione è utilizzato in una doppia accezione. Secondo diSessa, infatti, una classe di coordinazione svolge due funzioni cognitive: quella di organizzare (coordinare) le informazioni estratte in relazione ad una data situazione e quella di riconoscere la stessa informazione (ossia lo stesso concetto) in situazioni diverse.

Una classe di coordinazione consiste di due diversi elementi: le strategie di lettura (*readout strategies*) e reti causali (*causal nets*).

Le strategie di lettura “sono i modi con cui le persone focalizzano la loro attenzione ed estraggono le informazioni rilevanti dal mondo”, mentre le reti causali sono l'insieme delle possibili inferenze che possono essere effettuate a partire dalle informazioni disponibili (Levrini e diSessa 2008).

DiSessa e Wagner (2005) identificano due possibili cause di difficoltà nello sviluppo di una classe di coordinazione, l'estensione (*span*) e l'allineamento (*alignment*). Lo span attiene la capacità di utilizzare un concetto in differenti contesti in cui il concetto è applicabile. Ad esempio, un allievo che trasferisce il concetto di attrito dal dominio macroscopico a quello microscopico incrementa l'estensione della classe di coordinazione “attrito”, ma in modo poco funzionale, mentre un allievo che trasferisce il concetto di disordine dal dominio microscopico dei gas al modello microscopico della conduzione elettrica estende la classe “disordine” in modo produttivo.

L'allineamento rappresenta la capacità di leggere la stessa informazione da una varietà di contesti, indipendentemente dalle strategie di lettura e inferenza utilizzate.

I concetti di classe di coordinazione e di p-prims (che costituiscono le reti causali delle classi coordinazione) costituiscono utili strumenti operativi per l'analisi dei comportamenti cognitivi degli allievi in risposta a particolari sollecitazioni didattiche. Tali strumenti d'analisi concettuale sono stati utilizzati per caratterizzare e confrontare gli schemi d'interpretazione costruiti dagli allievi in relazione a particolari momenti dell'interazione didattica.

2.4 Modelli mentali, modelli scientifici e modelling

2.4.1 Modelli mentali

Lo studio dei *modelli mentali* è stato e continua ad essere uno dei più dinamici settori di ricerca in psicologia cognitiva e in scienze dell'educazione. Il termine modello mentale è stato introdotto per la prima volta da Johnson-Laird (1983). Secondo tale studioso “i modelli mentali sono analoghi strutturali del mondo così come percepito o concettualizzato”. Gentner and Stevens (1983) arguiscono che “i modelli mentali sono correlati alla conoscenza umana del mondo e a come esso lavora”, cioè, al modo in cui le persone comprendono un certo dominio di conoscenza. Per Gilbert e Boulter (1998) un modello mentale “è una rappresentazione di un target che può essere un oggetto, un evento, un processo o un sistema”, mentre Vosniadou (1994) sostiene che “i modelli mentali siano un particolare tipo di rappresentazione mentale, una rappresentazione analogica, che gli individui generano durante il processo cognitivo”. In particolare egli rileva che, al fine di operare una riconciliazione tra i modelli ingenui iniziali e l'evidenze su cui si fonda il modello “corretto”, durante l'apprendimento, un discente possa generare modelli mentali “ibridi”. Un modello mentale di questo tipo contiene alcuni elementi corretti, che permettono una adeguata comprensione del fenomeno, sebbene mantenga inalterata gran parte del sistema di conoscenze

pregresse. A simili conclusioni perviene Thornton (1995), nel quadro di uno studio finalizzato ad esplorare i processi dinamici attraverso i quali le rappresentazioni mentali di un concetto fisico si trasformano in apprendimento. In particolare, egli utilizza il termine *student views* per identificare le differenti interpretazioni di un stesso concetto fisico. La ricerca di Thornton evidenzia che gli studenti possiedono diversi punti di vista (*views*) che coesistono durante l'istruzione. Tale mescolamento di punti di vista è stato chiamato "stato di transizione" (*transitional state*).

L'idea di "mescolamento di concetti" è presente anche in altre ricerche: Bao e Redish (2001), ad esempio, descrivono tale processo in termini di "mixed model state", mentre Hrepic (2002) in termini di "ibridizzazione".

Alcuni dei risultati ottenuti nell'ambito della presente ricerca possono essere interpretati in termini del concetto di "modello di transizione". L'analisi delle dinamiche d'apprendimento evidenzia, infatti, che l'attivazione di un conflitto cognitivo induce in alcuni allievi uno stato di "instabilità" cognitiva, che si manifesta attraverso la generazione "in vivo" di modelli e schemi d'interpretazione in cui le vecchie conoscenze si fondono con quelle costruite sulla base delle nuove informazioni. Come vedremo, l'attivazione di tali instabili modelli di transizione rappresenta, spesso, un elemento precursore del cambiamento concettuale.

2.4.2 Caratteristiche strutturali e funzionali dei modelli mentali

Un altro aspetto rilevante, relativo alle caratteristiche dei modelli mentali, è stato introdotto da diSessa (1988). Egli distingue tra una conoscenza di un determinato sistema di tipo *strutturale* ("che cosa è...") ed una conoscenza *funzionale* ("come fa a ..."). La conoscenza strutturale (che probabilmente richiede l'attivazione di risorse mnemoniche) fornisce una comprensione accurata della struttura interna del sistema, mentre una conoscenza funzionale (che implica l'attivazione di risorse procedurali) si riferisce a quelle particolari proprietà del sistema richieste per realizzare un compito specifico, relativo, ad esempio, all'interpretazione o alla previsione dell'evoluzione del sistema.

Torneremo in seguito sulla tale questione. Per il momento riteniamo utile osservare che una possibile estensione di tali concetti è che un modello spontaneo possa essere caratterizzato in un duplice modo: in termini di struttura o in termini di funzionalità esplicativa e predittiva. Come verrà illustrato in seguito, un analogo tipo di separazione, tra caratteristiche strutturali e funzionali (*potenziale esplicativo*), può essere applicata anche ai modelli scientifici. Sulla base di tali presupposti è stata progettata e implementata una metodologia di analisi dei dati sperimentali che si è rivelata estremamente efficace, sia perché ha permesso di caratterizzare, in modo accurato, l'evoluzione delle conoscenze degli allievi, sia perché ha permesso di stimare la distanza tra conoscenze individuali e conoscenze scientifiche e il modo in cui essa si è modificata a seguito degli interventi formativi sperimentati.

In ultima analisi, i diversi punti di vista sui modelli mentali possono essere sintetizzati affermando che un modello mentale è una rappresentazione interna di un aspetto dell'ambiente, che l'uomo crea attraverso l'interazione con esso. Una delle funzioni di tale rappresentazione è quella di interpretare l'ambiente in modo da adattarsi, anticipandoli, ai suoi cambiamenti. Tale rappresentazione contiene informazioni di tipo strutturale, riguardanti le proprietà di un sistema, ma anche una conoscenza di tipo funzionale alle azioni da compiere per eseguire un dato compito. Nonostante tali modelli possano risultare incompleti, instabili e confusi, essi possono essere impiegati nella progettazione didattica e nell'interpretazione dei comportamenti degli allievi.

2.4.3 Modelli scientifici

Negli ultimi anni, la ricerca didattica centrata sull'uso e lo sviluppo di modelli (modelling) ha assunto una rilevanza progressivamente maggiore. Le questioni metodologiche ed epistemologiche legate all'uso dei modelli ed al modelling sono direttamente connesse con i problemi filosofici che attengono le relazioni tra teorie fisiche e la conoscenza del mondo, così come derivata dalla percezione o dagli esperimenti.

Secondo una visione tradizionale i modelli scientifici rappresentano strutture matematiche che costituiscono il tessuto connettivo delle teorie fisiche (Giere, 1988). In tempi più recenti, tale visione è stata contestata e l'idea che i modelli svolgano il ruolo di strumenti concettuali che mediano tra la teoria e le evidenze sperimentali è, adesso, ampiamente condivisa (Morrison e Morgan, 1999). Tale visione dei modelli scientifici è rappresentata in modo schematico in figura 2.4. Essa illustra le relazioni che intercorrono fra i tre diversi mondi che intervengono in tale visione: il mondo delle teorie fisiche, il mondo dei modelli e il mondo dei fenomeni naturali.

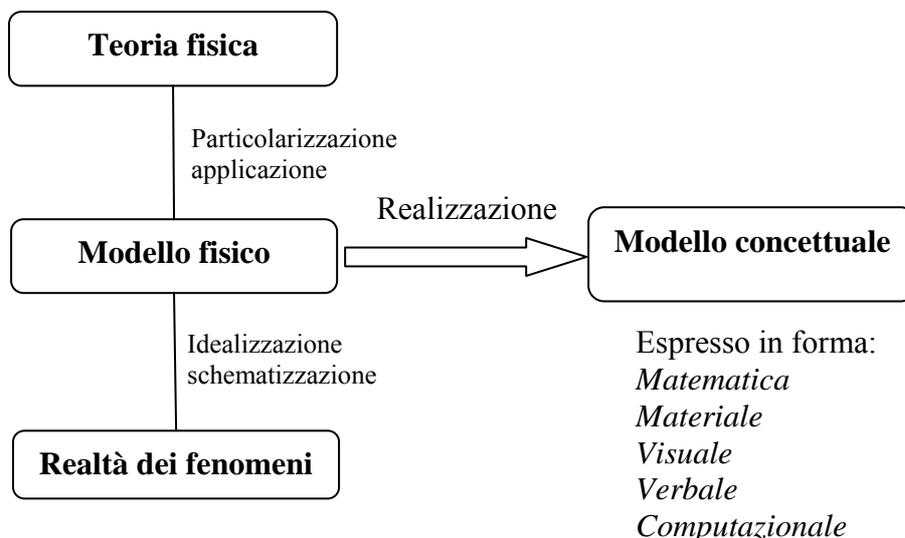


Figura 2.4

Nell'ambito di tale quadro interpretativo, la Fisica può essere considerata un insieme di teorie che rappresentano delle formulazioni astratte prodotte e accettate dalla comunità dei fisici, in accordo a regole condivise (come i principi di conservazione e le regole matematiche). Tuttavia, il contenuto semantico di una teoria non si riferisce a un sistema, un oggetto o un evento percepito attraverso l'osservazione diretta: la relazione tra la teoria e la realtà è sempre mediata da un modello fisico (Greca e Moreira, 2000, 2002). In altri termini, quando le affermazioni di una teoria sono riferite a un sistema o ad un fenomeno fisico

semplificato e idealizzato, la descrizione che ne risulta è un modello fisico: *modello* in quanto rappresentazione semplificata e idealizzata, *fisico* in quanto rappresentazione di un aspetto della realtà.

Tuttavia le relazioni tra teoria, modello e realtà sono complesse. Infatti, affinché le affermazioni che discendono dalla teoria possano essere confrontate con la realtà dei fenomeni, è necessario che le osservazioni sperimentali siano trasformate, usando delle appropriate regole statistiche, al fine di produrre un modello empirico (ossia una legge sperimentale). In questo modo le previsioni del modello fisico, espresse in forma compatibile con le leggi sperimentali (ad esempio, grafica o matematica), possono essere confrontate con la realtà fenomenologica che il modello intende rappresentare. Il modello, dunque, costituisce lo strumento mediante il quale la teoria e la realtà possono “incontrarsi”. Osserviamo che, nell’ambito di tale interpretazione, il rapporto tra realtà e teoria, che si realizza attraverso il modello, implica un processo bidirezionale: il confronto tra previsioni del modello e fenomeno rende, spesso, necessari ripetuti riadattamenti sia delle formulazioni teoriche che delle condizioni sperimentali.

2.4.4 Approccio al modelling utilizzato in questa ricerca

Il modelling può essere considerato l’insieme dei processi e dei metodi utilizzati dai fisici per costruire ed utilizzare i modelli al fine di correlare e accordare le affermazioni teoriche con la realtà dei fenomeni. Poiché è opinione condivisa che la finalità generale della Fisica sia per l’appunto quella di interpretare e prevedere il comportamento della realtà naturale, si comprende la rilevanza del modelling, sia sotto il profilo scientifico che didattico.

Focalizzando l’attenzione sugli aspetti didattici, osserviamo che le ricerche sui processi cognitivi e l’analisi epistemologica della disciplina hanno evidenziato che approcci basati sulla costruzione e l’uso dei modelli rappresenta un’efficace risorsa per la progettazione di interventi formativi significativi per il discenti.

Al fine di chiarire i criteri che ispirano il tipo di approccio didattico, centrato sul modelling, utilizzato in questa ricerca, è utile riferirsi alla figura 2.5. Essa riporta alcuni degli aspetti connessi al processo di costruzione ed uso dei modelli, illustrati nel paragrafo precedente. La freccia bidirezionale indica due possibili approcci didattici. Il primo (dall'alto verso il basso) si riferisce ad un processo di tipo deduttivo che parte dai principi generali (teorie) per pervenire successivamente a specifiche previsioni empiriche (viste come applicazioni); mentre il secondo si riferisce a un processo di costruzione della conoscenza scientifica per mezzo della costruzione di modelli (a differenti livelli di astrazione) a partire dalle informazioni provenienti dal campo delle esperienze sensibili.

Come vedremo l'approccio utilizzato in questa tesi utilizza, integrandoli, entrambi i processi. In particolare esso, implementando un processo ciclico, prende le mosse dall'osservazione dei fenomeni, al fine di raccogliere le informazioni necessarie a costruire una prima versione del modello, ma ritorna alla realtà dei fenomeni, al fine di attuare un graduale processo di perfezionamento del modello.

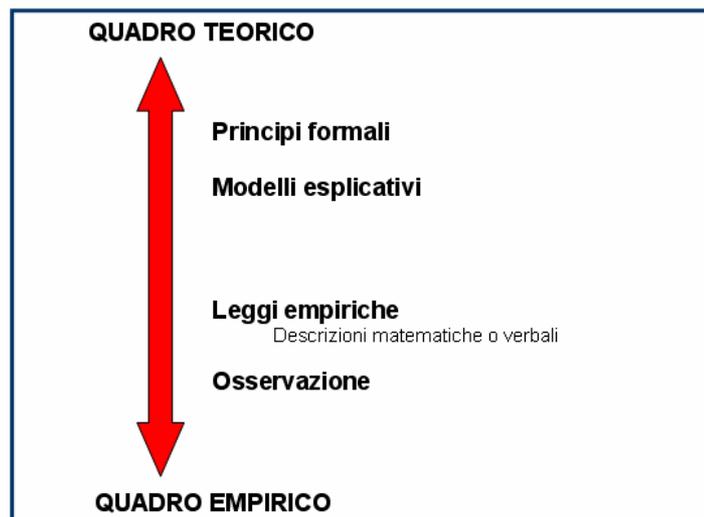


Figura 2.5

2.4.5 Precisazione dell'approccio pedagogico e dei criteri d'analisi alla luce delle ricerche sui modelli

Alla luce della discussione riguardante il ruolo dei modelli scientifici e dei modelli mentali per l'interpretazione delle connessioni tra realtà e conoscenza (sia individuale che collettiva), siamo in grado di precisare il quadro teorico su cui si fonda l'approccio pedagogico utilizzato in questa ricerca.

In particolare, abbiamo visto che sia i modelli mentali, sia i modelli scientifici assolvono una medesima funzione: essi rappresentano lo strumento mediante il quale le più ampie strutture di conoscenza (quella individuale e quella collettiva) vengono poste in comunicazione con la realtà e vengono modificate da essa. Infatti, sia modelli scientifici che i modelli mentali svolgono la funzione di interpretare e prevedere l'evoluzione dei fenomeni, ma eventuali discrepanze tra andamenti attesi ed andamenti osservati vengono utilizzati (dalla comunità degli scienziati in un caso, dall'individuo nell'altro) per modificare le conoscenze sul mondo.

Tali considerazioni permettono di precisare le basi su cui poggia l'approccio pedagogico illustrato nel paragrafo 2.3.3 e rappresentato nella precedente figura 2.3. Infatti, così come rappresentato in figura 2.6, l'avvicinamento tra conoscenze individuali e conoscenza scientifica può essere realizzato operando a livello di modelli, cioè, attraverso un progressivo avvicinamento del modello scientifico e del modello mentale (relativo all'ambito di contenuti d'interesse).

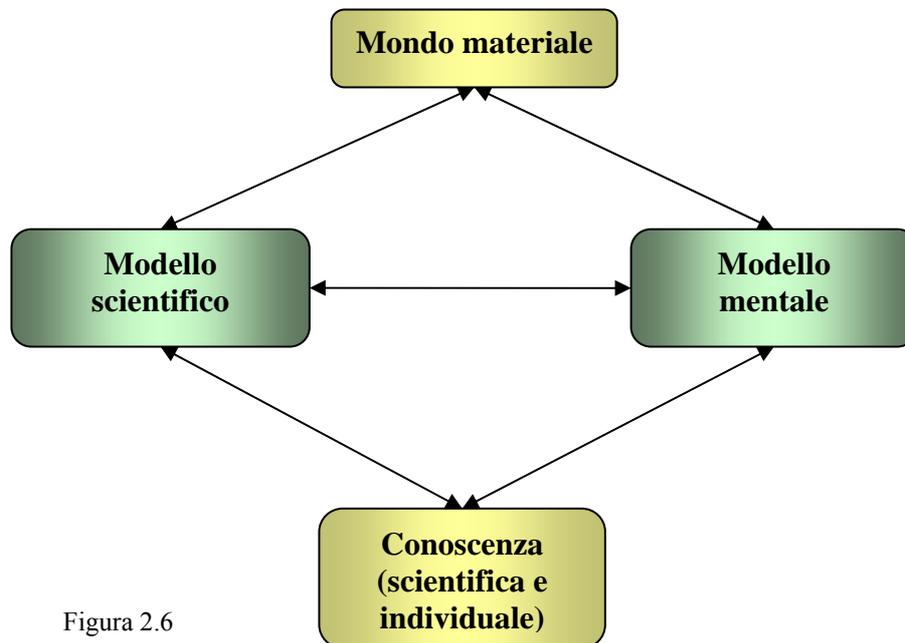


Figura 2.6

Le analogie e tra modelli scientifici e modelli individuali non riguardano soltanto le relazioni tra mondo delle conoscenze e mondo dei fenomeni, ma possono essere estese ad altre caratteristiche. Riteniamo, in particolare, che, in modo analogo a quanto abbiamo fatto per i modelli mentali, anche i modelli scientifici possano essere descritti in termini di caratteristiche strutturali e funzionali. Le caratteristiche strutturali riguardano le componenti del modello scientifico (ovvero gli oggetti o le classi di oggetti da cui esso è composto, le loro proprietà e le reciproche relazioni). Le caratteristiche funzionali sono, invece, connesse con il *potenziale esplicativo* del modello, ossia con il set di fenomeni e processi naturali che il modello permette di interpretare e/o prevedere. In tal senso, i modelli scientifici e quelli individuali possono essere confrontati sulla base di un duplice criterio: in termini di *struttura* e in termini di *funzionalità*. La constatazione di tale duplice possibilità di confronto costituisce il presupposto che ha ispirato la definizione di uno dei principali metodi di analisi utilizzati nella presente ricerca. Tale metodo sarà illustrato nel dettaglio nel paragrafo 2.7.2 ed esemplificato nell'ambito dei capitoli dedicati alle indagini sperimentali.

2.4.6 Strumenti didattici per il modelling

Al fine di far emergere un'immagine realistica della scienza, a tutti i livelli di formazione, è opportuno privilegiare percorsi didattici in cui il processo di costruzione di modelli sia alternato e integrato con procedure di tipo sperimentale. Negli ultimi anni, inoltre, si è affermato l'utilizzo di ambienti didattici basati su l'uso di strumenti informatici e computazionali. Tali strumenti sono utilizzati al fine di offrire un supporto per le attività di esplorazione, sperimentazione e modellizzazione. Tuttavia, essi non vanno considerati un semplice riadattamento di contenuti noti in una veste esteriore nuova, quanto piuttosto un'occasione per proporre metodologie di insegnamento alternative. Ad esempio, l'uso di tali tecnologie può permettere al discente di ragionare sui concetti da differenti punti di vista e al docente di trattare argomenti che risulterebbero improponibili senza l'uso di queste tecnologie. Più in generale, l'uso degli strumenti informatici nella didattica implica un sostanziale ripensamento del ruolo del docente e delle strategie didattiche.

I supporti disponibili finalizzati al modelling sono molteplici, alcuni di essi saranno descritti nel cap. 3. Una preliminare classificazione dei vantaggi didattici che tali supporti possono offrire è riportata di seguito:

- permettere la visualizzazione della struttura, dei processi d'interazione e dell'evoluzione dei modelli
- evidenziare modelli che rendano la fisica più accessibile
- alleggerire il peso delle difficoltà legate alla matematica (modelli di sistemi complessi possono essere resi maggiormente comprensibili se vengono elaborati senza fare ricorso al formalismo del calcolo)
- focalizzare il ragionamento qualitativo con i modelli facilitando (e motivando) il passaggio ad interpretazioni quantitative
- Favorire la comprensione delle relazioni tra processi microscopici e fenomeni emergenti a livello macroscopico.

Nell'ambito della presente ricerca sono stati progettati e sperimentati diversi supporti didattici basati sulle tecnologie informatiche. Alcuni di essi

rappresentano dei completi ambienti d'insegnamento/apprendimento che consentono di simulare e visualizzare le proprietà e l'evoluzione di modelli microscopici della conduzione elettrica alternativi. Essi permettono, inoltre, di eseguire esperimenti virtuali da confrontare con gli esiti di esperimenti reali. Tali strumenti saranno descritti nel dettaglio nel cap. 3.

2.5 Metodologia di ricerca

Le motivazioni che storicamente hanno stimolato la ricerca educativa sono due: comprendere come gli individui imparano, in particolare nei contesti di istruzione; progettare percorsi formativi e soluzioni didattiche che possano favorire efficacemente l'apprendimento. Se in passato questi due obiettivi generali hanno dato origine a due diverse linee di ricerca che si sono mosse su binari paralleli (ma interagenti), in tempi più recenti si sono sviluppate e progressivamente sistematizzate diverse metodologie d'indagine che poggiano su entrambe le motivazioni. Di tali approcci sono state proposte diverse versioni (che, in molti casi, differiscono soltanto nel nome). Essi condividono, oltre agli obiettivi generali anzi detti, il fatto che presentano una forte connotazione progettuale, operativa e pragmatica, sono, cioè, centrati sulla progettazione e la sperimentazione di un concreto "prodotto" didattico in contesti formativi autentici (*naturalistici*).

In questo paragrafo descriveremo gli elementi che caratterizzano due diverse proposte metodologiche di tipo progettuale che hanno raggiunto una relativa maturità: la *ricerca basata su progetti* (*Design Based Research: DBR*) e la ricerca orientata alla produzione di *sequenze d'insegnamento/apprendimento* (*teaching/learning sequences*). Entrambe le metodologie si inseriscono nel solco della Ricerca Azione e tale comune origine fa sì che esse evidenzino diversi punti di contatto.

A partire da questa analisi sarà, dunque, illustrato l'approccio metodologico che caratterizza la presente ricerca.

2.5.1 La ricerca basata su progetti

Le basi teoriche e metodologiche della DBR possono essere ricavate dai report del gruppo di lavoro denominato *Design-Based Research Collective*³ e da alcuni speciali⁴ dedicati a tale metodologia.

Il gruppo di lavoro precisa che la DBR si basa sulle cinque caratteristiche illustrate di seguito.

1. La DBR si pone due obiettivi: progettare ambienti di apprendimento e sviluppare teorie o «prototeorie» dell'apprendimento. Tali obiettivi sono strettamente interconnessi.
2. Lo sviluppo e l'attuazione del progetto e la ricerca che scaturisce dal controllo delle sue qualità hanno luogo attraverso continui cicli di progettazione, attuazione, analisi e riprogettazione (Cobb, 2001; Collins, 1992).
3. La ricerca progettuale deve condurre a teorie condivisibili che aiutino a comunicare agli operatori e ai progettisti informazioni rilevanti sia sotto il profilo della progettazione che delle implicazioni educative.
4. La ricerca deve render conto di come il progetto funziona in scenari autentici (naturalistici). Essa deve documentare non soltanto successi e fallimenti, ma deve anche focalizzare l'attenzione sulle interazioni che possano affinare la nostra comprensione delle problematiche d'apprendimento coinvolte.
5. Lo sviluppo delle rendicontazioni deve basarsi su metodi che documentino e colleghino processi di attuazione del progetto didattico con risultati pertinenti.

Dall'esame di tali caratteristiche emergono i lineamenti, le ipotesi, ma anche alcune soluzioni operative, su cui tale metodologia fonda le sue basi. Innanzitutto vi è il riconoscimento della natura complessa del processo d'insegnamento/apprendimento. Tale complessità è il frutto delle interazioni che

³ Informazioni sul gruppo di lavoro, sulle sue attività si possono trovare sul sito www.designbasedresearch.org.

⁴ Si veda, ad esempio, *Educational Researcher*, 32(1) (2003); *The Journal of Learning Sciences*, 13(1), (2005)

coinvolgono un gran numero di variabili. Tali variabili caratterizzano sia il contesto sociale (il gruppo di allievi e il contesto più generale cui essi appartengono) cui sono rivolti gli interventi educativi, sia il progetto didattico, sia i soggetti che hanno il compito di gestire e applicare il progetto in pratica (insegnanti, ricercatori). La consapevolezza della natura irriducibile delle interazioni tra le diverse variabili in gioco implica diverse conseguenze. In primo luogo, il riconoscimento dell'influenza critica del particolare contesto sugli esiti degli interventi formativi. Da ciò discende la necessità di un accurata valutazione e discriminazione dei risultati che dipendono dal particolare contesto e di quelli che sono, invece, generalizzabili.

In secondo luogo, la necessità di implementare metodologie di analisi che possano rendere conto delle interazioni tra le numerose variabili in gioco.

Da tutto ciò deriva la circostanza che tale metodologia tende a privilegiare criteri di valutazione di tipo interno⁵, piuttosto che esterno (basati, ad esempio, sul confronto con un gruppo di controllo). Inoltre, la complessità delle interazioni in gioco impone la necessità di predisporre un diversificato set di strumenti di analisi e controllo dell'apprendimento (sia quantitativi che qualitativi).

Un altro aspetto che caratterizza esplicitamente la DBR è il suo carattere *intenzionale*, ovvero il fatto che l'implementazione dell'ambiente didattico si prefigge lo scopo di perturbare significativamente il contesto in cui è applicato, in modo da produrre delle modificazioni misurabili. L'analisi di tali modificazioni permette da un lato di valutare l'efficacia delle soluzioni didattiche, dall'altro di accrescere le conoscenze teoriche sui processi d'insegnamento/apprendimento.

Un'ultima caratteristica riguarda la flessibilità. Il progetto da mettere in atto non è rigido bensì flessibile, in quanto può subire adattamenti sulla base dei riscontri sperimentali. L'esigenza di flessibilità determina anche la natura ciclica delle metodologie che si concretizza nella caratteristica descritta al precedente punto 2.

⁵ Un tipico criterio interno si basa su un'analisi della discrepanza tra ipotesi pedagogiche ed effetti ipotizzati dell'intervento ed effetti misurati.

E' utile sottolineare che un ambito d'applicazione particolarmente diffuso della DBR riguarda la costruzione di ambienti di apprendimento centrati sull'uso delle tecnologie della comunicazione e dell'informazione. A tal riguardo K.D Squire (2005) ha sottolineato il contributo determinante che le ricerche basate su tale metodologia stanno fornendo in termini di precisazione dei collegamenti tra quadri teorici ed esigenze della pratica didattica.

Alcuni degli aspetti descritti in questa breve panoramica riguardante la ricerca basata su progetti saranno estesi ed approfonditi nel paragrafo 2.5.3, adattandoli alle esigenze della presente ricerca.

2.5.2 Le teaching/learning sequences

Un altro approccio che coniuga l'esigenza di conseguire avanzamenti teorici sui processi d'insegnamento e apprendimento con le esigenze legate alla formulazione di proposte didattiche concretamente spendibili, è la metodologia centrata sull'idea di sequenza d'insegnamento/d'apprendimento.

Tale metodologia, che a nostro parere ha diversi punti in comune con la DBR, si inserisce nel contesto di una tradizione di ricerca educativa focalizzata sull'analisi delle problematiche d'insegnamento e apprendimento a livello *micro* (singole sessioni) o a livello *medio* (sequenze centrata su un singolo argomento), anziché a livello *macro* (curriculare) (Méheut e Psillos, 2004).

Una caratteristica distintiva di tali attività e prodotti pedagogici è la loro natura duale: la loro progettazione, che tiene conto degli stretti legami tra l'insegnamento e l'apprendimento in relazione ad un particolare argomento, implementa sia esigenze di ricerca teorica sia l'esigenza di sviluppo di prodotti didattici. In tal senso le sequenze d'insegnamento rappresentano sia strumenti di ricerca educativa, sia innovazioni finalizzate a risolvere un problema d'apprendimento relativo ad un circoscritto contesto di contenuti disciplinari.

Nell'ambito delle scienze dell'educazione i problemi relativi al tipo di ricerca che può essere condotta utilizzando le sequenze d'insegnamento sono stati portati all'attenzione della comunità di ricerca europea da Lijnse (1994, 1995). Egli sostiene che attività di questo tipo possono essere riguardate come una sorta

di “ricerca evolutiva” (“developmental research”) che implica la progettazione, lo sviluppo e l’applicazione di una sequenza d’insegnamento relativa a contenuti specifici, che dura poche settimane, e che implica un processo ciclico evolutivo illuminato da un ricco repertorio di dati di ricerca. In tale caratteristica ciclica ed evolutiva delle sequenze d’insegnamento/apprendimento ritroviamo strette similitudini con la DBR descritta prima.

Subito dopo Lijnse, Kattmann (1995) presenta un quadro di riferimento progettuale relativo all’elaborazione e all’ottimizzazione delle sequenze d’insegnamento/apprendimento in termini di “Ricostruzione Educativa” (“Educational Reconstruction”). Un altro approccio metodologico relativo alla progettazione delle sequenze è stato suggerito da Artigue (1988), nell’ambito della didattica della matematica. Tale quadro metodologico, noto con il nome di “Ingegneria Didattica” (“Ingenierie Didactique”), focalizza l’attenzione sull’analisi epistemologica *a priori* dei contenuti da insegnare. L’Ingegneria Didattica e la Ricostruzione Educativa hanno diversi punti in comune. Le caratteristiche di tali approcci progettuali saranno descritti nel paragrafo successivo, in quanto rappresentano le principali fonti che hanno ispirato il metodo di progettazione didattica utilizzato in questa tesi.

Sebbene diversi nomi siano stati usati in passato, i termini “Percorsi d’insegnamento/apprendimento” (TLP) e sequenze d’insegnamento/apprendimento” (TLS) (che rappresentano singole componenti dei percorsi), sono adesso comunemente utilizzati per denotare approcci che tengono conto dello stretto legame tra l’insegnamento proposto e l’apprendimento atteso e che sono orientati alla progettazione di sequenze didattiche relative ad uno specifico argomento disciplinare e fondate sui risultati della ricerca (Psillos and Méheut, 2001).

Un TLP e, in modo più specifico una TLS, sono simultaneamente una attività di ricerca di tipo “intenzionale” (si veda paragrafo precedente) e un prodotto (simile ad una tradizionale unità d’apprendimento), che includono attività d’insegnamento e apprendimento basate sulla ricerca e adattate empiricamente alle risorse dello studente. Vi sono, inoltre, alcune considerazioni

che influenzano, in modo più o meno significativo, lo sviluppo di una TLS: concezioni spontanee degli studenti, aspetti relativi allo specifico dominio scientifico, assunzioni epistemologiche, prospettive d'apprendimento, approcci pedagogici innovativi e aspetti del particolare contesto operativo.

Un'altra significativa caratteristica di una TLS è la sua inclusione in un graduale processo di sviluppo evolutivo finalizzato a ridurre il gap tra la prospettiva scientifica e quella individuale (dello studente).

Da questa breve caratterizzazione delle DBR e della ricerca centrata sulle TLS emergono più similitudini che differenze. Riteniamo che le differenze di maggiore rilievo riguardano soltanto due aspetti: il tipo di tematiche di intervento e l'enfaticizzazione dell'influenza del contesto. In relazione al primo aspetto osserviamo che mentre le TLS sono maggiormente focalizzate su un limitato contesto di contenuti disciplinari, le aree d'interesse della DBR sono più trasversali e meno delimitate, includendo aspetti legati all'innovazione dell'organizzazione dei sistemi formativi o aspetti legati alla motivazione, anche in situazioni di disagio socio-culturale. In relazione al secondo aspetto osserviamo la grande enfaticizzazione, nella DBR, della necessità di abbracciare, piuttosto che tentare di ridurre, la complessa natura dei problemi legati all'insegnamento e all'apprendimento ed il conseguente riconoscimento dell'estrema difficoltà insita nella possibilità di generalizzare i risultati di un esperimento d'insegnamento.

2.5.3 Requisiti di progetto e definizione della metodologia di ricerca

Come delineato nell'introduzione, il progetto di ricerca discusso in questa tesi si propone di formulare e validare un progetto didattico (relativo ai modelli microscopici dei solidi e alla proprietà elettriche della materia) che sia concretamente spendibile in scenari formativi naturalistici e variabili.

Usiamo il termine "scenari naturalistici" intendendo riferirci al fatto che i contesti d'istruzione e i gruppi di allievi coinvolti nel progetto non sono selezionati preventivamente, sulla base di opportuni requisiti funzionali all'intervento o agli obiettivi della ricerca, ma fanno parte della realtà scolastica così come essa è.

La variabilità è legata sia al grado d'istruzione sia alla natura degli allievi. E' evidente che tale variabilità presenta dei limiti. Tali limiti riguardano le conoscenze di base che gli allievi devono possedere. In particolare, essi devono avere affrontato i contenuti tradizionalmente inclusi nei curricula di meccanica classica, di termodinamica (inclusa la teoria cinetica dei gas) e i contenuti di elettrostatica da un punto di vista macroscopico. Ciò limita la variabilità del target, che può andare dagli ultimi anni del liceo, all'istruzione universitaria o post-universitaria non specialistica (ad esempio nell'ambito della SSIS).

L'ampia platea di allievi cui è rivolta la proposta impone la necessità di garantire un'adeguata *scalabilità* al progetto, in termini di predisposizione di materiali e strumenti didattici, alternativi, che possano essere adattati alle diverse tipologie (e maturità) dei potenziali fruitori.

L'ambizione pragmatica e le esigenze di flessibilità della ricerca, ma anche la carenza di studi precedenti sull'argomento, impongono la necessità di individuare un metodo ricerca compatibile con le finalità e con i requisiti di progetto e che, inoltre, risulti efficiente. A tal fine, a partire da un'attenta analisi critica, si è ritenuto opportuno orientare la scelta sulle due metodologie di ricerca illustrate nei paragrafi precedenti, i cui elementi sono stati, tuttavia, adattati e integrati tenendo conto delle peculiari esigenze della ricerca.

In particolare, dei due approcci abbiamo condiviso l'apporto pragmatico che si sostanzia attraverso un forte orientamento verso la formulazione di un prodotto didattico, cui, però, è affidata una duplice funzione: quella di diffondere innovazione nel campo dell'educazione scientifica e quella di contribuire alla crescita delle conoscenze teoriche nel campo ricerca educativa.

Dalla DBR mutuiamo la consapevolezza della complessità delle interazioni implicate dal processo d'insegnamento/apprendimento. Ciò ha stimolato la progettazione di un ampio e diversificato sistema di verifica e controllo e l'utilizzo di strumenti d'analisi che consentano di gestire le numerose variabili in gioco. Della ricerca basata sulle TLS condividiamo, invece, il tentativo di coniugare le esigenze dell'istruzione disciplinare con le esigenze cognitive degli allievi. Da entrambe le metodologie mutuiamo, infine, il carattere evolutivo

e flessibile della ricerca, che si concretizza attraverso il susseguirsi ciclico di tre fasi: progettazione, applicazione e revisione.

Gli elementi che caratterizzano la metodologia adottata nella presente ricerca possono essere così sintetizzati:

- è finalizzata alla produzione di un ambiente didattico la cui implementazione è effettuata in contesti naturalistici e, in quanto tale, affronta il problemi didattici in tutta la loro complessità, senza di ridurre i parametri in gioco, ma al contrario, tenendo opportunamente conto delle diverse variabili che descrivono il sistema;
- è focalizzato sulla definizione di un prodotto didattico che viene ottimizzato attraverso successive fasi d'implementazione. In altri termini, si procede per approssimazioni successive: il prodotto didattico, passa attraverso diversi cicli di *progettazione, implementazione, valutazione e revisione*. In questo modo si riducono i tempi di produzione, in quanto, già a partire dalle prime fasi di progetto, si dispone di una piattaforma didattica (anche se schematica), di materiali e strumenti didattici, che saranno eventualmente modificati sulla base degli esiti dell'esperimento d'insegnamento;
- le fasi d'implementazione rivestono un duplice ruolo: servono a testare le ipotesi su cui si basa il progetto didattico e i materiali didattici conseguentemente costruiti; permettono di ricavare informazioni utili alla ricerca in didattica in termini di definizione o precisazione di metodologie e di chiarimento dei processi d'insegnamento e apprendimento. Gli esiti dell'implementazione permettono così di validare o modificare le ipotesi e gli elementi teorici su cui si basa il progetto e di estrarre informazioni utili all'ottimizzazione del prodotto didattico. Ciascuna implementazione, pertanto, produce un salto qualitativo nel progetto di ricerca: arricchisce la conoscenza sui processi implicati nell'azione didattica (che sono eventualmente generalizzabili ad altri contesti), permette di migliorare il prodotto didattico.

2.5.4 Fasi della ricerca e dimensioni operative

Come si è detto, il percorso progettuale si sviluppa passando attraverso diversi cicli di progettazione, verifica, valutazione e ottimizzazione (revisione). In figura 2.7 sono rappresentate le diverse fasi in cui si articola il ciclo metodologico.

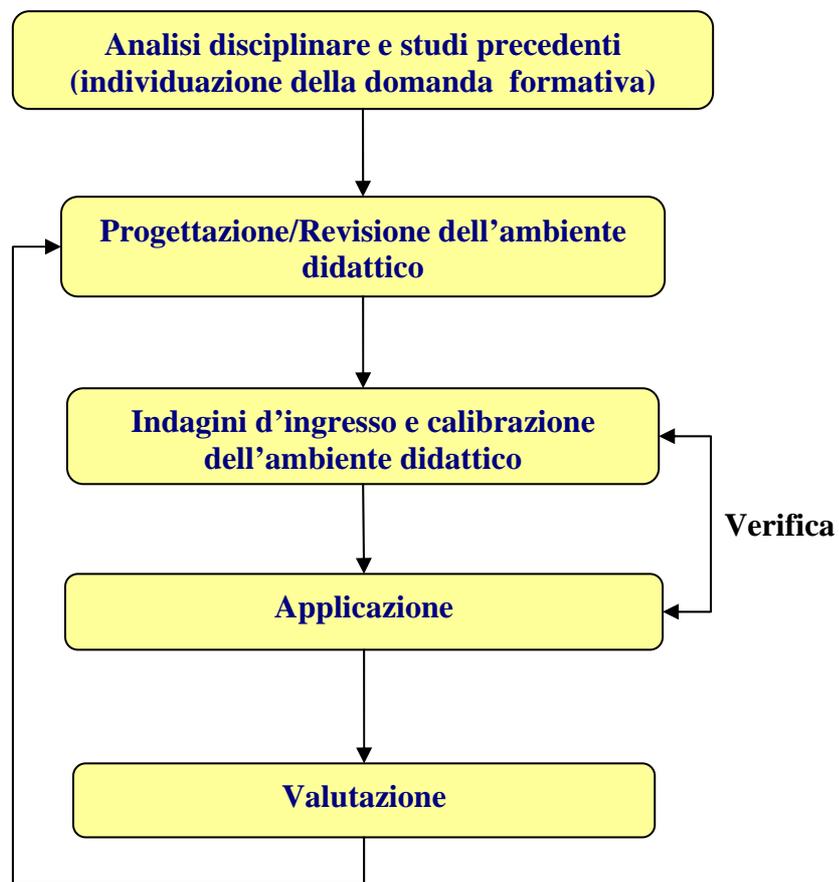


Figura 2.7

Le diverse fasi di ricerca rappresentate in figura possono essere situate in due diverse dimensioni operative: la dimensione progettuale e la dimensione della verifica. Alla dimensione progettuale appartengono tutti quegli elementi e quelle attività che contribuiscono alla costruzione del prodotto didattico e che lo caratterizzano: elementi che derivano dall'analisi disciplinare, gli obiettivi

pedagogici, i materiali e gli strumenti d'insegnamento/apprendimento, l'organizzazione didattica e così via. Mentre alla dimensione della verifica appartengono tutti gli elementi e le attività connesse con il controllo dell'apprendimento e della qualità delle componenti del prodotto didattico: i criteri e i metodi d'analisi, gli strumenti d'analisi, l'organizzazione del sistema di controllo e monitoraggio.

Gli aspetti metodologici delle diverse fasi del processo ciclico schematizzato in figura, che caratterizzano la dimensione progettuale e quella della verifica, saranno descritte nel dettaglio nei due paragrafi successivi. Mentre gli elementi epistemologici, pedagogici e didattici che caratterizzano il progetto didattico vero e proprio saranno l'argomento del prossimo capitolo.

In questo paragrafo approfondiremo alcuni aspetti generali del metodo di ricerca. In particolare, esplicheremo i criteri e i limiti che caratterizzano la *flessibilità* del metodo, illustreremo i criteri di valutazione degli esiti degli esperimenti d'insegnamento e definiremo un glossario minimo.

2.5.5 Criteri di flessibilità e focalizzazione sul prodotto didattico

Come illustrato precedentemente, l'ipotesi che sta alla base del metodo qui utilizzato è che l'applicazione di progetto didattico a un dato contesto naturalistico genera un sistema complesso le cui caratteristiche e la cui evoluzione dipendono dalle peculiari interazioni, mediate dal ricercatore e/o dal docente, che si vengono a stabilire tra l'ambiente didattico progettato ed il particolare contesto in cui si opera. Se, da un lato, l'implementazione dell'ambiente didattico ha carattere intenzionale, cioè viene realizzata con il preciso intento di produrre delle modificazioni nello stato di quella parte del sistema che chiamiamo contesto, dall'altro, le modificazioni effettivamente prodotte nel contesto, confrontate con quelle che l'esperimento d'insegnamento era orientato a produrre (sulla base delle ipotesi di progetto), costituisce un feedback che il ricercatore utilizza per modificare l'ambiente didattico.

Ritorniamo, per un momento, all'analogia con la formula 1 illustrata nell'introduzione. Lo scarto tra i risultati ottenuti in una gara e quelli attesi,

induce il team a modificare alcune caratteristiche della vettura, ossia produce innovazione. Se tale innovazione migliora le prestazioni della vettura rendendola più competitiva, gli altri team saranno indotti, a loro volta, a modificare le proprie vetture, e, talune volte, gli organi sportivi di controllo, a modificare le regole di gara. In questo modo, tramite un complesso gioco di feedback, l'intero sistema (i team, le case produttrici, i regolamenti ecc.) subisce un'evoluzione. In modo simile, a seguito dell'esperimento d'insegnamento, il sistema costituito dall'ambiente didattico e dal contesto registra un'evoluzione, che coinvolge, in linea di principio, tutte le sue componenti. Il riconoscimento di ciò costituisce una delle caratteristiche salienti del metodo di ricerca. Esso determina l'esigenza di flessibilità del processo progettuale, che si concretizza attraverso successive fasi di revisione del progetto. e che conferisce ad esso una forte connotazione evolutiva, finalizzata a velocizzare il processo di ottimizzazione del prodotto didattico.

Tale flessibilità è mutuata dai due metodi di ricerca psico – pedagogica cui il metodo qui descritto si ispira, ma caratterizza anche altri metodi di ricerca educativa, come la ricerca evolutiva e la ricerca-azione. Tra il metodo di ricerca qui illustrato e metodologie quali la ricerca azione vi sono, però, delle differenze. Innanzitutto, riteniamo, che quest'ultima metodologia sia orientata a produrre genericamente innovazione, ossia a produrre dei cambiamenti in un dato contesto scolastico, anche soltanto in termini di ripensamento critico dei metodi, delle strategie, dell'organizzazione scolastica da parte degli operatori della scuola coinvolti nelle sperimentazioni. Essa è focalizzata sull'osservazione e l'analisi dei processi d'apprendimento o delle interazioni sociali innescate dal progetto sperimentale. Una minore attenzione è, invece, dedicata alla validazione di un progetto educativo le cui caratteristiche siano riproducibili in altri contesti. E' questa una delle differenze significative con il metodo di ricerca qui utilizzato: il nostro obiettivo primario è la definizione e l'ottimizzazione di un ambiente didattico, le cui caratteristiche vengono testate in contesti differenti, in modo da stabilirne i margini di generalizzazione e i limiti di applicabilità. L'osservazione e l'analisi dei processi cognitivi innescati dagli interventi sperimentali, sebbene

costituiscono di per sé risultati significativi della ricerca, sono tuttavia riguardati come strumenti utili alla realizzazione dell'obiettivo: la validazione di un prodotto educativo.

L'esigenza di flessibilità pone, tuttavia, degli interrogativi, che riguardano, per l'appunto, i limiti di tale flessibilità. In primo luogo:

quali sono le caratteristiche del progetto didattico da tenere invariate durante una data fase di verifica (ossia, di un'indagine sperimentale finalizzata a verificare l'efficacia dell'ambiente didattico)?

E, ancora: in quali momenti dell'indagine è possibile, e opportuno, attivare una revisione del progetto didattico?

Il metodo di ricerca qui adottato fissa precisi limiti di flessibilità e criteri di revisione.

Per quanto riguarda la prima domanda, gli elementi che, durante una fase di verifica, non sono modificabili sono quelli direttamente connessi con le ipotesi e i presupposti teorici su cui si basa l'intero progetto didattico (che saranno precisati nel capitolo 3). Tali elementi costituiscono il nucleo fondamentale dal quale discendono e attorno al quale si coagulano tutti gli altri aspetti del progetto. Essi derivano dal quadro di riferimento psico – pedagogico (i cui aspetti salienti e funzionali alla presente ricerca sono stati illustrati nei paragrafi precedenti), e dagli esiti dall'analisi disciplinare, di tipo storico ed epistemologico (riportata nel cap 3) e sono rappresentati:

- dal *ciclo didattico*, caratterizzato da una stretta integrazione tra esperimenti e attività di modellizzazione, che intende favorire un graduale avvicinamento tra conoscenze individuali possedute dagli allievi e conoscenze scientifiche, nonché di esplicitare e trasferire significative modalità di sviluppo dell'impresa scientifica.
- dagli *obiettivi pedagogici* (la cui valenza va al di là dei limiti dei contenuti affrontati) che sono una diretta conseguenza dei presupposti pedagogici fondamentali e della significatività educativa, individuata a seguito dell'analisi disciplinare.

Tali elementi potranno essere rivisti o modificati, se è il caso, soltanto alla fine della fase di verifica, in seguito alla valutazione globale degli esiti dell'esperimento e alla validazione o confutazione delle ipotesi.

Per ciò che attiene la collocazione cronologica delle revisioni del progetto, oltre alla revisione effettuata alla fine della fase di verifica, sulla base della valutazione globale, si prevede la possibilità di apportare delle modifiche di alcuni elementi del progetto sulla base degli esiti delle analisi d'ingresso, ciò al fine adattare l'ambiente didattico alle reali esigenze del particolare contesto classe. Tale revisione può coinvolgere gli strumenti didattici, le strategie e i materiali di supporto, ma lascerà inalterati i due elementi fondamentali del progetto. Nel seguito ci riferiremo a tale fase di revisione con il termine "calibrazione in itinere". In tal senso, l'analisi della situazione in ingresso (che costituisce, come vedremo, la prima fase di un esperimento d'insegnamento) risponde ad una duplice esigenza: estrarre informazioni utili alla calibrazione del progetto didattico, permettere di costruire il profilo cognitivo d'ingresso della classe, riferendosi al quale analizzare l'evoluzione delle conoscenze e gli effetti del processo d'insegnamento-apprendimento.

2.5.6 Esiti dipendenti dal contesto ed esiti generalizzabili

La connotazione pragmatica propria del metodo di ricerca si concretizza anche nel fatto che l'implementazione del progetto didattico è orientata a contesti naturalistici. Nondimeno, considerato il grande numero delle variabili in gioco e la complessità delle correlazioni tra esse, sorge l'esigenza di distinguere quali modificazioni dipendono dal particolare contesto e quali, invece, ne risultano, in una certa misura, indipendenti (e pertanto generalizzabili ad altri contesti). L'individuazione di tali variabili è uno degli aspetti più problematici del metodo adottato che, tuttavia, si ritiene possa essere conseguita applicando due distinte procedure di controllo: un controllo di tipo indiretto ed un controllo di tipo diretto.

Il primo tipo di valutazione consiste in una chiara esplicitazione dei presupposti teorici e delle ipotesi che ispirano il progetto didattico, unitamente all'esplicitazione delle relazioni tra tali presupposti e le scelte progettuali (ossia

componenti progetto didattico quali: strumenti, strategie, obiettivi pedagogici, modalità di organizzazione didattica) che ne sono diretta conseguenza. Un'attenta analisi degli effetti prodotti sul contesto da tali componenti può permettere una valutazione, indiretta, della correttezza delle ipotesi e dei presupposti fondamentali del progetto.

Il secondo tipo di valutazione consiste nella reiterazione della sperimentazione in contesti naturalistici con diverse caratteristiche, al fine di confrontare gli esiti delle diverse sperimentazioni individuandone le regolarità. Nella presente ricerca si è tentato di attivare entrambi i tipi di valutazione, incrociandone i risultati.

In entrambi i tipi di controllo dei risultati, al fine di corroborare la correttezza delle ipotesi e l'efficacia delle conseguenti scelte progettuali, si adotta il criterio di falsificazione: un'ipotesi che non è confutata dai risultati ottenuti è ritenuta valida e dunque conservata, fino a prova contraria. Considerata la complessità del sistema oggetto di studio, risulta evidente, d'altra parte, che nella valutazione degli esiti di un esperimento d'insegnamento, è utopico (e, probabilmente, inutile) tentare di inseguire e riprodurre la stringente oggettività delle procedure di validazione proprie delle discipline scientifiche (ad esempio la Fisica), ciò non foss'altro per l'entità dell'errore (i cui margini sono spesso difficilmente stimabili) insito nelle valutazioni degli esiti di procedure didattiche: siamo coscienti, e non possiamo fare altro che accettarlo, che le nostre valutazioni conterranno elementi non oggettivi, rappresentati, ad esempio, da osservazioni non descrivibili in termini quantitativi o da evidenze basate su pochi casi.

2.5.7 Definizione di un glossario minimo

Intenzionalità: in termini generali mira a produrre modificazioni in un contesto sociale delimitato, nella fattispecie, a ridurre il gap tra conoscenze individuali e sapere scientifico, migliorando conoscenze e competenze degli allievi.

Contesto formativo: il contesto sociale verso cui è rivolta l'intenzionalità, cioè all'interno del quale si vogliono produrre e misurare delle modificazioni.

Ambiente didattico: insieme degli strumenti, dei materiali, delle attività e delle strategie opportunamente integrati e progettati al fine di produrre modificazioni in un dato contesto formativo. Tali modificazioni sono evidentemente orientate verso un miglioramento del contesto, miglioramento che può assumere diverse connotazioni e caratteristiche: miglioramento di tipo cognitivo, di tipo motivazionale, di tipo organizzativo, di tipo curriculare e così via.

Sistema: il sistema costituito dal contesto formativo (che include tutti i soggetti, le strutture che interagiscono con il processo formativo venendone modificati), dall'ambiente didattico effettivamente implementato e dal/i formatore/i. Una volta generato, il sistema formativo si evolve, in quanto tutte le componenti e i soggetti appartenenti al sistema vengono modificati dal processo formativo.

Ambiente esterno: l'insieme dei soggetti, delle strutture e dei vincoli non inclusi direttamente nel contesto ma che possono influenzare il processo formativo. Per una classe di un liceo, ad esempio, l'ambiente esterno è costituito dagli insegnanti della classe (non direttamente coinvolti nel processo formativo), le componenti, le strutture e i soggetti d'istituto che possono influenzare l'organizzazione e la realizzazione del progetto, ma le cui modificazioni non sono oggetto di controllo, analisi e valutazione.

Contesto formativo di tipo naturalistico: è un contesto formativo in cui le influenze dell'ambiente esterno sono significative, ossia in cui gli effetti delle variabili esterne che influenzano il processo di formazione non sono riducibili. In questo caso si ha a che fare con un sistema aperto, la cui evoluzione, in generale, dipende non soltanto dalle reciproche relazioni tra le variabili di sistema, ma anche dall'influenza delle variabili esterne.

2.6 La dimensione progettuale

Questo paragrafo è dedicato all'esplicitazione della dimensione progettuale della ricerca, vale a dire alla precisazione del metodo utilizzato per la progettazione didattica. Tale metodo si ispira a due diversi modelli: l'*ingegneria didattica* e l'*educational reconstruction* (ricostruzione educativa). Dopo una breve panoramica riguardante tali metodi di progettazione, si illustreranno nel dettaglio le caratteristiche del metodo utilizzato nella presente ricerca.

2.6.1 Educational reconstruction

Il modello della “ricostruzione educativa”, sviluppato da Kattmann et al. (1995), rappresenta un quadro di riferimento per la progettazione e validazione di unità d'apprendimento (sotto forma, ad esempio, di sequenze d'insegnamento/apprendimento). Tale metodo, ispirato al modello di pianificazione didattica della tradizione pedagogica tedesca, tenta di coniugare l'attenzione ai contenuti scientifici, propria di tale tradizione, con approcci orientati al costruttivismo.

La fase iniziale della progettazione didattica consiste nella “chiarificazione” dei contenuti disciplinari, ovvero in una loro scomposizione (“elementarizzazione”), finalizzata ad identificare le idee chiave (elementari) dei contenuti da insegnare. Il processo di chiarificazione si basa principalmente sull'analisi delle strutture disciplinari, mentre i problemi di tipo educativo sono affrontati in una fase successiva.

Uno degli aspetti distintivi del metodo è che l'analisi della disciplina tiene conto non soltanto della dimensione epistemologica, ma anche degli aspetti tecnologici e delle implicazioni sociali ed etiche dell'argomento scelto.

La progettazione didattica, nell'ambito di tale metodo, pone in relazione tre diversi aspetti: considerazioni legate alla struttura disciplinare, analisi della significatività didattica dell'argomento (in termini obiettivi didattici disciplinari e trasversali) e studi empirici sui processi d'apprendimento e sugli interessi degli studenti.

In un ottica costruttivista, la ricostruzione educativa viene effettuata in modo da adattare i contenuti della disciplina alle concezioni degli allievi. Infatti, come riportato da Kattmann (1995) le domande da cui trae spunto il processo di ricostruzione disciplinare sono: “Quali sono gli elementi più rilevanti delle concezioni degli studenti che devono essere rispettati? Quali sono le opportunità aperte da certi elementi delle concezioni e delle prospettive degli studenti? Quali sono le concezioni degli studenti che corrispondono ai concetti scientifici in modo tale che esse possano essere usate per un apprendimento più adeguato e fruttuoso?”

La prospettiva costruttivista su cui si basa tale modello di progettazione didattica ha diversi punti in comune con quella che ispira la presente ricerca e che è stata illustrata nei paragrafi precedenti. Infatti, da una parte, l’acquisizione della conoscenza è riguardata come una processo individuale e attivo di costruzione che si verifica all’interno di un dato scenario sociale e materiale, dall’altra parte, essa è vista come una costruzione umana.

I risultati dell’analisi disciplinare e la definizione di un preliminare progetto didattico giocano un ruolo significativo nella pianificazione di studi empirici relativi all’insegnamento e all’apprendimento. Al contempo, i risultati degli studi empirici influenza il processo di analisi educativa, elementarizzazione e la definizione delle mete e degli obiettivi educativi.

Come si può osservare, nell’ambito di tale metodo, la struttura dei contenuti scientifici e le concezioni degli studenti sono riguardate come componenti ugualmente importanti, che influenzano il processo di ricostruzione didattica e la definizione degli obiettivi. Inoltre, le conoscenze acquisite in relazione ad una delle due componenti influenza le attività e l’interpretazione dei risultati relativi all’altra componente.

2.6.2 Ingegneria didattica

L’ingegneria didattica è un altro metodo di progettazione educativa, proposto da Artigue (1988), nell’ambito della didattica della matematica. Tale metodo propone linee guida non soltanto per la progettazione ma anche per la

validazione di situazioni didattiche. In particolare, Artigue suggerisce tre principali dimensioni di analisi *a priori*:

- una dimensione epistemologica (analisi dei contenuti, i problemi che essi pongono, la genesi storica);
- una dimensione psico-cognitiva (analisi delle caratteristiche cognitive degli studenti);
- una dimensione didattica (analisi del funzionamento dell'istituzione scolastica, analisi dei programmi e dei curricula, vincoli legati all'organizzazione scolastica)

Tale modello progettuale è fortemente ancorato ad un modello d'apprendimento basato sul problem solving. Pertanto, l'analisi a priori è finalizzata principalmente all'individuazione dei problemi da proporre agli allievi, al fine di anticipare i possibili comportamenti messi in atto dagli allievi nella soluzione di tali problemi. Il confronto degli itinerari cognitivi effettivamente osservati con quelli predetti, sulla base dell'analisi a priori, conduce ad una conferma o meno delle ipotesi su cui si basa la costruzione delle situazioni d'apprendimento.

Come si può notare, i due modelli di progettazione didattica condividono la stessa prospettiva pedagogica, ispirata ad un *costruttivismo integrato*, che abbiamo illustrato nel par. 2.3.3. Esso coniuga la dimensione epistemologica con la dimensione psico-cognitiva della conoscenza. La condivisione dei presupposti pedagogici ed epistemologici fa sì che i due metodi evidenzino diversi elementi comuni. Entrambi gli approcci si basano, infatti, su due tipi di analisi: la prima concernente le conoscenze scientifiche da insegnare, la seconda connessa con le caratteristiche psico-cognitive degli allievi. Essi, tuttavia, sono complementari in relazione alle variabili sociali e istituzionali che concorrono alla definizione del prodotto didattico. Mentre l'ingegneria didattica enfatizza l'importanza dei vincoli legati al sistema d'istruzione, la ricostruzione educativa pone l'enfasi sugli aspetti legati all'interesse e alla motivazione degli allievi e al "valore" sociale della conoscenza.

2.6.3 Definizione del metodo di progettazione e fasi progettuali

Il metodo di progettazione didattica utilizzato in questa ricerca condivide molti degli elementi presenti nei due modelli progettuali illustrati prima. Analogamente a tali approcci esso è basato su una duplice analisi: un'analisi disciplinare, di tipo storico ed epistemologico, e un'analisi psico-pedagogica, finalizzata a individuare conoscenze spontanee e potenziali difficoltà d'apprendimento. Tuttavia, tali analisi sono state integrate con ulteriori informazioni, ricavate empiricamente, durante diverse fasi del percorso progettuale, finalizzate ad adattare il progetto didattico alle realtà formative cui esso è rivolto. Tali informazioni riguardano i vincoli e le possibili resistenze all'accoglimento della proposta: esigenze dei programmi, esigenze degli insegnanti, vincoli organizzativi, disponibilità di risorse, fruibilità degli strumenti e dei materiali didattici.

Lo schema di figura 2.8 esplicita le componenti che caratterizzano il metodo di progettazione didattica utilizzato.

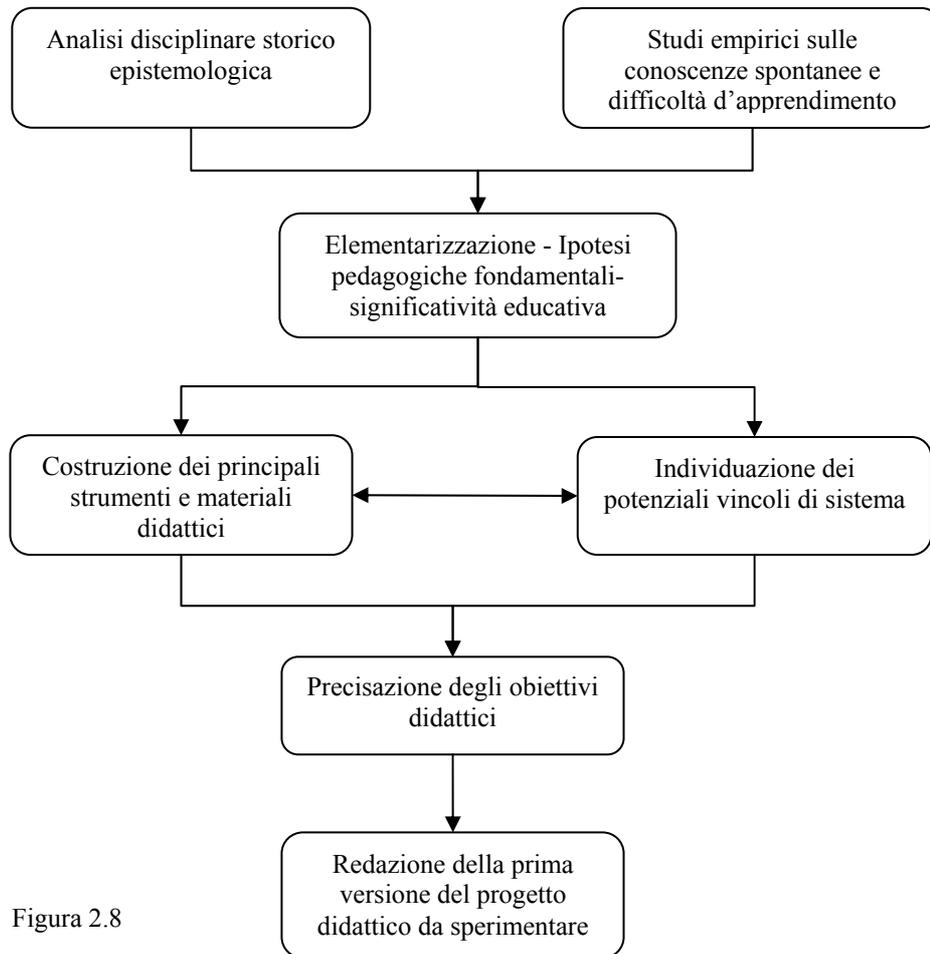


Figura 2.8

In particolare, le informazioni di partenza sono ricavate, da un lato, da un approfondita analisi storico - epistemologica riguardante lo sviluppo della teoria elettronica della materia, dall'altro, da un esame della letteratura scientifica riguardante gli studi empirici su modelli e concezioni spontanee degli allievi, difficoltà d'apprendimento e approcci didattici relativi all'argomento disciplinare d'interesse. Questa prima fase del processo progettuale ha consentito di realizzare diversi obiettivi: attuare il processo di elementarizzazione dell'argomento disciplinare, individuare, in modo preliminare, la domanda d'apprendimento (ovvero valutare la distanza tra conoscenze individuali e conoscenze scientifiche), individuare la significatività educativa dell'argomento (ovvero le opportunità formative offerte dall'argomento), formulare le ipotesi pedagogiche fondamentali su cui si basa lo sviluppo del progetto.

Scendendo più nello specifico, le informazioni ricavate a partire da tali analisi hanno consentito di:

- individuare le idee chiave che caratterizzano l'argomento scelto e le reciproche relazioni;
- selezionare i contenuti attorno ai quali costruire il progetto didattico;
- individuare le potenziali difficoltà d'apprendimento e gli ostacoli epistemologici;
- ottenere spunti relativi a soluzioni e strategie didattiche che possano favorire il superamento di tali gli ostacoli e difficoltà d'apprendimento;
- individuare le opportunità formative offerte dall'argomento;
- fissare i presupposti pedagogici fondamentali e le mete educative principali.

A scopo di sintesi, la figura 2.9 illustra le principali informazioni ricavate dalle diverse risorse utilizzate per l'analisi disciplinare e psico-cognitiva.

	Letteratura scientifica	Analisi storica	Manuali tecnici
Modelli spontanei			
Nodi didattici			
Contenuti, modelli, spunti			
Strumenti			

Figura 2.9

Tenendo conto di tali informazioni sono stati, dunque, progettati e realizzati i principali strumenti d'insegnamento/apprendimento, materiali didattici ed esperimenti. In questa fase preliminare, gli strumenti e i materiali progettati vengono sottoposti al giudizio di un gruppo insegnanti di scuola superiore, al fine

di ricavare informazioni circa i potenziali vincoli e resistenze all'accoglimento della proposta e spunti utili finalizzati ad una sua ottimizzazione e calibrazione che tenga conto delle reali esigenze del sistema.

Sulla base di tali informazioni sono stati precisati e ulteriormente specificati gli elementi e le componenti del progetto e sono stati integrati, attraverso la formulazione di un opportuno ciclo didattico, in struttura didattica coerente. Il percorso, così, costruito è stato, dunque, suddiviso in sequenze d'apprendimento/insegnamento secondo i criteri che verranno illustrati nel successivo paragrafo 2.7.

Il progetto didattico è, tuttavia, ancora in una fase non definitiva. Infatti, sulla base dei criteri esposti nel paragrafo 2.5.5, la sperimentazione del progetto didattico in un dato contesto formativo presuppone un'ulteriore fase di revisione (calibrazione in itinere), finalizzata ad adattare la proposta alle peculiarità del contesto. Tale calibrazione tiene conto dei vincoli locali che caratterizzano lo scenario formativo (istituzione formativa, istituto scolastico) e delle caratteristiche degli allievi coinvolti nella sperimentazione, così come emergono dalle indagini d'ingresso.

L'esplicitazione del processo progettuale e gli esiti delle diverse fasi di progettazione saranno descritti nel capitolo 3.

2.7 La dimensione della verifica

Come sarà certamente emerso dalla discussione del paragrafo precedente, il processo progettuale e il processo di verifica (che si realizza attraverso gli esperimenti d'insegnamento) sono strettamente correlati. Non soltanto perché le prime fasi d'indagine influenzano la calibrazione del progetto didattico e gli esiti complessivi di un esperimento possono determinare una sostanziale revisione del progetto, ma anche per altre ragioni. In primo luogo perché i presupposti teorici e pedagogici che ispirano la definizione delle elementi del progetto didattico influenzano anche l'individuazione dei criteri e degli strumenti d'analisi del

processo d'insegnamento/apprendimento; in secondo luogo perché gli aspetti dell'apprendimento che si intendono sottoporre ad analisi influenzano la strutturazione e l'organizzazione del percorso formativo.

In questo paragrafo, in cui verranno esplicitati i principali metodi e strumenti d'analisi del processo formativo e di validazione dell'ambiente didattico, tali correlazioni emergeranno chiaramente.

Al fine di illustrare il razionale che ha ispirato la progettazione del sistema di controllo del processo d'insegnamento/apprendimento, osserviamo che l'ambiente didattico può essere caratterizzato utilizzando due diversi livelli di descrizione: un livello *macroscopico* ed un livello *microscopico*.

Gli elementi che caratterizzano il progetto didattico a livello macroscopico, garantendone la coerenza globale, sono due:

- le ipotesi generali riguardanti la prospettiva epistemologica, psicopedagogica e didattica (illustrate nei primi quattro paragrafi del presente capitolo);
- le ipotesi e i presupposti pedagogici *fondamentali*⁶ connessi con argomento disciplinare oggetto del progetto. Essi sono individuati, in forma generale, a seguito delle prime fasi del processo di progettazione (analisi disciplinare e analisi degli studi pedagogici precedenti) e riguardano le relazioni tra aspetti disciplinari e aspetti psico-cognitivi legati al particolare argomento scelto (modelli di struttura e proprietà elettriche).

Se, da un lato, tali ipotesi influenzano le principali scelte pedagogiche, la strutturazione e l'organizzazione generale del percorso didattico, dall'altro, la loro esplicitazione e specificazione ispira la progettazione delle singole sequenze d'insegnamento/apprendimento in cui esso viene suddiviso. Sono tali sequenze che caratterizzano il progetto didattico a livello microscopico.

Come sarà esemplificato in seguito, ciascuna sequenza rappresenta una delimitata componente del percorso didattico ed è centrata sull'utilizzo di un

⁶ Come vedremo meglio nel capitolo successivo, una di tali ipotesi riguarda, ad esempio, la necessità didattica di enfatizzare le connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici dei fenomeni elettrici al fine di favorire uno sviluppo armonico delle conoscenze degli allievi.

particolare tool didattico o di una particolare strategia. Essa è costruita sulla base di ipotesi che sono una diretta conseguenza delle ipotesi e dei presupposti pedagogici fondamentali che caratterizzano l'intero progetto e mira fornire una risposta a domande di ricerca chiaramente esplicitate. Essa è affiancata da un sistema di controlli finalizzato a verificarne gli effetti, in termini di realizzazione di obiettivi d'apprendimento e/o in termini di differenze rispetto agli effetti ipotizzati.

Ciascuna sequenza d'insegnamento/apprendimento può essere, dunque, riguardata come un micro-esperimento che implementa un particolare aspetto delle ipotesi generali che ispirano l'intero progetto e che è finalizzato a raccogliere elementi utili a valutarne la correttezza.

Così come la dimensione progettuale, anche la dimensione della verifica può essere caratterizzata utilizzando due diversi livelli di descrizione. Il sistema di controllo e monitoraggio, finalizzato a valutare gli esiti di un'indagine sperimentale, implementa, infatti, due diversi tipi d'analisi. Un'analisi che possiamo chiamare *macroscopica*, relativa, cioè, all'impatto globale dell'ambiente didattico e del processo d'insegnamento/apprendimento ed un'analisi, per così dire, *microscopica*, relativa ad aspetti locali del processo didattico. L'analisi globale si basa su un confronto di tipo ingresso/uscita, mentre l'analisi locale si realizza attraverso un monitoraggio effettuato durante lo sviluppo delle singole sequenze. Sebbene i due tipi di analisi, singolarmente considerati, forniscano di per sé significativi elementi di valutazione, gli esiti delle due analisi vengono correlati, al fine di far emergere le relazioni tra aspetti globali e aspetti locali del processo formativo e dell'apprendimento: le risposte fornite alle domande di ricerca che caratterizzano le singole sequenze rappresentano lo strumento mediante il quale tali correlazioni vengono individuate.

2.7.1 Struttura del sistema di controllo e fasi della verifica

La figura 2.10 rappresenta la struttura del sistema di controllo e monitoraggio implementato durante un esperimento d'insegnamento. Esso

prevede tre diverse fasi di rilevazione: indagini d'ingresso, monitoraggio in itinere, indagini d'uscita.



Figura 2.10

Gli aspetti specifici dei tre momenti d'indagine dipendono dalla particolare fase d'attuazione del progetto didattico e saranno illustrati, unitamente agli specifici strumenti d'indagine utilizzati, nei capitoli dedicati alle sperimentazioni effettuate. Qui ci limiteremo a descrivere le caratteristiche e le motivazioni generali delle tre fasi.

Indagini d'ingresso

In termini generali, le indagini d'ingresso hanno lo scopo di caratterizzare lo stato cognitivo iniziale, tramite la verifica di diversi aspetti delle conoscenze pregresse e delle competenze degli allievi. Lo scopo di tali indagini è duplice:

- estrarre informazioni utili alla calibrazione in itinere (si veda par. 2.5.5) del progetto didattico, apportando, eventualmente, delle modifiche al percorso preventivato in modo da adattarlo alle reali esigenze del contesto formativo;
- raccogliere dati utili a fissare il riferimento rispetto al quale misurare l'apprendimento degli allievi e valutare, di conseguenza, l'efficacia globale dell'ambiente formativo implementato (si veda l'analisi macroscopica descritta sopra).

Monitoraggio in itinere

Il monitoraggio in itinere ha lo scopo di evidenziare diversi aspetti del processo d'apprendimento degli allievi e di verificare la correttezza delle ipotesi e l'efficacia soluzioni didattiche che caratterizzano le sequenze che compongono il percorso didattico. Il controllo d'apprendimento viene realizzato durante l'implementazione delle sequenze didattiche, utilizzando diversi strumenti di verifica e di analisi. I dati raccolti permettono di effettuare tre diversi tipi di analisi:

1. un'analisi finalizzata ad evidenziare le traiettorie d'apprendimento, ovvero l'evoluzione delle conoscenze e competenze rispetto alla situazione d'ingresso. Ciò si realizza caratterizzando i percorsi cognitivi degli allievi tramite misurazioni effettuate in corrispondenza di alcuni momenti del processo d'insegnamento/apprendimento;
2. un esame qualitativo di singoli casi emblematici al fine raccogliere elementi utili per caratterizzare il processo d'apprendimento.
3. un'analisi mirante ad evidenziare la risposta degli allievi, durante lo sviluppo e/o alla fine delle sequenze didattiche, e a confrontarla con gli effetti attesi delle sequenze, ciò al fine di valutare, con maggiore dettaglio, l'efficacia degli strumenti progettati e delle strategie predisposte.

Indagini d'uscita

Le indagini d'uscita sono effettuate allo scopo di valutare l'impatto globale dell'esperienza formativa sulle conoscenze e competenze degli allievi. A tal fine le informazioni tratte da tali indagini vengono confrontate con quelle emerse dalle indagini d'ingresso utilizzando una procedura di tipo pre /post test. Tali indagini, inoltre, sono progettate in modo tale da raccogliere ulteriori informazioni utili a valutare i processi innescati dall'interazione didattica e verificare la validità delle ipotesi che ispirano il progetto.

Nei successivi paragrafi verranno illustrati alcuni dei metodi di classificazione e degli strumenti di elaborazione statistica che sono stati utilizzati al fine di valutare gli esiti degli esperimenti d'insegnamento effettuati.

2.7.2 Un duplice criterio di classificazione fenomenografica

Abbiamo visto nel par 2.4.5 che i modelli scientifici e i modelli individuali (spontanei) presentano diverse caratteristiche comuni. In particolare, entrambi i tipi di modello possono essere caratterizzati sia in termini di struttura che di funzionalità.

Restringendo, per il momento, le considerazioni ai modelli scientifici e, in particolare, ai microscopici della conduzione elettrica, le caratteristiche che possono definirne la struttura sono le seguenti:

- Le componenti del modello (oggetti o classi di oggetti previsti)
- Le proprietà degli oggetti
- Le regole d'evoluzione e le proprietà d'insieme (tipo di leggi che ne regolano l'evoluzione dei singoli oggetti e le proprietà statistiche delle classi di oggetti)
- Le relazioni tra oggetti (ossia natura e modalità d'interazione)

A titolo di esempio, la tabella 2.1 rappresenta la caratterizzazione in termini di struttura del modello classico della conduzione elettrica e del modello quantistico di Sommerfeld (si veda cap. 3):

Tabella 2.1	Componenti	Proprietà	Regole	Interazioni
Modello classico	Elettroni (portatori)	Portatori liberi, privi di dimensione.	Statistica classica-Meccanica classica	Collisioni impulsive elettrone-ione
	Ioni (struttura dissipativa)	Organizzati in un reticolo fisso, con dimensioni finite, in quiete.		
Modello di Sommerfeld	Elettroni (portatori)	Portatori liberi, privi di dimensione.	Statistica di Fermi- Dirac per gli elettroni	Collisioni impulsive elettrone-ione
	Ioni (struttura dissipativa)	Organizzati in un reticolo fisso, con dimensioni finite, in quiete.		

Con il termine funzionalità di un modello scientifico ci riferiamo alla possibilità offerta dal modello di interpretare e prevedere fenomeni e processi fisici. Per caratterizzare la funzionalità di un modello è utile introdurre il concetto

di “potenziale esplicativo”. Il potenziale esplicativo si riferisce alla quantità e alla qualità delle interpretazioni fornite dal modello stesso. In altri termini, il potenziale esplicativo è tanto maggiore quanto più grande è l’insieme dei fenomeni e dei processi che il modello permette di interpretare e/o prevedere e quanto migliore è l’accordo tra le previsioni basate sull’elaborazione del modello e le leggi fenomenologiche. Ad esempio, il potenziale esplicativo del modello a bande dei solidi è maggiore di quello del modello classico della conduzione, non soltanto perché il primo modello permette d’interpretare più fenomeni del secondo, ma anche perché il modello a bande riproduce più fedelmente gli andamenti sperimentali.

D’altra parte, come abbiamo già osservato nel par. 2.4.2, anche i modelli mentali possono essere caratterizzati in termini di struttura e di funzionalità. La struttura del modello mentale si riferisce alle caratteristiche e alle proprietà degli “oggetti mentali” che lo compongono e alle loro reciproche relazioni, mentre la funzionalità si riferisce ai processi di elaborazione del modello mentale che consentono di interpretare e prevedere i cambiamenti di configurazione dell’ambiente (cioè, i fenomeni), in modo da consentire un adattamento dinamico individuo – ambiente.

Le analogie tra modelli individuali e modelli scientifici, così delineate, permettono di introdurre un duplice criterio di analisi e di classificazione fenomenografica (Marton, 1981, 1994; Entwistle, 1997): un criterio di tipo diretto, che guarda, cioè, direttamente alle componenti e alla struttura dei modelli individuali, e un criterio indiretto, focalizzato sull’analisi della funzionalità dei modelli individuali, ossia delle modalità con cui gli allievi utilizzano il modello per interpretare e prevedere fenomeni e processi. Questo secondo tipo di analisi conduce, pertanto, ad una classificazione in termini, più che di conoscenze, di competenze interpretative e predittive, permettendo di evidenziare come il modello individuale “funziona” in pratica. Entrambi i criteri assumono come riferimento i modelli scientifici (in termini di caratteristiche strutturali e funzionali dei modelli microscopici) e pertanto, anche se in modo qualitativo, caratterizzano la discrepanza tra conoscenze individuali e conoscenze scientifiche.

E' evidente, d'altra parte, che la possibilità di effettuare i due diversi tipi di analisi presuppone un'accurata progettazione di adeguati strumenti di verifica che permettano di estrarre le informazioni richieste. Ciò è stato realizzato utilizzando, principalmente, protocolli a risposta aperta contenenti diverse tipologie di quesiti⁷.

Le caratteristiche strutturali e funzionali dei modelli individuali sono state rilevate non soltanto durante le indagini d'ingresso e di uscita, ma anche in corrispondenza di momenti, opportunamente individuati, del processo d'insegnamento apprendimento. Ciò ha consentito di evidenziare le traiettorie d'apprendimento di ciascun allievo e di raccogliere informazioni utili a valutare gli effetti degli interventi formativi.

2.7.3 Strumenti d'analisi e statistica implicativa

Come sottolineato nei paragrafi precedenti, l'applicazione del metodo di ricerca utilizzato nel presente studio richiede un'accurata caratterizzazione del contesto naturalistico cui è rivolta l'azione formativa. E' necessario, a tal fine, poter disporre di adeguati strumenti di analisi statistica che permettano di gestire le diverse variabili cognitive che caratterizzano il contesto e che consenta di farne emergere le correlazioni. Uno strumento statistico che può soddisfare tali esigenze è "l'analisi statistica implicativa".

Tale strumento d'analisi è stato sviluppato da Grass (1996) nell'ambito della didattica della matematica, ma il suo utilizzo si è esteso negli anni ad altri campi di ricerca sperimentale, come, ad esempio, la sociologia, la psicologia e la biologia.

Il problema cui l'analisi implicativa intende fornire una risposta può essere così formulato: "date le variabili (binarie) **a** e **b**, in che misura è possibile affermare che in una popolazione il fatto che si osservi un dato valore della variabile **a** (ad esempio, 1) implichi l'osservazione dello stesso valore della variabile **b** ? O, esprimendoci in termini più semplici: "in che misura da *a* segue *b*"?

⁷ In particolare, il protocollo d'ingresso è riportato in appendice P1 ed è illustrato nel capitolo 5

In generale, fornire una risposta deterministica a tale domanda non è possibile e ci si deve accontentare di stabilire l'occorrenza di un'implicazione "quasi" vera. I metodi dell'analisi implicativa consentono di misurare, in termini statistici, il grado di validità di una proposizione implicativa, ovvero di quantificare il livello di "quasi verità" dell'implicazione $a \rightarrow b$.

Il grado di validità dell'implicazione $a \rightarrow b$ viene ottenuto sulla base della misura dei casi che invalidano l'implicazione, cioè a partire dalla una stima della frequenza dei dati che corrispondono ad $a = 1$ e $a \neq b$. Tale valutazione quantifica la frequenza dei contro esempi dell'implicazione: tanto più piccolo è il numero di contro esempi quanto più significativa è l'implicazione.

Al fine di fornire qualche dettaglio quantitativo sul metodo, consideriamo una popolazione E di n soggetti (ad esempio, un gruppo di allievi), indichiamo con x_i l' i -esimo elemento di E , e un insieme V di v variabili binarie $\mathbf{a, b, c, \dots}$, (corrispondenti, ad esempio, ad un insieme v di quesiti di tipo vero/falso). La variabile \mathbf{a} può assumere il valore a (ad esempio 1 che corrisponde a "vero") ed il valore opposto $a^{\bar{}}$ e così tutte le altre variabili dell'insieme V . Ad ogni elemento x della popolazione E è possibile associare un valore $a(x), b(x), \dots$ delle variabili binarie. In altri termini, i valori assunti da ciascuna variabile dell'insieme V , ad esempio \mathbf{a} , rappresentano un vettore con n componenti ciascuna delle quali può assumere valore 0 o 1.

La regola $a \rightarrow b$ è logicamente vera se per ogni x per cui $a(x)$ non è nullo lo è anche $b(x)$, ovvero se la sottopopolazione A di E per la quale $a(x) = 1$ è un sottoinsieme della sottopopolazione B di E per la quale $b(x) = 1$. Tuttavia, tale inclusione stretta si osserva soltanto eccezionalmente nella realtà. Nel caso concreto di un questionario somministrato ad una classe si osserveranno un certo numero di contro esempi che contravvengono alla regola: vi saranno alcuni allievi che rispondono correttamente all'item a ma forniscono una risposta scorretta all'item b . Ora, è evidente che la "quasi implicazione" può essere considerata valida se il numero di eccezioni alla regola è sufficientemente piccolo. Esprimendoci in altri termini, indicando con n_a il numero di elementi di A , n_b il numero di elementi di B e con $n_{a \neq b}$ il numero dei contro esempi, è il peso di

quest'ultimo numero che bisogna considerare al fine di stabilire l'accettabilità statistica della "quasi implicazione" $a \rightarrow b$.

La formalizzazione matematica di tali considerazioni conduce alla costruzione di un *indice d'implicazione*

$$q(a, \bar{b}) = \frac{n_{\bar{a}b} - \frac{n_a n_b}{n}}{\sqrt{\frac{n_a n_b}{n}}}$$

a partire dal quale è possibile introdurre un livello di confidenza (o di significatività) dell'implicazione β (Gras, 2000), legato alla probabilità che l'implicazione sia valida. Il valore di β consente, pertanto, di stabilire l'accettabilità della relazione d'implicazione. In particolare, un valore di $\beta \geq 0.90$ (ossia del 90 %) è ritenuto accettabile. Il livello di confidenza può essere calcolato a partire dall'indice d'implicazione q . Laddove i dati da analizzare siano numerosi si può ricorrere all'uso di software dedicati. L'Istituto di ricerca Matematica di Rennes ha sviluppato il software CHIC⁸ che consente di eseguire l'analisi implicativa e di rappresentare i risultati di tale analisi mediante dei "grafi implicativi". In figura 2.11 è riportato un esempio di grafo implicativo (che sarà descritto nel cap. 4) che rappresenta i risultati dell'analisi implicativa dei dati estratti da alcune delle sperimentazioni effettuate. I numeri indicati nel grafo si riferiscono al livello di confidenza dell'implicazione tra le variabili collegate dalle frecce.

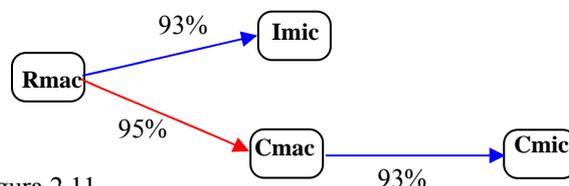


Figura 2.11

Osserviamo, infine, che il livello di confidenza relativo all'implicazione tra due variabili è legato al coefficiente di correlazione tra le due variabili. A

⁸ CHIC è disponibile al seguente indirizzo: Prof. R.Gras IRMAR Institut Mathématique Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex, Francia.

parità di ogni altra condizione, un elevato valore del coefficiente di correlazione implica un elevato livello di significatività dell'implicazione.

Capitolo 3. La dimensione progettuale: progettazione dell'ambiente didattico e adattamento educativo

In questo capitolo si espliciteranno gli elementi e le ipotesi che hanno orientato la progettazione didattica e si descriveranno le componenti dell'ambiente didattico predisposto. Dopo un'analisi di tipo storico – epistemologico, riguardante l'evoluzione della teoria elettronica dei solidi, si riportano i risultati principali emersi dagli studi precedenti relativi alle problematiche didattiche connesse con l'argomento disciplinare oggetto della ricerca. Sulla base delle informazioni tratte da tali analisi, vengono, dunque, introdotte le ipotesi e i presupposti fondamentali su cui si basa l'intero progetto e che hanno ispirato la ricostruzione educativa dei contenuti, le scelte e le soluzioni didattiche che lo caratterizzano. Dopo una dettagliata disamina delle strategie pedagogiche e del ciclo didattico che organizza le diverse componenti del percorso, si descrivono i principali strumenti progettati al fine di supportare l'apprendimento e l'insegnamento.

Si sottolinea che alcuni degli strumenti e delle strategie sono stati pensati e progettati a seguito della revisione dell'ambiente didattico ispirata dagli esiti della prima fase verifica (l'esperimento pilota descritto nei capitoli 4 e 5) e delle calibrazioni in itinere. Nondimeno, al fine di rendere organica l'esposizione, la descrizione di tali strumenti è inclusa in questo capitolo.

3.1 Analisi storico – epistemologica e studi precedenti

Come illustrato nel par. 2.6.3 la metodologia utilizzata per la progettazione dell'ambiente didattico si basa su due tipi di analisi a priori. Da un lato un'analisi storica ed epistemologica finalizzata ad enucleare gli aspetti fondamentali e i concetti chiave delle conoscenze scientifiche oggetto del progetto didattico,

nonché le modalità di sviluppo di tali conoscenze scientifiche, dall'altro un'analisi degli studi educativi precedenti, finalizzata a far emergere le concezioni alternative degli allievi e le potenziali difficoltà connesse con l'apprendimento e l'insegnamento dell'argomento scelto. In questo paragrafo si riportano gli esiti di entrambi i tipi di analisi.

3.1.1 Origini e sviluppo della teoria elettronica⁹

Il principale schema interpretativo applicato allo sviluppo della teoria elettronica dei metalli, nel periodo che va dalla formulazione della teoria degli elettroni liberi di Drude alla trattazione quanto - meccanica di Bloch, ricalca quello utilizzato per analizzare il più ampio problema dell'evoluzione della meccanica quantistica (Hoddeson e Baym, 1992; Eckert et al, 1992). Si ritiene, ad esempio, che, come nello sviluppo di quest'ultima, i passi che conducono alla teoria quantistica della conduzione elettrica possano essere suddivisi in tre distinti stadi evolutivi (Hoddeson e Baym, 1992):

- il periodo classico, che va dal 1900 al 1926, dominato dal modello di Drude (1900) e Lorentz (1905), in cui si ipotizza che le proprietà di trasporto di un metallo siano dovute ad un gas ideale di elettroni di conduzione, che obbediscono alla statistica di Maxwell – Boltzmann, e che interagiscono con gli ioni metallici solo esclusivamente tramite urti;
- il periodo semiclassico, che va dal 1926 al 1928, caratterizzato dal modello di Sommerfeld, che modifica la teoria di Drude – Lorentz applicando agli elettroni di conduzione la statistica di Fermi – Dirac;
- il periodo moderno, dal 1928 in avanti, caratterizzato, a partire dalla teoria di Bloch (1928), da una piena applicazione alla teoria elettronica dell'apparato teorico-matematico della meccanica quantistica.

Tuttavia, per gli scopi della presente ricerca, si ritiene utile introdurre una ulteriore articolazione interna del periodo classico, distinguendo una prima fase,

⁹ Parte dei contenuti di questo paragrafo sono tratti da A. Bonura "Sulla teoria elettronica dei metalli: modelli classici e prime applicazioni della teoria dei quanti", in preparazione, e da A. Bonura "La teoria elettronica dei metalli tra storia e didattica" reperibile in rete all'indirizzo: http://math.unipa.it/~grim/dott_HD_MphCh/bacheca_dott.htm

quella che va dalla formulazione del modello di Drude (1900) fino all'incirca al 1912 (anno di pubblicazione della teoria di Debye delle vibrazioni reticolari), ed una seconda fase che comprende la restante parte. Questa seconda fase viene generalmente considerata un periodo in cui la teoria elettronica versa in uno stato di disordine e di confusione, durante il quale si assiste al proliferare infruttuoso di teorie ed ipotesi alternative miranti a superare le gravi difficoltà e contraddizioni insite nel modello di Drude – Lorentz (Kaiser, 2001). Sebbene degli aspetti di questa seconda fase scarseggino resoconti storici dettagliati, un'attenta analisi delle fonti storiche disponibili ha evidenziato che alcuni dei modelli proposti durante tale periodo rivestono una notevole importanza in termini didattici. Da essi, infatti, si può trarre spunto per la costruzione di “modelli di collegamento” utili ad attenuare l'impatto pedagogico insito nella transizione tra teoria classica e teoria quantistica della conduzione elettrica. Ci riferiamo, in particolare, al modello di Wien (Wien, 1913), precisato ed esteso successivamente da Keensom (Keesom, 1913), in cui si introduce l'influenza delle vibrazioni reticolari sullo scattering elettrone – reticolo cristallino, al fine di interpretare alcuni andamenti sperimentali.

In figura 3.1 è rappresentato uno schema cronologico di massima relativo alle principali tappe oggetto della trattazione seguente.

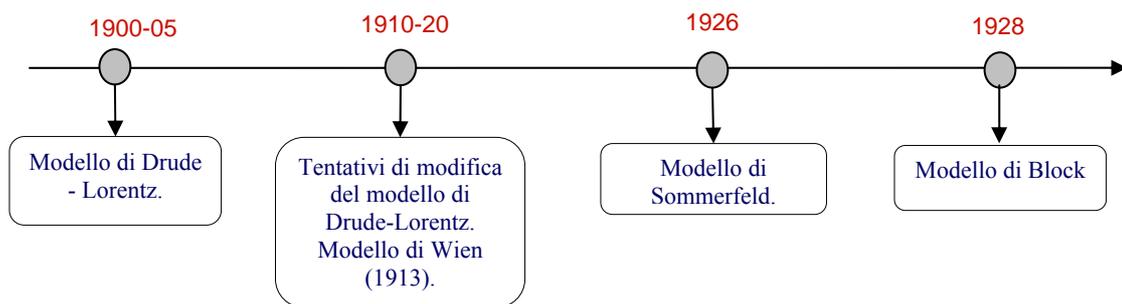


Figura 3.1

Per comprendere la genesi dei primi modelli elettronici dei metalli è opportuno riassumere il quadro teorico-sperimentale da cui essi traggono i loro presupposti. A tal fine, in tabella 3.1 sono elencati i principali risultati

sperimentali riguardanti la conduzione elettrica nei metalli ottenuti durante il XIX secolo.

Tabella 3.1

Fatti sperimentali
Leggi di Ohm (1827)
Andamento della resistività con la temperatura.
Effetti termoelettrici: ad esempio l'effetto Seebeck (1822)
Legge di Wiedemann e Franz (1853)
Effetto Hall (1879)
Interpretazione di Thomson dei raggi catodici come dovute ad un flusso di cariche elementari (1897-98)

Alcuni degli aspetti sperimentali riportati in tabella 1 meritano di essere approfonditi. Innanzitutto, sottolineiamo, anche per la rilevanza per il progetto didattico qui discusso, che la resistività di molti metalli esibisce un andamento pressoché lineare con la temperatura. Ciò veniva connesso con la legge di Wiedemann e Franz che stabilisce che il rapporto tra la conducibilità termica k ed elettrica σ di un metallo sia direttamente proporzionale alla temperatura T del metallo, ovvero:

$$\frac{k}{\sigma T} = \text{costante}$$

Tale relazione, unitamente all'osservazione degli effetti termoelettrici, faceva presupporre che la conduzione del calore e dell'elettricità fossero fenomeni strettamente connessi, dovuti ad un unico tipo di flusso microscopico.

Inoltre, gli studi sperimentali di Thomson sui raggi catodici potevano essere interpretati in termini di un flusso di cariche elettriche elementari (gli elettroni teoricamente previsti da Lorentz nel 1892), di cui egli effettuò le prime misure della carica elettrica (che risultano in accordo con quelle del quanto di elettricità nelle soluzioni elettrolitiche) e della massa.

Da tali fatti sperimentali e relative interpretazioni emergevano alcune ipotesi microscopiche riguardanti i metalli, che possono essere così riassunte:

- la struttura microscopica dei metalli è caratterizzata dalla presenza di particelle (gli elettroni) dotate di carica elementare e libere di muoversi¹⁰;
- sono queste le particelle responsabili della conduzione termica ed elettrica dei metalli.

Il modello classico della conduzione nei metalli

Nel 1900 due articoli di Paul Drude determinano importante svolta nella teoria elettronica dei metalli (Drude, 1900). Il modello di Drude semplifica e precisa alcuni aspetti di un modello matematico precedentemente formulato da Riecke, ottenendo un migliore accordo i risultati sperimentali.

Il modello di Drude prevede due tipi di portatori di carica elettrica pari a $\pm e$. Per “il quanto elementare di elettricità” egli assume “il numero trovato da J.J. Thomson che si accorda bene con i dati trovati per l'elettrolisi”.

Trasferendo per intero l'impianto concettuale della teoria cinetica dei gas alla teoria della conduzione elettrica, Drude ipotizza che l'energia cinetica degli elettroni di conduzione sia proporzionale alla temperatura assoluta, secondo l'espressione:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \alpha T \quad (3.1)$$

con la costante α numericamente uguale alla costante universale prevista nella teoria cinetica dei gas (in notazione moderna $\alpha = 3/2 k_B$). Secondo il modello di Drude, durante il loro movimento, gli elettroni urtano continuamente contro gli atomi metallici e si può associare ad essi un cammino libero medio λ uguale per tutti gli elettroni¹¹. Utilizzando tale modello microscopico di tipo meccanico e

¹⁰ Alla fine dell'800, il fatto che il verso del potenziale di Hall è positivo in alcuni metalli (effetto Hall anomalo) e negativo in altri, conduceva all'ipotesi che i portatori di carica elettrica potessero avere carica elettrica di entrambi i segni.

¹¹ Nel suo lavoro Drude trascura i dettagli statistici del cammino libero degli elettroni e ciò introduce un errore nel calcolo della conducibilità elettrica (che viene sottostimata per un fattore 2). Tale errore sta alla base del sorprendente accordo quantitativo della teoria di Drude con la

imponendo la validità delle leggi di Ohm, Drude riesce ad esprimere diverse grandezze caratteristiche dei metalli in termini di parametri microscopici. In particolare, egli calcola la conducibilità elettrica e la conducibilità termica dei metalli, ottenendo in questo modo il rapporto tra le due grandezze, che risulta in perfetto accordo con la già citata legge di Wiedemann e Franz.

Per il calcolo della conducibilità elettrica egli ipotizza che il moto degli elettroni, sottoposti all'azione di un campo elettrico E , venga controbilanciato da una forza resistente dovuta agli urti degli elettroni contro gli atomi del metallo, di modo che in condizioni di stazionarie la velocità di deriva v_d degli elettroni risulta costante. Il ragionamento utilizzato da Drude per calcolare v_d può essere riassunto nel modo seguente. Sotto l'azione di un campo elettrico E , la velocità degli elettroni sarà pari alla somma della loro velocità termica v (proporzionale alla radice quadrata di T) e della velocità v_d (che si suppone piccola rispetto a v) lungo la direzione del campo. Se $\tau = \lambda/v$ è il tempo medio tra due urti consecutivi, alla fine di un percorso libero medio la forza elettrica imprimerà all'elettrone una velocità:

$$-\frac{eE \lambda}{m v} \quad (1.2)$$

dove m rappresenta la massa di un elettrone (e considerando soltanto cariche negative). Trascurando i dettagli statistici del cammino libero degli elettroni (supponendo, cioè, erroneamente che la distribuzione dei cammini liberi sia uniforme), Drude assume che la velocità di deriva degli elettroni sia pari alla metà della velocità espressa dalla (2). In questo modo, applicando le leggi di Ohm (che sono, dunque, esplicitamente assunte nella teoria di Drude) egli perviene alla seguente espressione per la conducibilità elettrica σ :

$$\sigma = \frac{ne^2 \lambda}{2mv} = \frac{ne^2}{2m} \tau \quad (1.3)$$

legge sperimentale di Wiedemann-Franz, che costituisce uno dei principali motivi del grande favore con cui venne accolta la teoria.

o, in virtù del principio di equipartizione (eq. 1.1)

$$\sigma = \frac{ne^2 \lambda}{2\sqrt{3mkT}} = \quad (1.4)$$

Il passo successivo nello sviluppo della teoria elettronica dei metalli fu compiuto nel 1905 da A.H. Lorentz (Lorentz, 1905). Sulla scorta dei risultati ottenuti da Richardson (1901) sull'emissione termoionica (Richardson, 1929), Lorentz assunse che in un metallo fossero presenti soltanto elettroni negativi che obbedivano alla statistica di Maxwell - Boltzmann e sviluppò i calcoli utilizzando i metodi della meccanica statistica. In particolare, assumendo che la presenza di un campo elettrico e/o di un gradiente termico inducessero una piccola perturbazione sulla distribuzione di velocità degli elettroni, rispetto alla distribuzione di equilibrio, ottenne le formule per la corrente di elettroni e per la corrente di energia e , a partire da queste, le espressioni per la conducibilità elettrica e termica del metallo. La rivisitazione operata da Lorentz del modello di Drude fornisce la seguente espressione per la conducibilità elettrica:

$$\sigma \approx \frac{ne^2}{\sqrt{3mkT}} \lambda \quad (1.5)$$

che differisce dalla formula (1.4) per il fattore 2 erroneamente introdotto da Drude. L'eliminazione di tale fattore nell'espressione della conducibilità elettrica, peggiora i risultati ottenuti da Drude in relazione alla legge di Wiedemann e Franz. Sebbene Lorentz dichiarò esplicitamente, all'inizio dell'articolo, che il suo scopo è quello "di mostrare tutta la bellezza della teoria di Drude", di fatto, i risultati che ottiene ne indeboliscono uno dei principali punti di forza, ossia l'accordo quantitativo della teoria con la legge empirica di Wiedemann e Franz. Ma la teoria si scontrava con diversi altri problemi, che emersero via via nei sei anni successivi il perfezionamento della teoria da parte di Lorentz.

Alcuni problemi erano di natura teorica e riguardavano principalmente il principio di equipartizione dell'energia. Il modello di Drude-Lorentz, infatti, prevedeva un contributo $3/2 R$ al calore specifico molare del metallo dovuto agli

elettroni liberi, che non aveva alcun riscontro sperimentale. Il teorema di Nerst, formulato nel 1911, rendeva ancora più marcate le contraddizioni termodinamiche insite nel modello. Esso prevedeva infatti che il calore specifico di una sostanza, e dunque anche quello di un metallo, doveva tendere a zero al tendere a zero della temperatura assoluta, è ciò non era in alcun modo giustificabile nel contesto della teoria di Drude – Lorentz (e, più in generale, nel contesto della fisica classica).

Altri problemi erano connessi con il mancato accordo con alcuni andamenti sperimentali, in particolare l'andamento osservato della resistività di un metallo in funzione della temperatura, che risultava pressoché lineare in un ampio range di temperature. Dalla formula (1.5) si deduce, invece, che la resistività (pari a $1/\sigma$) è proporzionale a $T^{1/2}$, tranne che non si ammetta che, per qualche imprecisata ragione, il cammino libero medio λ sia proporzionale a $T^{-1/2}$. In relazione a tale problema, la discrepanza diventava ancor più drammatica alla luce degli studi di sperimentali Kammerling Onnes sulla resistività metalli a basse temperatura ed, in particolare, in seguito alla scoperta, avvenuta nel 1911, del fenomeno della superconduttività, che evidenziava l'annullarsi discontinuo della resistività del mercurio al di sotto della temperatura di circa 4 K.

Sviluppi della teoria nel periodo classico e modello di Wien

Gran parte dei modelli proposti¹² (se ne contano 14), nel periodo che va, all'incirca, dal 1910 al 1920, in sostituzione di quello di Drude–Lorentz sono basati, al pari di quest'ultimo, sull'ipotesi di “percorso libero” (Bridgman, 1924), centrati cioè sull'ipotesi che gli elettroni si muovono liberamente all'interno del metallo ad eccezione degli istanti in cui la loro traiettoria si arresta bruscamente a causa di un urto; tali teorie presuppongono che l'effetto di un campo elettrico si manifesti tramite una velocità di trasporto supplementare che viene annichilata ogniqualvolta l'elettrone subisce un urto. Tutte le teorie del percorso libero conducono alla stessa formula (l'equazione (1.5)) per la conducibilità elettrica e tutte contengono implicitamente la legge di Ohm. I modelli proposti differiscono

¹²Le informazioni sui modelli proposti in questo periodo sono state ricavate dall'analisi degli atti della conferenza di Solvay del 1924 dedicata alla “conducibilità elettrica dei metalli e problemi connessi”.

per le differenti espressioni di n , λ , e v . Sebbene gli schemi utilizzati per modificare l'immagine fisica siano diversi, qui esamineremo il modello proposto da Willy Wien nel 1913 e caratterizzato dall'applicazione delle prime idee quantistiche al problema della conduzione elettrica.

Il modello di Wien può essere considerato una diretta estensione della teoria di Einstein e Debye delle vibrazioni reticolari. Gli obiettivi principali che ispirano la formulazione del modello Wien sono il tentativo di spiegare il contributo trascurabile degli elettroni al calore specifico dei metalli e l'andamento della resistività di un metallo alla variare della temperatura. A tal fine Wien rinuncia al postulato di una velocità d'equipartizione per gli elettroni, per sostituirlo con l'ipotesi che essi possiedano una velocità quasi del tutto indipendente dalla temperatura, determinata da una sorta di meccanismo di dissociazione, anch'esso indipendente dalla temperatura. Egli suppone, in particolare, che il numero di elettroni liberi sia uguale a quello degli ioni e che le vibrazioni di *punto zero* del reticolo (previste dalla *seconda teoria quantistica* di Plank) pongano gli elettroni in uno stato d'agitazione tale che un aumento di temperatura abbia un effetto trascurabile sulla loro energia; sulla base di tali ipotesi è evidente che il contributo degli elettroni al calore specifico risulti trascurabile. La teoria di Wien è una teoria del percorso libero, nel senso che egli suppone che gli elettroni si muovano attraverso i "canali" (interstizi) tra gli atomi. La spiegazione della legge di Ohm e dell'effetto Joule è dunque la stessa che nella teoria classica. Wien, pertanto, mantiene la formula (1.5) per la conducibilità, ma poiché nella sua teoria la velocità media v degli elettroni non è influenzata dalla temperatura, la dipendenza di σ dalla temperatura è tutta contenuta nel cammino libero medio λ (o, se vogliamo, nel tempo di volo medio $\tau = \lambda/v$).

Per rendere conto della dipendenza della conducibilità elettrica dalla temperatura, Wien introduce una seconda ipotesi decisamente "non classica", vale a dire che la frequenza degli urti degli elettroni contro gli ioni (e quindi il loro cammino libero medio) non dipenda dalle dimensioni degli ioni quanto piuttosto dall'ampiezza delle vibrazioni atomiche. Un esame più approfondito mostrava, in particolare, che il percorso libero medio doveva dipendere dal quadrato

dell'ampiezza di vibrazione. Dunque, utilizzando la teoria di Debye delle vibrazioni reticolari, Wien esprime l'ampiezza d'oscillazione atomica come funzione della temperatura (e della frequenza d'oscillazione) e ricava un'espressione della conducibilità elettrica che varia come $1/T$ per temperature maggiori della temperatura di Debye (in accordo con i risultati sperimentali). Poiché, inoltre, nella teoria di Wien gli urti degli elettroni contro gli atomi dipendono soltanto dall'agitazione termica, allo zero assoluto gli elettroni possono spostarsi liberamente all'interno del metallo. In questo modo la teoria di Wien forniva anche una possibile interpretazione della superconduttività¹³.

Sebbene la teoria di Wien riusciva a risolvere molte delle difficoltà della teoria classica della conduzione elettrica, essa tuttavia era basata su presupposti difficilmente accettabili per le conoscenze del tempo. Decisamente "esotica" risultava, in particolare, l'ipotesi relativa alla proprietà di *degenerazione* del gas di elettroni liberi, secondo cui gli elettroni dovessero possedere un'energia notevolmente superiore a quella di equipartizione (anche allo zero assoluto) e quasi del tutto indipendente dalla temperatura. Come vedremo, una fondata giustificazione teorica di tale ipotesi verrà fornita soltanto nel 1926 da Sommerfeld sulla base dell'applicazione della statistica di Fermi - Dirac al gas di elettroni liberi.

Il modello di Sommerfeld¹⁴

Sebbene la teoria di Wien costituisse un indubbio progresso nell'interpretazione delle proprietà dei metalli, essa non fu ulteriormente sviluppata. Più in generale, quello che segue è un lungo periodo di stasi, in cui non si realizza alcun avanzamento significativo nell'interpretazione delle proprietà dei metalli.

¹³ Tale interpretazione era, peraltro, condivisa da Kamerlingh Onnes, che aveva scoperto il fenomeno della superconduttività.

¹⁴ Per un'analisi dettagliata dello sviluppo della teoria elettronica nel periodo 1926-1928 si veda, ad esempio, Hoddeson e Baym, 1992 e "The beginnings of solid state physics", Proc. Roy. Soc. A371, 1980, 3-177.

Fu soltanto nel 1924 che Shrödinger ed Einstein avanzarono nuovamente delle ipotesi sulla degenerazione del gas ideale e sulle possibili conseguenze sulla teoria elettronica dei metalli, quest'ultimo, in particolare, nel contesto della nuova statistica da lui sviluppata sulla base delle idee di Bose. Ma il punto di svolta si ebbe nel 1926, con la formulazione della statistica quantistica di Fermi – Dirac, cui obbediscono le particelle che soddisfano il principio di esclusione di Pauli e successivamente denominate *fermioni*.

Con l'introduzione della nuova statistica si ebbe una forte accelerazione negli sviluppi della teoria elettronica, che portò, in breve tempo, alla formulazione della moderna teoria quantistica della conduzione nei solidi. In particolare, nel 1925 W. Pauli applica la nuova statistica al gas di elettroni, fornendo una interpretazione per il debole paramagnetismo dei metalli alcalini e una prova indiretta del fatto che, come gli elettroni atomici, anche gli elettroni di conduzione fossero fermioni.

Nel 1926 Sommerfeld estende il modello di Pauli al fine di rivisitare la teoria di Drude-Lorentz. I risultati ottenuti da Sommerfeld mostrano chiaramente come proprietà di degenerazione del gas di elettroni, qualitativamente simili a quelle anticipate dalla teoria di Wien, emergono naturalmente come conseguenza dell'applicazione della statistica di Fermi - Dirac. Sulla base di tali proprietà Sommerfeld riesce a spiegare, tra l'altro, il contributo trascurabile degli elettroni al calore specifico dei metalli e la legge di Wiedemann - Franz.

Sebbene la teoria di Sommerfeld costituisse un passo avanti nell'interpretazione delle proprietà dei metalli, rimanevano ancora molti punti oscuri. In particolare, poiché il modello di Sommerfeld non includeva gli effetti delle vibrazioni reticolari, esso non forniva alcuna interpretazione dell'andamento della resistività dei metalli in funzione della temperatura. Inoltre, la teoria di Sommerfeld prevedeva che gli elettroni potessero muoversi all'interno del metallo (i cui ioni sono supposti in quiete) urtando con una frequenza bassissima con gli ioni del reticolo. Benché ciò giustificasse l'approssimazione di elettroni liberi, si poneva il problema di comprendere come facessero gli elettroni ad evitare gli ioni con tanta efficacia.

La teoria quanto meccanica di Bloch

Il problema fu affrontato e risolto nel 1928 da Ernst Bloch, uno dei più brillanti allievi di Eisenberg, il quale, utilizzando l'intero apparato matematico e concettuale della meccanica quantistica, impostò l'equazione d'onda per un elettrone sottoposto al potenziale periodico generato dagli ioni del cristallo. La soluzione dell'equazione di Schrödinger implicava che l'elettrone in un cristallo perfetto, con ioni a riposo, potesse muoversi liberamente come in uno spazio vuoto, cosicché gli eventi di scattering che potevano rendere conto del valore finito della resistenza elettrica dovevano essere dovuti a deviazioni rispetto ad un potenziale perfettamente periodico. Come correttamente previsto da Wien 15 anni prima, tali deviazioni erano principalmente costituite dalle vibrazioni reticolari.

Sviluppando la sua teoria, Bloch considera, dunque, le interazioni dell'elettrone con le onde elastiche, aggiungendo al potenziale un termine che rende conto delle oscillazioni reticolari. In questo modo dimostra che il termine aggiunto all'equazione causa lo scattering degli elettroni e ottiene un andamento della conducibilità elettrica analogo a quello già ottenuto da Wien (cioè proporzionale a $1/T$) per temperature superiori alla temperatura di Debye e tendente a zero come $1/T^5$ per T tendente a zero.

E' importante sottolineare che la teoria di Bloch è alla base dello sviluppo della teoria a bande dei solidi che permette di riassumere in un unico schema interpretativo il comportamento non soltanto dei conduttori, ma anche dei semiconduttori e degli isolanti. Della trasposizione didattica della teoria a bande ci occuperemo più avanti in questo capitolo, utilizzando, tuttavia, un approccio diverso da quello utilizzato da Bloch.

3.1.2 Considerazioni epistemologiche e conseguenze didattiche

L'analisi precedente permette di trarre due diverse considerazioni epistemologiche. Innanzitutto, abbiamo visto che il tentativo di comprendere, ad un livello più profondo, le proprietà elettriche della materia ha innescato un processo di sviluppo scientifico che ha condotto, nell'arco di 30 anni, alla

formulazione di una completa teoria della struttura della materia e che ha contribuito in modo significativo all'evoluzione della meccanica quantistica.

Inoltre, tale analisi permette di precisare alcune delle idee espresse, in termini generali, nel capitolo precedente. Essa fornisce, infatti, un esempio concreto delle modalità e dei processi implicati nello sviluppo di una teoria scientifica, nella fattispecie la teoria elettronica della materia. Ciò che riteniamo utile evidenziare, a tal riguardo, sono le mutue e sinergiche relazioni fra tre diversi elementi: teoria, fatti sperimentali, modelli esplicativi. In primo luogo, abbiamo visto che la formulazione del modello classico della conduzione è, da un lato, basata su statuti teorici (elettromagnetismo, termodinamica, meccanica), dall'altro su alcuni fatti sperimentali (ad esempio, le leggi di Ohm, l'effetto Hall, i raggi catodici). In secondo luogo, l'evoluzione ed il perfezionamento dei modelli microscopici della conduzione è trainato da due fattori: dalla necessità di estendere il potenziale esplicativo (si veda par. 2.7.2) del modello ad un ambito fenomenologico sempre più ampio (ad esempio, l'interpretazione dell'andamento della resistività con la temperatura o del calore specifico dei metalli o delle proprietà dei semiconduttori) e dal tentativo di includere all'interno del modello nuove ipotesi e principi teorici (ad esempio, il principio di Nerst, la teoria di Plank, la statistica di Fermi - Dirac). Infine, abbiamo visto che il mancato "incontro" tra previsioni basate sul modello e andamento osservato dei fenomeni ha stimolato l'avanzamento della teoria e la formulazioni di nuovi modelli che includono i nuovi elementi teorici.

Tali aspetti epistemologici inducono alcune considerazioni didattiche.

- 1) Si ritiene che un'opportuna riproduzione delle relazioni tra teoria, osservazioni sperimentali e costruzione di modelli microscopici, che caratterizzano lo sviluppo storico della teoria elettronica, possa avere ricadute positive anche sullo sviluppo delle conoscenze degli allievi.
- 2) Una trasposizione didattica della teoria elettronica dei solidi che preveda una stretta connessione tra analisi macroscopica e procedure di modellizzazione microscopica, può consentire di introdurre le idee della meccanica quantistica a partire dall'osservazione di fenomeni elettrici

facilmente riproducibili (ad esempio, l'andamento della resistività di un metallo e di un semiconduttore dalla temperatura)

Tali considerazioni, che saranno corroborate dall'analisi degli studi pedagogici precedenti, rappresentano alcuni dei presupposti fondamentali su cui si basa il progetto didattico discusso in questo capitolo.

3.1.3 Studi educativi precedenti riguardanti i modelli microscopici dei solidi e i fenomeni di conduzione elettrica

In questo paragrafo saranno riportati i risultati dei principali studi relativi alle problematiche riguardanti l'apprendimento dei modelli microscopici della materia e delle proprietà elettriche. E' bene ribadire, tuttavia, che sebbene diversi studi abbiano affrontato i problemi relativi all'apprendimento e all'insegnamento degli aspetti macroscopici dei fenomeni elettrici (ad esempio, quelli connessi al funzionamento dei circuiti), sono pochi gli studi che hanno affrontano il problema in relazione agli aspetti microscopici di tali fenomeni. Ciò premesso, in questo paragrafo, saranno sottolineati tre diversi aspetti connessi al problema: concezioni alternative e modelli spontanei di struttura della materia e dei fenomeni elettrici; ipotesi pedagogiche finalizzate a favorire l'apprendimento dell'argomento; opportunità didattiche offerte dalla trattazione dell'argomento.

Il problema delle concezioni alternative e dei modelli spontanei evidenziati dagli studenti nell'ambito dell'elettricità, è stato affrontato utilizzando, tipicamente, un strumento di verifica rappresentato da un semplice circuito elettrico costituito da una batteria, da due fili di collegamento e da una o più lampadine (Borges e Gilbert 1999). La consegna consiste nel collegare i diversi elementi, in modo da accendere la lampadina. Restringendo le considerazioni a studenti di scuola secondaria, i modelli mentali evidenziati rientrano in sei diverse categorie (Karrqvist, 1985; Osborne 1983; Shipstone, 1985):

- Modello unipolare: il modello prevede un flusso di corrente dal terminale positivo della batteria alla base della lampadina. Il secondo filo è considerato superfluo. Questo modello implica che la corrente non è distinta dall'energia e che non si conserva.

- Modello a due componenti: correnti con segno + e – provengono dai due terminali della batteria e, incontrandosi in corrispondenza della lampadina producono energia, facendola accendere.
- Modello a circuito chiuso: tutti gli elementi del circuito hanno due connessioni. La corrente circola in un solo verso ed il circuito funziona solo ad interruttore chiuso. Tale modello prevede la bipolarità degli elementi del circuito ma suggerisce che la corrente non si conserva a causa di una non differenziazione tra corrente ed energia.
- Modello a consumo di corrente: la corrente è descritta per mezzo una sequenza cronologica di eventi. La corrente si consuma quando attraversa la componente resistiva del circuito, però una frazione ritorna all'altra estremità del circuito.
- Modello a sorgente costante di corrente: la corrente circola nel circuito ed è necessario che il circuito sia chiuso. La batteria è riguardata come una sorgente costante di corrente indipendentemente dal circuito connesso. In accordo a tale modello due lampadine condividono la stessa corrente indipendentemente da come sono collegate.
- Modello di Ohm: corrisponde al modello scientifico e con una frequenza che cresce in funzione dell'età degli studenti, probabilmente come risultato dell'istruzione.

Come già osservato, molti degli studi sui modelli dell'elettricità riguardano il funzionamento di semplici circuiti e soltanto pochi affrontano il problema della natura della corrente elettrica. Uno dei primi lavori che ha affrontato tale problema è uno studio condotto da Eylon e Ganiel (1990). Sebbene tale indagine non fosse finalizzata ad evidenziare i modelli spontanei degli allievi, essa ha fatto emergere una grande quantità di evidenze riguardanti i ragionamenti utilizzati in relazione all'elettricità. Lo studio pone l'enfasi sui processi microscopici che hanno luogo in un circuito che attraversa una fase di transitorio e sulle relazioni che tali processi hanno con il comportamento macroscopico del circuito. Stockmayer e Treagust (1996) si interessano, invece, alle immagini e alle metafore che non esperti ed esperti evocano quando parlano dell'elettricità. Essi

trovano, ad esempio, che anche alcuni esperti (insegnanti) utilizzano un modello meccanico in cui gli elettroni sono visti come piccole biglie che si muovono attraverso un tunnel.

Borges e Gilbert (1999), nell'ambito di uno studio finalizzato all'analisi dei modelli mentali relativi alla natura dell'elettricità e alla loro variabilità in funzione dell'età, dell'esperienza e della crescita delle conoscenze concettuali sull'argomento, analizzano i modelli spontanei espressi sia da allievi di scuola superiore (con età compresa tra i 15 e 17 anni) sia da diversi gruppi di professionisti (tecnici di laboratorio, insegnanti, ingegneri elettrici). Borges e Gilbert individuano quattro diverse categorie di modelli spontanei: elettricità come flusso, elettricità come correnti opposte, elettricità come cariche in moto, elettricità come fenomeno di campo.

Il modello "elettricità come flusso" è una sorta di modello idraulico. Esso è caratterizzato da una cattiva differenziazione delle nozioni di corrente, energia, elettricità e tensione. La corrente è vista come "qualcosa" che fluisce, come l'acqua in un circuito idraulico, e la batteria è considerata la sorgente di tale flusso.

Il "modello a correnti" opposte è simile al modello a due componenti citato prima: la corrente (positiva e negativa) fluisce dai due terminali della batteria in direzioni opposte. In alcuni casi, gli studenti menzionano elettroni e protoni, suggerendo che la corrente è costituita da particelle cariche che si muovono attraverso il circuito.

Nel "modello di elettricità come cariche in moto" la corrente consiste di particelle cariche in moto attraverso il circuito. La batteria è riguardata come una sorgente di energia che sviluppa cariche elettriche. L'energia generata dalla batteria si consuma quando attraversa le componenti resistive del circuito. Le risposte fornite dagli studenti riportano, anche, delle analogie di tipo meccanico e antropomorfo finalizzate a spiegare le interazioni delle particelle cariche con gli atomi delle componenti del circuito, come collisioni e movimento attraverso un mezzo viscoso (attrito).

Nel “modello di elettricità come fenomeno di campo” la corrente viene distinta dall'energia ed è rappresentata come il movimento di cariche elementari sotto l'azione di una ddp. La corrente circola soltanto se il circuito è chiuso e si conserva. La batteria genera una ddp costante che, a sua volta, genera un campo elettrico. E' questo un modello prossimo al modello scientifico ed è espresso da molti insegnanti e dagli ingegneri.

Come vedremo, le indagini condotte nell'ambito delle sperimentazioni dell'ambiente didattico progettato riproducono gran parte dei risultati riportati da Borges e Gilbert. Dalle nostre indagini, emergono, inoltre, modelli mentali dei fenomeni elettrici di cui non si trova traccia negli studi precedentemente citati.

Dai risultati ottenuti da Borges e Gilbert emerge un altro aspetto, ovvero il fatto che la distribuzione dei modelli mentali dell'elettricità evidenzia una progressione, dai più semplici modelli fenomenologici ai modelli scientifici accettati, al crescere dell'età e delle competenze professionali dei soggetti esaminati.

Il problema delle concezioni degli studenti di scuola superiore (dai 15 ai 18 anni di età) sulla struttura interna dei metalli e la conduzione elettrica è stato affrontato da De Posada (1997). In relazione alle concezioni riguardanti la struttura dei metalli, l'indagine evidenzia come una percentuale relativamente elevata di studenti (tra i 15 e i 16 anni di età) esprime un modello continuo della struttura di un metallo (come costituito da lamine o da piccoli blocchi di pietra). Tra gli allievi che esprimono, invece, un modello discontinuo del metallo, soltanto una percentuale del 30% evidenzia un modello completo, che include, cioè, l'idea di reticolo cristallino e di nuvola elettronica. In relazione all'interpretazione della conduzione elettrica nei metalli, lo studio evidenzia quattro diversi schemi d'interpretazione: la corrente elettrica è energia, gli elettroni conducono la corrente elettrica, la corrente elettrica è prodotta dal movimento di particelle, la corrente elettrica è un flusso di elettroni.

Più recentemente, nell'ambito di uno studio riguardante la comprensione della fisica quantistica, a livello di studi universitari, Wittmann ed altri (2002) conducono un'indagine sui modelli spontanei della conduzione elettrica. In

particolare, gli autori sono interessati a far emergere le concezioni degli studenti ad un livello di descrizione atomico. L'indagine utilizza il metodo delle interviste strutturate relative all'interpretazione microscopica della conduzione in un semplice circuito elettrico. Essa ha evidenziato che molti allievi non accettano l'esistenza di elettroni liberi come nel modello di Drude, ma esprimono un modello spontaneo caratterizzato dall'idea che l'energia (o la potenza o la tensione) della batteria "tira fuori" dagli atomi gli elettroni legati, permettendo ad essi di muoversi attraverso il filo. Tale movimento consiste nel salto degli elettroni da un atomo ad un altro (in una lacuna lasciata libera da un altro elettrone che è stato estratto da un atomo). Si osserva, inoltre, che tale modello spontaneo, denominato "modello jumping", conduce ad interpretazioni erranee di alcuni fenomeni elettrici. Ad esempio, gli studenti che evidenziano tale modello ritengono, erroneamente, che la resistenza elettrica di un metallo diminuisca al crescere della temperatura e che per far sì che in un circuito circoli una corrente elettrica sia necessario che la tensione applicata superi un certo valore di soglia (corrispondente all'energia necessaria per estrarre gli elettroni dagli atomi). Wittmann ritiene che tale modello sia originato dal fatto che gli studenti, nell'interpretare la conduzione, non pensano alle proprietà d'insieme del sistema, ma costruiscono un modello della situazione focalizzando l'attenzione su modello di singolo atomo (così come appreso in chimica).

I risultati riportati da Wittmann sono stati confermati da studi più recenti. Hirvonen (2007), ad esempio, analizzando i modelli spontanei espressi da studenti universitari, individua un modello spontaneo simile al modello jumping riportato da Wittmann.

Come sarà illustrato nel capitolo 5, le indagini condotte nell'ambito della presente ricerca hanno permesso di evidenziare un modello spontaneo che può essere considerato una generalizzazione del modello jumping descritto da Wittmann. Tale modello, che in alcuni casi si manifesta come il modello jumping, è stato battezzato "modello ad elettroni legati". Esso è caratterizzato dal fatto che gli elettroni di conduzione risentono di interazioni, più o meno intense, che ne limitano il movimento e ciò conduce ad interpretazioni erranee di alcuni fenomeni

e proprietà elettriche (ad esempio, l'andamento della resistività con la temperatura e l'interpretazione microscopica della resistenza elettrica).

Come già anticipato, uno studio che ha affrontato il problema delle connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze sui fenomeni elettrici è stato condotto da Eylon e Ganiel (1990). Una delle ipotesi centrali avanzate da questi ricercatori è che, al fine di attivare la capacità di analizzare in termini qualitativi i fenomeni che si verificano nei circuiti elettrici, è necessario che gli allievi sviluppino robusti modelli dei fenomeni microscopici, ciò al fine di permettere loro di comprendere i processi elementari da cui i fenomeni osservati traggono la loro origine.

Allo scopo di trovare conferme sperimentali all'ipotesi avanzata da Eylon e Ganiel, Tacker ed altri (1999) hanno condotto un'indagine sulla comprensione concettuale di fenomeni transienti nei circuiti elettrici. Essi, come arguito da Eylon e Ganiel, trovano che la predisposizione di percorsi d'istruzione che supportino lo sviluppo e la comprensione di modelli dei processi microscopici favorisce lo sviluppo di una migliore comprensione dei fenomeni macroscopici.

Più in generale, le ricerche indicano (Hestenes, M. Wells, and G. Swackhammer, 1992) che quando lo sviluppo di modelli dei fenomeni microscopici è introdotto come parte integrante dello studio dell'elettricità e del magnetismo (Thornton e Sokoloff, 1998), gli studenti internalizzano meglio i concetti, costruiscono modelli mentali coerenti ed usano tali modelli per analizzare ed interpretare fenomeni fisici. Al contrario, studenti che non hanno sviluppato adeguati modelli dei fenomeni microscopici, mostrano grandi difficoltà nell'analizzare i fenomeni macroscopici.

Sebbene l'enfasi sui processi microscopici non sia prescrittiva nell'ambito dello studio dell'elettromagnetismo, lo è, invece, nell'ambito della fisica moderna e della meccanica quantistica. In relazione a tale ambito disciplinare, Tacker (2003) evidenzia un aspetto complementare delle connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici dei fenomeni. Secondo Tacker, infatti, se, per un verso, la comprensione dei fenomeni macroscopici presuppone la comprensione della descrizione microscopica dei processi sottesi, dall'altro, un adeguato

sviluppo di modelli dei processi microscopici (soprattutto nell'ambito della fisica moderna) deve essere basata su pertinenti osservazioni macroscopiche. Nel suo studio sperimentale Tacker raccoglie qualche evidenza, sebbene non conclusiva, sulla validità di tale ipotesi.

Un'ulteriore difficoltà d'apprendimento connessa con le rappresentazioni microscopiche dei fenomeni elettrici riguarda la transizione tra elettrostatica e conduzione elettrica (Eylon e Ganiel, 1990; Hirvonen, 2007; Borghi et al, 2007). Su tale problema ritorneremo più diffusamente nel paragrafo 3.5, dove si illustrerà un approccio didattico finalizzato a favorire la transizione tra rappresentazioni microscopiche dei fenomeni elettrostatici e fenomeni di conduzione.

3.1.4 Problemi aperti e prospettive di ricerca

Gli esiti dei due diversi tipi di analisi, quella storico - epistemologica e quella pedagogica, puntano nella stessa direzione e forniscono utili elementi su cui basare il progetto didattico. Riteniamo, in particolare, che le ultime considerazioni del paragrafo precedente, quelle relative all'importanza pedagogica dell'enfaticizzazione delle connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici dei fenomeni, rappresentino una conferma delle ipotesi di cui ai punti 1 e 2 del par. 3.1.2, formulate sulla base dell'analisi storico - epistemologica dei contenuti. Tali considerazioni stanno alla base dei presupposti pedagogici che ispirano il progetto didattico discusso in questa tesi e che saranno adeguatamente illustrati nel paragrafo successivo.

Dall'esame degli studi precedenti emergono, inoltre, diversi problemi ancora irrisolti relativi all'apprendimento e all'insegnamento dell'argomento disciplinare d'interesse. Riteniamo che alcuni dei principali problemi aperti, che intercettano le vocazioni della presente ricerca, siano i seguenti:

1. sebbene alcuni studi abbiano affrontato il problema delle concezioni spontanee degli allievi sui fenomeni legati alla conduzione elettrica da un punto di vista macroscopico, mancano delle evidenze esaustive sui modelli spontanei dei fenomeni di conduzione a livello microscopico (atomico) e sulla loro funzionalità esplicativa (si veda par. 2.7.2). Le indagini di

Wittmann, ad esempio, si basano su un piccolo campione (soltanto 13 soggetti) e fanno emergere un solo modello spontaneo. Sorge, dunque, l'esigenza di raccogliere ulteriori evidenze sperimentali al fine di costruire una classificazione dei modelli mentali in tale ambito;

2. un altro elemento che riteniamo utile indagare riguarda gli aspetti critici delle conoscenze degli allievi sui fenomeni microscopici. Intendiamo riferirci a quegli elementi delle conoscenze spontanee che attengono la natura microscopica dei fenomeni elettrici e che possono influenzare negativamente lo sviluppo di adeguate competenze interpretative. E' evidente che l'acquisizione di tali informazioni riveste fondamentale importanza al fine di predisporre adeguate strategie d'istruzione;
3. un'altra problematica poco indagata riguarda l'individuazione di correlazioni significative tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze spontanee;
4. un'ultima, ma rilevante, questione riguarda l'ipotesi relativa alle prospettive didattiche aperte da una focalizzazione dell'insegnamento e dell'apprendimento sulle connessioni *macro-micro*, in relazione anche all'introduzione di concetti di meccanica quantistica. Tale questione può essere esaminata da due diversi punti di vista. Il primo riguarda il modo in cui tale ipotesi possa essere implementata in un progetto didattico che risulti efficace ed efficiente, il secondo riguarda, invece, la predisposizione di indagini sperimentali che possano corroborare la validità di tale ipotesi.

I quattro problemi di ricerca, così individuati, riguardano sia aspetti progettuali che sperimentali. Questa tesi intende portare elementi utili a chiarire tutte e quattro le questioni.

3.2 Ipotesi pedagogiche, scelte didattiche e strategie educative

Sulla base degli elementi emersi dalle analisi illustrate nel paragrafo precedente e delle ipotesi che discendono dal quadro teorico e metodologico i cui

aspetti sono stati descritti nel capitolo 2, in questo paragrafo saranno esplicitati i diversi aspetti che caratterizzano l'architettura dell'ambiente didattico, le ipotesi, le scelte pedagogiche e i criteri che hanno contribuito alla formulazione dei percorsi formativi sperimentati. In particolare, in ciò che segue saranno affrontati i seguenti problemi:

- individuazione della significatività educativa e delle ipotesi pedagogiche
- definizione degli obiettivi didattici
- selezione dei contenuti
- individuazione dei nodi didattici e degli elementi critici
- definizione delle strategie pedagogiche e del ciclo didattico

3.2.1 Significatività educativa e ipotesi pedagogiche

Il progetto didattico è finalizzato all'introduzione di elementi di fisica dello stato solido, a partire dagli ultimi anni della scuola superiore, con particolare riguardo ai fenomeni relativi alla conduzione elettrica dei solidi e alle connessioni tra diversi livelli di rappresentazione e di descrizione dei fenomeni.

Le discussioni e i risultati delle precedenti analisi consentono di precisare gli elementi significativi e le opportunità pedagogiche offerte dall'argomento disciplinare scelto. Tali elementi possono essere così sintetizzati:

La Fisica della materia:

- offre l'opportunità di un'ampia sintesi didattica, consentendo di applicare gran parte dei concetti e dei modelli della fisica allo studio di sistemi reali e di frequente uso quotidiano;
- offre l'opportunità di introdurre alcuni dei concetti di base di fisica moderna a partire dall'osservazione di fenomeni macroscopici facilmente riproducibili;
- consente di valutare l'efficacia di approcci didattici che enfatizzino le connessioni tra fenomeni macroscopici e modelli microscopici

Come si è detto nel capitolo precedente, uno degli elementi principali su cui si basa il progetto didattico sono le ipotesi e i presupposti pedagogici *fondamentali*. Essi riguardano le relazioni tra le esigenze disciplinari e aspetti

psico-cognitivi legati al particolare argomento scelto. Tali ipotesi influenzano le principali scelte pedagogiche, la strutturazione e l'organizzazione generale del percorso didattico e la loro specificazione ispira la progettazione delle singole sequenze d'insegnamento/apprendimento in cui esso viene suddiviso e che caratterizzano il progetto. Inoltre, la verifica della correttezza di tali ipotesi costituisce uno degli obiettivi principali delle sperimentazioni effettuate.

Il presupposto pedagogico (ipotesi generale) su cui si fonda l'intero progetto di ricerca discusso in questa tesi è che lo sviluppo di adeguate competenze di analisi e di interpretazione dei fenomeni, soprattutto nell'ambito della fisica moderna, possa essere favorito da approcci didattici che enfatizzino le connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze fisiche. In particolare, si ritiene che una corretta e autonoma elaborazione di informazioni tratte da osservazioni macroscopiche possa favorire lo sviluppo di adeguati modelli dei processi microscopici e che, viceversa, lo sviluppo di adeguati modelli microscopici favorisca la capacità di estrarre dai fenomeni macroscopici informazioni finalizzate alla loro interpretazione.

Scendendo più nel dettaglio, riteniamo che l'utilizzazione di una strategia di costruzione e di sviluppo graduale dei modelli microscopici della conduzione elettrica, vada fondata il più possibile su evidenze e fatti accessibili agli allievi. In questo modo è possibile, da un lato, stimolare il cambiamento concettuale degli allievi che evidenziano conoscenze spontanee inadeguate, tramite l'attivazione di opportuni conflitti cognitivi, dall'altro, favorire il processo di consolidamento dei modelli mentali degli allievi le cui conoscenze risultano più adeguate.

3.2.2 Scopi educativi e contenuti disciplinari

La selezione degli obiettivi pedagogici principali che ispira il percorso formativo è una diretta conseguenza della significatività educativa e delle ipotesi pedagogiche illustrate sopra. Essi discendono da una specificazione di due elementi: le connessioni tra aspetti microscopici e macroscopici dei fenomeni di conduzione e la transizione a modelli quantistici. Gli scopi pedagogici principali possono essere così sintetizzati:

1. favorire la comprensione (e/o attivare capacità di sviluppo) di modelli microscopici, via via più raffinati, a partire da osservazioni sperimentali;
2. attivare la capacità di prevedere comportamenti macroscopici a partire dall'elaborazione di modelli microscopici;
3. esercitare la capacità di analizzare ed interpretare fatti e fenomeni utilizzando e connettendo diversi livelli di rappresentazione;
4. indurre la consapevolezza della necessità del passaggio da interpretazioni classiche a interpretazioni quantistiche a partire dall'osservazione e l'analisi di fenomeni macroscopici facilmente riproducibili.

La definizione degli obiettivi pedagogici e la selezione dei contenuti da insegnare sono aspetti strettamente correlati. La figura 3.2 rappresenta i principali contenuti del progetto didattico. In figura si è operata una suddivisione tra aspetti macroscopici e microscopici.

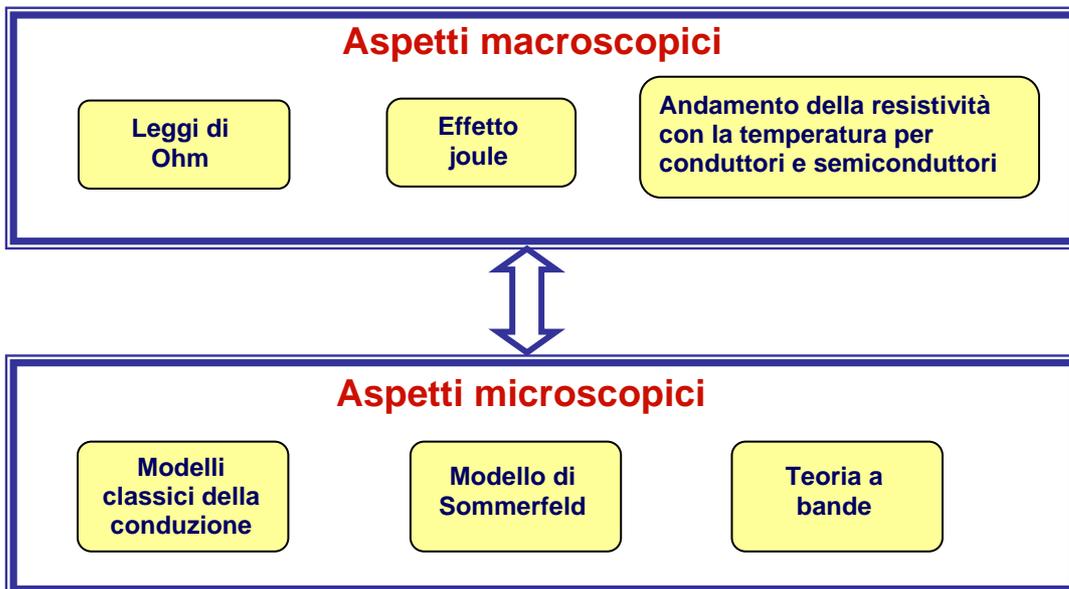


Figura 3.2

Le tabelle 3.2 e 3.3 esplicitano le tappe e i concetti principali che caratterizzano il progetto didattico. Come si può osservare esso è stato suddiviso in due moduli. Il primo modulo riguarda la teoria elettronica dei metalli, mentre il secondo la teoria a bande.

Tab. 3.2 Modulo 1 Teoria elettronica dei metalli

Tappe principali	Concetti principali
Leggi di Ohm Effetto Joule e altre osservazioni sperimentali	Andamento $V(I)$, resistenza elettrica, resistività, dissipazione energia elettrica, effetti elettrotermici
Il modello di Drude - Lorentz	Elettrone, reticolo, velocità di Drift, cammino libero medio, interazione elettrone-ione, dissipazione punto di vista microscopico, influenza dello stato termico
Dipendenza della resistività dalla temperatura	Andamento $\rho(T)$, confronto previsioni teoriche e evidenze sperimentali
Modello di Wien	Influenza vibrazioni reticolari, principio di equipartizione, sezione d'urto, relazioni tra dettagli del modello e proprietà emergenti
Modello di Sommerfeld	Principio di esclusione, elementi statistica di Fermi-Dirac, velocità di Fermi, applicazioni alla teoria elettronica

Tab. 3.3 Modulo 2 Il modello a bande

Tappe principali	Concetti principali
Confronto conduttori, semiconduttori, isolanti e curva caratteristica $R(T)$ per un semiconduttore	Criteri di distinzione conduttori, semiconduttori, isolanti, risposta di un semiconduttore alle variazioni di temperatura
Modello di cristallo unidimensionale e meccanismo di formazione delle bande	Potenziale atomico come buca di potenziale, livelli atomici, cristallo come successione di buche di potenziale, meccanismo di formazione delle bande, gap, influenza della valenza atomica sulle proprietà elettriche, orbitali cristallini e distribuzione della carica elettronica (opzionale)
Effetti della temperatura sulle proprietà elettriche dei semiconduttori	Livello d'occupazione della banda di conduzione, influenza del gap e della temperatura, differenza tra conduttori e semiconduttori, influenza delle impurezze, drogaggio

3.2.3 Nodi didattici e potenziali difficoltà d'apprendimento

L'analisi a priori condotta nel paragrafo precedente permette di avanzare delle ipotesi circa le potenziali difficoltà che possono incontrare gli allievi nell'apprendimento dell'argomento. Una difficoltà d'apprendimento potrebbe

riguardare le concezioni alternative degli allievi circa la struttura interna dei metalli, evidenziata dalle indagini di De Posada (1999), e delle proprietà degli elettroni di conduzione (modello jumping, Wittmann, 2002); ciò potrebbe ostacolare una corretta rappresentazione delle idee di elettroni liberi e di reticolo cristallino, essenziali per la costruzione dei modelli classici della conduzione. Altre potenziali difficoltà di apprendimento sono, invece, connesse con ostacoli di tipo epistemologico e riguardano, in particolare, la transizione alla meccanica quantistica e lo sviluppo di competenze basate sull'elaborazione dei modelli matematici dei processi microscopici. Un ultimo nodo da affrontare è connesso, infine, con l'implementazione didattica del presupposto pedagogico su cui si basa il progetto. In ultima analisi, possiamo così riassumere i nodi didattici connessi in parte all'apprendimento, in parte all'insegnamento:

1. Introduzione del modello classico della conduzione.
2. Motivazione del passaggio da rappresentazioni classiche a rappresentazioni quantistiche
3. Attenuazione dell'impatto del formalismo matematico (o motivazione degli allievi all'utilizzo del formalismo).
4. Enfaticizzazione delle connessioni tra descrizioni macroscopiche e interpretazioni microscopiche

Come vedremo la necessità di affrontare e risolvere, in modo preventivo, tali problemi ha rappresentato un vincolo che ha orientato le scelte e le soluzioni didattiche progettate, a partire dal ciclo didattico illustrato di seguito.

3.2.4 Strategie pedagogiche e ciclo didattico

Al fine chiarire il razionale che ha ispirato la formulazione del ciclo didattico e delle strategie pedagogiche che organizzano l'insegnamento dei contenuti selezionati, riteniamo opportuno richiamare alcune delle scelte e delle ipotesi che discendono dai diversi quadri teorici utilizzati.

Sulla base delle motivazioni espresse nel paragrafo 2.3.3, l'approccio pedagogico che ispira la ricerca qui discussa coniuga la prospettiva psico – cognitiva, focalizzata sulle relazioni tra conoscenza individuale e mondo

materiale, con la prospettiva epistemica, focalizzata sulle relazioni tra sapere scientifico, condiviso e accettato dalla comunità, e mondo naturale. In un certo senso, tale tipo di approccio può essere riguardato come una diretta conseguenza della teoria dell'adattamento di Piaget integrata, però, con le esigenze di negoziazione sociale della conoscenza di derivazione Vygotskiana. Inoltre, come si è detto nel paragrafo 2.4.5, il riconoscimento delle strette analogie strutturali e funzionali tra modelli scientifici e modelli individuali suggerisce che l'avvicinamento tra conoscenze individuali e conoscenza scientifica possa essere efficacemente realizzato operando a livello di modelli, cioè, attraverso un progressivo avvicinamento del modello scientifico e del modello mentale. Ancora, i risultati delle analisi riportate nel paragrafo 3.1 ci hanno permesso di trarre due elementi utili: il primo relativo all'opportunità didattica di riprodurre alcuni degli aspetti di tipo procedurale che hanno caratterizzato l'evoluzione della teoria elettronica della materia (in cui teoria, fenomenologia e modelling sono strettamente correlati), il secondo relativo all'opportunità di focalizzare il discorso didattico sulle connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici dell'argomento disciplinare.

Tali considerazioni stanno alla base della formulazione del ciclo che organizza e struttura la traduzione didattica dei contenuti. Esso è caratterizzato da una stretta integrazione, e un costante rimando, tra osservazioni macroscopiche ed esperimenti (descritti nel successivo par. 3.3) e attività di modellizzazione microscopica, supportata dall'uso di ambienti di visualizzazione, simulazione e sperimentazione virtuale (descritti nel paragrafo 3.4). Il ciclo didattico è rappresentato schematicamente in figura 3.3.

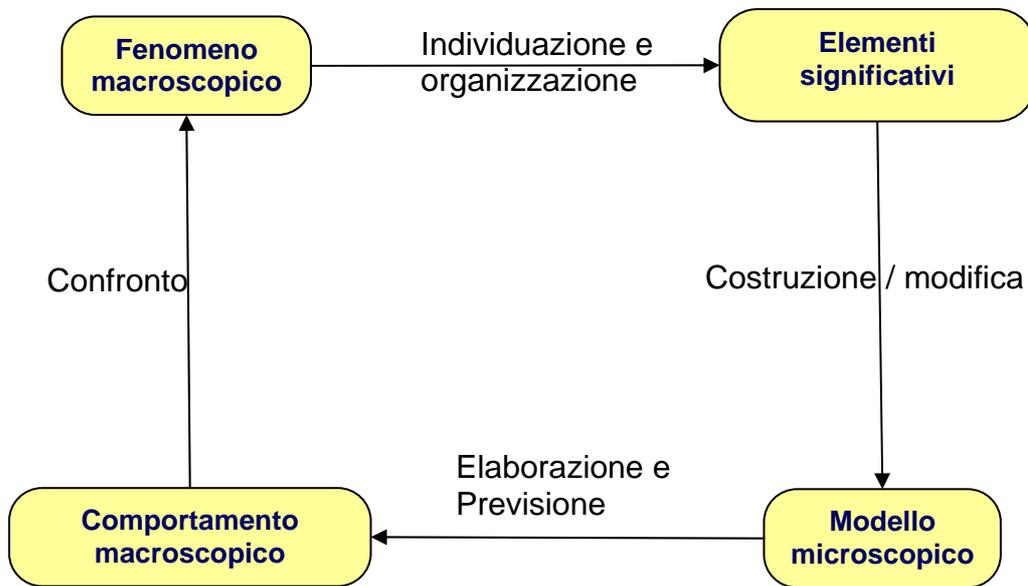


Figura 3.3

Il ciclo rappresentato in figura implementa l'ipotesi pedagogica fondamentale e rappresenta, pertanto, in termini globali, una risposta al problema progettuale riportato al punto 4 del paragrafo 3.1.4. Più in generale, esso mira ad attivare un percorso di conoscenza, strutturato sulla base delle ipotesi richiamate sopra, che possa favorire lo sviluppo delle conoscenze e delle competenze che caratterizzano gli obiettivi pedagogici perseguiti dal progetto.

Il ciclo didattico progettato comprende quattro fasi:

1. osservazioni fenomenologiche e organizzazione delle informazioni raccolte (ad esempio tramite la formulazione di un modello descrittivo);
2. costruzione di un modello microscopico (sulla base delle informazioni e di ipotesi teoriche) o modifica del modello (se la fase è stata attraversata più di una volta);
3. elaborazione del modello e previsione di comportamenti macroscopici (relativi a fenomeni o sistemi diversi da quelli di partenza);
4. Confronto tra previsioni del modello e andamenti osservati;

Nel caso in cui l'esito del confronto sia negativo è necessario introdurre nel modello delle ipotesi correttive, o delle precisazioni, in modo da migliorare l'accordo tra previsioni del modello e andamenti sperimentali. Qualora l'esito del

confronto risulti positivo, il processo può essere riattivato al fine di ampliare il potenziale esplicativo del modello, ovvero considerando fenomeni nuovi o sistemi non considerati prima (passando ad esempio, dai conduttori ai semiconduttori).

L'attuazione del ciclo mira ad attivare e/o potenziare negli allievi due diverse e complementari competenze: da un lato la capacità di estrarre dall'osservazione dei fenomeni macroscopici informazioni utili per costruire e/o affinare i modelli microscopici della materia, dall'altro la capacità di utilizzare modelli microscopici, via via più raffinati, per interpretare o prevedere comportamenti emergenti a livello macroscopico.

Tipicamente le prime due fasi del ciclo sono finalizzate a favorire un processo di costruzione (o di modifica) autonoma del modello microscopico, a partire dalle osservazioni sperimentali proposte e mediante un processo induttivo. Come vedremo nei capitoli dedicati alle sperimentazioni, in molti casi la prima fase del ciclo, quella osservativa, è finalizzata ad innescare un conflitto cognitivo che possa favorire l'abbandono di modelli inadeguati. Nella fase successiva, quella di costruzione del modello, gli allievi vengono, dunque, coadiuvati nel processo di costruzione di un modello alternativo più funzionale.

Le fasi di elaborazione del modello e del confronto tra previsioni e andamenti sperimentali mirano, invece, ad attivare la capacità complementare, di tipo deduttivo, relativa all'utilizzazione del modello microscopico al fine di interpretare gli andamenti macroscopici.

In ultima analisi, possiamo così riassumere le fasi che caratterizzano la strategia pedagogica:

- Osservazioni macroscopiche ed estrazioni di elementi utili
- Costruzione di un modello microscopico tentativo
- Uso degli strumenti didattici ed esecuzione di esperimenti virtuali
- Uso del modello matematico per l'interpretazione dei risultati
- Confronto con gli andamenti sperimentali
- Formulazione di ipotesi correttive e revisione del modello.

Un ultimo elemento dell'approccio didattico che riteniamo utile evidenziare - e su cui torneremo nel paragrafo successivo - riguarda gli aspetti sperimentali che caratterizzano e motivano il processo didattico di sviluppo e revisione dei modelli microscopici. Nell'ambito dell'analisi storica abbiamo visto che il processo di sviluppo della teoria elettronica è stato caratterizzato e trainato dal tentativo di accordare la teoria e i modelli microscopici con alcune evidenze sperimentali. Le principali tra queste sono il contributo elettronico e reticolare al calore specifico dei metalli e l'andamento della resistività dei conduttori e semiconduttori con la temperatura e, in secondo luogo, le proprietà ottiche e magnetiche dei metalli. In particolare, nell'ambito del presente adattamento educativo dell'argomento, l'andamento della resistività con la temperatura è utilizzato come *fenomeno guida* per favorire e motivare il passaggio graduale da modelli più semplici a modelli via via più raffinati.

3.3 Analisi fenomenologica

Come si è detto l'ambiente didattico è caratterizzato da un continuo rimando tra osservazioni fenomenologiche ed esecuzione di esperimenti e attività di modellizzazione. In questo paragrafo si descriveranno i più significativi aspetti sperimentali del progetto didattico, tralasciando la descrizione delle procedure tipiche delle trattazioni tradizionali dell'argomento (ad esempio le leggi di Ohm). In particolare, si illustreranno:

- alcune osservazioni qualitative, di semplice realizzazione, relative a due fenomeni complementari, l'effetto Joule e l'effetto della temperatura sulle proprietà elettriche di un conduttore;
- due diverse procedure sperimentali (una di più semplice realizzazione, l'altra più complessa) finalizzate a ricavare l'andamento quantitativo della resistività di un conduttore metallico e di un semiconduttore in funzione della temperatura.

Nel paragrafo 3.5 si descriveranno ulteriori osservazioni sperimentali che riguardano un'analogia meccanica della conduzione elettrica.

3.3.1 Osservazioni qualitative

Al fine di evidenziare l'effetto delle variazioni di temperatura sulla resistenza elettrica di un sottile filo conduttore (ad esempio, rame) è stato progettato il semplice circuito rappresentato in figura 3.4.

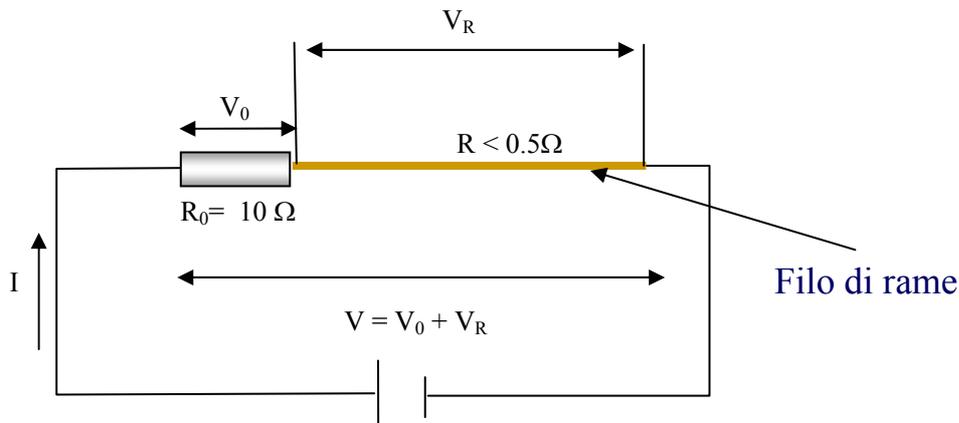


Figura 3.4

Come si può osservare, in serie al filo conduttore di resistenza R è posta una resistenza R_0 . La serie è alimentata da una ddp costante V . Al variare della resistenza del filo varia la ddp V_R ai suoi capi, ma la tensione complessiva ai capi della serie rimane costante. Applicando le leggi dei circuiti è facile ricavare la seguente espressione di V_R :

$$V_R = \frac{V}{(R + R_0)} R \quad (3.6)$$

Utilizzando un filo di rame della lunghezza di circa 0,5 m e di diametro pari a 0,2 mm (facilmente reperibile e con una resistenza, a temperatura ambiente, pari a circa 0,3 Ω) e una resistenza R_0 di 10 Ω¹⁵, nell'espressione precedente è possibile trascurare il valore di R che compare a denominatore e si potrà scrivere:

¹⁵ Con tale scelta delle dimensioni del filo e del valore di R_0 e alimentando il circuito con una tensione di qualche volt, il valore di V_R risulta dell'ordine del decimo di volt, facilmente apprezzabile con un comune voltmetro.

$$V_R \approx \frac{V}{R_0} R = KR \quad (3.7)$$

Se il filo di rame viene riscaldato, utilizzando, ad esempio, la fiamma di un accendino, la variazione della resistenza R produrrà una proporzionale variazione della tensione V_R ai suoi capi. Pertanto, se riscaldando il filo si rileva un incremento/decremento della V_R , ciò implica un incremento/decremento della resistenza del rame. Come vedremo più avanti lo stesso circuito può essere usato per ricavare l'andamento quantitativo della resistività del rame al variare della temperatura (almeno per temperature al di sopra di 0 °C).

Un semplice esperimento (Bonura, 2002) che permette di evidenziare l'effetto termico della corrente può essere realizzato utilizzando un sottile filo di rame della lunghezza di 15:20 cm, collegandone le due estremità ai poli di una comune pila da 1,5 volt. Il passaggio della corrente elettrica produrrà un immediato incremento di temperatura del conduttore percepibile al tatto.

Nei capitoli successivi si descriveranno le caratteristiche e gli esiti di una sequenza didattica centrata sui due semplici esperimenti qualitativi descritti sopra.

3.3.2 Andamento della resistività di conduttori e semiconduttori con la temperatura

Come si è detto, la ricostruzione didattica dell'argomento prevede il passaggio graduale da modelli microscopici della conduzione elettrica più semplici a modelli via via più complessi. Si vedrà, inoltre, che le previsioni basate su tali modelli conducono a diversi legami funzionali tra resistività ρ e temperatura T . Da un punto di vista pedagogico, il confronto di tali andamenti con quello di $\rho(T)$ ottenuto sperimentalmente è un processo che guida la graduale aggiunta o modifica di ipotesi teoriche e che motiva il passaggio a modelli via via più complessi. Di seguito verranno descritte due diverse procedure sperimentali finalizzate a ricavare l'andamento di $\rho(T)$. La prima, più complessa, che utilizza l'azoto liquido per variare la temperatura del componente, permette di indagare un ampio range di temperature. La seconda, più semplice, può essere eseguita direttamente dagli studenti utilizzando le attrezzature presenti in un laboratorio didattico mediamente attrezzato.

Esperimento 1¹⁶

Resistività del rame

Le misure di resistività del rame in funzione della temperatura sono state effettuate utilizzando un apparato elettronico commerciale che consente di misurare l'intensità di corrente che attraversa un campione soggetto ad una data ddp come funzione della temperatura. L'apparato è progettato per studiare il comportamento dei superconduttori ad alta temperatura critica ma è stato opportunamente modificato in modo da permetterne l'utilizzo anche con campioni conduttori e semiconduttori. In figura 3.5 è mostrata una foto dell'apparato e il disegno della schede elettroniche di misura.

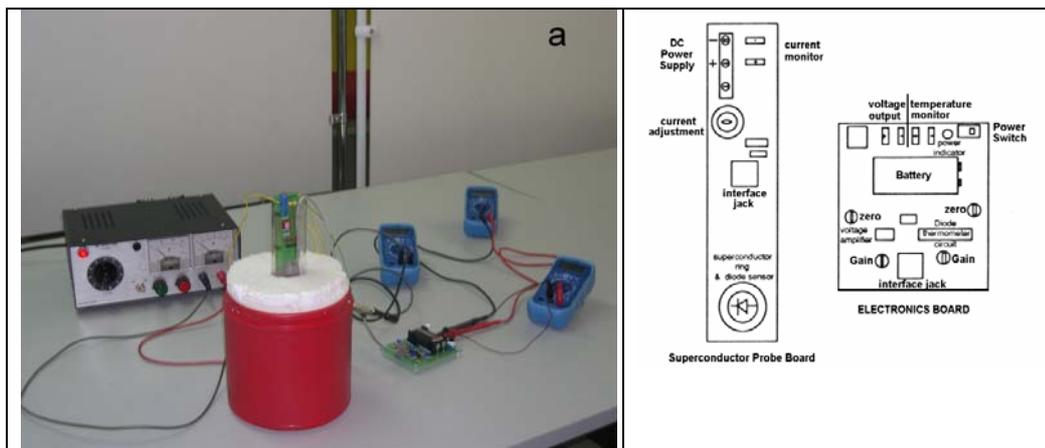


Figura 3.5

I valori di resistenza del rame a bassa temperatura sono stati ottenuti sospendendo il conduttore in un recipiente termicamente isolato e facendolo raffreddare sottoponendolo ai vapori dell'azoto liquido posto all'interno del recipiente. I valori di tensione, corrente e temperatura sono stati rilevati tramite tre multimetri digitali collegati alla scheda elettronica dell'apparato di misura.

La figura 3.6 mostra i dati ottenuti usando un sottile filo di rame di diametro $d = 2 \cdot 10^{-4}$ m e lunghezza $L = 0.5$ m. La resistività esibisce un andamento lineare con la temperatura, del tipo:

¹⁶ A. Bonura, M. C. Capizzo and C. Fazio, *A Pedagogical Approach to Modelling Electric Conduction in Solids*. Girep 2006

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

essendo ρ_0 il valore della resistività del rame a $T_0 = 273\text{K}$.

Dai parametri del fit, riportati in figura 3.6, è possibile ottenere una stima del coefficiente di temperatura del rame, essendo:

$$\alpha = (4.00 \pm 0.05) \times 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

Tale valore risulta in accordo con il valore atteso per il rame pari a circa $3.93 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$.

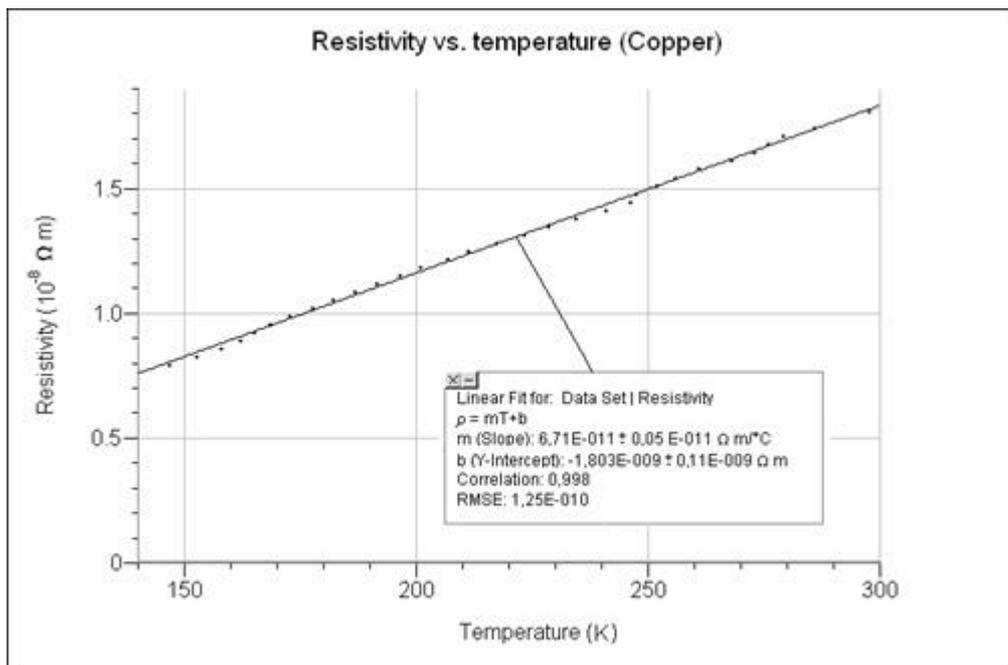


Figure 3.6 .Resistività vs temperatura relativi ad un sottile filo di rame.

Semiconduttore

Un'analoga procedura sperimentale può essere utilizzata per ricavare l'andamento della resistenza di un semiconduttore. Il semiconduttore usato nella

misura è un NTC costituito da una miscela di ossidi metallici. In figura 3.7 sono riportati i valori misurati della resistenza del semiconduttore come funzione della temperatura. Come si può osservare la resistenza diminuisce al crescere della temperatura.

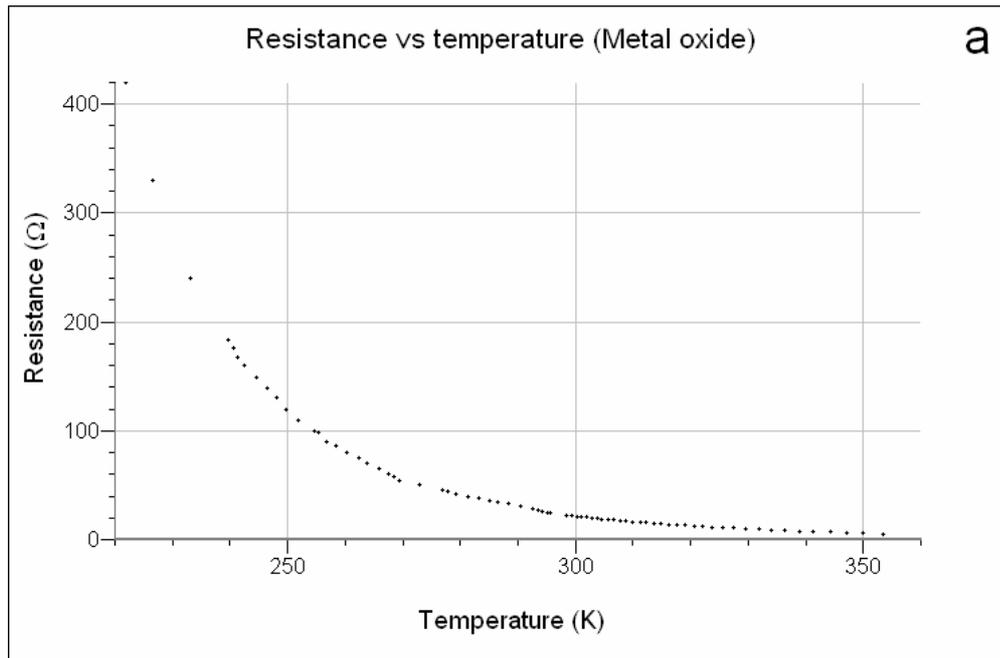


Figura 3.7

In figura 3.8 è rappresentato, invece, il logaritmo naturale di R/R_0 come funzione di $(1/T - 1/T_0)$, dove R_0 rappresenta la resistenza del componente a $T_0 = 273$ K.

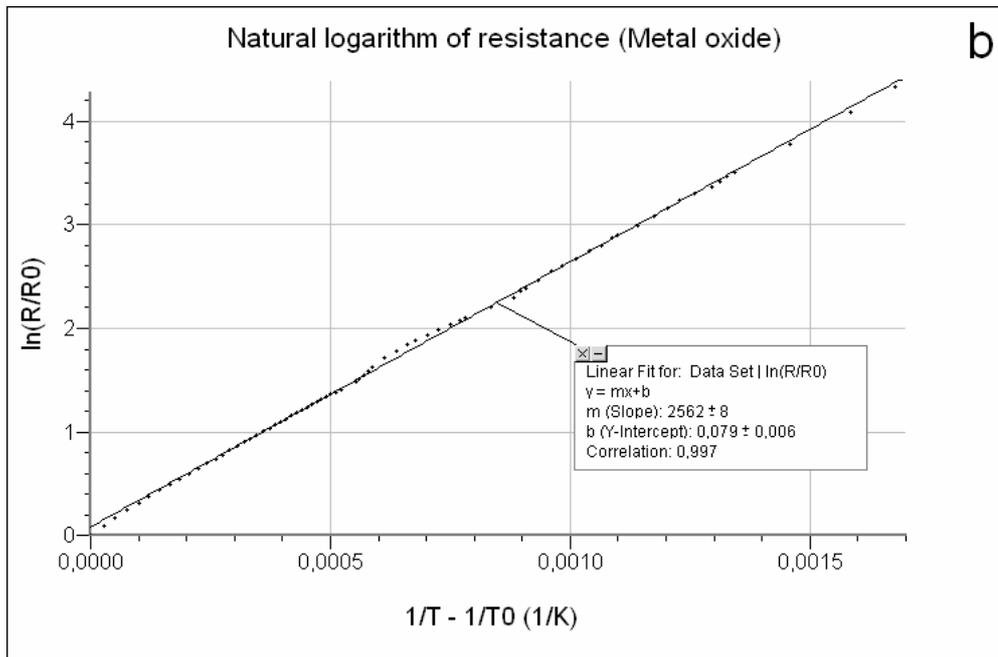


Figura 3.8

Il fatto che i dati esibiscano una tendenza lineare implica che la resistenza del semiconduttore sia legata da una funzione esponenziale alla variabile $(1/T - 1/T_0)$. In un semiconduttore la variazione della resistività con la temperatura è dominata (per temperature non troppo basse) dal fattore di Boltzmann, secondo la formula:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

dove ΔE è il gap di energia tra banda di valenza e banda di conduzione e k la costante di Boltzmann. Utilizzando i valori dei parametri del fit riportati in figura ricaviamo:

$$\Delta E = 0.221 \pm 0.001 \text{ eV}$$

che rappresenta un valore ragionevole per il gap di un semiconduttore drogato, come quello utilizzato nell'esperimento.

Esperimento 2

Un esperimento più semplice del precedente che permette di ricavare l'andamento di $\rho(T)$ (per temperature superiori a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) può essere realizzato utilizzando il circuito di figura 3.4. L'apparato sperimentale è schematizzato in figura 3.9. Il filo di rame viene avvolto su un supporto isolante (ad esempio un piccolo blocco di legno), facendo attenzione che le spire non vengano in contatto, in modo da poterlo immergere in un bagno termico a temperatura T . L'acqua del bagno termico viene prima portata a temperatura di ebollizione, quindi, il filo conduttore viene immerso al suo interno.

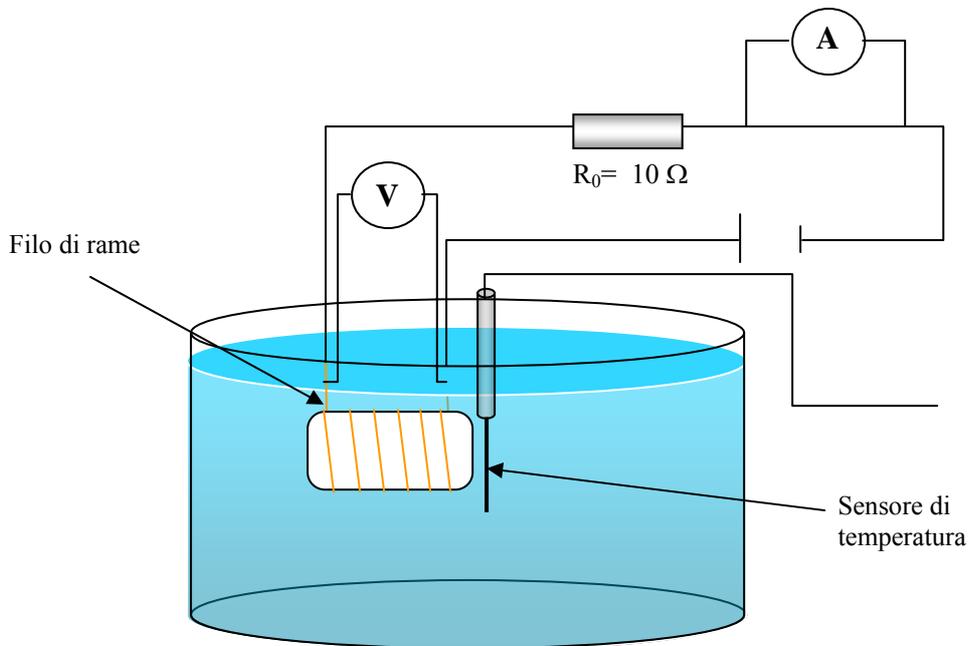


Figura 3.9

Le misure vengono effettuate in discesa (via via che l'acqua del bagno termico si raffredda). La resistenza del filo viene misurata con il metodo volt - amperometrico, a partire, cioè, dal valore della corrente I che attraversa il circuito e da quello della tensione V_R ai capi del filo. Misurando i valori di I e di V_R in corrispondenza di diversi valori di temperatura è possibile ottenere l'andamento della resistenza elettrica e, dunque, della resistività del conduttore con la

temperatura. Il grafico di figura 3.10 riporta i risultati dell' esperimento relativo al rame.

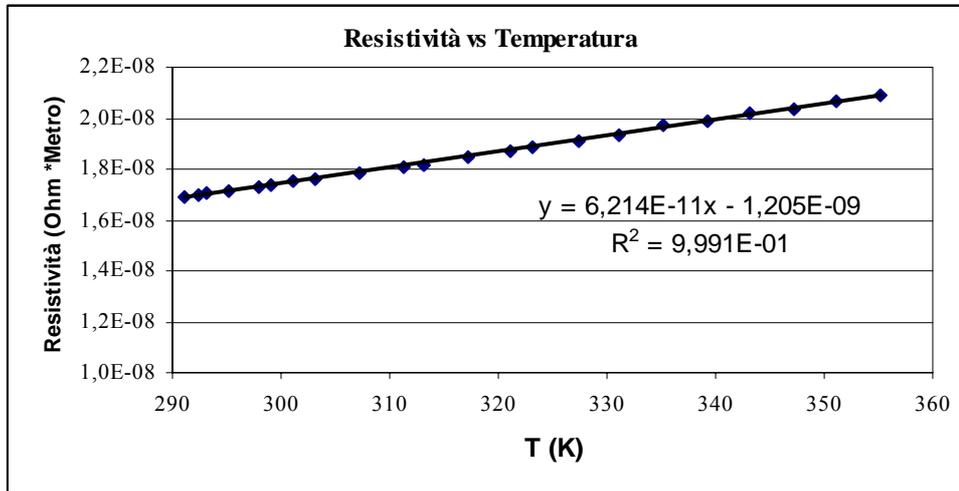


Figura 3.10

Come nell'esperimento precedente, i risultati sono compatibili con un andamento lineare del tipo:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

Anche in questo caso il valore del coefficiente di temperatura, ottenuto sulla base dei parametri del fit è compatibile con il valore atteso, essendo:

$$\alpha = (3,94 \pm 0.05) \times 10^{-3} \frac{1}{K}$$

3.4 Approcci microscopici e strumenti per il computer modelling

Al fine di assistere gli allievi nel processo di costruzione, elaborazione e revisione dei modelli microscopici della conduzione elettrica, sono stati sviluppati diversi strumenti centrati sull'uso delle tecnologie informatiche. Alcuni di tali strumenti rappresentano dei veri e propri ambienti didattici virtuali. Essi permettono di impostare le caratteristiche del modello microscopico, di visualizzare i processi microscopici implicati nella conduzione elettrica e di

eseguire simulazioni dinamiche. I risultati di tali simulazioni rappresentano andamenti di grandezze macroscopiche (ad esempio di $\rho(T)$) che possono essere confrontati con i corrispondenti andamenti sperimentali. L'esito di tale confronto permette così di stabilire se la "teoria" sottesa dal modello selezionato si accorda o meno con la "realtà" dei fenomeni. In questo paragrafo si effettuerà una rilettura della teoria elettronica dei metalli e della teoria a bande finalizzata alla trasposizione didattica di tali argomenti e si descriveranno le caratteristiche e le potenzialità didattiche di alcuni dei principali strumenti di computer modelling progettati.

3.4.1 Un ambiente virtuale per la conduzione nei metalli

Gli strumenti computazionali di modelling relativi alla conduzione elettrica nei metalli sono stati implementati utilizzando l'ambiente di simulazione dinamica NetLogo¹⁷. NetLogo è uno strumento che consente di costruire modelli virtuali di sistemi complessi e di simularne e visualizzare l'evoluzione temporale. E' un ambiente multiagent (Resnick e Wilensky, 1998; Pallant e Tinker, 2004) che consente di definire oggetti indipendenti (per l'appunto gli agents), cui è possibile associare opportune proprietà e che interagiscono in un "mondo" sulla base di regole definite. Le simulazioni dinamiche costruite con tale strumento consentono di esplorare le connessioni tra le caratteristiche microscopiche (degli oggetti e delle loro interazioni) e i comportamenti emergenti a livello macroscopico e di effettuare esperimenti virtuali i cui esiti confrontare con gli esperimenti reali.

Uno dei principali vantaggi offerti da uno strumento di modelling dinamico come NetLogo è il fatto che esso consente di far emergere le proprietà d'insieme del sistema e la loro evoluzione temporale direttamente dalle proprietà dinamiche delle singole particelle di cui esso si suppone costituito e dall'interazioni elementari tra esse. Ciò consente di simulare l'evoluzione del sistema introducendo soltanto le ipotesi strettamente necessarie, evitando

¹⁷Informazioni su NetLogo possono essere reperite all'indirizzo: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

d'introdurre il gran numero di vincoli e di ipotesi teoriche che sono invece indispensabili per l'approccio analitico, ma che spesso nascondono gli aspetti essenziali del modello, influenzando negativamente l'efficacia didattica della trattazione.

Per costruire l'ambiente didattico si sono sviluppati tre diversi modelli dinamici, sia classici che quantistici, basati sulla "teoria degli elettroni liberi". I tre modelli differiscono tra loro per la diversa statistica applicata al moto degli elettroni e/o per il diverso meccanismo di scattering elettrone – reticolo cristallino. I modelli implementati sono basati sulle ipotesi che caratterizzano i principali modelli microscopici, specificatamente il modello di Drude - Lorentz, il modello di Wien ed il modello di Sommerfeld, che si sono succeduti storicamente e che rappresentano le principali tappe di avvicinamento al modello quantistico dei solidi.

Rilettura a fini didattici della teoria degli elettroni liberi

Al fine di esplicitare le caratteristiche dei modelli implementati (ma anche al fine di evidenziare alcuni aspetti della ricostruzione didattica) è utile rivisitare e sistematizzare l'evoluzione della teoria elettronica dei metalli mettendone in luce i concetti chiave e i punti nodali.

Come si è detto, la teoria degli elettroni liberi, inaugurata con il modello classico di Drude, prevede che la conduzione elettrica in un metallo sia dovuta ad un "gas di elettroni liberi" che si muovono attraverso gli ioni del reticolo cristallino contro i quali collidono. Quando al metallo viene applicato un campo elettrico E ciascuno degli elettroni liberi, di carica elettrica $-e$ e massa m_e , risente di un'accelerazione il cui modulo è eE/m_e . L'effetto complessivo delle collisioni può essere assimilato ad una sorta di forza viscosa che, dopo un transitorio, controbilancia esattamente la forza elettrica, di modo che la velocità degli elettroni lungo la direzione del campo si mantiene costante. Se n_e rappresenta il numero medio di elettroni in un volume unitario e v_d la velocità di deriva (drift), cioè la velocità media degli elettroni lungo la direzione del campo, applicando le leggi di Ohm, la resistività del metallo può essere scritta come:

$$\rho = \frac{E}{n_e e v_d} \quad (3.8)$$

La velocità di deriva può essere correlata al “tempo di volo medio” $\langle \tau \rangle$ (che coincide con il tempo di rilassamento) tra due collisioni consecutive mediante la formula:

$$v_d = \frac{eE}{m_e} \langle \tau \rangle \quad (3.9)$$

A sua volta $\langle \tau \rangle$ può essere espresso in termini della velocità termica (media) v_m degli elettroni e della sezione d'urto di scattering elettrone-ione, ovvero:

$$\langle \tau \rangle = \frac{1}{n_e v_m A} \quad (3.10)$$

In questo modo la resistività risulta espressa dalla formula:

$$\rho = \frac{m_e}{e^2} v_m A \quad (3.11)$$

L'aspetto cruciale in questa rappresentazione microscopica riguarda l'interpretazione di v_m ed A . Diverse assunzioni teoriche relative alla statistica cui obbediscono gli elettroni e al meccanismo d'interazione elettrone – reticolo conducono, infatti, a diverse espressioni per v_m ed A .

In relazione alla statistica degli elettroni si possono considerare due diverse ipotesi, l'una classica, l'altra quantistica.

1a. **Ipotesi di Lorentz:** il gas di elettroni liberi obbedisce alla statistica di Maxwell - Boltzmann, proprio come le molecole di un gas; pertanto, la velocità termica degli elettroni v_m corrisponde alla velocità quadratica media, cioè:

$$v_m = v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}} \quad (3.12)$$

2a. **Ipotesi di Sommerfeld:** bisogna tener conto della natura quantistica degli elettroni, trattando il gas di elettroni come un gas di Fermi. Questo modello più raffinato fa uso della statistica di Fermi-Dirac per gli elettroni e v_m risulta pressoché indipendente dalla temperatura.

In relazione alla natura dell'interazione elettrone – reticolo si possono avanzare altre due ipotesi:

1b. **Ipotesi di Drude:** gli ioni possono essere considerati centri di scattering fissi con dimensioni ben definite indipendenti dalla temperatura. Pertanto, la sezione d'urto di scattering A coincide con l'area geometrica πr_0^2 di uno ione del reticolo, dove r_0 rappresenta il raggio ionico (per esempio per il rame 0.361 \AA).

2b. **Ipotesi di Wien:** gli ioni non sono fermi bensì oscillano attorno la loro posizione di equilibrio, di conseguenza la diffusione elettronica dipende dall'ampiezza r delle vibrazioni termiche dello ione. Agli ioni va, dunque, associate un'area efficace A proporzionale a πr^2 . Poiché l'energia media di vibrazione di uno ione è proporzionale ad r^2 e, per il principio di equipartizione, anche alla temperatura T del metallo, l'area efficace A risulterà proporzionale alla temperatura.

Combinando tra loro le quattro ipotesi descritte sopra, sono stati costruiti tre differenti modelli dinamici di tipo statistico, denominati rispettivamente: “Modello di Drude - Lorentz”, “Modello pienamente classico” e “Modello semiclassico di Fermi”. Nello specifico, il modello di Drude- Lorentz” implementa le ipotesi 1a e 1b. In questo caso la dipendenza della resistività dalla temperatura è legata soltanto alla velocità termica degli elettroni. Il “modello pienamente classico” implementa le ipotesi 1a e 2b. In questo caso la dipendenza della resistività dalla temperatura è legata sia alla velocità termica degli elettroni che al moto termico degli ioni. Infine il “modello semiclassico di Fermi” implementa le ipotesi 2a e 2b e, pertanto, l'influenza della temperature sulla resistività è legata soltanto al moto termico degli ioni.

Presentati in quest'ordine i tre modelli esibiscono un livello di complessità crescente e riproducono nelle linee essenziali lo sviluppo storico delle conoscenze scientifiche sulle proprietà microscopiche dei metalli.

Implementazione numerica e caratteristiche dell'ambiente virtuale

I tre modelli sono stati integrati in un unico ambiente didattico virtuale che consente di selezionarne uno dei tre modelli, di modificare i parametri macroscopici del sistema, di simularne l'evoluzione temporale e di effettuare diversi tipi di esperimenti simulati.

I modelli implementati rappresentano un piccolo volume di rame che contiene lo stesso numero (circa 120) di elettroni liberi e di ioni disposti in un reticolo regolare. Le interazioni coulombiane elettrone-elettrone ed elettrone-ione non sono considerate, di conseguenza la traiettoria di un elettrone è una linea retta(/arco di parabola) in assenza(/presenza) di un campo elettrico E .

Per calcolare la resistività del metallo le simulazioni utilizzano soltanto la formula (3.8). Infatti, le formule (3.9), (3.10) e (3.11), per quanto indispensabili nell'ambito della trattazione analitica del problema, nelle simulazioni non sono state assunte come punti di partenza quanto piuttosto come risultati da verificare. Una volta nota la densità elettronica del metallo n_e , per ricavare la resistività è necessario disporre del valore della velocità di drift. Per calcolare la velocità di drift si è utilizzata la sua definizione, assimilandola, cioè, al "valore medio della velocità degli elettroni lungo la direzione del campo elettrico" (Bellomonte, Sperandio 1998). Così come rappresentato in figura 3.11, una volta selezionato il modello microscopico, i parametri di input della simulazione sono la temperatura del metallo e l'intensità del campo elettrico applicato; il programma restituisce in output il valore della velocità di drift e quello della resistività del metallo, calcolato con la formula (3.8).



Figura 3.11

La figura 3.12 rappresenta l'interfaccia dell'ambiente di simulazione, mentre in figura 3.13 è riportata un'immagine del modello tridimensionale costruito con NetLogo 3D preview.

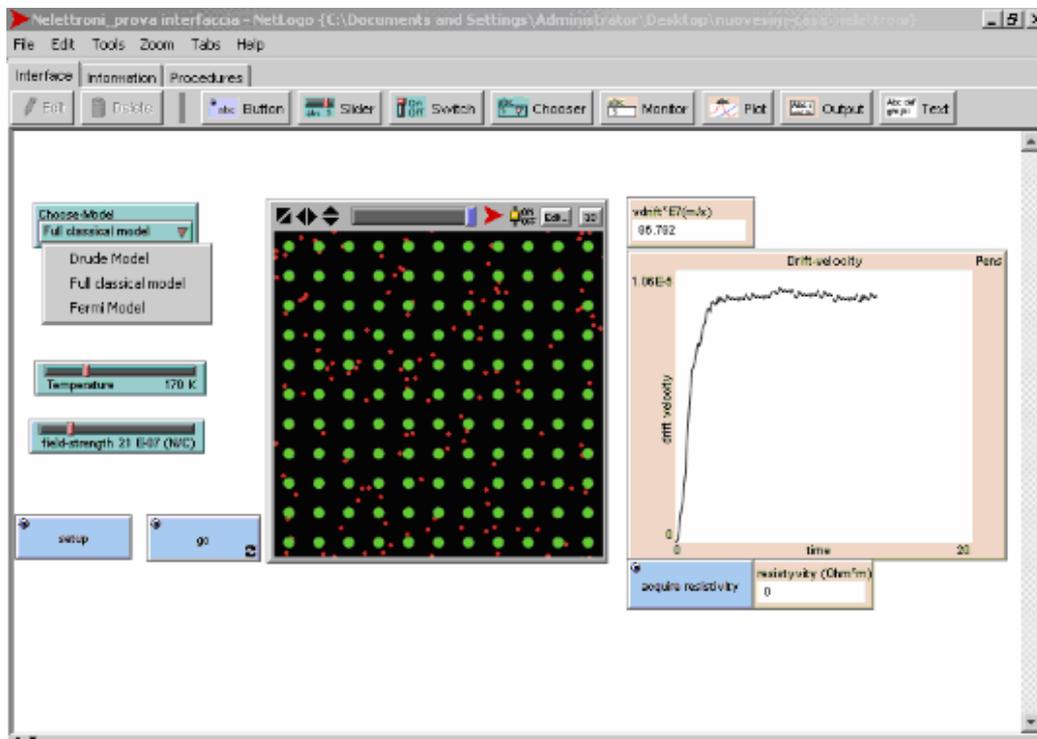


Figura 3.12

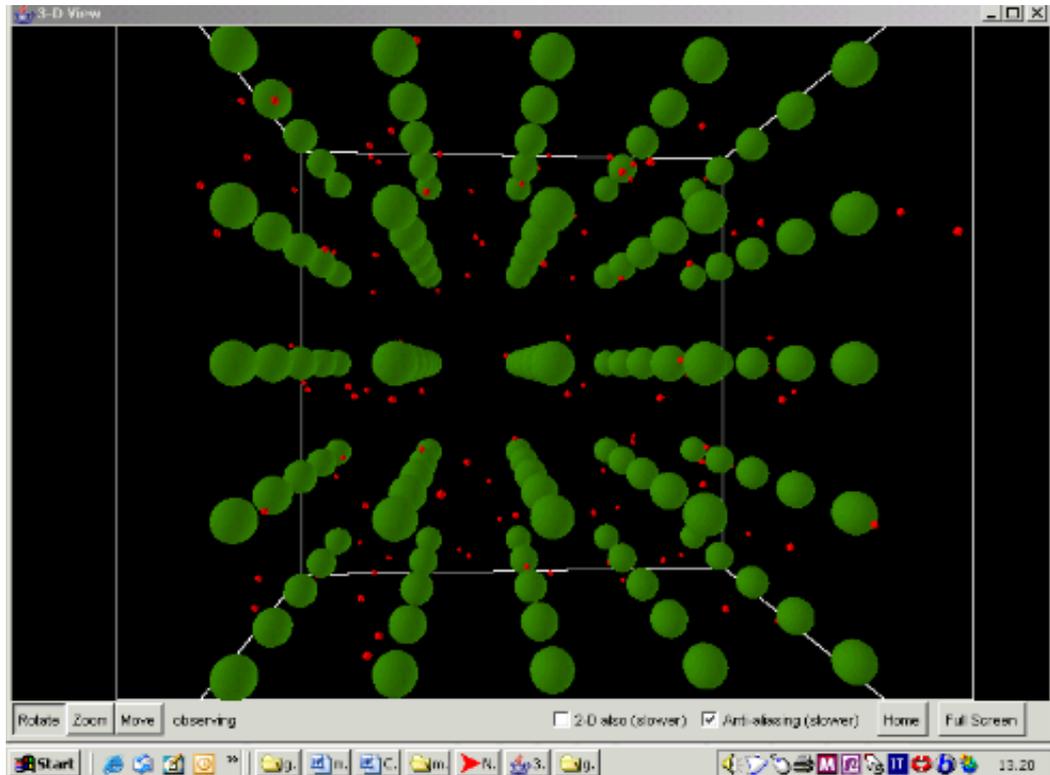


Figura 3.13

I dettagli dell'implementazione dei tre diversi modelli presenta delle differenze, sia statistiche che dinamiche, che riflettono le differenti ipotesi sottese da tali modelli. In particolare:

- nel modello di Drude-Lorentz gli elettroni vengono generati con velocità che obbediscono alla statistica di Maxwell-Boltzmann. Pertanto, ad una data temperatura T , la velocità quadratica media è proporzionale alla radice quadrata di T . Gli ioni cristallini sono, invece, considerati fermi con una raggio pari a 0.361 \AA ; Le collisioni elettrone-ioni sono perfettamente elastiche e non è previsto nessun meccanismo di dissipazione. Nonostante quest'ultima assunzione, per campi elettrici non molto grandi (inferiori a 100V/m), il sistema raggiunge una condizione di regime in cui la velocità di drift e il tempo medio di rilassamento si mantengono costanti.
- nel modello pienamente classico gli ioni non sono fermi ma si assume che oscillino attorno alle rispettive posizioni di equilibrio, con una

- distribuzione di energia di tipo classico. Per rendere conto dell'influenza del moto oscillatorio degli ioni sullo scattering elettrone - ione, nel modello si assume che gli ioni abbiano un'area A proporzionale al quadrato dell'ampiezza delle vibrazioni termiche. Inoltre, si suppone che gli ioni siano in equilibrio con un bagno termico a temperatura costante T ;
- nel modello semiclassico di Fermi viene considerata la natura quantistica degli elettroni, applicando ad essi la statistica di Fermi-Dirac. In questo modo si ottiene una velocità termica media degli elettroni quasi del tutto indipendente da T , cosicché la dipendenza della resistività dalla temperatura risulta influenzata soltanto dalle vibrazioni termiche del reticolo cristallino.

L'ambiente di simulazione permette di evidenziare diversi aspetti. In particolare:

- in che modo la corrente elettrica (intermini di velocità di drift) dipende dal campo elettrico applicato;
- in che modo la resistività del metallo è influenzata dalla temperatura;
- in che modo gli aspetti quantitativi di tali dipendenze vengono influenzate dal particolare modello microscopico utilizzato.

Una volta scelto uno dei tre modelli, l'utente può selezionare il valore della temperatura e dell'intensità del campo elettrico e quindi far partire la simulazione. In questo modo è possibile eseguire due diversi tipi di esperimento: uno mantenendo costante la temperatura e variando l'intensità del campo, l'altro mantenendo costante il campo e variando la temperatura.

L'output del programma è la velocità di drift degli elettroni come funzione del tempo. Quando la velocità di drift raggiunge il valore di regime, il valore della resistività può essere acquisito. In questo modo, fissando il valore dell'intensità del campo elettrico applicato ed eseguendo l'esperimento per diversi valori della temperatura, è possibile costruire il grafico di ρ in funzione di T .

Andamento di $\rho(T)$

Nelle figure 3.14 a, b e c sono riportati gli andamenti di $\rho(T)$ ottenuti con i tre diversi modelli. Come si può osservare i tre modelli implicano dipendenze funzionali differenti. In particolare, interpolando i dati con una funzione esponenziale (del tipo aT^x) otteniamo una dipendenza di ρ da $T^{1/2}$ per il modello di Drude-Lorentz, da $T^{3/2}$ per il modello che tiene conto dell'influenza delle vibrazioni reticolari e una dipendenza lineare da T per il modello che implementa la statistica di Fermi -Dirac per gli elettroni. Come previsto, i modelli classici forniscono una dipendenza di ρ dalla temperatura diversa da quella ottenuta sperimentalmente. L'andamento ottenuto con il modello quantistico risulta, invece, in buon accordo con l'andamento sperimentale. Non soltanto il modello fornisce una corretta dipendenza lineare di ρ da T , ma anche i parametri fisici che caratterizzano il fenomeno, come il coefficiente di temperatura e il valore della resistività a 273 K, risultano molto prossimi ai valori ottenuti sperimentalmente.

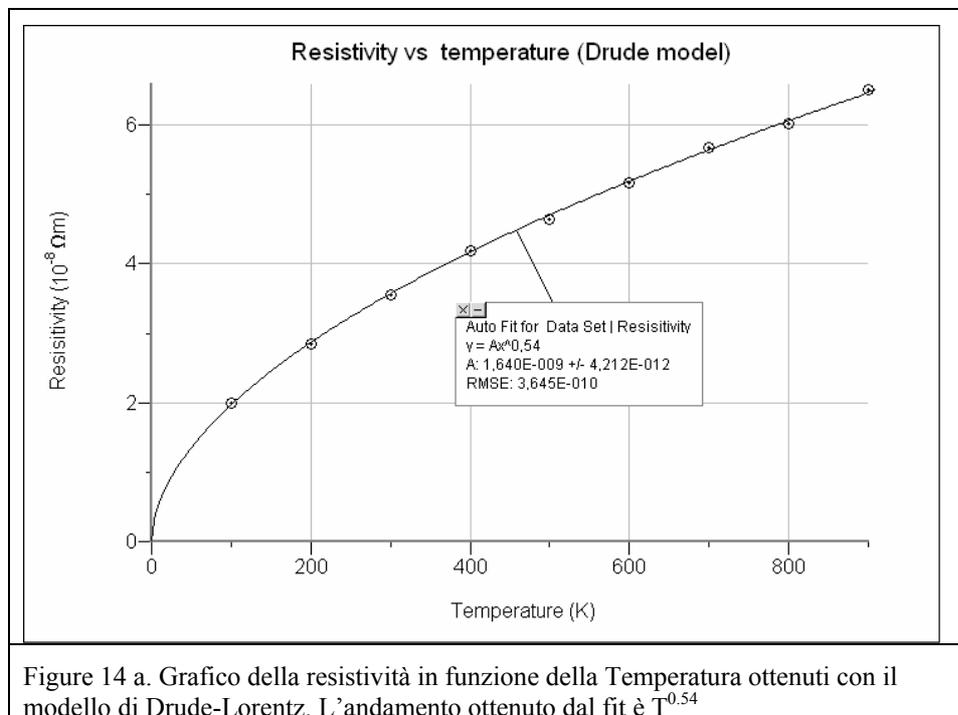


Figure 14 a. Grafico della resistività in funzione della Temperatura ottenuti con il modello di Drude-Lorentz. L'andamento ottenuto dal fit è $T^{0.54}$

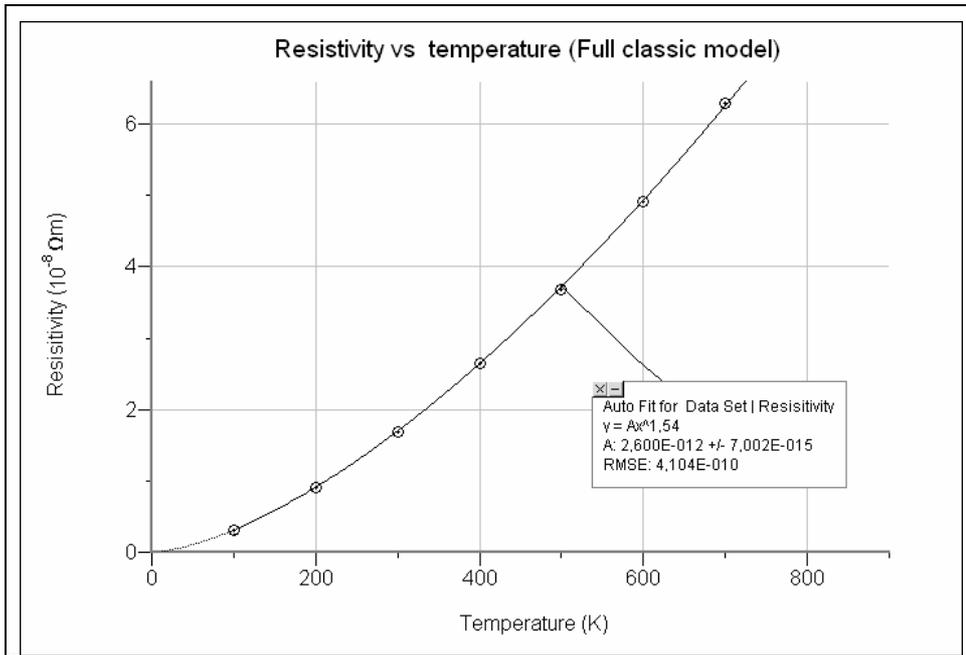


Figure 14 b. Grafico della resistività in funzione della Temperatura ottenuti con il modello di pienamente classico. L'andamento ottenuto dal fit è $T^{1.54}$

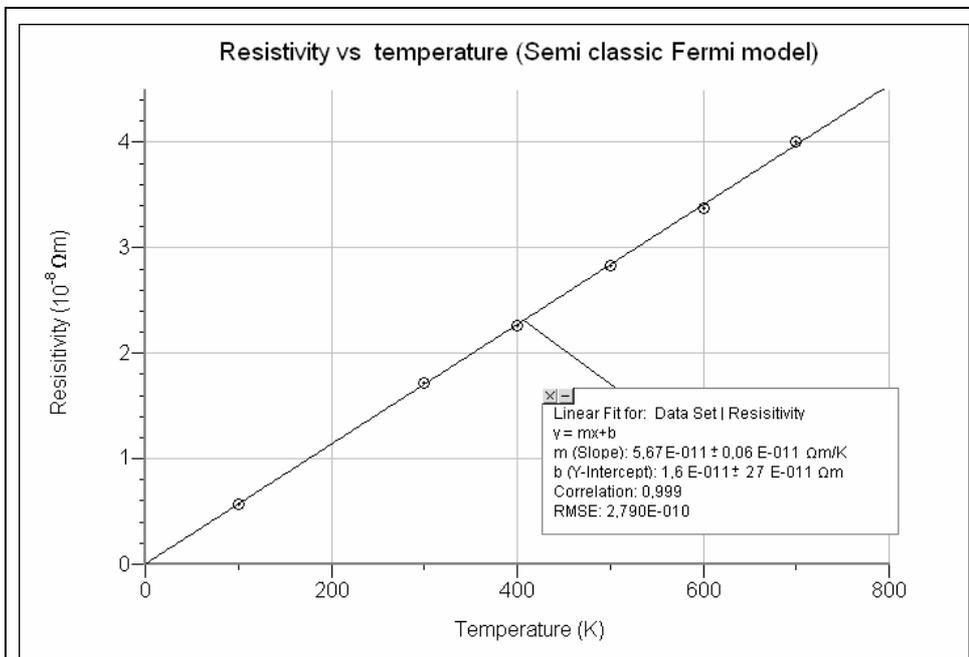


Figure 14 c. Grafico della resistività in funzione della temperatura ottenuti con il modello semiclassico. I dati sono compatibili con un andamento lineare che risulta in ottimo accordo con i dati sperimentali.

3.4.2 Approfondimenti teorici sulla teoria a bande dei solidi

Sebbene la teoria semiclassica ad elettroni liberi permetta di risolvere alcuni problemi, ne lascia irrisolti tanti altri. Se è vero, ad esempio, che essa consente di spiegare perché le sostanze conducono elettricità, non fornisce alcuna indicazione sul perché alcuni materiali sono conduttori, altri semiconduttori ed altri ancora isolanti. Ne, tanto meno, fornisce una giustificazione del fatto che la resistività dei semiconduttori evidenzia un andamento decrescente con la temperatura. Per risolvere tali problemi è necessario abbandonare l'approssimazione di elettrone libero, su cui si fondano i modelli microscopici fin qui descritti, e tenere opportunamente conto del potenziale che tende a legare gli elettroni agli ioni del reticolo cristallino.

In ciò che segue, illustreremo le idee basilari della teoria a bande dei solidi e descriveremo alcuni dei diversi approcci scientifici al problema.

Il potenziale reticolare

Trascurando i dettagli dell'interazione elettrone-elettrone, possiamo immaginare che in un solido cristallino ciascun elettrone sia sottoposto ad un potenziale periodico (con la stessa periodicità del reticolo) dovuto alla sovrapposizione dei potenziali atomici. Infatti, in un solido cristallino la sovrapposizione dei potenziali coulombiani generati dai singoli atomi del cristallo (figura 3.15) dà origine ad un potenziale periodico con un andamento simile a quello rappresentato in figura 3.16

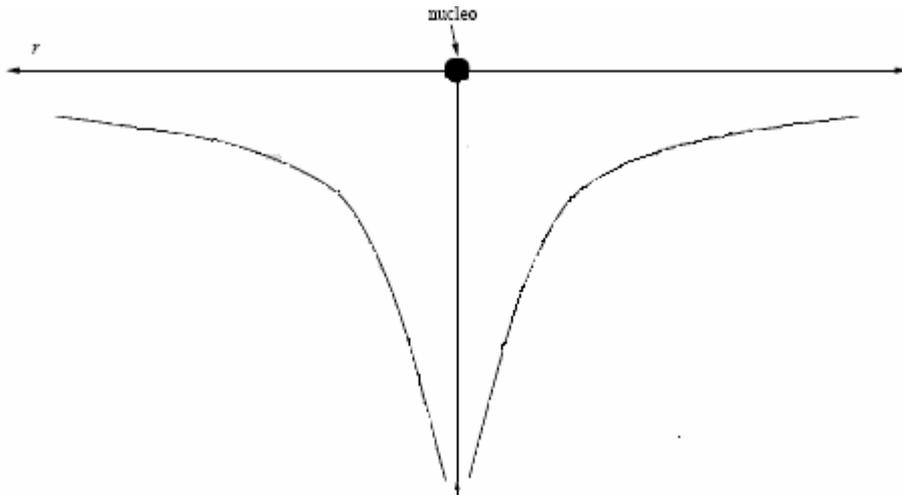


Figura 3.15. Andamento del potenziale atomico

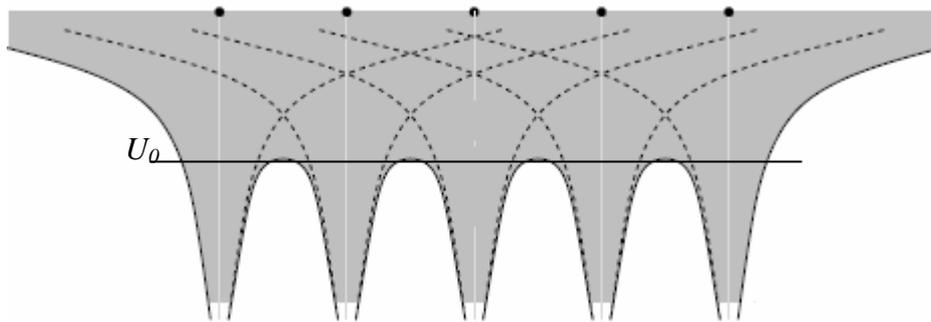


Figura 3.16. La curva continua rappresenta il potenziale visto da un elettrone all'interno di un solido. Esso è dato dalla sovrapposizione dei potenziali generati dai singoli nuclei (curve tratteggiate)

Si può notare che all'interno del solido la curva di potenziale non tende asintoticamente a zero, come nell'atomo isolato, ma è una funzione periodica costituita da una successione di buche di potenziale con i massimi U_0 localizzati nei punti medi tra due nuclei vicini.

Le bande di energia

La meccanica quantistica dimostra che quando gli atomi isolati si uniscono per formare il cristallo, la struttura dei livelli energetici degli elettroni più esterni e le corrispondenti funzioni d'onda viene drasticamente modificata. Mentre, infatti, i livelli energetici e le funzioni d'onda degli elettroni degli strati interni non vengono apprezzabilmente cambiati, di modo che tali elettroni rimangono

vincolati ai singoli atomi, i livelli della shell più esterna risultano sensibilmente alterati dalla presenza degli atomi vicini. Al posto dei singoli livelli energetici nettamente distinti presenti nell'atomo isolato, l'accoppiamento tra le funzioni d'onda degli elettroni porta alla formazione di una fitta banda di livelli energetici a cui corrispondono stati elettronici delocalizzati. In altri termini, un elettrone che occupa uno dei livelli della banda non è vincolato ad un atomo ma è condiviso da diversi atomi del cristallo. Sono proprio gli elettroni appartenenti a tale banda, chiamata *banda di valenza*, che non essendo confinati all'interno di un singolo atomo, possono contribuire alla conduzione elettrica.

Al disopra della banda di valenza (ma, in genere, anche al disotto) si ha la formazione di altre bande di energia, separate una dall'altra da intervalli *proibiti* di energia, chiamati *gap energetici* (figura 3.17).



Figura 3.17

Come vedremo in seguito con maggiore dettaglio, le proprietà elettriche di un solido cristallino dipendono dalle peculiari caratteristiche della struttura a bande e dall'livello d'occupazione della banda di valenza. Riferendoci ai casi più semplici, se la banda di valenza è parzialmente occupata, di modo che vi sono livelli superiori disponibili per gli elettroni nella stessa banda, il solido è un conduttore; se, invece, la banda di valenza è completamente occupata il solido può essere un semiconduttore o un isolante, a seconda dell'ampiezza del gap energetico che separa la banda di valenza da quella immediatamente superiore (*banda di conduzione*). In particolare, alla temperatura T , il solido è un semiconduttore se il gap E_g non è molto più grande di kT (in modo tale che il

moto di agitazione termica permetta ad un certo numero di elettroni di valenza di passare nella banda di conduzione), è un isolante se E_g è molto più grande di kT .

Le origini della teoria a bande e l'approssimazione di Kronig-Penney

Come si è detto nell'ambito dell'analisi storica (par. 3.1), il primo fisico che affrontò il problema della conduzione nei solidi, in termini pienamente quantistici, fu Ernst Bloch, nel 1928. Limitandoci al caso di cristallo unidimensionale, Bloch affronta il problema considerando l'equazione di Shroedinger per un elettrone sottoposto ad un potenziale periodico $U(x)$, con periodo uguale alla distanza a tra due atomi vicini del cristallo. Egli, inoltre, ignora i confini del cristallo supponendo che la sua lunghezza sia infinita (imponendo, in modo equivalente, condizioni a contorno cicliche). Se ψ rappresenta la funzione d'onda di un elettrone, l'equazione di Shroedinger indipendente dal tempo assume la seguente forma:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \partial^2 / \partial x^2 + U(x) \right] \psi = E \psi \quad (3.13)$$

E' evidente che le soluzioni dell'equazione (stati stazionari e autovalori dell'energia) dipendono dai dettagli del potenziale; Bloch tuttavia dimostra (**teorema di Bloch**) che, indipendentemente dalla forma del potenziale, gli stati stazionari assumono la forma di un'onda piana stazionaria (cioè, una autofunzione di particella libera) moltiplicata per una funzione con la stessa periodicità del cristallo:

$$\psi_k(x) = u_k(x) e^{ik \cdot x} \quad (3.14)$$

L'indice k , che individua una particolare autofunzione, rappresenta il numero d'onda $k = 2\pi/\lambda$.

Come sappiamo, nel caso di particella libera (ossia, $U(x) = 0$), compatibilmente con le condizioni a contorno imposte alla soluzione, tutti i valori di k sono permessi e l'energia E della particella può essere ottenuta dalla formula:

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad (3.15)$$

Nella sua soluzione, Bloch trova, invece, che esistono intervalli di energie per i quali il numero d'onda è immaginario e la soluzione (3.14) non è accettabile. Questo fu il primo indizio dell'esistenza di bande di energia, all'interno delle quali i livelli energetici sono distribuiti in modo quasi continuo, e di gap corrispondenti a valori proibiti dell'energia.

Nello stesso periodo, un'analogha conclusione fu raggiunta procedendo secondo un'altra direzione, con una linea di argomentazioni che può essere riassunta nel modo seguente. In una riga di N atomi, ciascuno con un elettrone fortemente confinato, i livelli energetici cambiano in funzione della distanza tra gli atomi vicini. Se gli atomi sono molto distanti l'uno dall'altro i livelli disponibili per ciascun elettrone saranno quelli di singolo atomo. Se, però, gli atomi sono molto vicini, la sovrapposizione delle funzioni d'onda dei singoli elettroni produrrà la separazione di ciascun livello energetico di singolo atomo in N livelli energetici lievemente distanziati tra loro. In questo modo lo spettro discreto dei livelli energetici di singolo atomo evolve in una successione di bande quasi continue, intervallate da gap proibiti. Quella appena descritta è la cosiddetta approssimazione "tight binding".

La prima dimostrazione analitica dell'esistenza delle bande fu dedotta da Kronig e Penney (de Kronig and Penney, 1931; Kittel, 1976), i quali riuscirono a risolvere l'equazione di Shroedinger nel caso in cui il potenziale cristallino $U(x)$ è approssimato da una successione infinita di buche di potenziale fortemente accoppiate (Figura 3.18), cioè in cui l'ampiezza delle barriere è piccola rispetto all'ampiezza delle buche.



Figura 3.18. Potenziale di Kronig -Penney

Assumendo che il cristallo abbia lunghezza infinita e che la distanza tra due buche consecutive sia molto piccola, Kronig e Penney ottennero la soluzione analitica per i livelli d'energia, dimostrando in modo inequivocabile l'esistenza di bande e di gap.

3.4.3 Approcci didattici per la teoria a bande

Sulla base dei concetti introdotti nel paragrafo precedente, in questo paragrafo descriveremo un approccio semplificato, ma semiquantitativo, alla teoria bande che, senza banalizzarne i contenuti più ostici, ben si adatta (se confrontato con altri tipi di approccio) ad una trattazione didattica. Illustreremo, inoltre, le caratteristiche e le potenzialità didattiche di un ambiente di simulazione che permette di evidenziare il meccanismo di formazione delle bande di energia in un solido e di interpretare, in modo estremamente semplice, le proprietà dei conduttori, dei semiconduttori e degli isolanti.

Un semplice modello di cristallo unidimensionale

L'approccio didattico al problema della proprietà elettroniche dei solidi, è basato su una versione semplificata del modello di cristallo a buche di potenziale quadrate ed passibile di implementazione numerica tramite l'uso di un semplice programma di calcolo, ad esempio Excel. E', tuttavia, opportuno sottolineare che il nostro scopo non è quello di descrivere le proprietà di un qualsiasi materiale reale, quanto piuttosto quello di spiegare il meccanismo di formazione delle bande, dei gap di energia e le loro proprietà generali. Osserviamo, inoltre, che, al fine di fornire una descrizione scientifica completa dell'approccio, la trattazione seguente comprende gli aspetti della teoria relativi alla descrizione quantistica dello stato di singola particella (utilizzando, dunque, i concetti di funzione d'onda

e autostato dell'elettrone); successivamente illustreremo una versione ulteriormente semplificata di tale approccio, rivolta a studenti della secondaria superiore, in cui il problema è affrontato facendo riferimento esclusivamente alla struttura dei livelli energetici, senza utilizzare i concetti legati alla descrizione quantistica dello stato elettronico.

Livelli d'energia in un reticolo unidimensionale

Iniziamo considerando un singolo atomo. Nella nostra approssimazione il potenziale atomico visto da un elettrone è rappresentato da una singola buca di potenziale quadrata di ampiezza a e altezza U_0 , così come riportato in figura 3.19a.

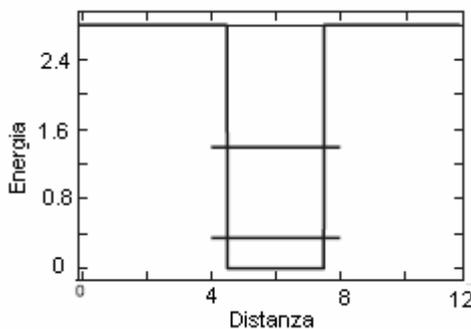


Figura 3.19a

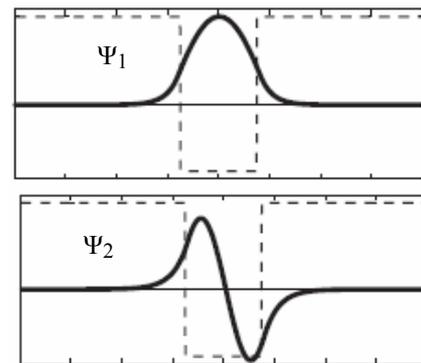


Figura 3.19b

L'equazione di Shroedinger per l'elettrone può essere risolta anche tramite l'uso di Excel¹⁸ e si trova, ad esempio, che per $U_0 \approx 3$ ed $a \approx 4$ l'elettrone può disporre di due livelli energetici E_1 ed E_2 cui corrispondono gli stati stazionari legati rappresentati in figura 3.20b. Ma vediamo come viene alterata la struttura dei livelli considerando due ioni molto vicini tra loro. Il potenziale, in questo caso, è rappresentato da due buche di potenziale separate da una barriera di piccola ampiezza (Figura 3.20 a).

¹⁸ Per una descrizione dettagliata del procedimento numerico si veda la Scheda d'attività "Soluzione numerica equazione di Shroedinger per buche di potenziale accoppiate" appendice MQ1. I risultati ottenuti sono espressi in unità ridotte ponendo $\hbar^2/2m = 1$.

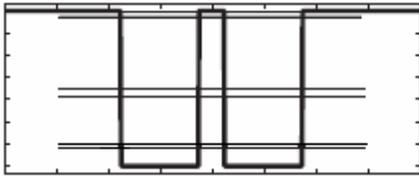


Figura 3.20a

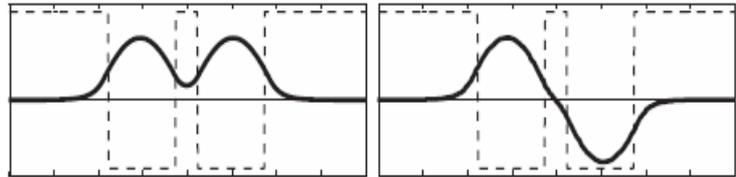


Figura 3.20b

Come si può osservare, ciascun livello energetico di singola buca si separa in una coppia di livelli molto vicini tra loro. In Figura 3..b, sono rappresentate le autofunzioni corrispondenti ai due più bassi livelli energetici della doppia buca di potenziale; esse corrispondono a stati elettronici non più vincolati ad un singolo atomo; l'elettrone, infatti, può trovarsi, con uguale probabilità, in entrambe le buche di potenziale ed ha anche una probabilità diversa da zero di trovarsi tra i due atomi, nella zona classicamente proibita (*effetto tunnel*). Più in generale, le autofunzioni dell'elettrone (che sono funzioni con parità definita, simmetriche o antisimmetriche) corrispondono a distribuzioni di carica elettrica perfettamente simmetriche.

Se continuiamo la procedura, aggiungendo via via altri atomi al cristallo unidimensionale, lo schema si ripete. In generale, se consideriamo un reticolo costituito da N atomi (ossia, nel nostro modello, N buche di potenziale accoppiate) si osserva che, in luogo dei singoli livelli atomici, si formano altrettante bande di energia, ciascuna costituita da N livelli molto vicini tra loro (figura 3.21). Inoltre, l'ampiezza di queste bande risulta molto più piccola della distanza tra esse, cosicché è possibile parlare di gap energetici tra le bande.

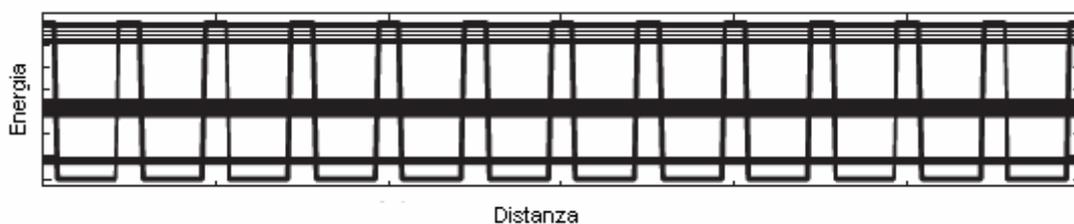


Figura 3.21

Proprietà degli stati elettronici

La figura 3.22 mostra le autofunzioni corrispondenti ad alcuni dei livelli energetici della prima banda d'energia.

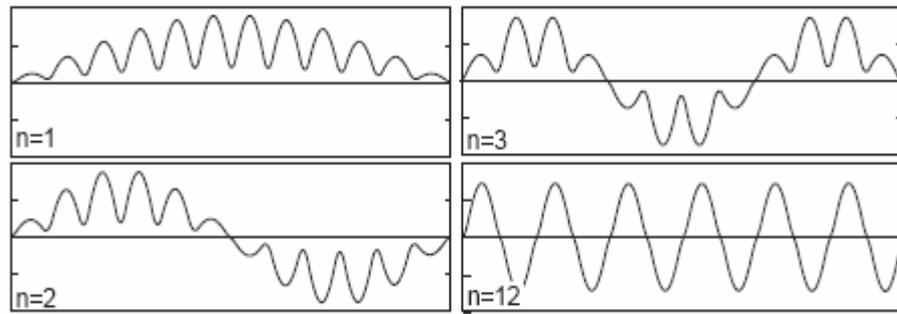


Figura 3.22

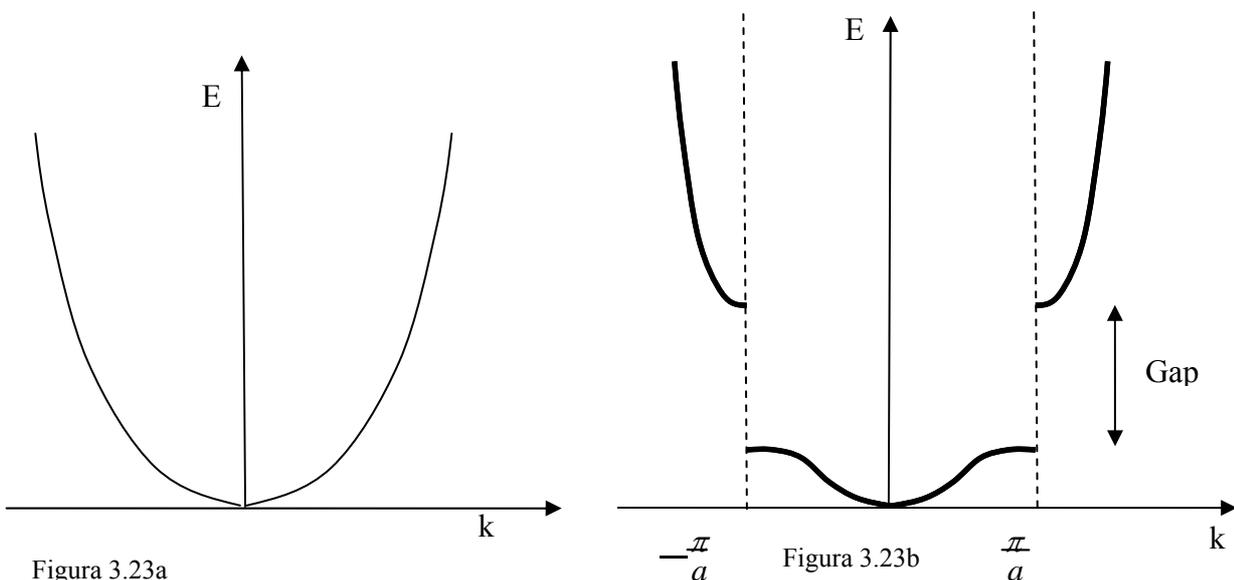
Osservando la forma di queste funzioni è facile rendersi conto che esse soddisfano il teorema di Bloch, essendo esprimibili mediante la formula:

$$\psi_n(x) \approx u_n(x) \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \tag{3.16}$$

dove L è la lunghezza del cristallo e u(x) una funzione con la stessa periodicità del cristallo. La stessa conclusione si applica a tutte le autofunzioni dell'elettrone. Ciò implica che, se vogliamo descrivere il moto di un elettrone in un cristallo, possiamo continuare a immaginare l'elettrone come un'onda cui è associato un numero d'onda definito $k = n \pi/L$ (come per l'elettrone confinato in una buca di lunghezza L), ma la cui ampiezza è modulata dal potenziale ionico del reticolo cristallino. Rispetto al caso di elettrone libero, l'effetto principale della presenza del potenziale reticolare è quello di modificare la relazione tra l'energia cinetica dell'elettrone ed il suo momento $p = \hbar k$. Infatti, se all'elettrone libero (o confinato all'interno di una scatola con L molto grande) è applicabile la relazione (3.15), per un elettrone che si muove in un cristallo si ha, in generale:

$$E \neq \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \tag{3.17}$$

La figura seguente permette di confrontare la funzione $E(k)$ nel caso di un elettrone libero (figura 3.23a) e di un elettrone in un reticolo unidimensionale (figura 3.23b). Il grafico di figura 3.23b mostra chiaramente l'alternarsi di bande continue intervallate da gap proibiti nella struttura dei livelli dell'elettrone reticolare. Si nota, in particolare, che le discontinuità nei valori dell'energia si hanno in corrispondenza di valori di k multipli di $\pm \pi/a$ (che corrispondono ai confini delle *zone di Brillouin* del cristallo, si veda Kittel, 1976).



Conduttori, isolanti, semiconduttori

Nel nostro modello semplificato il numero di livelli energetici in una banda è esattamente uguale al numero N di atomi del cristallo. Pertanto, tenendo conto che ciascun livello può essere occupato da due elettroni con spin opposto, una banda può contenere al più $2N$ elettroni. Tuttavia, è necessario tenere presente che in un cristallo reale la situazione può essere notevolmente diversa, sia perché il potenziale di un atomo è più complesso di quello da noi ipotizzato, sia perché le direzioni di un cristallo reale non sono, in generale, equivalenti. Ciò può determinare, ad esempio, la sovrapposizione di due bande derivanti da orbitali atomici diversi (ad esempio, s e p), con la conseguenza che il numero di stati disponibili in una banda composta è maggiore di $2N$. In ciò che segue, tuttavia,

non terremo conto di tali complicazioni. Nella trattazione seguente, inoltre, ignoreremo la presenza degli elettroni appartenenti alle shell chiuse, considerando soltanto gli elettroni di valenza, immaginando che essi possano muoversi liberamente attraverso il cristallo. Per comprendere le proprietà dei conduttori, dei semiconduttori e degli isolanti nel nostro modello semplificato sarà sufficiente considerare specie atomiche aventi 0, 1 o 2 elettroni di valenza.

Conduttori

Consideriamo prima un cristallo formato da atomi che hanno un solo elettrone di valenza (ad esempio, il rame). In un cristallo di N atomi vi sono, dunque, N elettroni che possono muoversi liberamente. Questi elettroni, a bassa temperatura, occuperanno esattamente per metà (cioè, fino al livello $N/2$) la banda di valenza (vi sono, infatti, due elettroni per livello). La situazione è rappresentata in figura 3.24.

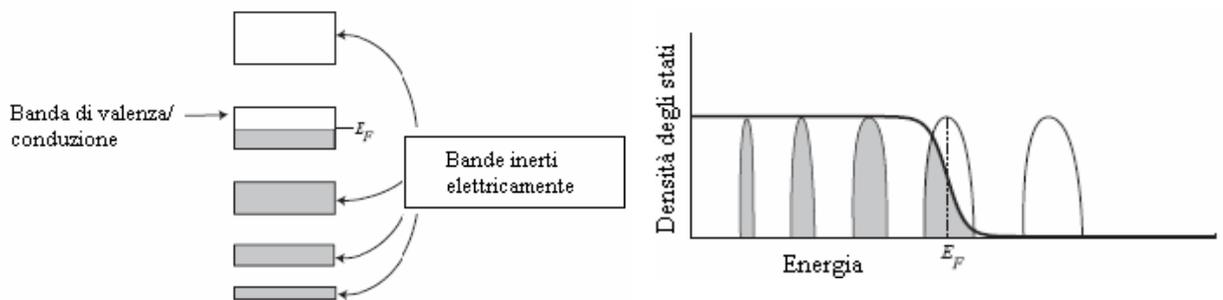


Figura 3.24

In questo caso, la banda di valenza coincide con quella di conduzione (potendosi definire quest'ultima come la banda di più bassa energia con livelli disponibili). A $T = 0$ metà dei livelli della banda risultano occupati, l'altra metà vuoti e l'energia di Fermi E_F cade a metà della banda. A temperature più alte alcuni elettroni andranno ad occupare alcuni dei livelli superiori della banda, ma molti rimarranno disponibili. Se al solido viene applicato un campo elettrico, gli elettroni che si trovano in prossimità del livello di Fermi possono essere eccitati ai livelli superiori della banda acquistando energia dal campo. In questa maniera gli

elettroni possono muoversi liberamente all'interno del metallo, poiché vi sono molti stati disponibili con energie molto prossime ai livelli occupati. Il solido considerato si comporta dunque da conduttore.

Isolanti

Consideriamo, adesso, un materiale che, a $T = 0$ K, ha la banda di valenza completamente occupata e quella immediatamente superiore (la banda di conduzione) completamente vuota. Ciò corrisponde, secondo il nostro modello, a materiali costituiti da una specie atomica con valenza 0 o 2 (ad esempio, il carbonio che ha valenza 2). La situazione è rappresentata in figura 3.25. La banda di valenza e la banda di conduzione sono separate da un gap energetico E_g e l'energia di Fermi cade nella regione tra le due bande

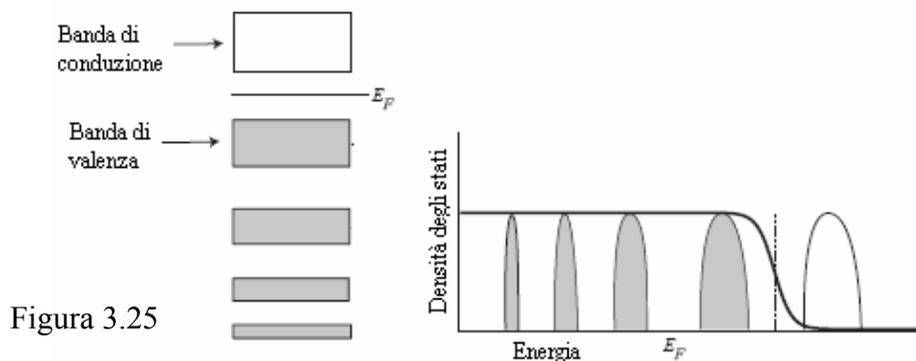


Figura 3.25

A temperature maggiori di 0 K, se il gap d'energia è molto elevato (per gli isolanti è dell'ordine dei 10 eV) rispetto all'energia d'eccitazione termica kT , la probabilità che un elettrone venga eccitato nella banda di conduzione è trascurabile. La banda di conduzione rimarrà, dunque, praticamente vuota anche ad alte temperature e il solido si comporterà da isolante. In effetti, quando si sottopone il materiale ad un campo elettrico, ciascun elettrone della banda di valenza si mette in moto, ma, a causa delle proprietà quantistiche degli autostati elettronici, metà degli elettroni si muoveranno nel verso opposto al campo, l'altra metà lungo lo stesso verso del campo, con il risultato che la corrente netta sarà nulla.

Semiconduttori

La struttura delle bande di un semiconduttore è molto simile a quella degli isolanti, con la differenza che il gap di energia tra banda di valenza e banda di conduzione è più piccolo (tipicamente dell'ordine di 1eV). Per il silicio, ad esempio, il gap è 1.14 eV, per il germanio 0.67 eV. Per questi materiali, dunque, la probabilità che vi siano elettroni nella banda di conduzione, pur mantenendosi piccola, è decisamente più grande di quella relativa ad un isolante.

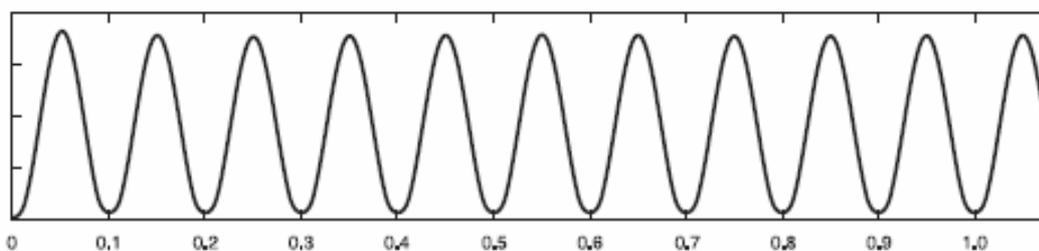
Sebbene, a basse temperature, vi siano pochi elettroni nella banda di conduzione, essi hanno un numero molto elevato di stati disponibili nella banda, di conseguenza la conducibilità risulta diversa da zero. Inoltre, al crescere della temperatura, la conducibilità aumenta molto rapidamente, in quanto cresce il numero di elettroni nella banda di conduzione.

Lacune

Osserviamo che, quando un elettrone viene eccitato termicamente nella banda di conduzione, lascia uno stato elettronico vuoto nella banda di valenza. Tale stato vuoto, che prende il nome di **lacuna**, possiede delle proprietà elettriche proprie: infatti, in presenza di un campo elettrico, esibisce un comportamento analogo a quello di una carica positiva.

Per rendercene conto consideriamo, nuovamente, il modello di cristallo unidimensionale. Le funzioni d'onda di tutti gli stati della banda di valenza, e le corrispondenti densità di probabilità, possono essere ricavate numericamente. Sommando le densità di probabilità di tutti gli stati si ottiene la distribuzione di probabilità corrispondente alla banda completamente occupata. Il risultato relativo al caso $N = 12$ è mostrato in figura 3.26. Osserviamo che la distribuzione non viene in alcun modo alterata dalla presenza di un campo elettrico.

Figura 3.26.
Distribuzione
di probabilità
elettronica.
Gli atomi
occupano le
posizioni 0.1,
0.2, ..., 1.2.



Notiamo che la probabilità di trovare un elettrone è distribuita in modo perfettamente simmetrico. Su piccola scala la densità di carica risulta positiva in prossimità dei centri atomici, negativa nella regione tra due atomi. Su scala macroscopica la densità media di carica risulta uniforme e uguale a zero. Il fatto, poi, che la distribuzione non viene alterata dalla presenza di un campo significa che il materiale non si polarizza, comportandosi esattamente come un isolante.

Ma che cosa accade se un elettrone della banda di valenza (quello di più alta energia) passa alla banda di conduzione?

Per rispondere alla domanda è necessario calcolare la distribuzione di probabilità relativa alla somma delle prime (N-1) funzioni d'onda della banda. Il risultato relativo al caso in cui il materiale è sottoposto ad un campo elettrico diretto verso destra è riportato in figura 3.27.

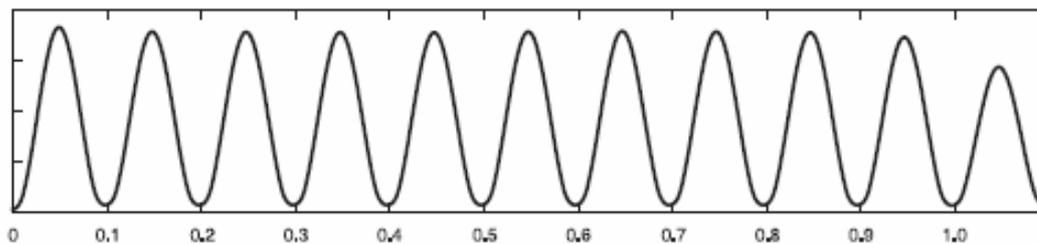


Figura 3.27

Ciò che si osserva è che la distribuzione di carica non è più uniforme. Per la maggior parte del reticolo la carica netta continua ad essere nulla, ma in corrispondenza del margine destro la carica netta risulta positiva: l'elettrone che non si trova più nella banda ha lasciato una lacuna, e questa lacuna risponde ad un campo elettrico esterno come una carica positiva $+e$.

E' opportuno sottolineare che gli elettroni nella banda di conduzione e le lacune nella banda di valenza contribuiscono entrambi alla conduzione elettrica, agendo come portatori di carica: gli elettroni trasportando carica negativa verso l'estremità a potenziale elettrico più elevato, le lacune nel senso opposto. In un materiale puro, costituito soltanto da un elemento chimico o da un composto, vi sono lo stesso numero di elettroni e di lacune (o coppie elettrone -lacuna). Tali materiali sono chiamati semiconduttori intrinseci.

Semiconduttori drogati

In relazione alle applicazioni tecnologiche, una delle più importanti proprietà dei semiconduttori consiste nel fatto che il numero entrambi i tipi di portatori di carica (elettroni e lacune) può essere controllato mediante il processo di drogaggio, che consiste nell'introdurre all'interno del reticolo cristallino del semiconduttore atomi di altri elementi, le cosiddette *impurezze*, con lo scopo di far crescere il numero di elettroni di conduzione o quello delle lacune. Nel caso in cui aumenta il numero di elettroni di conduzione (ad esempio, introducendo atomi di arsenico nel reticolo cristallino del silicio) il semiconduttore drogato viene detto di tipo n. Se al contrario il drogaggio produce un aumento delle lacune (ad esempio drogando il silicio con atomi di alluminio) il semiconduttore viene detto di tipo p. Il drogaggio ha l'effetto alterare la struttura delle bande introducendo livelli di energia localizzati tra la banda di valenza e quella di conduzione. In particolare, nel drogaggio di tipo n, si formano livelli di energia, occupati da elettroni di valenza, prossimi alla banda di conduzione. Poiché l'energia richiesta per eccitare tali elettroni è molto più piccola del gap tra le bande, le impurezze (chiamate, in questo caso, *donori*) hanno l'effetto di accrescere il numero di portatori negativi. Ritornando al modello di cristallo unidimensionale, l'inserimento di un donore nel reticolo cristallino corrisponde ad una rottura della simmetria del potenziale mediante l'introduzione di una buca di potenziale con una profondità maggiore delle altre. Nel drogaggio di tipo p i livelli localizzati (chiamati livelli *accettori*) sono prossimi al top della banda di valenza. Così, alcuni elettroni della banda di valenza vengono eccitati nei livelli accettori, lasciando delle lacune nella banda di valenza. Nel modello di cristallo unidimensionale un accettore corrisponde ad una buca di potenziale meno profonda delle altre.

3.4.4 Generatore di bande: uno strumento didattico per la teoria a bande

Utilizzando il modello di cristallo unidimensionale a buche di potenziale, descritto nel paragrafo precedente, è stato progettato uno modello computazionale per la teoria a bande. Il modello è stato implementato in visual basic, mentre

l'interfaccia utente è stata costruita utilizzando excel. La simulazione consente di determinare e visualizzare gli autovalori di un elettrone in un reticolo cristallino unidimensionale il cui potenziale è approssimato da una successione di buche di potenziale quadrate.

Variando il numero di buche (ossia il numero di atomi del cristallo) è possibile visualizzare il meccanismo di formazione delle bande di energia in un solido, cioè in che modo, mediante l'aggiunta progressiva di atomi ad una catena lineare, i livelli energetici di singolo atomo evolvono in una struttura a bande.

La simulazione è stata realizzata utilizzando un algoritmo iterativo chiamato "Metodo d'inversione delle matrici di transizione" (Kolbas e Holonyac, 1984). Si tratta, sostanzialmente, di un metodo di minimizzazione che sfrutta la conoscenza della forma della funzione d'onda dell'elettrone all'interno delle buche (di tipo seno o coseno) e all'interno delle zone di potenziale classicamente proibite (di tipo esponenziale) e che impone la condizione di continuità della funzione d'onda e della sua derivata in corrispondenza delle barriere di potenziale tra una buca e la successiva. Gli autovalori vengono determinati in modo analogo a quanto descritto nell'attività riportata in appendice MQ1, imponendo, cioè, che la funzione d'onda si annulli in corrispondenza dei confini del reticolo cristallino. In figura 3.28 è mostrata l'interfaccia del programma.

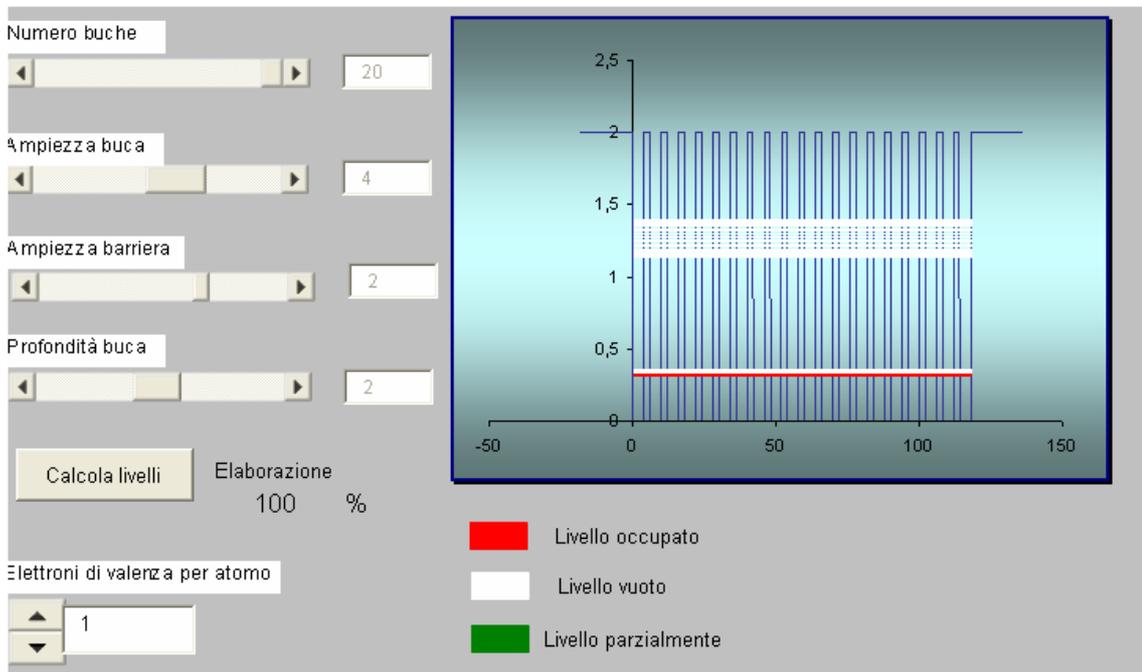


Figura 3.28

La simulazione consente di variare il numero di buche di potenziale (cioè il numero di ioni del cristallo), da un minimo di 1 ad un massimo di 20, l'ampiezza di ciascuna buca e l'ampiezza della barriera (ossia la distanza tra gli atomi del cristallo), la profondità della buca, cioè il valore massimo del potenziale (il minimo si suppone uguale a 0) e il numero di elettroni di valenza del singolo atomo (sono previsti soltanto due valori 1 e 2). Una volta fissati i parametri è possibile calcolare i livelli energetici del sistema evidenziando la formazione e la struttura delle bande di energia. La simulazione offre, inoltre, la possibilità di visualizzare i valori numerici dei livelli energetici, così come rappresentato in figura 3.29

	A	H	I	J	K
1					
2		3,99900000			
3		0,031622777			
4		1,999749984			
5					
6					
7	a b				
8	0				
9	4				
10	3				
11	4				
12	3	Livelli d'energia	m11	m21	kautvalori
13	4	0,392097218	-3,07029E-06	0,995079415	3
14	3	1,530882464	4,7969E-07	-0,99993961	
15	4	3,231553576	-2,96916E-05	1,000608674	
16	3				
17	4				
18	3				
19	4				
20	3				
21	4				

Figura 3.29

La simulazione costituisce un supporto didattico estremamente versatile che permette di evidenziare molti degli aspetti della teoria elettronica dei solidi che abbiamo descritto nei paragrafi precedenti. In ciò che segue si riportano alcuni esempi di utilizzo didattico di tale strumento.

Meccanismo di formazione delle bande di energia

La figura 3.30 esemplifica il procedimento mediante il quale è possibile evidenziare il meccanismo di formazione delle bande di energia a partire dai livelli energetici di singolo atomo.

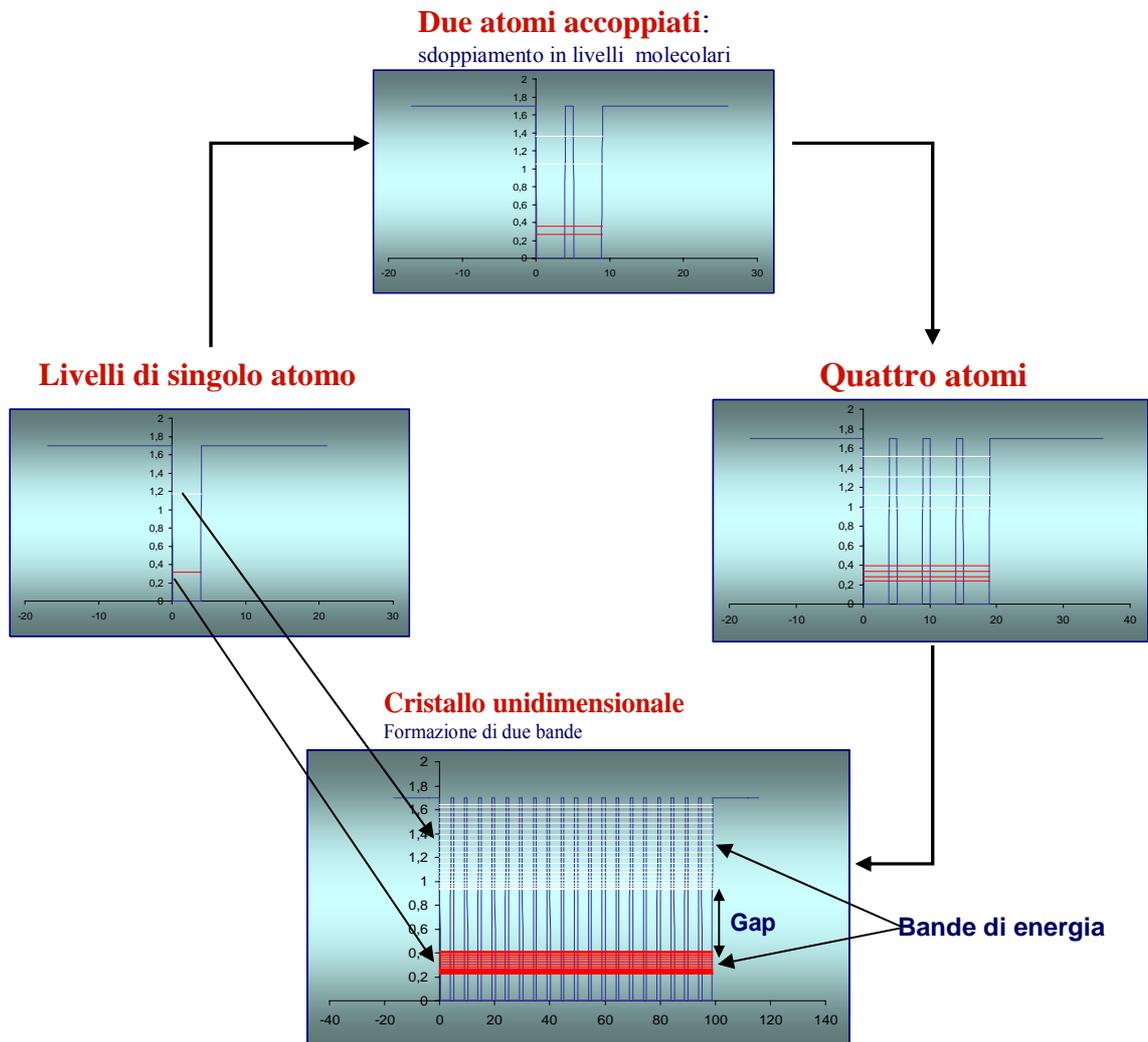


Figura 3.30

Supponiamo, ad esempio, di partire da un atomo isolato con due livelli energetici¹⁹, di cui il primo completamente occupato (da due elettroni con spin opposto), il secondo vuoto. Se si aggiunge un altro atomo, ciascuno dei livelli atomici si sdoppia. I primi due livelli saranno completamente occupati, gli ultimi due vuoti: il processo schematizza la formazione di una molecola biatomica, nella quale gli elettroni di valenza di ciascun atomo si dispongono negli orbitali molecolari, essendo condivisi dai due atomi. Aumentando il numero degli atomi della catena lineare si verifica la moltiplicazione dei livelli di singolo atomo, di

¹⁹ La presente schematizzazione è focalizzata sui livelli energetici d'interesse per la conduzione elettrica e la formazione dei legami tra atomi del cristallo. Pertanto, dei due livelli considerati, il primo rappresenta il livello di valenza, il secondo il livello di più bassa energia non occupato.

modo che se la catena contiene n atomi si assisterà alla formazione di due bande di energia, ciascuna costituita da n livelli energetici, separate da un intervallo di energie proibite (gap). L'esempio riportato in figura rappresenta la struttura a bande di un semiconduttore (o di un isolante) in quanto la valenza di singolo atomo è stata assunta pari a due. Se avessimo considerato atomi con valenza 1 (cioè con il primo livello energetico parzialmente occupato) la banda di valenza del cristallo lineare sarebbe risultata occupata soltanto per metà, simulando in questo modo la formazione di un conduttore elettrico.

Dal modello ad elettroni liberi al modello a bande

Un altro esempio di utilizzo della generatore di bande è connesso con la possibilità di esplicitare le differenze fondamentali tra la teoria quantistica degli elettroni liberi (modello di Sommerfeld) e la teoria a bande.

Nell'ambito della trattazione di Sommerfeld vengono trascurati i dettagli del potenziale atomico. In tale schematizzazione, infatti, si assume che gli elettroni di conduzione possano essere assimilati ad un gas di elettroni liberi confinati all'interno di una "scatola". In altri termini, tale modello assume che la sovrapposizione tra i potenziali di singolo atomo dia origine esclusivamente a barriere di potenziale localizzate in corrispondenza dei confini del cristallo, mentre all'interno del solido il potenziale visto da un elettrone si suppone uniforme. Nel nostro modello ciò equivale a porre uguale a zero l'ampiezza delle barriere di potenziale tra atomi contigui. Il risultato della simulazione è mostrato in figura 3.31. Mentre in figura 3.32 è riportato il risultato della simulazione nel caso in cui l'ampiezza della barriera è diversa da zero, cioè nel caso in cui si tiene conto dei dettagli del potenziale generato dagli atomi all'interno del cristallo.

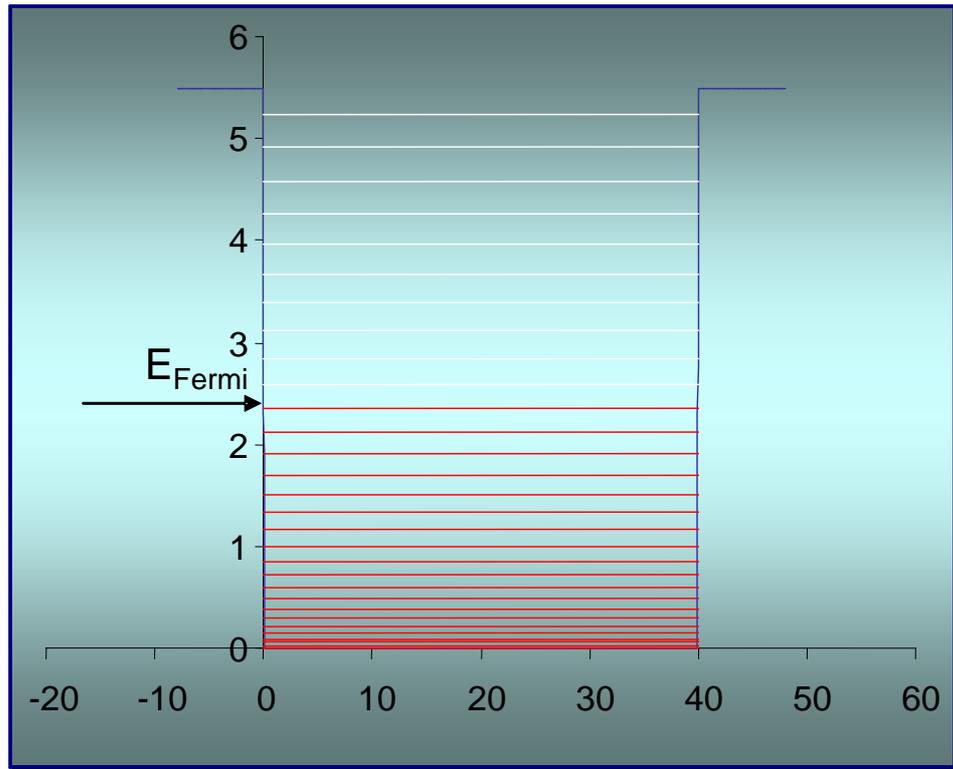


Figura 3.31

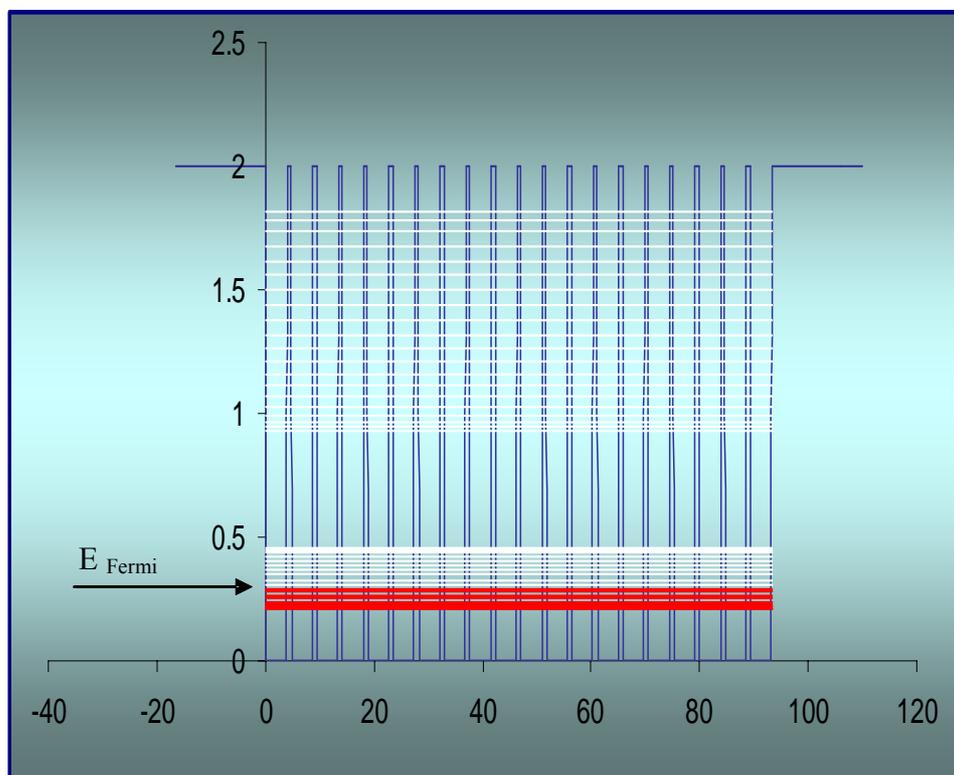


Figura 3.32

In questo secondo caso la presenza del potenziale periodico degli ioni del cristallo modifica marcatamente la struttura dei livelli energetici disponibili per un elettrone, separando lo spettro in due bande nettamente distinte. Utilizzando i valori calcolati dei livelli energetici è, inoltre, possibile rappresentare i risultati dei due diversi modelli in termini di diagrammi d'energia. Le figure 3.33a e 3.33b, confrontano i grafici dell'energia E in funzione della quantità di moto p per i due modelli. Mentre il grafico relativo al modello ad elettroni liberi evidenzia un andamento parabolico dell'energia (di tipo sostanzialmente classico), il grafico relativo al modello a buche di potenziale evidenzia la presenza di discontinuità in corrispondenza di ben determinati valori del momento elettronico (si veda la discussione del paragrafo 3.4.3)

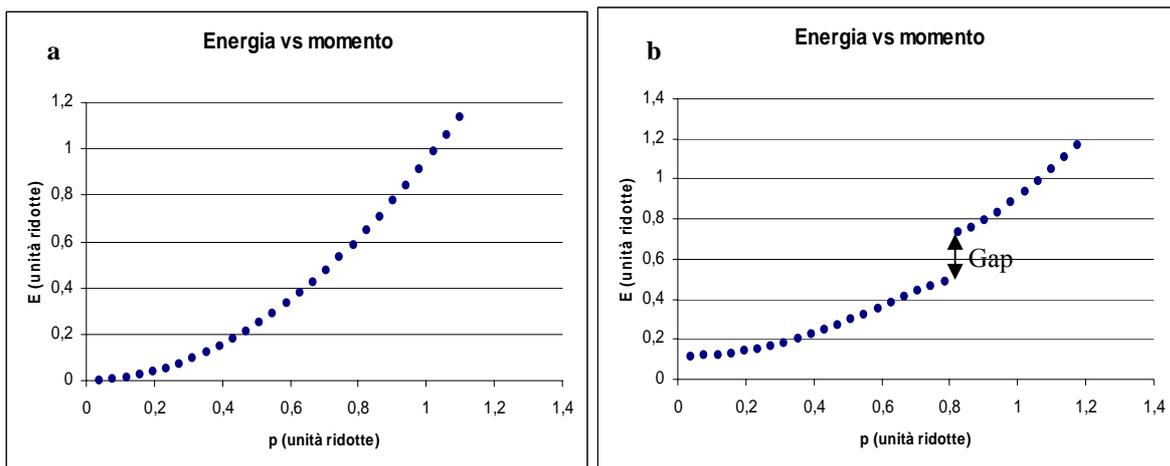


Figura 3.33. Grafici dell'energia dell'elettrone in funzione della sua quantità di moto in unità di $\hbar^2/2m$: a) per il modello ad elettroni liberi di Sommerfeld (gas di fermi); b) per il modello a buche di potenziale

Le precedenti considerazioni permettono di interpretare la teoria a bande come una naturale estensione della teoria degli elettroni liberi. Riteniamo che tale approccio alla teoria a bande possa essere estremamente proficuo in termini didattici, permettendo di attenuare notevolmente le difficoltà insite nelle tradizionali trattazioni quanto meccaniche dell'argomento.

La simulazione “Generatore di bande” consente di evidenziare diversi altri aspetti della teoria e costituisce un utile supporto didattico per l'introduzione dei principali concetti del modello a bande. In appendice MQ2 è riportata una scheda guida relativa ad una sequenza didattica centrata sull'uso della simulazione.

3.5 Dall'elettrostatica all'elettrodinamica mediante un'analogia gravitazionale

Come si è detto precedentemente, diversi studi (Tiberghien, 1984; Closet, 1989; Benseghir e closet, 1996; Hirvonen, 2007) hanno evidenziato che uno dei problemi che può influenzare negativamente la comprensione dei fenomeni elettrici è da individuare nella mancanza di chiari collegamenti tra elettrostatica e conduzione elettrica. In particolare, alcuni autori (Eylon e Ganiel, 1990; Arons, 1997; Borghi et al, 2007) suggeriscono che una migliore comprensione dei fenomeni di conduzione può essere ottenuta focalizzando l'attenzione su modelli microscopici che favoriscano la transizione tra elettrostatica e corrente elettrica. A tal fine, in ciò che segue, si propone un approccio didattico basato su un'analogia gravitazionale dei fenomeni elettrici. Tale approccio è finalizzato, da un lato, ad aiutare gli allievi a creare le adeguate connessioni tra modelli microscopici elettrostatici ed elettrodinamici, dall'altro, a favorire la costruzione di una rappresentazione mentale dei meccanismi microscopici della corrente e della resistenza elettrica.

La sequenza utilizza un semplice sistema costituito da un piano su cui è poggiata una sferetta al fine di stabilire un analogia meccanica, facilmente visualizzabile, dei fenomeni microscopici che si verificano all'interno di un conduttore (sia in condizioni di equilibrio, sia in condizioni di regime transitorio, sia in condizioni di regime stazionario). La figura 3.34 schematizza i diversi momenti di costruzione dell'analogia. La colonna sinistra della figura rappresenta il sistema elettrico che si vuole analizzare, quella di destra analogo meccanico.

La situazione rappresentata nella figura 3.34a mette a confronto un conduttore su cui è distribuita una carica in equilibrio elettrostatico con un piano orizzontale su cui è poggiata una pallina. Il piano è l'analogo meccanico del conduttore, la pallina rappresenta invece un elettrone. L'analogia tra i due sistemi può essere analizzata sia in termini energetici che in termini dinamici. La pallina è in equilibrio (indifferente) lungo il piano inclinato in quanto i punti del piano si trovano tutti allo stesso potenziale e pertanto non vi sono forze parallele al piano

che possano accelerarla. D'altra parte, il moto della pallina verso il basso (dove alla pallina competerebbe un'energia potenziale inferiore) è impedito dalla presenza del piano che costituisce un vincolo. In modo del tutto analogo, una carica del conduttore è in una condizione di equilibrio in quanto i punti del conduttore si trovano tutti allo stesso potenziale. Il moto di una carica verso l'esterno del conduttore (dove alla carica competerebbe un'energia inferiore) è impedito dalla presenza della superficie del conduttore stesso che costituisce un vincolo.

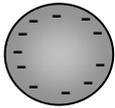
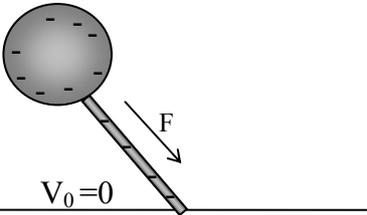
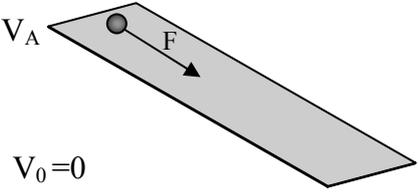
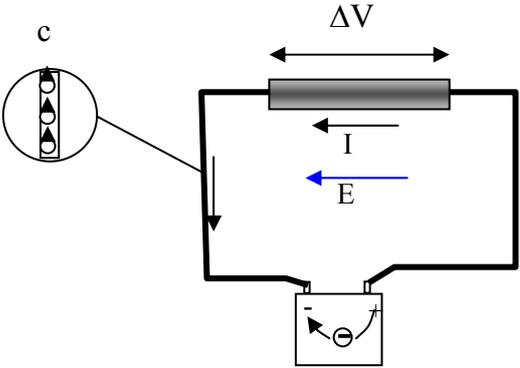
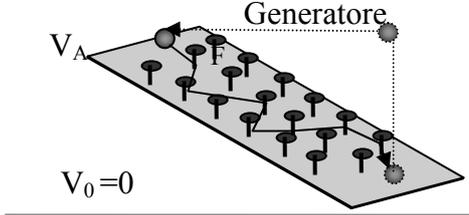
Sistema elettrico	Analogo meccanico
<p>a</p> <p>$V_A = \text{costante}$</p> 	<p>$V_A = g h = \text{costante}$</p> 
<p>b</p> <p>V_A</p>  <p>$V_0=0$</p>	<p>V_A</p>  <p>$V_0=0$</p>
<p>c</p>  <p>ΔV</p> <p>I</p> <p>E</p>	<p>Generator</p> <p>V_A</p>  <p>$V_0=0$</p>

Figura 3.34

La situazione di figura 3.34b rappresenta il conduttore che è stato collegato a terra tramite un filo. Il conduttore si scarica. Durante il transitorio la carica in eccesso fluisce attraverso il filo verso terra. L'analogo meccanico è costituito dal piano inclinato su quale la pallina si muove verso terra. La pallina si muove verso il basso lungo il piano perché questa volta i punti del piano non si trovano più allo stesso potenziale. Il corpo pertanto tenderà a spostarsi verso i punti in cui ad esso compete un'energia potenziale inferiore, cioè verso il suolo. D'altra parte, ragionando in termini dinamici, poiché i punti del piano si trovano a potenziale diverso, sulla pallina si esercita una forza orientata secondo il verso cui corrisponde la diminuzione massima dell'energia potenziale della pallina. In modo del tutto analogo, un elettrone in eccesso del conduttore tenderà a muoversi verso terra attraverso il filo, in quanto tenderà a raggiungere i punti in cui ad esso compete energia potenziale più bassa (ossia verso terra). D'altra parte, in questo caso, i punti del conduttore non si trovano allo stesso potenziale, il campo elettrico non è nullo e sulle cariche agiscono delle forze elettriche. La forza elettrica che agisce su una carica del conduttore tenderà a farne diminuire l'energia potenziale (elettrica), facendola fluire attraverso il filo, verso terra. Il flusso di carica avrà termine quando il conduttore si scaricherà del tutto, ovvero quando il suo potenziale risulterà uguale al potenziale di terra.

Affinché si realizzi un flusso stazionario di carica elettrica è necessario che la differenza di potenziale tra le due estremità del filo si mantenga costante. La situazione è rappresentata in fig. 3.34c, in cui una pila mantiene una d.d.p. costante tra i due poli di un filo conduttore. D'altra parte, il fatto che la corrente elettrica sia costante implica che gli elettroni di conduzione non acquistino energia cinetica ma si muovano a velocità costante, nonostante all'interno del filo vi sia un campo elettrico (e dunque una forza elettrica) che tende ad accelerare gli elettroni: l'energia fornita dalla forza elettrica viene dissipata per effetto Joule. L'analogo meccanico del circuito elettrico non può essere, dunque, un piano inclinato. La pallina in moto lungo il piano, infatti, acquista energia cinetica. L'analogo meccanico del circuito può essere costituito da un piano inclinato su cui vi sono degli ostacoli disposti in un reticolo regolare: ogni volta che la pallina

urta contro un ostacolo tende a perdere l'energia cinetica acquistata durante il moto libero, di modo che la sua velocità si mantiene costante (in media). E' evidente che tale sistema costituisce una riproduzione meccanica del modello ad elettroni liberi di Drude – Lorentz: la pallina rappresenta un elettrone, gli ostacoli rappresentano gli ioni.

Tale sistema meccanico è stato realizzato concretamente, per mezzo di una tavoletta di legno su cui sono stati conficcati dei chiodi disposti in un reticolo regolare. Tale artefatto è stato utilizzato per progettare e successivamente proporre ad allievi del liceo scientifico un esperimento centrato sull'analogia meccanica qui descritta. L'attività sperimentale mira a promuovere la costruzione di una rappresentazione mentale (un modello *sorgente* di tipo analogico) dei processi di conduzione e a favorire la comprensione di alcuni dei concetti chiave della teoria ad elettroni liberi (come la velocità di drift, tempo di rilassamento, meccanismo di conversione di energia elettrica in termica). In appendice A1 è riportata una scheda guida (rivolta agli allievi) relativa all'esperimento. Nel capitolo 6 saranno descritte le modalità di implementazione didattica della sequenza e alcuni degli esiti della sperimentazione.

Capitolo 4. Esperimento pilota: contesto sperimentale, fasi d'indagine, implementazione dell'ambiente didattico

La sperimentazione pilota è stata realizzata tra i mesi di aprile e maggio 2007 nell'ambito del corso Ssis attivato presso l'Università degli Studi di Palermo. In questo capitolo, dopo avere caratterizzato il contesto in cui si è realizzato l'intervento e descritto nel dettaglio gli obiettivi e l'articolazione in fasi dell'indagine, si illustreranno le caratteristiche e la struttura dell'ambiente didattico effettivamente implementato. Nel capitolo successivo saranno, invece, esplicitati i metodi e i criteri d'analisi e si valuteranno gli esiti della sperimentazione.

4.1 Il contesto sperimentale e gli obiettivi dell'indagine

Come illustrato nel paragrafo 2.5, l'implementazione di un ambiente didattico è fortemente dipendente dal contesto sperimentale in cui esso è applicato e i risultati della sperimentazione vanno valutati tenendo conto opportunamente di tali influenze. In ciò che segue, pertanto, verrà riportata una dettagliata descrizione della natura del contesto, evidenziandone i vincoli e le caratteristiche.

4.1.1 Caratterizzazione del contesto sperimentale

Ambientazione

La sperimentazione è stata effettuata nell'ambito del Laboratorio di Termodinamica attivato presso la Ssis di Palermo e rivolto a studenti iscritti al I anno del corso di specializzazione per l'insegnamento secondario per il conseguimento dell'abilitazione in Matematica e Fisica, la sua durata è stata complessivamente di 10 ore e ad essa hanno partecipato 21 studenti. L'attività di docenza è stata da me condotta; inoltre, durante gli interventi in classe, era presente un osservatore, che ha tenuto il diario di bordo durante le attività e che ha

collaborato ad alcune fasi di pianificazione degli interventi e di analisi degli elaborati.

Vincoli

I vincoli esterni imposti all'implementazione del progetto sono stati determinati principalmente dalle richieste da parte del titolare del laboratorio didattico e hanno riguardato i tempi da poter dedicare alla sperimentazione (10 ore delle 25 complessivamente contemplate dal laboratorio, suddivise in due sole sessioni di 5 ore ciascuna più 1 ora per la somministrazione del protocollo d'ingresso) e la necessità di adattare i contenuti del corso all'ambito disciplinare del laboratorio (Termodinamica) in cui esso trovava collocazione. Il vincolo temporale ha determinato la necessità di ridurre l'ampiezza del percorso didattico, eliminando la parte relativa alla teoria a bande dei solidi e limitando la trattazione alla teoria elettronica dei metalli. Inoltre, per rispondere alla seconda richiesta sono stati enfatizzati all'interno dell'impianto didattico alcuni temi (già in parte previsti) relativi alle connessioni della teoria elettronica con alcuni aspetti della termodinamica, ad esempio il principio di equipartizione dell'energia, la meccanica statistica e le connessioni tra conduzione elettrica e termica.

Natura degli allievi e variabili climatiche

Il gruppo di allievi insegnanti che ha partecipato alle attività laboratoriali era abbastanza eterogeneo sia in relazione alla distribuzione delle età (tra i 25 e i 38 anni), sia in relazione al percorso di studi seguito; differenze marcate si sono evidenziate pure nei livelli motivazione e nel livello delle conoscenze di base.

In tabella 4.1 sono riportate alcune delle variabili (quelle esprimibili in forma quantitativa) considerate per caratterizzare il gruppo classe. Esse sono state stimate sulla base delle informazioni tratte durante le prime fasi della sperimentazione (indagini d'ingresso, osservazioni dei comportamenti e delle interazioni sociali) e sulla base di informazioni fornite dai docenti e dai supervisor che conoscevano già il gruppo classe.

Tabella 4.1

Scuola superiore		Laurea		Conoscenze di base	
Tipo	%	Tipo	%	Livello	%
Scientifico	62 (13)	Mat.	43 (9)	Carenti	48 (10)
Classico	14 (3)	Ing.	57 (12)	Suff. -buone	52 (11)
Magistrale	14 (3)				
Geometra	10 (2)				

Come si evince dai dati riportati in tabella, circa metà della classe era costituita da laureati in matematica, l'altra metà da laureati in ingegneria. Dei laureati in matematica (9 in tutto) 4 provenivano dal Liceo scientifico, 3 dal Magistrale e 2 dal Liceo classico, tra gli ingegneri 5 erano laureati in ingegneria elettrica o elettronica, 3 in ingegneria civile, 2 in ingegneria gestionale, 1 in ingegneria informatica ed 1 in ingegneria meccanica. Per quanto riguarda, infine, la scuola superiore di provenienza degli ingegneri: 9 provenivano dal liceo scientifico, 2 dall'istituto tecnico per geometri e 1 dal liceo classico. Sebbene tutti gli allievi, durante il loro percorso universitario, avevano seguito due corsi di fisica generale, la maggior parte dei laureati in matematica evidenziava conoscenze fisiche di base carenti, sia in relazione ai concetti dell'elettrostatica che della termodinamica, (particolarmente carenti si sono rivelate le competenze di base dei tre matematici provenienti dal magistrale), e ciò si accompagnava a livelli di motivazione ugualmente carenti. Le connessioni tra caratteristiche cognitive e motivazionali era probabilmente determinata dal fatto che la consapevolezza delle carenze nelle conoscenze di base determinava in questi allievi un atteggiamento passivo e preventivamente negativo nei confronti di una proposta innovativa che, in quanto tale, veniva da loro percepita come eccessivamente impegnativa. I laureati in ingegneria, in buona parte, manifestavano un atteggiamento positivo caratterizzato da impegno e interesse adeguati.

Più in generale, si può ritenere che le differenze tra i livelli di motivazione e d'impegno degli allievi avevano una natura più profonda, essendo determinate da una differenza di aspettative e di obiettivi personali che animavano i due diversi gruppi di allievi. L'obiettivo primario del primo gruppo di allievi era

esclusivamente il conseguimento dell'abilitazione e i loro sforzi erano commisurati al conseguimento di questo unico obiettivo: il loro inserimento in un ambiente didattico innovativo e sperimentale avrebbe implicato, a loro parere, un surplus d'impegno e ciò era da essi considerato inutile e superfluo ai fini del conseguimento dello scopo. Il gruppo di allievi più impegnati e motivati, al contrario, affrontavano il percorso di specializzazione come un ulteriore periodo di arricchimento culturale e professionale, utile non soltanto ai fini del conseguimento di un ulteriore titolo di studio ma anche ai fini della loro crescita culturale e di un pieno inserimento nella vita professionale.

La presenza in classe di allievi che manifestavano bisogni, motivazioni ed aspettative così diverse determinava delle dinamiche sociali estremamente negative, innescando, in particolare, un meccanismo di competizione al ribasso: gli allievi cognitivamente più deboli e meno motivati mettevano in atto comportamenti e atteggiamenti finalizzati a frenare le ambizioni, l'impegno e le performance degli allievi più bravi, isolandone i comportamenti virtuosi e tentando d'imporre a tutta la classe un basso profilo cognitivo.

4.1.2 Obiettivi della sperimentazione e domande di ricerca

Seguendo le indicazioni della ricerca basata su progetto, l'esperimento d'insegnamento è stato impostato in modo tale da conseguire un duplice obiettivo: da un lato valutare l'efficacia globale dell'ambiente didattico progettato e di alcune delle sue componenti (ritenute significative in quanto diretta conseguenza delle ipotesi teoriche che hanno ispirato la redazione dell'intero progetto), dall'altro estrarre informazioni, di portata più generale (poiché, in una certa misura, slegate dalle interazioni ambiente didattico - contesto), relative ad alcune problematiche pedagogiche connesse all'insegnamento/apprendimento dei modelli microscopici della materia.

Considerata tuttavia l'esigenza pragmatica e la focalizzazione sul prodotto didattico assunta come criterio guida dell'intero percorso di ricerca discusso in questa tesi, i due diversi tipi di informazione sono stati utilizzati al fine di realizzare un unico scopo, ossia quello di disporre di una base di dati utile

all'ottimizzazione del progetto didattico e, più in generale, ad impostare le successive fasi di sviluppo del progetto di ricerca.

Le domande di ricerca cui la sperimentazione mirava di fornire una risposta sono una diretta conseguenza del duplice obiettivo della sperimentazione. Esse possono essere così formulate:

1. Quali sono i modelli microscopici della conduzione elettrica pre-istruzione evidenziati dagli allievi?
2. In che modo tali modelli vengono utilizzati per interpretare/prevedere fenomeni?
3. Quali sono gli aspetti dei modelli e delle conoscenze pregresse che possono influenzare negativamente il processo d'apprendimento e lo sviluppo di adeguate competenze interpretative?
4. In che misura e sotto quali condizioni l'ambiente didattico e gli strumenti pedagogici progettati possono stimolare e supportare un'adeguata evoluzione delle conoscenze e competenze disciplinari degli allievi? E, in particolare, quali sono le caratteristiche dell'ambiente didattico che risultano più efficaci e quelle che necessitano di una modifica?

Come si può osservare, le prime tre domande sono inerenti la valutazione di variabili cognitive *indipendenti* dal prodotto didattico progettato e dalla sua implementazione, tali variabili tuttavia influenzano criticamente gli esiti del processo d'insegnamento/apprendimento e di esse si deve tener conto sia per valutare i risultati della sperimentazione sia per ottimizzare il prodotto didattico. L'ultima domanda di ricerca è invece direttamente centrata sull'interazione tra l'ambiente didattico ed il contesto sperimentale.

Fornire una risposta a tali domande ha implicato la risoluzione di diversi problemi di ricerca relativi, principalmente, all'individuazione di adeguati strumenti e metodi di analisi, in particolare:

- costruire opportuni strumenti d'indagine finalizzati ad accertare la natura ed il livello delle conoscenze iniziali e dei modelli individuali degli allievi sulla conduzione elettrica;

- far emergere le correlazioni tra le componenti dell'ambiente didattico ed il processo d'apprendimento degli allievi (ossia valutare le relazioni stimolo-risposta in corrispondenza di particolari segmenti didattici), valutando, in particolare, l'efficacia degli strumenti e delle strategie didattiche anche in ragione della natura ed il livello delle conoscenze e competenze iniziali dei singoli allievi;
- implementare strumenti di monitoraggio e modalità d'analisi che consentano di estrarre le informazioni necessarie e permettano di caratterizzare le traiettorie d'apprendimento degli allievi.

4.2 Fasi della sperimentazione e razionale della ricerca

Come riportato in tabella 4.2, la sperimentazione si articola in 5 distinte fasi d'indagine. In questo paragrafo, anche al fine di esplicitare il razionale della ricerca, si fornirà una panoramica generale del percorso sperimentale, saranno esaminate le motivazioni, le finalità delle singole fasi e le relazioni che intercorrono tra esse. Un'analisi più dettagliata delle caratteristiche, degli strumenti utilizzati e degli esiti di alcune di tali fasi è, invece, riportata nei paragrafi seguenti.

Tabella 4.2

Che cosa	Perché
1. Indagini d'ingresso	Individuare conoscenze di base, modelli e conoscenze spontanee.
2. Calibrazione del progetto didattico	Adattare gli strumenti e i materiali didattici, sulla base degli esiti dell'analisi d'ingresso, alle peculiarità del contesto sperimentale.
3. Realizzazione degli interventi formativi	Immergere gli allievi nell'ambiente didattico al fine di evidenziare gli effetti delle componenti e dei segmenti del progetto didattico.
4. Indagini d'uscita	Individuare l'impatto globale dell'ambiente didattico sulla base delle modificazioni prodotte sugli allievi.
5. Analisi e valutazione	Valutare gli esiti della sperimentazione con riferimento agli obiettivi e alle domande di ricerca, al fine di ottimizzare il progetto didattico, in vista delle successive implementazioni.

4.2.1 Fase 1: indagini d'ingresso.

La prima fase mira ad accertare diversi aspetti delle conoscenze pregresse e delle competenze degli allievi. Gli scopi di tale indagine sono molteplici e possono essere così sintetizzati:

- individuare la qualità delle conoscenze di base;
- estrarre informazioni circa i modelli individuali della conduzione elettrica ed effettuare una prima classificazione fenomenografica dei modelli spontanei (2.7.2);

- evidenziare le modalità mediante le quali gli allievi utilizzano i modelli microscopici posseduti per interpretare proprietà e prevedere fenomeni, ossia valutare il *potenziale esplicativo* dei modelli individuali (par. 2.7.2);
- estrarre dati utili alla calibrazione del progetto didattico apportando, eventualmente, delle modifiche al percorso preventivato in modo da adattarlo alle reali esigenze del contesto classe.

Gran parte delle informazioni raccolte durante questa prima fase d'indagine costituiscono, più in generale, il riferimento essenziale, circa la situazione cognitiva d'ingresso, rispetto al quale misurare l'evoluzione delle conoscenze e competenze degli allievi e valutare, di conseguenza, l'efficacia dell'ambiente formativo implementato.

Le informazioni necessarie per valutare la situazione cognitiva in ingresso sono state ricavate utilizzando le seguenti risorse e strumenti d'indagine:

- il test di ammissione alla scuola di specializzazione relativo alle conoscenze sugli argomenti di base di fisica;
- un protocollo d'ingresso a risposta aperta (riportato in appendice P1) mirante ad accertare alcune conoscenze sui fenomeni elettrici, funzionali al buon esito dei successivi interventi, i modelli spontanei sulla struttura microscopica dei metalli e i meccanismi della conduzione elettrica, le modalità di utilizzazione dei modelli microscopici individuali per interpretare proprietà e prevedere fenomeni (capacità di interpretare fenomeni e processi sulla base del modello microscopico posseduto dall'allievo);
- discussione con gli allievi dopo l'analisi del protocollo d'ingresso;
- il diario di bordo redatto dall'osservatore;

I metodi utilizzati per analizzare e classificare i dati raccolti durante questa prima fase d'indagine e risultati ottenuti sono illustrati nel dettaglio nel successivo capitolo 5. Per il momento, al fine di chiarire i presupposti e le motivazioni della successiva fase 2, si ritiene utile anticipare, brevemente e in modo schematico, alcuni dei risultati dell'indagine d'ingresso:

1. una percentuale relativamente elevata di allievi evidenziava lacune significative nelle conoscenze di base (sia in relazione ai concetti macroscopici e le leggi fenomenologiche della conduzione elettrica, sia in relazione ai prerequisiti di termodinamica e teoria cinetica) e nelle capacità di analizzare e interpretare, in modo coerente rispetto alle conoscenze possedute, i fenomeni connessi alla conduzione elettrica;
2. il 30% circa degli allievi evidenziava un modello microscopico della conduzione elettrica, qui battezzato *modello ad elettroni legati*, con caratteristiche simili ad un modello spontaneo riportato in letteratura (Wittman, 2002.). Sebbene tali allievi erano in grado di utilizzare il modello microscopico posseduto per interpretare e prevedere fenomeni, tuttavia le interpretazioni che essi fornivano risultavano in evidente conflitto con l'esperienza (alcuni di loro ritenevano, ad esempio, che al crescere della temperatura diminuisse il valore della resistività di un conduttore elettrico).
3. Più in generale, una rappresentazione erronea (o del tutto assente) dei meccanismi microscopici d'interazione tra i costituenti elementari del modello è uno degli aspetti delle conoscenze spontanee che influenza negativamente le competenze interpretative e predittive degli allievi.

4.2.2 Fase 2: calibrazione del progetto didattico

Come già illustrato nel capitolo precedente, sulla base di una dettagliata analisi storica ed epistemologica riguardante i modelli microscopici della conduzione elettrica, dei risultati degli studi precedenti sull'argomento e delle conseguenti ipotesi sulla significatività educativa e sui possibili ostacoli epistemologici e difficoltà d'apprendimento, sono stati progettati preliminarmente gli strumenti, le strategie e i materiali didattici principali ed integrati, tramite la formulazione di un opportuno ciclo didattico, in una coerente, ma flessibile, ipotesi di percorso formativo. Gli ulteriori elementi di valutazione forniti dai dati e dalle informazioni sperimentali raccolte durante la prima fase d'indagine hanno indotto la necessità di attivare una fase di "calibrazione in itinere" (par. 2.5.5),

apportando alcune modifiche all'ambiente didattico preventivamente predisposto, in modo da adattare l'iter formativo alle peculiari esigenze degli allievi emerse da tali indagini. In particolare:

A. quanto illustrato nel precedente punto1 ha reso necessario ampliare (sia in termini di contenuti che di tempi previsti) la prima fase dell'intervento didattico, quella relativa all'introduzione delle conoscenze di base, eliminando, di contro (anche per i motivi espressi nel paragrafo 4.1), la trattazione delle proprietà dei semiconduttori e la teoria a bande dei solidi.

B. Al fine di favorire l'apprendimento degli allievi di cui ai precedenti punti 2 e 3, si è introdotto nel percorso didattico (in una fase che precede immediatamente l'introduzione del modello classico della conduzione e la sua successiva elaborazione tramite l'utilizzo dell'ambiente Net-Logo descritto nel par. 3.4.1) una sequenza didattica (la S2 descritta in seguito) relativa all'analisi dell'effetto Joule e alla realizzazione di un semplice esperimento qualitativo (descritti nel par. 3.3.1) che evidenzia chiaramente e in modo immediato l'effetto dell'incremento della temperatura sulla resistenza elettrica di un filo di rame. Come sarà precisato meglio in seguito, tale modifica alle sequenze è motivata da due esigenze:

- evidenziare fenomeni la cui analisi fornisce informazioni sui meccanismi d'interazione tra i costituenti microscopici di un conduttore (elettroni ed ioni);
- attivare un evidente *conflitto* tra le previsioni basate sul modello spontaneo ad elettroni legati e le osservazioni sperimentali, al fine di favorire l'abbandono di tale modello spontaneo e predisporre gli allievi alla sua *sostituzione* con un modello alternativo più funzionale.

C. per rispondere alle carenze nelle capacità di elaborazione del modello spontaneo evidenziata da alcuni allievi si sono potenziate le attività che prevedono l'applicazione di ragionamenti di tipo logico deduttivo (relative, ad esempio, all'analisi dei comportamenti macroscopici a partire dalle caratteristiche dei modelli microscopici via via introdotti).

In accordo con i criteri stabiliti precedentemente per le fasi di revisione (par. 2.5.5), tali modifiche coinvolgono diversi elementi del progetto (strumenti didattici, strategie e contenuti) ma ne lasciano inalterati elementi fondamentali: il ciclo didattico e gli obiettivi pedagogici.

4.2.3 Fase 3: realizzazione degli interventi.

La realizzazione degli interventi formativi ha perseguito lo scopo di immergere gli allievi nell'ambiente didattico progettato, al fine di valutare gli effetti delle sue componenti sull'apprendimento e di ricavare, in questo modo, informazioni sulla loro efficacia pedagogica. In altri termini, l'applicazione delle sequenze didattiche intendeva produrre delle precise modificazioni nel contesto sperimentale, modificazioni finalizzate a ridurre la distanza tra le conoscenze individuali evidenziate dagli allievi e le conoscenze scientifiche accettate e condivise assunte come riferimento. In particolare, come verrà meglio precisato in seguito, date le peculiarità e i presupposti del progetto educativo, l'implementazione dell'ambiente didattico perseguiva l'obiettivo di attivare (o potenziare) competenze procedurali relative alla costruzione, affinamento e uso di modelli esplicativi (stimolate attraverso l'individuazione delle relazioni tra osservazioni e descrizioni macroscopiche e ipotesi sulla natura microscopica dei sistemi e dei processi). Ciò ha implicato un duplice coinvolgimento dello scrivente durante le attività formative: da un lato l'attività di formazione finalizzata a promuovere, tramite la proposizione dei problemi e l'attivazione delle strategie didattiche, i cambiamenti attesi (sulla base delle ipotesi formulate a priori sugli effetti dell'azione formativa), dall'altro un'attenta attività di monitoraggio (preceduta da un'attenta pianificazione degli strumenti d'indagine) mirante ad evidenziare tali modificazioni e, più in generale, il processo d'apprendimento degli allievi.

Il monitoraggio dell'apprendimento, i cui criteri verranno precisati in seguito, è stato effettuato in diversi momenti, opportunamente scelti, dell'iter formativo, utilizzando diversi strumenti di monitoraggio, tra i quali:

- schede relative alle attività realizzate compilate dai discenti

- test a risposta aperta
- osservazione dei comportamenti durante le attività in classe registrate su diario di bordo
- discussioni con gli allievi durante l'iter formativo registrate sul diario di bordo

4.2.4 Fase 4: indagini d'uscita

Le indagini d'uscita sono state effettuate allo scopo di valutare l'impatto globale (di tipo cognitivo e metacognitivo) dell'esperienza formativa sulle conoscenze e competenze degli allievi. Gli aspetti dell'apprendimento che si intendevano evidenziare possono essere così sintetizzati:

- evoluzione nelle conoscenze e competenze degli allievi (in relazione, in particolare, ai modelli microscopici della conduzione e alle capacità d'interpretazione dei fenomeni), valutata sia rispetto alle conoscenze e competenze evidenziate in ingresso sia rispetto al sapere scientifico di riferimento;
- capacità di estendere alla risoluzione di problemi nuovi e complessi le competenze acquisite (ossia il grado di capitalizzazione di tali competenze)
- il punto di vista dei discenti circa l'esperienza formativa ed il proprio percorso d'apprendimento

Gli strumenti d'indagine utilizzati per estrarre tali informazioni sono:

- un protocollo d'uscita a risposta aperta (identico a quello d'ingresso)
- un protocollo contenente domande – problema miranti ad accertare alcuni aspetti significativi dell'apprendimento, tra cui il grado di capitalizzazione delle competenze (appendice P2)
- un test di tipo metacognitivo relativo al punto di vista dei discenti sulle esperienze formative e all'autovalutazione (appendice P3).

4.2.5 Fase 5: analisi e valutazione.

Al fine di valutare gli esiti della sperimentazione sono stati effettuati diversi tipi di analisi dei dati raccolti e delle osservazioni effettuate durante l'iter

formativo. In termini generali, la motivazione che ha ispirato e informato i criteri ed i metodi d'analisi è la necessità di verificare il raggiungimento degli obiettivi della sperimentazione e di fornire una risposta alle domande di ricerca. In termini più specifici, gli elementi che hanno costituito oggetto d'analisi e che hanno contribuito alla formulazione di un giudizio consuntivo sugli esiti della sperimentazione sono i seguenti:

- le modificazioni globali indotte dall'intero processo formativo sulle conoscenze e competenze degli allievi, in termini di evoluzione dei modelli microscopici della conduzione elettrica e di capacità di interpretazione/previsione di proprietà e processi fisici (per gli strumenti utilizzati si veda la precedente fase 4);
- le correlazioni tra particolari "episodi" del percorso didattico ed il processo d'apprendimento degli allievi, in relazione alle ipotesi e agli obiettivi formativi che hanno ispirato la progettazione e l'implementazione di tali sequenze (per gli strumenti utilizzati si veda la precedente fase 3)
- gli aspetti critici delle conoscenze che ostacolano l'apprendimento, evidenziati utilizzando i metodi dell'analisi implicativa.
- il punto di vista dei discenti sull'esperienza formativa (per gli strumenti utilizzati si veda la precedente fase 4)

Come si può osservare la valutazione degli esiti dell'indagine si basa su due diversi tipi d'analisi. Un'analisi che possiamo chiamare *macroscopica*, relativa all'impatto globale dell'ambiente didattico e del processo d'insegnamento/apprendimento ed un'analisi, per così dire *microscopica*, relativa a particolari aspetti del processo didattico e/o dell'apprendimento. Sebbene i due tipi di analisi, singolarmente considerati, forniscano di per sé significativi elementi di valutazione, si è operato l'ulteriore tentativo di correlare gli esiti di tali analisi, al fine di far emergere le relazioni tra aspetti globali e aspetti locali del processo formativo e dell'apprendimento.

A scopo di sintesi, in figura 3.1 è riportata una visione d'insieme dell'intero percorso sperimentale.

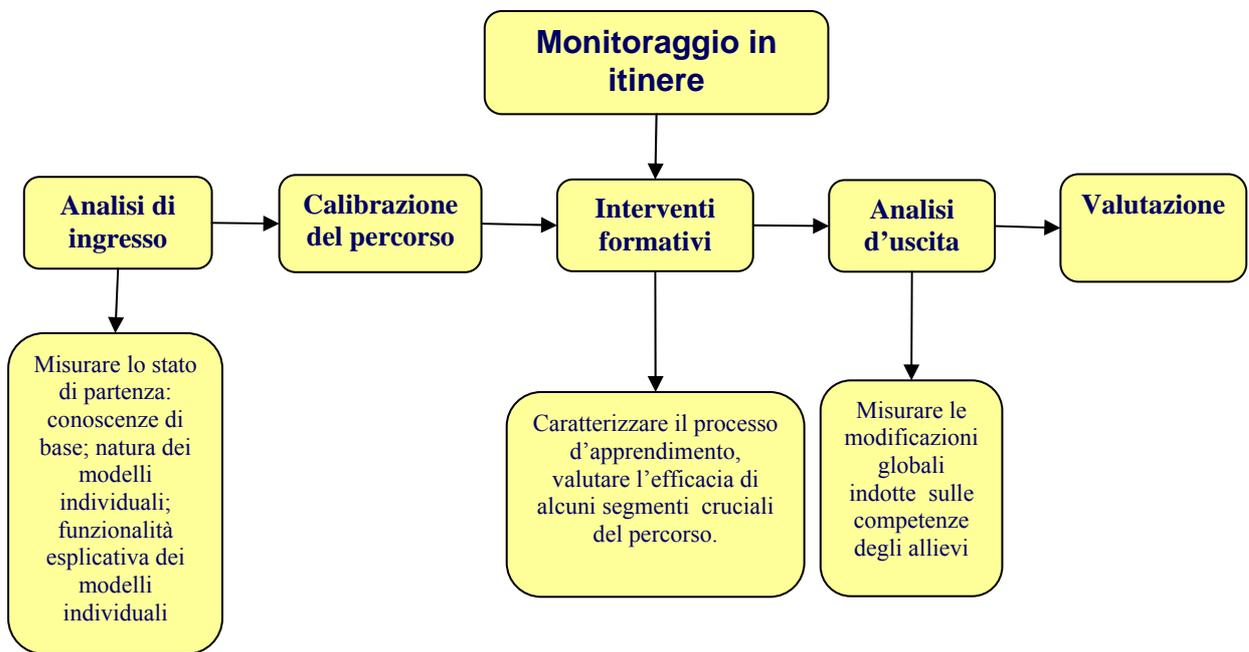


Figura 3.1

4.3 Caratteristiche e struttura del percorso formativo

In questo paragrafo si illustreranno, in modo dettagliato, la struttura, le caratteristiche e l'articolazione in sequenze del percorso didattico sperimentato.

Dopo una panoramica generale sulle motivazioni didattiche, sugli gli obiettivi pedagogici e sul percorso concettuale seguito durante l'iter formativo, si descriveranno le caratteristiche delle singole sequenze in cui si articola il percorso, mettendone in evidenza, tra l'altro, i presupposti teorici e pedagogici che ne hanno ispirato la progettazione, le ipotesi circa effetti attesi sull'apprendimento, le domande di ricerca, l'organizzazione didattica e gli strumenti di controllo utilizzati.

4.3.1 Motivazioni didattiche e obiettivi pedagogici

L'ambiente didattico è stato progettato secondo i criteri, le ipotesi e le strategie didattiche illustrate nel precedente capitolo 3. Esso è caratterizzato da una stretta integrazione, e un costante rimando, tra osservazioni macroscopiche ed

esperimenti (descritti nel par 3.3) e attività di modellizzazione microscopica supportata dall'uso dei software e delle simulazioni descritte nel paragrafo 3.4.

Come illustrato precedentemente, il focus didattico è centrato sulle connessioni tra aspetti macroscopici e interpretazioni microscopiche dei fenomeni di conduzione elettrica. La realizzazione degli interventi mira, infatti, ad attivare e/o potenziare negli allievi due diverse e complementari competenze: da un lato la capacità di estrarre dall'osservazione dei fenomeni macroscopici informazioni utili per costruire e/o affinare i modelli microscopici della materia, dall'altro la capacità di utilizzare modelli microscopici, via via più raffinati, per interpretare o prevedere comportamenti emergenti a livello macroscopico.

In particolare, le motivazioni didattiche che hanno influenzato la strutturazione del percorso sono le seguenti:

- favorire la comprensione (e/o attivare capacità di sviluppo) di modelli microscopici, via via più raffinati, a partire da osservazioni sperimentali;
- attivare la capacità di prevedere comportamenti macroscopici a partire dall'elaborazione di modelli microscopici;
- esercitare la capacità di analizzare ed interpretare fatti e fenomeni utilizzando e connettendo diversi livelli di rappresentazione;
- indurre la consapevolezza della necessità del passaggio da interpretazioni classiche a interpretazioni quantistiche a partire dall'osservazione e l'analisi di fenomeni macroscopici facilmente riproducibili.

Conseguentemente le attività di monitoraggio dell'apprendimento sono state predisposte in modo tale da far emergere l'evoluzione di tali competenze. Entrando più nel dettaglio, al fine di valutare l'efficacia degli strumenti, dei materiali e delle strategie didattiche utilizzate durante gli interventi formativi, si è cercato di tracciare l'evoluzione delle seguenti conoscenze o comportamenti osservabili degli allievi:

- conoscenze relative ai modelli microscopici della conduzione elettrica.
- capacità di utilizzare le osservazioni macroscopiche per modificare i modelli microscopici;
- capacità di interpretare/prevedere fenomeni e processi sulla base di un adeguato modello microscopico;
- capacità di applicare le competenze acquisite a nuovi contesti problematici (internalizzazione di quanto appreso);
- evidenze circa la transizione da una descrizione puramente classica ad una descrizione quantistica delle proprietà elettriche dei solidi.

4.3.2 Percorso concettuale e articolazione in sequenze dell'iter formativo

La figura 3.2 è una rappresentazione schematica del percorso concettuale sotteso dall'iter formativo. E' facile rendersi conto come tale schema sia una diretta conseguenza del ciclo didattico illustrato nel par..., caratterizzato dal susseguirsi ciclico di quattro fasi pedagogiche: osservazione ed analisi fenomenologica, costruzione di un modello microscopico esplicativo, elaborazione del modello e previsione di comportamenti osservabili, confronto tra previsioni e osservazioni sperimentali.

La traduzione didattica del percorso concettuale rappresentato in figura è stata realizzata attraverso un'articolazione in cinque sequenze d'insegnamento/apprendimento. Ad eccezione della prima (relativa al consolidamento delle conoscenze di base), ciascuna sequenza risponde alle esigenze di una, o al più, due fasi successive del ciclo didattico (ad eccezione della sequenza 4 che integra tre fasi del ciclo: confronto, revisione del modello e ulteriore confronto).

Ciascuna sequenza è stata progettata e realizzata sulla base di criteri che conferiscono ad esse delle caratteristiche comuni che possono essere così sintetizzate:

- rappresenta l'implementazione di una delimitata componente del percorso concettuale;

- è centrata sull'utilizzazione (e la verifica d'efficacia) di un particolare soluzione progettuale di valenza pedagogica (un tools didattico o una particolare strategia);
- mira a produrre ben determinati cambiamenti nelle conoscenze e concezioni degli allievi e persegue un delimitato set di obiettivi pedagogici;
- è caratterizzata da un sistema di controllo d'apprendimento finalizzato ad evidenziare gli effetti dell'intervento, in termini di realizzazione di obiettivi pedagogici e/o in termini differenze rispetto agli effetti ipotizzati.

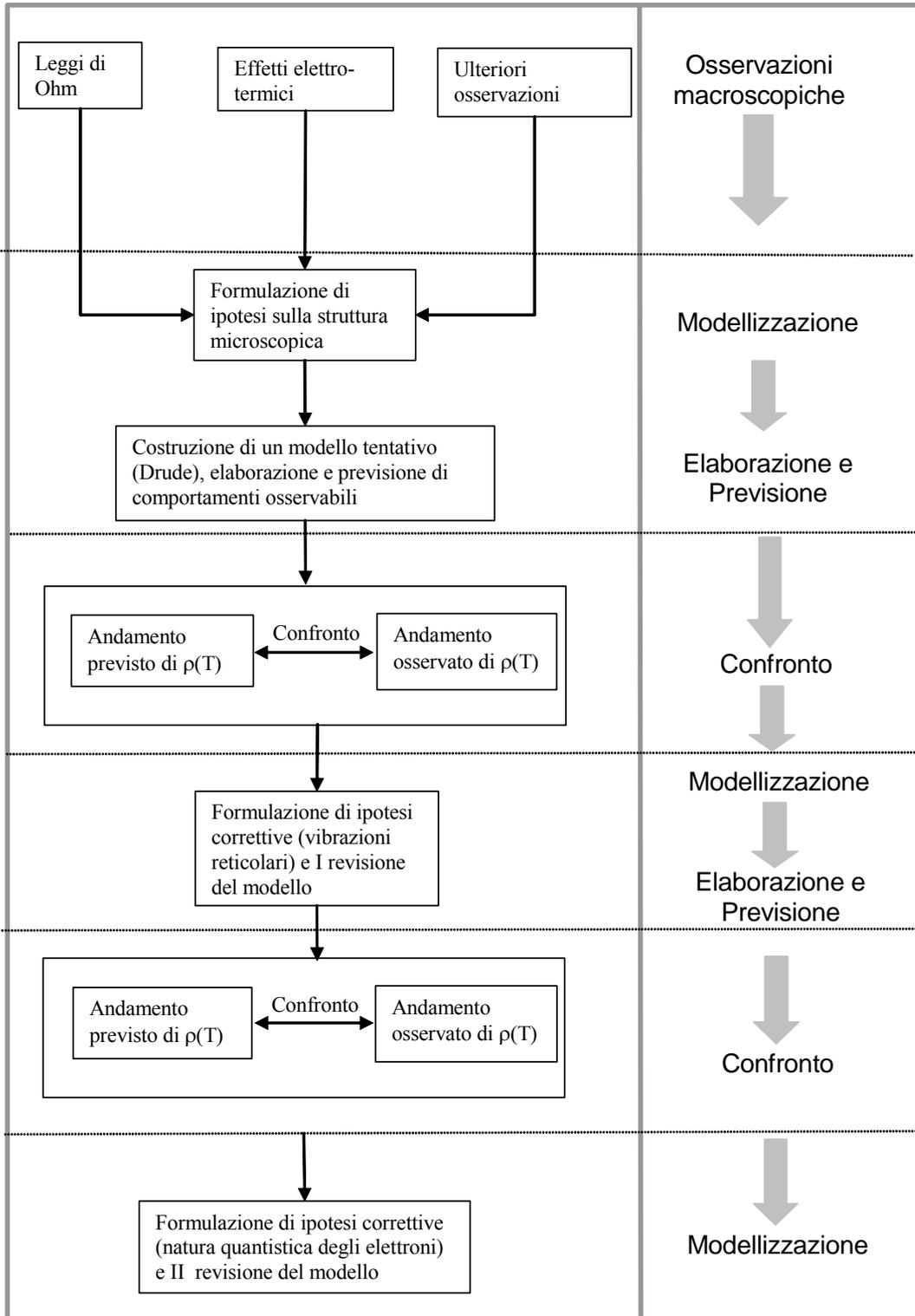


Figura 3.2

Tali caratteristiche fanno sì che, ad eccezione della prima, l'implementazione di ciascuna sequenza assume le caratteristiche di un autoconsistente *micro-esperimento d'insegnamento* (in contrapposizione al *macro-esperimento* rappresentato dall'intero percorso), che si pone un delimitato set di obiettivi, è fondato su ipotesi adeguatamente esplicitate, è finalizzato a rispondere ad alcune domande sperimentali ed è caratterizzato da un sistema di controllo e verifica appositamente progettato.

4.3.3 Le sequenze nel dettaglio

In ciò che segue si fornirà una descrizione dettagliata della struttura, delle caratteristiche e delle modalità d'implementazione didattica delle sequenze d'insegnamento/apprendimento (ad eccezione della S1). In particolare, di ciascuna sequenza saranno descritti:

- l'argomento e lo scopo principale dell'intervento;
- i presupposti pedagogici e le ipotesi relative agli effetti attesi sull'apprendimento degli allievi;
- le domande di ricerca;
- Una descrizione dell'iter formativo e degli strumenti di verifica

Sequenza 2. Effetti elettro-termici.

Argomento centrale di questa sequenza è l'osservazione e l'analisi di due diversi fenomeni, l'effetto Joule e la variazione della resistività ρ di un conduttore come effetto della variazione di temperatura (rilevata mediante un esperimento qualitativo), che evidenziano le correlazioni tra stato termico e comportamento elettrico di un conduttore. Lo scopo dell'intervento è quello di far emergere, dall'analisi dei due fenomeni, aspetti che possano consentire agli allievi (i cui modelli spontanei risultano discrepanti da quelli scientifici) di acquisire informazioni e formulare ipotesi sulla struttura microscopica dei metalli, al fine di modificare e/o arricchire il modello microscopico evidenziato prima dell'intervento. In particolare, il presupposto pedagogico che ispira e che ha motivato la realizzazione dell'intervento può essere così formulato: *l'analisi dei*

due fenomeni elettro-termici può consentire a quegli allievi il cui modello microscopico risulta carente, di arricchire o modificare tale modello, precisandolo, in particolare, in quegli aspetti che riguardano i meccanismi d'interazione tra i costituenti elementari del modello. In particolare, uno dei risultati attesi è che gli allievi che hanno evidenziato il modello spontaneo “ad elettroni legati” abbandonino tale modello.

Di contro, per gli allievi che hanno evidenziato conoscenze più prossime a quelle scientifiche, l'intervento si configura come un'attività di rinforzo utile per precisare e consolidare tali conoscenze. Inoltre, la loro partecipazione alle attività di gruppo può favorire, in un'ottica cooperativa, l'apprendimento degli allievi più deboli.

Le domande di ricerca cui l'esperimento vuole contribuire a fornire una risposta sono le seguenti:

- 1. In che modo allievi utilizzano le informazioni fornite e le osservazioni proposte per modificare i propri modelli microscopici?*
- 2. In che misura gli strumenti e le strategie utilizzate risultano efficaci in relazione al presupposto pedagogico che ne ha ispirato la progettazione?*

L'obiettivo principale dell'analisi sperimentale (che sarà descritta nel capitolo seguente) è, dunque, quello di far emergere evidenze circa le modalità con cui gli allievi recepiscono le osservazioni proposte e gli stimoli didattici per arricchire/modificare i propri modelli microscopici della conduzione elettrica.

Entrando più nel dettaglio, i concetti principali che si intendono veicolare (e che si presuppone gli allievi possano cogliere) sono i seguenti:

- A)** l'analisi dell'effetto joule permette di concludere che il lavoro compiuto dal campo non produce alcun aumento di energia cinetica dei portatori di carica²⁰ che attraversano il conduttore, ma viene convertito in energia termica: il campo elettrico tende ad indurre un moto ordinato (energia meccanica) delle cariche libere mentre i processi d'interazione che si verificano all'interno del conduttore tendono a disordinare (energia

²⁰ L'ipotesi circa l'esistenza dei portatori di carica è stata introdotta durante la S1, a partire da una possibile interpretazione (riscontrabile storicamente) di alcuni fatti sperimentali, tra cui l'esistenza dei conduttori, dei semiconduttori ed isolanti e l'emissione dei raggi catodici (effetto Thomson)

termica) tale moto. Ciò presuppone il verificarsi, all'interno del conduttore, di interazioni che tendono a convertire energia meccanica in termica.

B) La semplice osservazione qualitativa che la resistività di un metallo (un sottile filo di rame) cresce con il crescere della temperatura permette di discriminare tra i possibili meccanismi d'interazione tra elettroni e struttura "ordinata" del metallo: l'ipotesi relativa ad una prevalenza di interazioni di tipo attrattivo tra i portatori di carica (elettroni) e i costituenti elementari della struttura rigida del metallo (ioni), che caratterizza il modello spontaneo "ad elettroni legati", conduce, infatti, alla conclusione opposta che la resistenza del conduttore diminuisce con il crescere della temperatura (così come emerge dalle indagini d'ingresso).

In ciò che segue si fornirà una descrizione dell'articolazione dell'intervento e delle attività realizzate.

I. Nella fase introduttiva viene stimolata la discussione sugli effetti prodotti dalla corrente elettrica che attraversa un conduttore. La discussione viene guidata in modo da focalizzare l'attenzione degli allievi sull'effetto Joule.

II. Viene proposto un semplice esperimento qualitativo per evidenziare l'effetto Joule²¹. Il fenomeno viene quindi analizzato da un punto di vista energetico in modo da evidenziare il fatto che, in condizioni di regime, il calore prodotto per effetto Joule in un dato intervallo di tempo eguaglia la variazione di energia potenziale della carica che attraversa il conduttore nello stesso tempo. Dalla discussione seguente emerge che il lavoro compiuto dal campo elettrico sui portatori di carica si traduce in incremento di energia termica.

III. Se il passaggio di corrente elettrica modifica lo stato termico del conduttore (effetto Joule), che cosa accade, nell'opposta circostanza, in cui lo stato termico del conduttore viene modificato dall'esterno? In termini più espliciti, il problema che viene posto agli allievi è il seguente: in che modo l'incremento di temperatura

²¹ L'esperimento consiste nel collegare un sottile filo di rame ai due poli di una batteria. Il riscaldamento prodotto dal passaggio di corrente è percepibile al tatto.

influenza le proprietà elettriche del conduttore (ad esempio, la resistenza elettrica)?

Dopo aver posto il problema e stimolato la discussione, in modo da permettere agli allievi di esplicitare le loro concezioni e interpretazioni sul fenomeno, si propone alla classe un esperimento mediante il quale evidenziare, in modo qualitativo, l'effetto della variazione di temperatura sulla resistenza elettrica di un sottile filo di rame²² (la scheda – allievo è riportata in appendice A2).

IV. Nella fase finale dell'intervento agli allievi viene proposto un protocollo contenente due quesiti, l'uno relativo all'interpretazione microscopica dell'effetto Joule, l'altro relativo all'interpretazione microscopica del secondo esperimento.

I metodi e gli strumenti utilizzati per analizzare i dati estratti durante l'intervento e gli esiti dell'intervento sono illustrati nel successivo capitolo.

Sequenza 3 Costruzione di un modello microscopico della conduzione

In questa sequenza gli elementi tratti dall'osservazione dei fenomeni macroscopici vengono precisati ed organizzati in uno schema coerente al fine di formulare un primo modello di struttura dei metalli che possa rendere conto dei fenomeni di conduzione (il modello di Drude-Lorentz analizzato nei par. 3.1 e 3.4.1), il modello viene dunque elaborato, tramite l'uso delle simulazioni e degli ambienti virtuali descritti nel par. 3.4, allo scopo di prevedere comportamenti emergenti al livello macroscopico (in particolare l'andamento di $\rho(T)$), da confrontare successivamente con i corrispondenti andamenti sperimentali.

Lo scopo pedagogico dell'intervento è quello di supportare gli allievi nel processo di riorganizzazione delle conoscenze al fine di permettere la costruzione, o l'affinamento, di un modello esplicativo della conduzione elettrica nei metalli. L'intervento intende, inoltre, supportare l'attivazione di competenze relative all'elaborazione quantitativa del modello microscopico e alla giustificazione analitica di andamenti emergenti a livello macroscopico.

²² L'esperimento consiste nel riscaldare, alla fiamma di un accendino, un sottile filo di rame inserito in un circuito, in serie ad un resistore opportunamente dimensionato: il segno della variazione di d.d.p. (o di corrente elettrica) misurata ai capi della serie permette di stabilire se la resistenza del filo aumenta o diminuisce.

Le ipotesi che informano l'organizzazione didattica, gli strumenti e le strategie che caratterizzano la sequenza sono le seguenti:

- 1. L'utilizzazione di una strategia di costruzione del modello microscopico fondata il più possibile su evidenze e fatti accessibili agli allievi e di cui essi hanno diretta esperienza può favorire e stimolare il cambiamento concettuale (soprattutto di quelli per i quali il processo di transizione dal modello spontaneo a un modello scientificamente più adeguato non si è del tutto realizzata a seguito del conflitto cognitivo attivato durante la sequenza precedente) o il processo di consolidamento (internalizzazione) per gli allievi che hanno evidenziato conoscenze più adeguate.*
- 2. L'utilizzazione degli ambienti di simulazione dinamica progettati, che permettono di visualizzare i processi microscopici e di effettuare esperimenti virtuali (simili a quelli reali) al fine di evidenziare l'andamento di fenomeni emergenti al livello macroscopico, può favorire l'apprendimento per diverse ragioni: perché permette di "vedere" il modello microscopico "mentre lavora", favorendo in tal modo la costruzione di un'utile immagine mentale dei suoi costituenti, dei loro comportamenti e delle modalità d'interazione; perché stimola e facilita il processo di elaborazione formale (matematica) degli elementi del modello finalizzata alla previsione di andamenti macroscopici, in quanto lo sforzo deduttivo e analitico è motivato e orientato dalla necessità riprodurre andamenti noti (già ricavati nell'ambito di osservazioni sperimentali, ancorché virtuali).*

Le domande di ricerca cui l'esperimento vuole contribuire a fornire una risposta sono le seguenti:

- 1. In che misura le attività proposte favoriscono il cambiamento concettuale degli allievi il cui modello spontaneo risulta ancora inadeguato?*
- 2. In che misura gli strumenti e le attività di modelling predisposte supportano il consolidamento delle competenze interpretative degli allievi?*

La sequenza si articola in quattro fasi successive.

I. Sistematizzazione dei fatti e degli andamenti sperimentali oggetto delle sequenze precedenti (leggi di Ohm, correlazioni tra proprietà termiche ed elettriche, evidenze circa l'esistenza degli elettroni: effetto Thomson), descrizione di ulteriori evidenze sperimentali (effetto Richardson che corrobora l'ipotesi del

gas di elettroni liberi) e formulazione di ipotesi sulla struttura microscopica dei metalli e i meccanismi d'interazione tra i costituenti microscopici.

II. Precisazione di alcuni aspetti dinamici e termodinamici del modello (corrente elettrica come flusso microscopico, moto dell'elettrone, velocità di deriva, tempo di rilassamento, proprietà statistiche del gas di elettroni)

III. Utilizzazione delle simulazioni, delle visualizzazioni ed esecuzione di esperimenti virtuali finalizzati a ricavare l'andamento, implicato dal modello, della resistività del rame come funzione della temperatura.

IV. Giustificazione quantitativa degli andamenti ottenuti.

Durante lo sviluppo della sequenza gli allievi suddivisi in piccoli gruppi sono stati impegnati in attività guidate di simulazione e sperimentazione (la scheda – guida relativa alle attività proposte è riportata in appendice M1). Gli esiti dell'intervento sono stati rilevati sulla base di osservazioni tratte durante lo svolgimento delle attività e l'analisi delle risposte fornite dagli allievi alle domande proposte nella scheda-guida, relative sia all'elaborazione dei dati sperimentali ottenuti dalla simulazione (costruzione di un modello analitico descrittivo dell'andamento di $\rho(T)$) sia all'interpretazione microscopica quantitativa degli andamenti ottenuti. Alla fine della sequenza, inoltre, agli allievi è stato richiesto di precisare le risposte che essi avevano fornito alle due domande poste alla fine della sequenza precedente, ciò al fine di acquisire informazioni sull'impatto globale della sequenza 3 sull'apprendimento.

Gli aspetti specifici circa le modalità di analisi dei dati e i risultati ottenuti sono descritti nel paragrafo 5.2.4.

Sequenza 4 I revisione del modello (influenza delle vibrazioni reticolari)

Argomento di questa sequenza è la realizzazione di un esperimento quantitativo finalizzato a ricavare la dipendenza funzionale della resistività del rame dalla temperatura ed il successivo confronto con l'andamento previsto sulla base del modello microscopico costruito durante lo svolgimento della precedente sequenza. La discrepanza tra risultati teorici (basati sul modello di Drude-Lorentz) e risultati sperimentali viene sfruttata per introdurre nel modello l'ipotesi di Wien

(descritta nel par. 3.1) relativa all'influenza delle oscillazioni degli ioni reticolari del metallo. Il modello viene dunque elaborato, tramite l'uso del modello di simulazione NetLogo, allo scopo di ricavare il nuovo andamento di $\rho(T)$, da confrontare con l'andamento sperimentale (ormai noto).

In accordo con il criterio di gradualità che ispira l'intero progetto didattico, lo scopo dell'intervento è quello di sostenere gli allievi nella costruzione di un modello di transizione propedeutico al passaggio ad un più funzionale modello quantistico, tappa finale del percorso d'insegnamento/apprendimento qui descritto. Infatti, le attività proposte sono tali, da un lato, di giustificare (sulla base dell'inadeguatezza del modello di Drude-Lorentz evidenziata sperimentalmente) l'inclusione nel modello dell'influenza delle oscillazioni reticolari, e di creare, dall'altro, uno scenario che possa predisporre gli allievi alla successiva revisione quantistica del modello.

Esprimendoci in termini più generali, l'intervento si propone di estendere la zona di sviluppo prossimale degli allievi al fine di preparare il terreno per il successivo superamento degli ostacoli epistemologici implicati dai concetti della meccanica quantistica.

I presupposti pedagogici che stanno alla base dell'attivazione della sequenza hanno elementi in comune con quelli già espressi in relazione alla sequenza 2 e alla sequenza 3. Essi possono essere così espressi:

1. *l'attivazione di un conflitto tra le previsioni formulate sulla base del modello di Drude-Lorentz e risultati sperimentali induce negli allievi consapevolezza della necessità di apportare modifiche al modello, e può predisporli all'accoglimento (o alla formulazione autonoma) di ipotesi correttive sulle proprietà dei suoi costituenti microscopici.*
2. *l'utilizzazione di una strategia d'affinamento del modello microscopico fondata il più possibile su evidenze e fatti accessibili agli allievi e di cui essi hanno diretta esperienza (andamento di $\rho(T)$) può favorire e stimolare l'apprendimento.*
3. *l'utilizzazione degli ambienti di simulazione dinamica progettati, può favorire la costruzione di un'utile immagine mentale dei suoi costituenti,*

dei loro comportamenti e delle modalità d'interazione; inoltre può stimolare e facilitare il processo di elaborazione formale (matematica) degli elementi del modello finalizzata alla previsione di andamenti macroscopici, in quanto lo sforzo deduttivo e analitico è motivato e orientato dalla necessità riprodurre andamenti noti (già ricavati nell'ambito di osservazioni sperimentali, ancorché virtuali).

4. *L'ulteriore conflitto tra previsioni del modello revisionato e osservazioni sperimentali può indurre negli allievi la consapevolezza della necessità di apportare ulteriori modifiche al modello e può predisporli all'accoglimento (o alla formulazione autonoma) di ipotesi correttive sulle proprietà dei suoi costituenti microscopici.*

Le domande di ricerca cui si intende fornire una risposta sono strettamente connesse con le ipotesi sugli effetti dell'intervento di cui ai precedenti punti 2 e 3.

Esse possono essere così formulate:

1. *In che misura gli strumenti e le attività di modelling predisposti supportano il consolidamento delle competenze interpretative degli allievi?*
2. *In che misura gli allievi sono in grado di riorganizzare le proprie conoscenze e formulare ipotesi correttive in modo autonomo?*

Qui di seguito si fornisce una descrizione dell'iter didattico:

- I. Dopo aver posto il problema (verificare se la dipendenza ρ da T prevista dal modello di Drude-Lorentz si accorda con dipendenza ricavabile sperimentalmente), si descrive un possibile metodo sperimentale per ricavare la $\rho(T)$; agli allievi, suddivisi in piccoli gruppi (tre, quattro persone), viene richiesto di predisporre l'apparato sperimentale e di eseguire l'esperimento²³. Dopo avere analizzato i dati e ricavato la curva sperimentale, agli allievi viene richiesto confrontare i risultati ottenuti con l'andamento previsto teoricamente e di interpretare l'eventuale discrepanza tra andamento previsto e

²³ L'esperimento proposto agli allievi è quello descritto nel paragrafo 3.3.2. L'esperimento più complesso che prevede l'uso dell'azoto liquido è stato proposto successivamente ex cattedra.

andamento ottenuto sperimentalmente. Si discutono i risultati degli esperimenti, mettendo in evidenza le discrepanze rispetto ai risultati attesi. Si stimola la discussione in modo da far emergere possibili interpretazioni di tale discrepanza e ipotesi relative a possibili modifiche da apportare al modello.

- II. Tra le diverse ipotesi emerse dalla discussione, si focalizza l'attenzione della classe sugli effetti delle oscillazioni degli ioni sulla probabilità di scattering da parte degli elettroni liberi del metallo. Si propone, dunque, un'attività centrata su una simulazione NetLogo, che permette di evidenziare come la probabilità di urto elettrone-ione dipenda in modo significativo dall'ampiezza d'oscillazione degli ioni.
- III. Si evidenzia come l'effetto delle oscillazioni ioniche può essere simulato conferendo agli ioni un'area efficace A che dipende non tanto dalle loro effettive dimensioni geometriche, quanto piuttosto dall'ampiezza d'oscillazione, ovvero sostituendo al raggio r degli ioni l'ampiezza d'oscillazione x_0 (che dipende dalla temperatura secondo il principio di equipartizione).
- IV. Gli allievi, suddivisi in piccoli gruppi, ricavano, tramite l'ambiente di simulazione NetLogo, l'andamento di $\rho(T)$ previsto dal modello che tiene conto delle oscillazioni degli ioni (si veda appendice M1, attività 2). Tale andamento viene, dunque, confrontato con la legge sperimentale e si discutono gli esiti del confronto.

Gli esiti dell'intervento sono stati rilevati sulla base di osservazioni tratte durante lo svolgimento delle attività e l'analisi delle risposte fornite dagli allievi alle domande proposte nelle scheda-guida, relative sia all'attività sperimentale, sia all'elaborazione dei dati ottenuti dalla simulazione (costruzione di un modello analitico descrittivo dell'andamento di $\rho(T)$) sia all'interpretazione microscopica quantitativa degli andamenti ottenuti. Come attività propedeutica alla successiva sequenza 5, il protocollo prevedeva, inoltre, che gli allievi avanzassero delle ipotesi circa le possibili modifiche da apportare al modello finalizzate a

ricomporre la discrepanza tra andamenti previsti ed andamenti osservati. Ulteriori evidenze sono state estratte dall'analisi del test finale.

Gli aspetti più specifici circa le modalità di analisi dei dati e i risultati ottenuti sono descritti nel paragrafo 5.2.5.

Sequenza 5. Seconda revisione del modello (quantizzazione dei livelli elettronici e statistica di Fermi - Dirac)

E' questa l'ultima tappa del percorso in cui i diversi elementi emersi durante le fasi precedenti vengono utilizzati per giustificare l'introduzione delle idee quantistiche (in particolare la statistica di Fermi - Dirac per gli elettroni liberi del metallo) che permettono di ricomporre le contraddizioni tra previsioni teoriche e osservazioni sperimentali. In particolare, uno degli scopi dell'intervento è quello di richiamare alcuni elementi di meccanica quantistica che fanno parte (o, almeno, dovrebbero) del bagaglio culturale degli allievi (livelli energetici atomici, principio di esclusione di Pauli), a partire dai quali includere nel modello microscopico della conduzione la statistica di Fermi - Dirac per gli elettroni.

Come già osservato precedentemente, la transizione da una rappresentazione puramente classica dei fenomeni di conduzione ad una di tipo quantistico (ancorché limitata alla sola componente elettronica del modello) si ritiene possa costituire uno dei punti critici del percorso d'apprendimento, in quanto presuppone il superamento di ostacoli epistemologici che hanno una diretta controparte nell'evoluzione storica della teoria elettronica dei metalli. Ciò ha implicato, in fase di progettazione, un'attenta pianificazione dell'intero percorso, finalizzata a creare uno scenario didattico adatto a predisporre gli allievi al superamento di tali ostacoli d'apprendimento. In concreto, il presupposto che ispira le strategie e gli strumenti utilizzati può essere così esplicitato:

l'utilizzazione di una strategia di revisione del modello microscopico motivata, da un lato, dalla necessità di ricomporre le contraddizioni emerse e fondata, dall'altro, su una graduale e diretta estensione di conoscenze quantistiche già in possesso degli allievi (o di molti di essi) può stimolare la transizione ad un adeguato modello quantistico della conduzione nei metalli.

L'ipotesi circa gli effetti sull'apprendimento è la seguente:

a seguito dell'intervento si ritiene che, in buona misura, gli allievi che hanno già evidenziato il possesso di un adeguato modello classico effettuino la transizione al modello quantistico.

La domanda di ricerca cui s'intende fornire una risposta può essere così formulata:

In che misura la precedente ipotesi circa gli effetti dell'intervento è confermata dagli esiti dell'indagine?

Nel seguito si illustra l'articolazione didattica della sequenza.

- I. Si chiede agli allievi di esplicitare le risposte fornite alle domande proposte nel protocollo alla fine della precedente sequenza 5. Utilizzando la formula (eq. (3.11)) che esprime la resistività in termini di grandezze microscopiche, si analizzano le diverse ipotesi emerse dalla discussione, focalizzando l'attenzione su quella relativa a una possibile indipendenza della velocità media degli elettroni dalla temperatura.
- II. Si richiamano gli elementi essenziali del modello quantistico di atomo (tipicamente previsti nei curricula di Chimica e di Fisica della scuola superiore), mettendo in luce, in particolare, due concetti: la natura discreta dei livelli energetici atomici, il principio di esclusione di Pauli per gli elettroni atomici.
- III. Utilizzando questi due soli concetti si introducono gli elementi essenziali della statistica di Fermi - Dirac per un gas di elettroni liberi confinati in una scatola, mettendo in evidenza, in particolare, il significato di *livello di Fermi* ed *energia di Fermi*. A partire dai concetti introdotti, si giustifica l'ipotesi circa la debole dipendenza della velocità quadratica media degli elettroni dalla temperatura.
- IV. Gli allievi, suddivisi in piccoli gruppi, ricavano, tramite l'ambiente di simulazione NetLogo, l'andamento di $\rho(T)$ previsto dal modello che implementa la statistica di Fermi - Dirac per gli elettroni liberi del

metallo. Tale andamento viene, dunque, confrontato con la legge sperimentale e si discutono i risultati di tale confronto.

Gli esiti dell'intervento sono stati rilevati sulla base delle discussioni e delle osservazioni tratte durante lo svolgimento delle attività e delle risposte fornite dagli allievi al test d'uscita (proposto alla fine dell'intervento).

Capitolo 5. Esperimento pilota: metodologie d'analisi ed esiti dell'indagine

Nel capitolo precedente sono stati esposti gli obiettivi, i criteri e le domande di ricerca che hanno ispirato l'indagine pilota e ne è stato descritto l'impianto complessivo e l'articolazione in fasi di ricerca. Inoltre, è stata illustrata la struttura e l'organizzazione didattica del percorso formativo, le caratteristiche delle sequenze d'insegnamento/insegnamento in cui esso è stato suddiviso, esplicitandone i presupposti pedagogici, le ipotesi e le domande di ricerca.

In questo capitolo verranno descritte nel dettaglio la struttura e le caratteristiche del sistema di controllo del processo d'insegnamento/apprendimento, gli strumenti di verifica delle conoscenze, le metodologie d'analisi dei dati raccolti e gli strumenti e le procedure mediante le quali è stata fornita una risposta alle domande di ricerca e valutati gli esiti della sperimentazione.

Al fine di chiarire il razionale che sta alla base del sistema di controllo implementato e delle metodologie d'indagine utilizzate è opportuno richiamare alcuni elementi già illustrati nei capitoli precedenti.

Osserviamo, innanzitutto, che il presupposto pedagogico (ipotesi generale) su cui si fonda l'intero progetto di ricerca discusso in questa tesi è che lo sviluppo di adeguate competenze di analisi e di interpretazione dei fenomeni, soprattutto nell'ambito della fisica moderna, possa essere favorito da approcci didattici che enfatizzino le connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze fisiche. In particolare, si ritiene che una corretta e autonoma elaborazione di informazioni tratte da osservazioni macroscopiche possa favorire lo sviluppo di adeguati modelli dei processi microscopici e che, viceversa, lo sviluppo di adeguati modelli microscopici favorisca la capacità di estrarre dai fenomeni macroscopici informazioni finalizzate alla loro interpretazione.

Tale presupposto, la cui verifica costituisce uno degli obiettivi principali della ricerca, ha influenzato tutti gli aspetti del progetto: ha suggerito le scelte pedagogiche e gli strumenti didattici che caratterizzano l'ambiente formativo, ha ispirato la progettazione delle sequenze didattiche in cui stato suddiviso il percorso e ha influenzato la predisposizione del sistema di controllo dell'apprendimento e le metodologie d'analisi implementate.

In particolare, lo schema di figura 5.1, rappresenta la struttura essenziale del sistema di controllo implementato durante l'iter formativo, esso può essere suddiviso logicamente in tre diversi momenti d'indagine: indagini d'ingresso, monitoraggio in itinere, indagini d'uscita

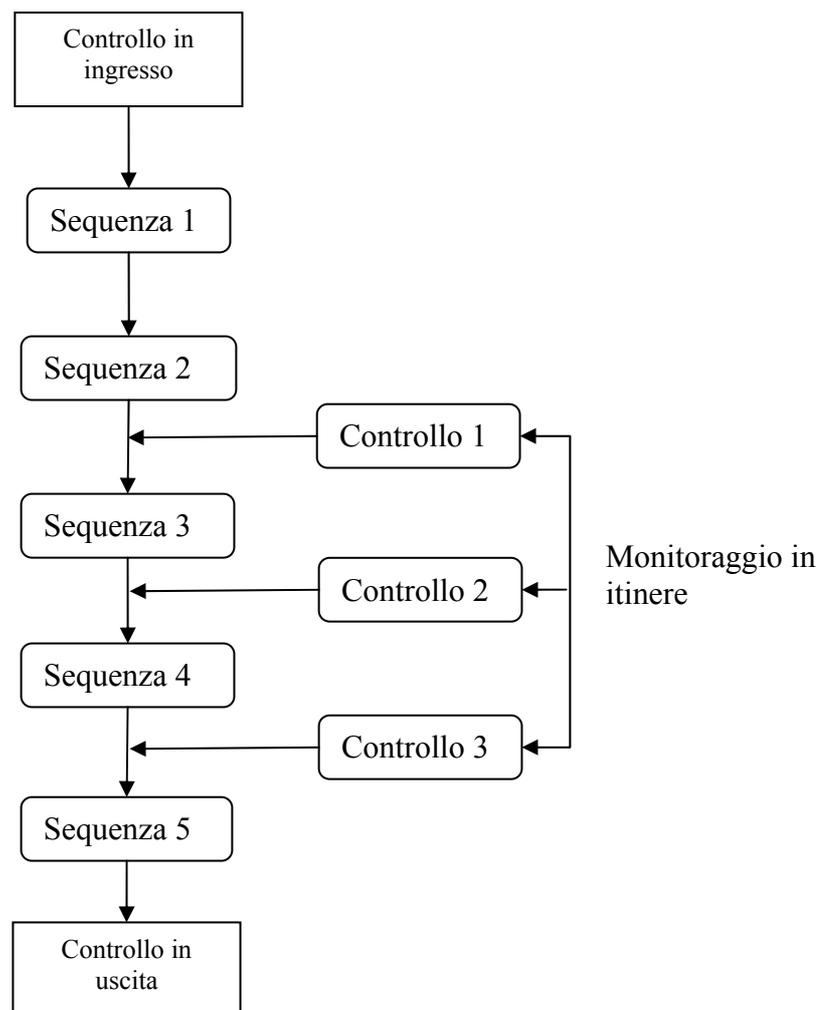


Figura 5.1

Le indagini d'ingresso sono state effettuate al fine raccogliere informazioni relative a diversi aspetti delle conoscenze pregresse e delle competenze degli allievi. Queste indagini hanno permesso di estrarre elementi utili per rispondere alle prime tre domande di ricerca riportate nel par. 4.1.2 e per calibrare il percorso didattico. Le informazioni acquisite durante tale fase d'indagine costituiscono, inoltre, il riferimento rispetto al quale è stato misurato l'apprendimento degli allievi e valutata, di conseguenza, l'efficacia dell'ambiente formativo implementato.

Il monitoraggio in itinere ha avuto lo scopo di evidenziare diversi aspetti del processo d'apprendimento degli allievi e di verificare la correttezza delle ipotesi e l'efficacia soluzioni didattiche che caratterizzano le sequenze che compongono il percorso. Come si è detto, ciascuna sequenza d'insegnamento/apprendimento è stata costruita sulla base di presupposti pedagogici ed ipotesi che sono una diretta conseguenza dell'ipotesi generale (richiamata prima) che caratterizza l'intero progetto e che hanno orientato, quindi, la selezione degli aspetti dell'apprendimento da sottoporre a verifica.

Esprimendoci in altri termini, ciascuna sequenza d'insegnamento/apprendimento rappresenta un micro-esperimento che implementa un particolare aspetto dell'ipotesi generale che ispira l'intero progetto e che è finalizzata a raccogliere elementi utili a valutare la correttezza di tale ipotesi. In tal senso, le risposte fornite alle domande di ricerca relative a ciascuna sequenza costituiscono lo strumento mediante il quale gli esiti dei singoli episodi didattici, che caratterizzano l'ambiente didattico al livello microscopico, sono correlate all'ipotesi generale su cui si basa l'intero progetto, che caratterizza l'ambiente didattico a livello macroscopico.

Le indagini d'uscita sono state effettuate allo scopo di valutare l'impatto globale (di tipo cognitivo e meta-cognitivo) dell'esperienza formativa sulle conoscenze e competenze degli allievi. Le informazioni tratte da tali indagini sono state confrontate con quelle emerse dalle indagini d'ingresso, esse, inoltre, hanno fornito ulteriori elementi utili per valutare i processi innescati dall'interazione didattica e per validare l'ipotesi generale che ispira il progetto.

In ciò che segue si descriveranno nel dettaglio i diversi tipi d'indagine effettuate. In particolare:

- nel paragrafo 5.1 saranno illustrati i metodi, gli strumenti e gli esiti delle indagini d'ingresso;
- nel paragrafo 5.2 saranno descritti nel dettaglio i metodi, gli strumenti e gli esiti del monitoraggio in itinere. In questo paragrafo saranno, inoltre, evidenziati alcuni significativi casi particolari sottoposti ad analisi qualitativa, saranno caratterizzati i profili d'apprendimento degli allievi e sarà fornita una risposta alle domande di ricerca che caratterizzano le sequenze didattiche.
- nel paragrafo 5.3 saranno descritte le caratteristiche e gli esiti delle indagini d'uscita e del confronto ingresso/uscita;
- nel paragrafo 5.4, a partire da un'analisi retrospettiva, saranno sintetizzati i risultati dell'indagine. In particolare, si fornirà una risposta alle domande di ricerca della sperimentazione, si formulerà una valutazione delle singole componenti e caratteristiche del progetto didattico (prospettando ipotesi di modifica) e si valuterà la correttezza dell'ipotesi generale che ha orientato il progetto di ricerca.

5.1 Analisi d'ingresso: metodi, strumenti, esiti

Gli obiettivi principali delle indagini d'ingresso sono stati illustrati nel par. 4.2.1, unitamente ad alcuni risultati emersi dall'analisi dei dati raccolti. In questo paragrafo saranno descritti nel dettaglio i metodi, gli strumenti e gli esiti di tali indagini. In particolare, in ciò che segue, dopo aver definito le variabili cognitive oggetto d'indagine e descritto i criteri e gli strumenti d'indagine, sarà condotta una puntuale analisi dei risultati ottenuti in relazione alle singole variabili cognitive. Successivamente, al fine di ottenere informazioni più dettagliate sullo stato cognitivo d'ingresso degli allievi, gli esiti dell'analisi delle singole variabili saranno correlati, utilizzando opportuni metodi di rappresentazione e strumenti statistici. L'emergere di correlazioni e regolarità tra le diverse categorie cognitive,

permetterà di avanzare ipotesi significative circa le connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze e competenze degli allievi e consentirà di individuare alcuni aspetti critici delle conoscenze che possono ostacolare le prestazioni interpretative degli allievi ed il successivo processo d'apprendimento.

5.1.1 Variabili cognitive e strumenti d'indagine

Le indagini d'ingresso sono state effettuate allo scopo di ricavare informazioni relative a diverse variabili cognitive, vale a dire a diversi aspetti delle conoscenze e competenze pre - istruzione degli allievi. La tabella seguente illustra i diversi aspetti delle conoscenze oggetto d'indagine.

Tabella 5.1

Aspetti delle conoscenze/competenze	Descrizione
1 Conoscenze fenomenologiche di base	possesso delle conoscenze macroscopiche di base relative ai fenomeni della conduzione elettrica
2 Struttura dei modelli spontanei	le caratteristiche strutturali e le componenti dei modelli microscopici della conduzione elettrica nei metalli evidenziati dagli allievi.
3 Funzionalità dei modelli spontanei	le modalità con cui gli allievi utilizzano il modello posseduto per interpretare e prevedere fenomeni, ossia il modo in cui si manifesta il <i>potenziale esplicativo</i> del modello individuale (tale concetto è stato introdotto nel par 2.7.2)
4 Aspetti critici delle conoscenze	aspetti specifici delle conoscenze spontanee che possono influenzare negativamente il potenziale esplicativo dei modelli individuali

Lo strumento principale mediante il quale sono state tratte tali informazioni è il protocollo d'ingresso riportato in appendice P1. In prima istanza, tale questionario è stato progettato in modo da verificare le conoscenze degli allievi relative, oltre che alla conduzione nei metalli, anche alle proprietà elettriche dei semiconduttori e degli isolanti. Tuttavia, poiché, per i motivi esposti nel capitolo precedente, la teoria a bande è stata esclusa dalla trattazione, si

riporteranno soltanto gli esiti dell'analisi relativi alla conduzione elettrica nei metalli, ossia alle risposte fornite alle prime cinque domande del test d'ingresso. Tali domande sono state opportunamente formulate (o selezionate dalla letteratura²⁴) al fine di acquisire le informazioni di cui sopra. In particolare, le informazioni relative alle conoscenze di base sono state ricavate dalle risposte fornite dagli allievi al quesito B1 del test; le informazioni relative alla struttura dei modelli spontanei sono state ricavate, principalmente, dalle risposte alle domande A e B2; le informazioni relative alla funzionalità dei modelli sono state ricavate dalle risposte ai quesiti C e D; le informazioni relative agli aspetti critici delle conoscenze sono state ricavate da un esame globale del protocollo.

5.1.2 Criteri d'analisi e classificazione delle conoscenze

La caratterizzazione dei quattro diversi aspetti delle conoscenze spontanee oggetto d'indagine è stata effettuata utilizzando diversi criteri di classificazione e di analisi.

In particolare, le conoscenze di base sono state valutate analizzando, come si è detto, le risposte alla domanda B1 del test, in cui si richiedeva agli allievi di descrivere che cosa accade quando in un circuito si inserisce un filo di rame. Sono stati introdotti due diversi livelli di classificazione: il livello L_1 che corrisponde ad descrizione povera (o non pertinente) del fenomeno e/o in cui non si esplicitano relazioni causali ed livello L_2 corrispondente ad una descrizione in cui si ritrovano (almeno) i concetti necessari e in cui le relazioni tra tali concetti sono esplicitate.

L'analisi delle caratteristiche e della funzionalità dei modelli microscopici della conduzione evidenziati dagli allievi è stata effettuata utilizzando un approccio fenomenografica (Marton, 1981, 1994; Entwistle, 1997). Le motivazioni e i presupposti teorici che hanno ispirato tale duplice criterio di analisi dei modelli mentali sono illustrati nel capitolo 2, la concreta applicazione al contesto in esame e gli esiti di tale analisi sono illustrati nel seguente paragrafo 5.1.4.

²⁴ Le prime tre domande del test sono un adattamento di items utilizzati nell'ambito d'indagini sperimentali sui modelli microscopici della materia (De Posada, 1999) e modelli della conduzione elettrica (Wittman, 2002)

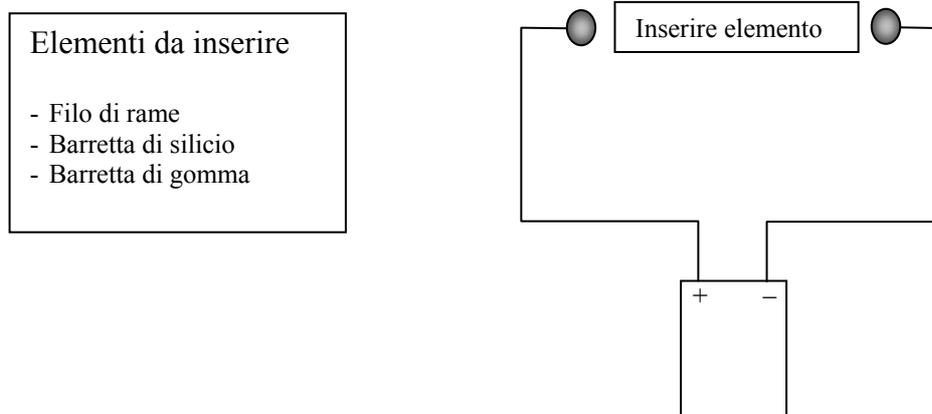
L'individuazione degli aspetti critici delle conoscenze è stata effettuata sulla base di un preliminare esame qualitativo e globale delle risposte fornite dagli allievi al test d'ingresso e la successiva verifica delle ipotesi formulate tramite l'utilizzo degli strumenti dell'analisi implicativa descritti nel par. 2.7.3.

Nei paragrafi seguenti, dopo aver discusso separatamente i risultati dell'analisi delle quattro variabili cognitive, si espliciteranno le relazioni che intercorrono tra esse.

5.1.3 Conoscenze di base

La caratterizzazione delle conoscenze di base è stata effettuata analizzando le risposte fornite dagli allievi alla seguente domanda del protocollo d'ingresso:

La figura riportata sotto a destra rappresenta un sistema costituito da una batteria e da due cavetti di collegamento (con resistenza trascurabile). Tra le due estremità libere dei cavi è possibile inserire gli elementi rappresentati sotto sinistra.



Descrivi che cosa accade quando tra i due poli della batteria viene inserito il filo di rame. Ti suggeriamo alcuni termini che puoi usare nella tua spiegazione: campo elettrico, differenza di potenziale, forza elettrica, carica elettrica, corrente elettrica, tensione, resistenza elettrica, resistività. (N.B. Non è necessario che la tua spiegazione contenga tutti i termini riportati sopra ma soltanto quelli che ritieni pertinenti ed eventualmente altri non elencati).

Lo spettro delle descrizioni fornite dagli allievi è estremamente ampio, variando dal caso in cui la risposta è del tutto assente (un solo caso), a quello opposto, corrispondente ad una descrizione estremamente dettagliata che include elementi di analisi microscopica. Al fine di esemplificare il criterio utilizzato per

la classificazione binaria delle risposte, in figura 5.2 sono riportate alcune tipologie di risposta fornite dagli allievi e classificate come L_1 (*livello basso*), mentre in figura 5.3 sono riportate alcune risposte classificate come L_2 (*livello alto*).

<i>C'è un passaggio di corrente elettrica. Nel generatore di tensione vi è una differenza di potenziale, ed inoltre si genera un campo elettrico</i>	<i>Si ha un passaggio di corrente elettrica</i>
--	---

Figura 5.2. Alcuni esempi di risposte classificate come L_1 .

<i>La differenza di potenziale generata dalla batteria genera tra i due morsetti un campo elettrico. Gli elettroni liberi del metallo sono quindi sottoposti ad una forza da destra verso sinistra, provocando un moto nella stessa direzione. Tale moto è sempre sovrapposto al moto caotico ma, mediamente l'unica componente diversa da zero è proprio lungo il campo</i>	<i>La differenza di potenziale imposta dal generatore sarà causa di un flusso di elettroni all'interno del circuito. Avremo quindi una corrente elettrica (costante se $V = \text{costante}$) che circola nel circuito. Tale corrente dipende dalla resistenza del filo perché V è uguale al prodotto di R ed I.</i>
--	--

Figura 5.3. Alcuni esempi di risposte classificate come L_2 .

In termini quantitativi risulta che circa il 48 % degli allievi è da includere nella classe L_1 , il rimanete 52 % nella classe L_2 .

Bisogna, tuttavia, sottolineare che un certo numero di allievi (circa il 20%), pur avendo evidenziato una conoscenza dei concetti di base necessari a descrivere il fenomeno proposto, sono stati tuttavia inclusi nella classe L_1 , in quanto, in accordo con i criteri di classificazione stabiliti, hanno mostrato difetti nella capacità di collegare tra loro tali concetti e stabilire relazioni causali.

Osserviamo, infine, che i risultati dell'analisi qui descritta sono stati confrontati con i risultati del test di ammissione alla scuola di specializzazione, mirante ad accertare il livello di conoscenze degli allievi relative a un ampio insieme di contenuti di Fisica (Meccanica, Termodinamica ed Elettromagnetismo classici). L'esito di tale confronto conferma (nel limite di un ragionevole margine di errore) i risultati ottenuti.

5.1.4 Caratteristiche strutturali e funzionali dei modelli spontanei

La caratterizzazione dei modelli microscopici della conduzione elettrica evidenziati dagli allievi è stata effettuata utilizzando il duplice criterio di analisi e classificazione illustrato nel par 2.7.2: un criterio di tipo diretto, che guarda cioè direttamente alle componenti e alla struttura dei modelli individuali, e un criterio, per così dire indiretto, focalizzato sull'analisi delle modalità con cui gli allievi utilizzano il modello per interpretare e prevedere fenomeni e processi. Questo secondo tipo di analisi conduce, pertanto, ad una classificazione in termini, più che di conoscenze, di competenze interpretative e predittive, permettendo di evidenziare come il modello individuale “funziona” in pratica. Entrambi i criteri assumono come riferimento le conoscenze scientifiche (modelli e interpretazioni) e pertanto, anche se in modo qualitativo, caratterizzano la discrepanza tra conoscenze individuali e conoscenze scientifiche.

Classificazione in termini di struttura e componenti del modello

La classificazione in termini di struttura dei modelli individuali (classificazione M) è stata effettuata, principalmente, sulla base delle risposte fornite alle due seguenti domande del test d'ingresso:

1. *La figura rappresenta un chiodo di ferro. Descrivi brevemente la sua struttura microscopica aiutandoti con un disegno*



2. Prova a fornire un'interpretazione microscopica della conduzione elettrica nel filo di rame, aiutandoti con un disegno per evidenziare i processi microscopici che si verificano al suo interno.

Laddove necessario si sono tuttavia utilizzate informazioni tratte dalle risposte fornite ad altre domande del test.

La definizione delle categorie è stata effettuata utilizzando i criteri illustrati nel par. 2.72., vale adire considerando le seguenti caratteristiche del modello:

- Componenti del modello (oggetti o classi di oggetti previsti)
- Proprietà degli oggetti
- Regole d'evoluzione e proprietà d'insieme (tipo di leggi che ne regolano l'evoluzione dei singoli oggetti e le proprietà statistiche delle classi di oggetti)
- Relazioni tra oggetti (ossia natura e modalità d'interazione)

Come illustrato precedentemente, la selezione di tali caratteristiche è motivata dal fatto che esse costituiscono le componenti essenziali che permettono di descrivere la struttura dei principali modelli che hanno caratterizzato l'evoluzione della teoria elettronica dei metalli (e, in particolare, dei tre modelli introdotti durante il percorso formativo). Il problema che ci eravamo posti in fase di definizione della metodologia d'analisi era se un criterio di classificazione stabilito a priori (a partire da un'analisi di tipo scientifico-epistemologica) potesse essere sufficientemente esaustivo da permettere di rendere conto, oltre che dei modelli scientifici, anche della variabilità dei modelli spontanei emersi sperimentalmente. L'ipotesi che avanzammo allora è che il criterio di classificazione scelto è sufficientemente generale da consentire la classificazione anche dei modelli spontanei. L'analisi delle risposte fornite dagli allievi, condotta indipendentemente da due diversi ricercatori, ha confermato tale ipotesi.

L'analisi delle risposte è stata effettuata cercando di individuare le caratteristiche dominanti che caratterizzano i modelli evidenziati dagli allievi e costruendo le classi sulla base di tali caratteristiche. Da tale analisi emerge che è

possibile introdurre una partizione del campione di allievi nelle quattro diverse classi riportate di seguito.

- **Classe M_0** : gli allievi che appartengono a questa classe non hanno fornito risposta alle domande.
- **Classe M_1** : a questa classe appartengono allievi che evidenziano un modello caratterizzato da soli portatori di carica. In figura 5.4 sono riportati i disegni e le risposte fornite da alcuni di tali allievi. Come si può osservare, alcuni allievi evidenziano un modello di tipo idraulico, in cui le cariche (in un caso sia positive che negative) generate dalla batteria fluiscono liberamente da un polo all'altro del conduttore (proprio come un flusso idraulico), in altri un modello tipo "domino", in cui, riportando la risposta fornita da un allievo, *"gli elettroni, liberi, si urtano fra di loro e consentono il trasferimento di energia (corrente elettrica)"*.
- **Classe M_2** : a questa classe appartengono gli allievi che hanno evidenziato un modello qui battezzato "ad elettroni legati", caratterizzato dal fatto che gli elettroni di conduzione del metallo risentono di interazioni attrattive che ne limitano il movimento. In alcuni casi tale modello si manifesta come il "modello Jumping" riportato in letteratura (Wittman, 2002), in altri si manifesta come un modello elettrostatico, nel quale il campo elettrico induce una separazione di carica. In figura 5.5 sono riportate alcune risposte (e disegni) fornite da tali allievi.
- **Classe M_3** : a quest'ultima classe appartengono allievi il cui modello è strutturalmente simile al modello classico della conduzione, prevedendo elettroni liberi che interagiscono tramite urti con gli ioni fissi del metallo (si veda figura 5.6).

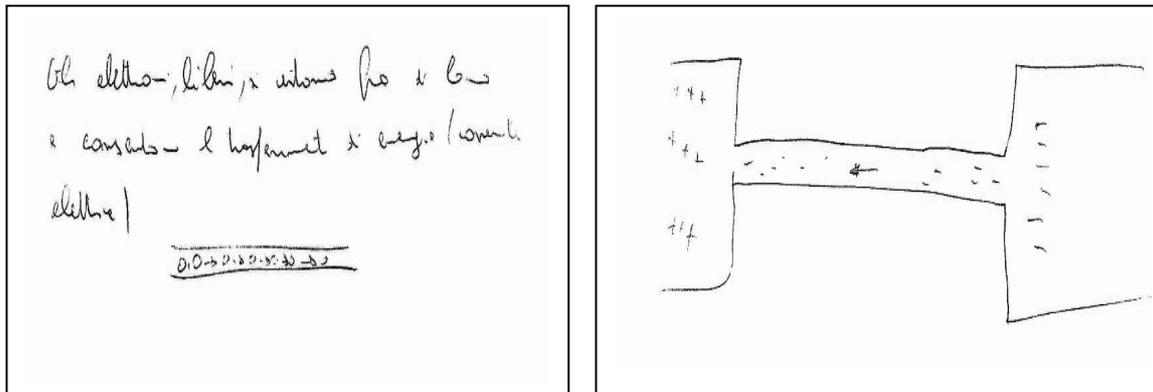


Figura 5.4. Alcuni esempi di modello M_1

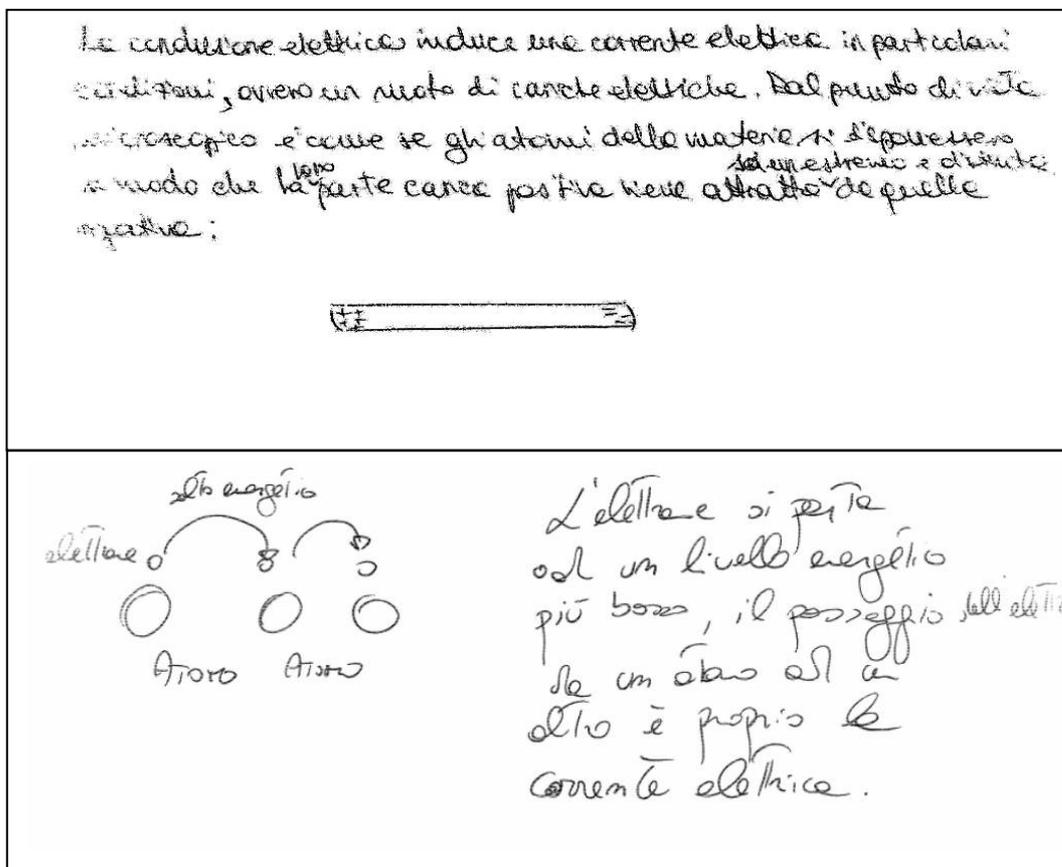


Figura 5.5. Alcuni esempi di modello M_2

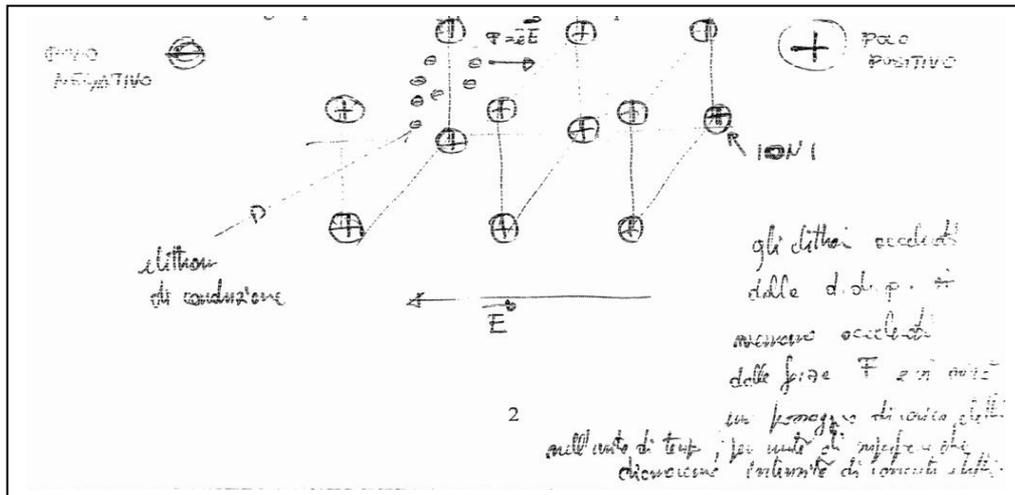


Figura 5.6. Esempio di modello M₃

La tabella. 5.2 riassume le caratteristiche delle classi sopra descritte. Nella tabella, a scopo di confronto, è riportato anche il modello classico della conduzione.

Tabella 5.2

Modello	Portatori di carica	Caratteristiche	Ioni/reticolo	Regole	Interazioni
M0	Assenti	-	Assente	-	-
M1 (idraulico o tipo domino)	Presenti (elettroni o cariche)	Portatori liberi	Assente	Fisica classica	Nessuna, Elettro-elettro,
M2 (elettroni legati, Ad esempio Jumping)	Presenti	Portatori legati	Presente	Fisica classica	Interazioni attrattive elettrone/ione più o meno intense
M3 (elettroni liberi- struttura fissa)	Presenti	Portatori liberi	Presente	Fisica classica	Collisioni impulsive elettrone – ione
Modello di riferimento Drude- Lorentz	elettroni	Portatori liberi	Presente	Fisica classica	Collisioni impulsive elettrone – ione

Leggendo la tabella dall'alto verso il basso, le classi risultano caratterizzate da una distanza decrescente dal modello scientifico di riferimento. La classe M₀ è, evidentemente, la più discrepante dal modello scientifico, la classe M₁ differisce dal modello di riferimento per il fatto che non prevede una componente essenziale (la struttura ionica), la classe M₂, pur prevedendo

entrambe le componenti del modello classico, differisce da questo per il tipo d'interazioni cui sono soggetti gli elettroni, il modello M_3 , infine, è sostanzialmente concorde con il modello classico.

Nel grafico di figura 5.7 è riportata la distribuzione dei modelli emersi dal campione in termini percentuali.

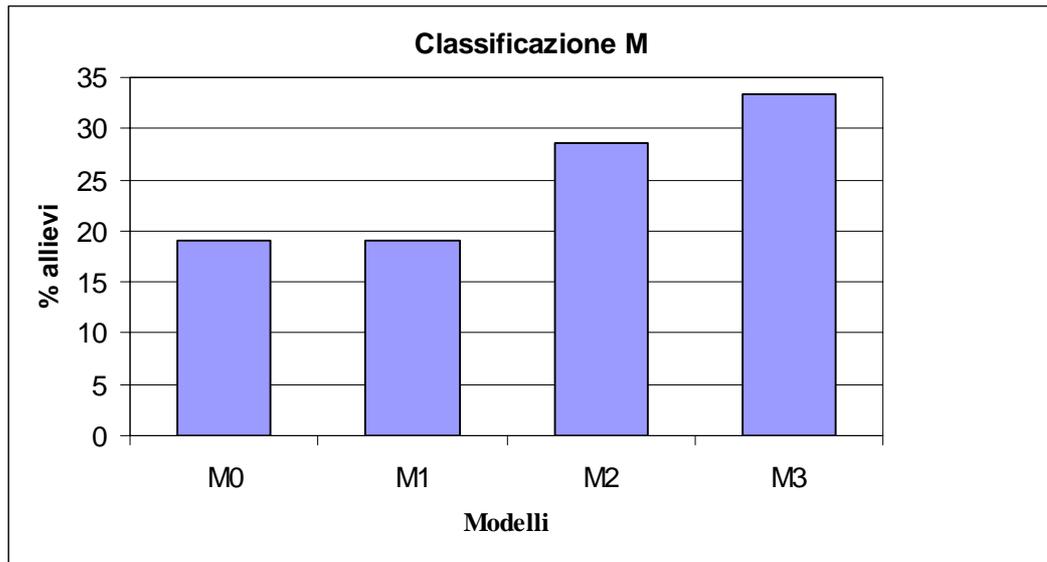


Figura 5.7.

Se accorpriamo i dati relativi ai modelli più poveri e maggiormente discrepanti dal modello scientifico (M_0 , cioè nessun modello, ed M_1 , modello elementare), rileviamo che i modelli individuali sono distribuiti in modo pressoché uniforme: il 38% circa degli allievi evidenzia i modelli M_0 o M_1 , il 29% il modello M_2 , il 33 % il modello M_3 (più prossimo a quello scientifico).

Classificazione in termini di funzionalità esplicativa del modello spontaneo

La classificazione in termini funzionalità dei modelli individuali (classificazione I) è stata effettuata sulla base delle risposte fornite alle due seguenti domande del test d'ingresso:

C. Qual è l'origine microscopica della resistenza elettrica di un metallo?

D. Supponi che il filo di rame venga riscaldato (usando, per esempio, la fiamma di un accendino). L'innalzamento della temperatura del filo produce degli effetti

sulla risposta del sistema? Se la risposta è affermativa, quali sono le grandezze elettriche che cambiano e in che modo? Motiva la tua risposta sulla base del modello microscopico che hai illustrato in B2.

Le descrizioni fornite per iscritto dagli studenti sono state analizzate e classificate in categorie. Ciò ha permesso di evidenziare tre diverse categorie di spiegazione: una spiegazione di tipo descrittivo (spesso tautologica) in cui non interviene alcun elemento d'interpretazione microscopica; una spiegazione che, pur fondata su l'elaborazione delle componenti del modello microscopico, risulta incompatibile con le corrispondenti interpretazioni scientifiche (e/o con l'esperienza); un'interpretazione microscopica qualitativamente concorde con quella scientifica (nell'ambito del modello di Drude-Lorentz). I tre livelli d'interpretazione sono stati indicati rispettivamente con i simboli I_1 , I_2 , I_3 . La tabella 5.3 sintetizza le tre categorie ed esemplifica le risposte fornite dagli allievi.

Tabella 5.3

Livello	Natura della spiegazione	Esempio
I_1	Fornisce un'interpretazione descrittiva, che non include elementi di analisi microscopica e non chiarisce relazioni causali.	<i>La resistenza è la forza che oppone il materiale al passaggio di corrente</i> <i>All'aumento della temperatura aumenta la conducibilità elettrica</i>
I_2	Utilizza il modello microscopico per interpretare/prevedere il fenomeno elettrico ma tale interpretazione non è concorde con l'interpretazione scientifica (o con l'esperienza in relazione alla seconda domanda)	<i>La resistenza elettrica è dovuta alla forza dei legami interni della materia.</i> <i>Al crescere di T gli elettroni possiedono un'energia più elevata, quindi risentono meno del potenziale degli ioni fissi, quindi la corrente cresce.</i>
I_3	Fornisce un'interpretazione concorde o sostanzialmente concorde con l'interpretazione scientifica (modello di Drude-Lorentz).	<i>L'innalzamento di temperatura aumenta l'energia cinetica delle particelle libere, che aumenteranno gli urti con il reticolo cristallino, aumentando la resistenza a livello macroscopico</i>

Nel grafico di figura 5.8 sono riportate le percentuali di allievi che hanno evidenziato i tre diversi livelli di descrizione.

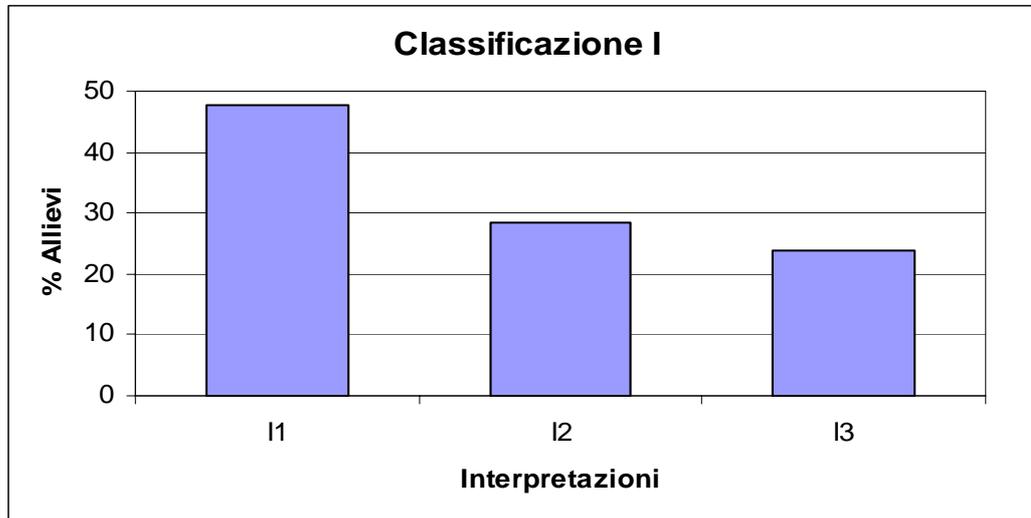


Figura 5.8

Come si può osservare, il 48% circa degli allievi evidenzia un livello di descrizione I_1 . In particolare alcuni (il 18 %) non forniscono alcuna risposta ai quesiti posti, gli altri, pur fornendo una spiegazione, manifestano un'inadeguata capacità di connettere le conoscenze microscopiche possedute per interpretare i fenomeni proposti. Circa il 28 % degli allievi appartiene alla classe I_2 . Tali allievi utilizzano il modello microscopico posseduto, tuttavia le interpretazioni fornite non sono compatibili con le corrispondenti interpretazioni scientifiche e, spesso, risultano in conflitto con l'esperienza. Come sarà meglio evidenziato in seguito, correlando la classificazione M con la classificazione I, osserviamo che, ad eccezione di un allievo, tutti gli studenti che hanno evidenziato un modello microscopico del tipo M_2 (modello ad elettroni legati) forniscono interpretazioni del tipo I_2 . In particolare, questi allievi (si veda esempio riportato in tabella 5.3), elaborando il modello posseduto, concludono che al crescere della temperatura diminuisce (anziché aumentare) la resistenza elettrica conduttore. Tale interpretazione pur essendo scorretta è una diretta conseguenza dell'elaborazione del modello M_2 . Notiamo, infine, che la restante parte degli allievi, circa il 24 %, fornisce una spiegazione del tipo I_3 , tali allievi appartengono tutti alla classe M_3 . Questi allievi, dunque, oltre a possedere conoscenze relative ai modelli

microscopici coerenti con il modello scientifico di riferimento mostrano di saper elaborare correttamente le informazioni possedute, attivando un adeguato set di relazioni causali.

5.1.5 Correlazioni tra conoscenze di base, struttura e funzionalità dei modelli individuali

In tabella 5.4 è riportato il quadro riassuntivo relativo alle tre diverse componenti cognitive oggetto delle precedenti analisi. La riga i -esima della tabella corrisponde ad uno studente, indicato con il simbolo S_i , nelle colonne sono invece riportati gli indicatori che caratterizzano le tre variabili cognitive: conoscenze di base (classificazione L), caratteristiche strutturali dei modelli (classificazione M) e caratteristiche funzionali (classificazione I).

Tabella 5.4

Allievo	Classificazione L	Classificazione M	Classificazione I
S1	L1	M1	I1
S2	L1	M0	I1
S3	L1	M0	I1
S4	L1	M3	I1
S5	L1	M0	I1
S6	L1	M1	I1
S7	L2	M2	I2
S8	L2	M2	I1
S9	L1	M3	I3
S10	L2	M2	I2
S11	L2	M3	I3
S12	L2	M3	I3
S13	L2	M3	I3
S14	L1	M3	I2
S15	L2	M2	I2
S16	L2	M1	I1
S18	L2	M2	I2
S19	L1	M1	I1
S20	L1	M0	I1
S21	L2	M3	I3

Al fine di evidenziare le correlazioni fra le tre variabili cognitive, è utile esaminare i grafici riportati di seguito. In particolare, la figura 5.9 confronta le distribuzioni dei modelli individuali della conduzione per gli studenti L_1 e gli studenti L_2 . Come si può osservare, un più alto livello di conoscenze

macroscopiche di base (studenti L₂) corrisponde, in media, ad un più alto livello di conoscenze microscopiche: infatti, i modelli microscopici evidenziati dagli allievi L₂ sono, in media, più prossimi al modello scientifico di riferimento (M₃); mentre gli allievi L₁ evidenziano in media modelli microscopici più poveri.

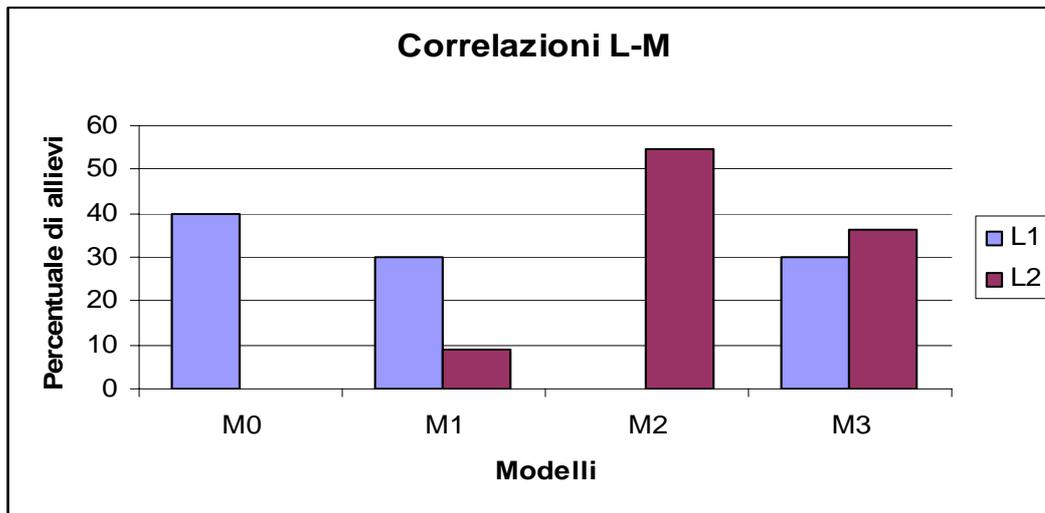


Figura 5.9

Il grafico di figura 5.10, si riferisce, invece, al legame tra la variabile L e la variabile I. Esso mostra che le correlazioni tra livello di conoscenze macroscopiche e competenze procedurali interpretative sono significative. Si osserva, infatti, che l'80% degli allievi che ha evidenziato un basso livello di conoscenze macroscopiche di base evidenzia livelli d'interpretazione microscopica carenti, al contrario più dell'80% degli allievi L₂ è in grado di elaborare le conoscenze microscopiche per interpretare fenomeni (anche se non sempre in modo coerente con le interpretazioni scientifiche).

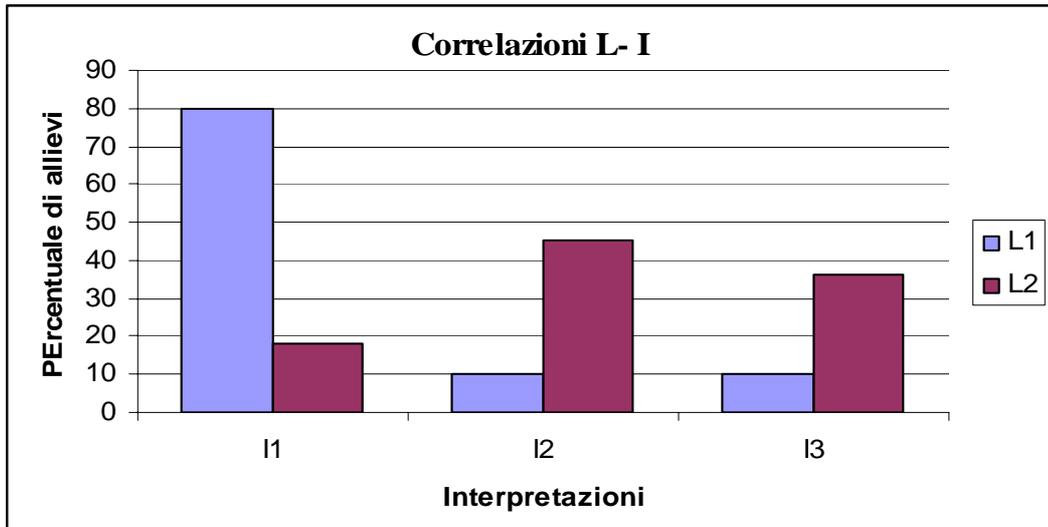


Figura 5.10

Il grafico 3D di figura 5.11 si riferisce, infine, alle relazioni tra caratteristiche strutturali e funzionali del modello microscopico.

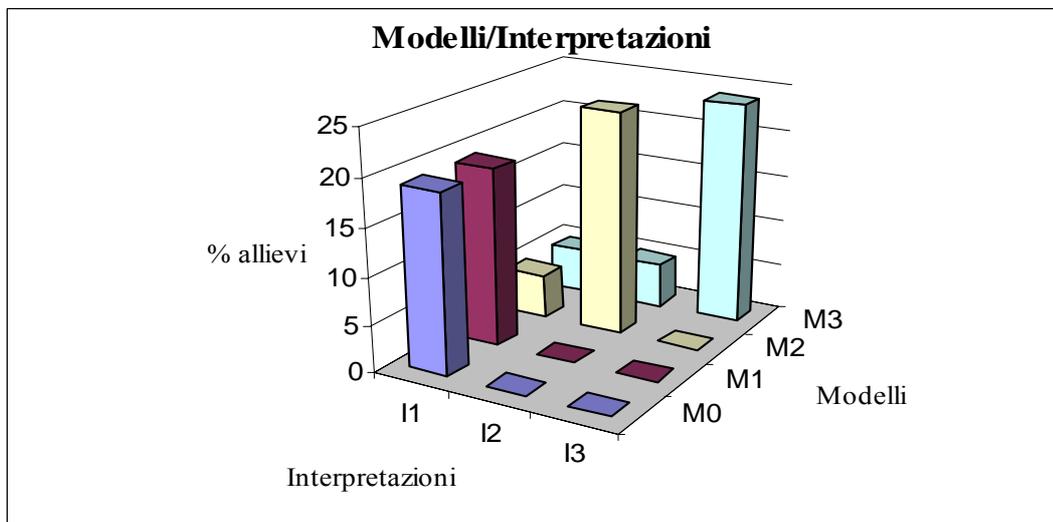


Figura 5.11

Tale rappresentazione evidenzia, con alcune significative eccezioni, l'esistenza di una correlazione tra tipo di modello posseduto e funzionalità del modello. In generale, possiamo affermare che, in termini statistici, quanto più il modello individuale è prossimo al modello scientifico tanto più la funzionalità del modello è prossima alla funzionalità del modello scientifico. Scendendo più nel dettaglio, si può evidenziare quanto segue:

1. i modelli M_0 ed M_1 corrispondono ad un livello di funzionalità identico: gli allievi che hanno evidenziato i due modelli manifestano, infatti, il livello di funzionalità più basso (I_1). Tale risultato non è scontato a priori: il modello M_1 (che prevede soltanto cariche libere) avrebbe potuto permettere delle deduzioni non esclusivamente descrittive;
2. gli allievi che hanno evidenziato il modello M_2 (elettroni legati) utilizzano il modello microscopico ma forniscono interpretazioni che configgono con l'esperienza: molti di questi allievi ritengono, ad esempio, che al crescere della temperatura la resistività del metallo diminuisce. Ciò conferma un aspetto già emerso da studi precedenti: infatti, come sottolineato da Wittmann (2002), il modello Jumping (di cui la classe di modelli M_2 costituisce una generalizzazione) è il frutto di cattivi esiti dell'istruzione precedente non necessariamente associato a significative carenze nelle conoscenze di base;
3. la maggior parte degli allievi che hanno evidenziato il modello M_3 forniscono interpretazioni concordi con le interpretazioni scientifiche. Vi sono tuttavia due casi anomali: due allievi infatti non forniscono interpretazioni corrette e, in particolare, un allievo non utilizza il modello microscopico per interpretare o prevedere fenomeni. Sebbene tali allievi possiedono le conoscenze necessarie non riescono ad elaborarle in modo coerente.

5.1.6 Correlazioni tra competenze interpretative e livelli di descrizione dei fenomeni

Da un preliminare esame qualitativo dei dati raccolti emerge un ulteriore aspetto che riteniamo significativo. Si osserva, infatti, che la capacità di interpretare fenomeni sembrerebbe essere una competenza, in una certa misura, indipendente dal livello di descrizione (macroscopico o microscopico) del fenomeno in esame; si nota, infatti che, in termini statistici, gli allievi che sono in grado di stabilire relazioni causali tra concetti macroscopici (ad esempio tra corrente elettrica e ddp per interpretare la conduzione elettrica) evidenziano

anche la capacità di fornire interpretazioni microscopiche (competenza che implica la capacità di stabilire legami tra i concetti microscopici).

Al fine di confermare (o meno) la validità di tale ipotesi, è utile approfondire l'analisi delle correlazioni tra le variabili cognitive oggetto d'indagine. Per farlo, a partire dai dati raccolti, è stato definito un nuovo insieme di variabili, da sottoporre ad elaborazione statistica, con gli strumenti dell'analisi implicativa descritti nel par. 2.7.3. In particolare, ai fini della validazione dell'ipotesi, abbiamo rielaborato i dati introducendo il set di 4 variabili binarie riportate in tabella 5.5.

Tabella 5.5

Nome della variabile	Descrizione	Valore
Cmac	L'allievo possiede conoscenze macroscopiche relative ai fenomeni di conduzione	1 = vero 0 = falso
Rmac	L'allievo stabilisce relazioni tra i concetti macroscopici	1 = vero 0 = falso
Cmic	L'allievo possiede conoscenze microscopiche relative alla conduzione	1 = vero 0 = falso
Imic	L'allievo interpreta, da un punto di vista microscopico, i fenomeni proposti	1 = vero 0 = falso

La figura 5.12 rappresenta i risultati dell'analisi implicativa. Il diagramma implicativo è particolarmente significativo. Come si può osservare, infatti, il ramo di destra del diagramma evidenzia che la capacità di stabilire relazioni tra i concetti a livello macroscopico (Rmac) implica (con una significatività del 90%) la capacità di interpretare i fenomeni anche a livello microscopico (Imic). Osservando il ramo di sinistra si può trarre, da un lato, la conclusione (banale) che la capacità di correlare i concetti macroscopici (Rmac) implica il possesso di tali concetti (Cmac), dall'altro che il possesso di conoscenze macroscopiche implica il possesso di conoscenze microscopiche (Cmic).

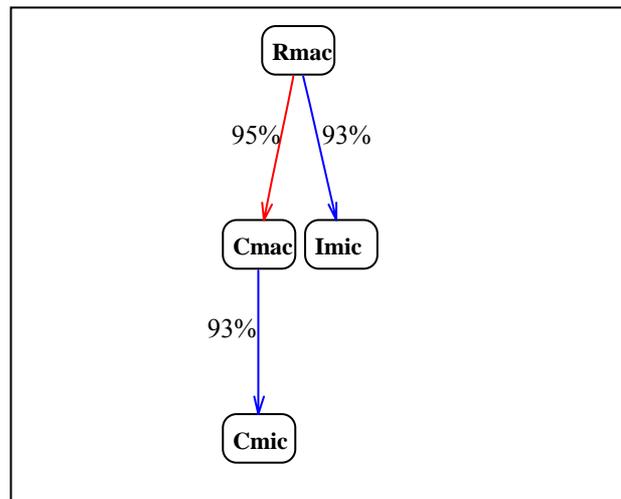


Figura 5.12. Grafo implicativo. Le frecce rosse indicano un livello d'implicazione del 95%, quello blu un livello d'implicazione dell'93%.

Gli esiti dell'analisi precedente permettono, dunque, di trarre le seguenti conclusioni:

1. L'ipotesi avanzata sulla base di un esame qualitativo dei dati è corroborata dall'analisi statistica effettuata. In altri termini, in relazione al campione di allievi analizzato, possiamo affermare che: *l'attivazione di competenze interpretative è, in una certa misura, indipendente dal livello di descrizione e rappresentazione dei fenomeni*. Una possibile interpretazione di tale evidenza sperimentale è che i processi cognitivi che stanno alla base delle competenze esplicative implicano l'attivazione di risorse cognitive di tipo procedurale che sono, in una certa misura, indipendenti dagli elementi di conoscenza che tali procedure elaborano.
2. Gli allievi che evidenziano un buon livello di conoscenza dei concetti a livello macroscopico evidenziano anche conoscenze a livello microscopico. Ciò, evidentemente, implica la validità dell'affermazione opposta (antinominale) relativa al fatto che la presenza di lacune nelle conoscenze microscopiche è associata ad analoghe carenze anche nelle conoscenze macroscopiche. In altri termini, possiamo affermare che le lacune nelle conoscenze evidenziate dagli allievi sono generalizzate, coinvolgendo sia gli aspetti macroscopici che microscopici.

Più in generale, i risultati ottenuti confermano quanto emerso da studi precedenti, in relazione alle connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze, ovvero il fatto che studenti che non hanno sviluppato modelli dei processi microscopici trovano grandi difficoltà a fornire spiegazioni qualitative dei fenomeni macroscopici (Tacker, 2003; Thaker, 1999; Eylon e Ganiel, 1990).

5.1.7 Modelli mentali, modelli microscopici e aspetti critici delle conoscenze spontanee

Al fine di fornire una risposta alla terza domanda di ricerca riportata nel par. 4.1.2, focalizziamo l'attenzione su un'analisi più fine relativa alle conoscenze microscopiche. La domanda che ci siamo posti è la seguente:

Quali sono gli aspetti delle conoscenze spontanee relative ai modelli microscopici della conduzione elettrica che possono inficiare le competenze esplicative degli allievi?

Indicazioni circa una possibile risposta possono essere tratte dai risultati dell'analisi descritta nel paragrafo precedente e da alcune considerazioni teoriche.

Abbiamo visto che le competenze esplicative sono correlate alla capacità di connettere tra loro le conoscenze possedute, ovvero di individuare le relazioni tra gli “oggetti mentali” (concetti, pezzi di conoscenza) che costituiscono una rappresentazione interna di singoli aspetti della realtà (oggetti, enti fisici). Ciò, per quanto osservato nel paragrafo precedente, sembrerebbe indipendente dal livello di descrizione dei fenomeni. D'altra parte, quando l'ambito ontologico riguarda i modelli microscopici di un dato sistema (nella fattispecie di un conduttore elettrico), sorge un'ulteriore difficoltà: quali sono, infatti, i riferimenti “reali” che le componenti del modello mentale rappresentano?²⁵ La costruzione di un modello mentale microscopico è infatti, per certi versi, un'attività puramente mentale, che presuppone una doppia procedura di costruzione: “l'invenzione” di “enti fisici microscopici” che noi immaginiamo essere, sulla base di informazioni indirette e

²⁵ Nel caso dei modelli scientifici della conduzione nei metalli, i riferimenti reali sono di tipo analogico equivalenti a quelli della termodinamica statistica, ossia sistemi meccanici costituiti da corpi che interagiscono secondo determinate regole.

ipotesi sull'origine microscopica dei fenomeni, gli oggetti microscopici che compongono "realmente" il sistema e la costruzione (se contestuale o successiva non sappiamo) di una rappresentazione mentale isomorfa di tali oggetti, ossia di oggetti mentali che corrispondono, uno ad uno, alle entità fisiche microscopiche che noi immaginiamo compongono il sistema. Tuttavia, la procedura di costruzione del modello deve prevedere anche la costruzione di una rete semantica, vale a dire di una struttura di relazioni tra le diverse componenti del modello, in mancanza della quale il modello mentale assumerebbe le caratteristiche di un'immagine statica che, difficilmente, può permettere di elaborare la rappresentazione mentale del sistema e dedurre conseguenze da confrontare con le osservazioni. Tali relazioni, nell'ambito della rappresentazione di "realtà" microscopiche, corrispondono alle interazioni che noi immaginiamo si verifichino tra i costituenti fisici microscopici del sistema.

Avanziamo, pertanto, l'ipotesi che un aspetto delle conoscenze spontanee che può inficiare le competenze esplicative degli allievi sia riscontrabile in una inadeguata rappresentazione delle interazioni che si verificano tra i costituenti microscopici del sistema (in particolare tra elettroni e ioni).

Al fine di sottoporre a verifica tale ipotesi, utilizzando i dati a partire dai quali è stata costruita la classificazione M, è stato introdotto il nuovo insieme di variabili, rappresentato in tabella 5.6 Tali variabili sono state correlate alle variabili I_1 , I_2 , I_3 . che caratterizzano la natura delle interpretazioni, utilizzando gli strumenti dell'analisi implicativa.

Tabella 5.6

Nome della variabile	Descrizione	Valore
Pp	Portatori presenti	1= vero 0 = falso
Retp	Reticolo, struttura fissa presente	1= vero 0 = falso
Intn	Interazioni assenti	1= vero 0 = falso
Intee	Interazioni elettrone-elettrone	1= vero 0 = falso
Intattr	Interazioni attrattive elettroni-ioni	1= vero 0 = falso
Inturti	Collisioni impulsive elettroni-ioni	1= vero 0 = falso

In fig 5.13 è rappresentato il grafo implicativo. Come abbiamo già osservato precedentemente analizzando le correlazioni tra le variabili M ed I, notiamo che un modello che prevede portatori di carica che risentono di interazioni attrattive (classe M₂) implica (con una significatività del 95%) un livello d'interpretazione I₂ (ossia un'interpretazione microscopica che configge con l'interpretazione scientifica). Un modello che non prevede alcuna interazione (Intn) implica (al 90%) che l'allievo non è in grado di fornire interpretazioni microscopiche (I₁). Un'interpretazione concorde con quella scientifica (I₃) è connessa con un modello in cui la natura delle interazioni tra elettroni ed ioni è concorde con quella prevista dal modello scientifico di riferimento. Tali considerazioni sono confermate dal calcolo dei coefficienti di correlazione tra le coppie di variabili, riportati in tabella 5.7²⁶.

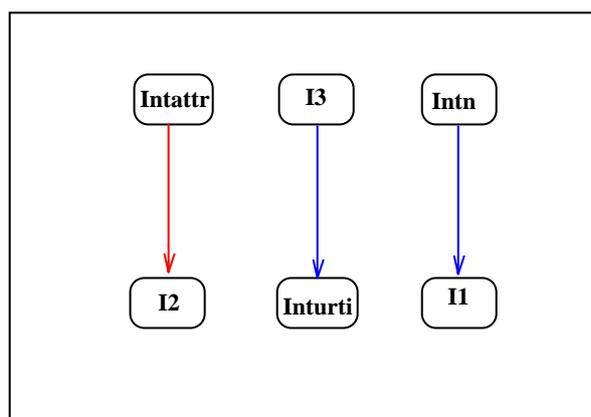


Figura 5.13

Tabella 5.7. Coefficienti di correlazione

	I ₁	I ₂	I ₃
Intn	0. 66	-0. 41	-0. 31
Intattr	-0. 54	0. 87	-0. 36
Inturti	-0. 37	-0. 29	0. 75

Sulla base dei risultati ottenuti riteniamo, dunque, che l'ipotesi circa l'influenza critica della natura e del tipo d'interazioni previste dal modello

²⁶ La probabilità che le due variabili c(Intn, I₁), con coefficiente di correlazione positivo più piccolo (0.66), non siano correlate è inferiore allo 0.5 %.

individuale sulle competenze interpretative e predittive degli allievi risulti confermata (o, esprimendoci più correttamente, non falsificata).

5.1.8 Sintesi dei risultati e ulteriori commenti

I metodi e gli strumenti utilizzati per l'analisi dei dati estratti dalle indagini di ingresso si sono rivelati estremamente utili. Innanzitutto, perché restituiscono una rappresentazione chiara e dettagliata dello stato cognitivo d'ingresso degli allievi, permettendo di far emergere le caratteristiche e la variabilità dei modelli spontanei della conduzione elettrica e consentendo, dunque, di fornire una risposta alle prime tre domande di ricerca della sperimentazione (par. 4.1.2); in secondo luogo, perché hanno consentito di evidenziare regolarità e aspetti significativi delle conoscenze individuali che forniscono utili indicazioni ai fini delle azioni da intraprendere per favorire l'apprendimento; infine, perché suggeriscono ipotesi, passibili di generalizzazione, relative ad interessanti aspetti della ricerca psicopedagogica, inerenti le connessioni tra livelli di descrizione dei fenomeni e processi cognitivi.

I risultati ottenuti in relazione alla caratterizzazione cognitiva del contesto sociale possono essere così riassunti:

1. una percentuale di allievi di circa il 40% evidenzia carenze significative nelle conoscenze di base (sia in relazione ai concetti macroscopici che microscopici della conduzione elettrica nei metalli) e nelle capacità di analizzare e interpretare, in modo coerente rispetto alle conoscenze possedute, i fenomeni connessi alla conduzione elettrica;
2. il 30% circa degli allievi evidenzia un modello microscopico della conduzione elettrica, qui battezzato "modello ad elettroni legati", che costituisce una generalizzazione di un modello spontaneo riportato in letteratura (Wittmann, 2002). Sebbene la maggior parte di tali allievi è in grado di utilizzare il modello microscopico posseduto per interpretare e prevedere fenomeni, tuttavia tali interpretazioni risultano in evidente conflitto con l'esperienza;

3. Soltanto il 20 % circa degli allievi evidenzia conoscenze globalmente coerenti con quelle scientifiche (sia a livello di descrizione macroscopica che microscopica) che si accompagnano ad adeguate competenze esplicative.
4. Il rimanente 10 % degli allievi (2 allievi) pur evidenziando un modello microscopico sostanzialmente coincidente con il modello scientifico di riferimento non è in grado di fornire adeguate interpretazioni.

Per quanto riguarda i risultati più generali emersi dalla studio delle correlazioni tra le variabili cognitive oggetto d'indagine, sottolineiamo quanto segue:

- A. in relazione al campione di allievi analizzato e al loro particolare stadio cognitivo (situazione d'ingresso), abbiamo osservato che l'attivazione di competenze interpretative e predittive è, in una certa misura, indipendente dal livello di descrizione e rappresentazione dei fenomeni. Abbiamo interpretato tale evidenza sperimentale ipotizzando che i processi cognitivi che stanno alla base delle competenze esplicative implicano l'attivazione di risorse di tipo procedurale che sono, in una certa misura, indipendenti dal contesto problematico (nella fattispecie dal livello di descrizione dei fenomeni elettrici).
- B. un'inadeguata rappresentazione delle interazioni che si verificano tra i costituenti microscopici del sistema (che è uno degli elementi che caratterizza la struttura semantica del modello mentale) è un aspetto delle conoscenze spontanee, relative alla natura microscopica della conduzione elettrica, che ostacola il completo manifestarsi del potenziale esplicativo del modello individuale (ossia la capacità di elaborare le informazioni contenute nel modello individuale al fine di interpretare e prevedere fenomeni).

Al fine di valutare quanto tali ipotesi costituiscano risultati generalizzabili, durante le successive fasi di sviluppo della ricerca saranno sottoposte ad ulteriore verifica (si veda par. 5.3.3).

Come già illustrato nel precedente paragrafo 4.2.2, i risultati dell'analisi d'ingresso si sono rivelati estremamente utili ai fini della calibrazione del progetto formativo.

5.2 Monitoraggio in itinere e profili d'apprendimento

In questo paragrafo riportiamo gli esiti delle indagini effettuate durante lo sviluppo dell'iter formativo. Il controllo d'apprendimento è stato realizzato durante l'implementazione delle sequenze didattiche, sulla base delle ipotesi, degli strumenti e dei criteri illustrati nel paragrafo 5.3.3.

I dati estratti dalle indagini in itinere hanno permesso di effettuare diversi tipi di analisi:

4. un'analisi finalizzata alla valutazione dell'evoluzione dei modelli microscopici rispetto alla situazione d'ingresso. Ciò è stato effettuato caratterizzando i percorsi cognitivi in termini delle classificazioni M ed I descritte prima, tramite misurazioni effettuate in corrispondenza di alcuni momenti del processo d'insegnamento apprendimento;
5. un esame qualitativo di singoli casi emblematici utilizzando gli strumenti dell'analisi concettuale (reti semantiche, risorse cognitive di medio e basso livello), al fine raccogliere elementi utili per caratterizzare il processo d'apprendimento.
6. un'analisi mirante ad evidenziare la risposta degli allievi, durante lo sviluppo e/o alla fine delle sequenze didattiche, e a confrontarla con gli effetti attesi delle sequenze, ciò al fine di valutare, con maggiore dettaglio, l'efficacia degli strumenti progettati e delle strategie predisposte.

5.2.1 Evoluzione dei modelli microscopici

Così come illustrato schematicamente in figura 5.14, l'evoluzione della struttura e della funzionalità dei modelli spontanei è stata valutata principalmente tramite controllo d'apprendimento alla fine delle sequenze 2 e 3 e, successivamente, sulla base del test d'uscita.

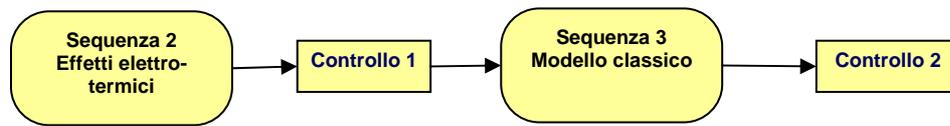


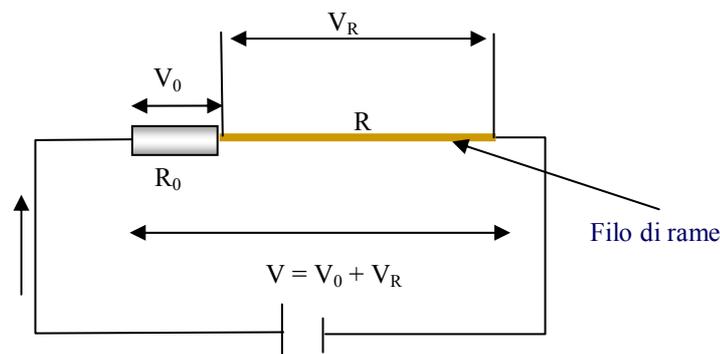
Figura 5.14

La discussione seguente riguarda i risultati delle indagini in itinere, mentre una valutazione complessiva, che include anche gli esiti del test finale, sarà riportata nel paragrafo 5.3.

Il controllo d'apprendimento è stato effettuato analizzando le risposte fornite dagli allievi alle due seguenti domande:

1. *Perché in un conduttore elettrico si verifica l'effetto Joule? Prova a interpretare la conversione di energia implicata da tale fenomeno da un punto di vista microscopico, cioè in termini di processi e interazioni che coinvolgono le particelle di cui è costituito il metallo.*

2. *Utilizzando il circuito rappresentato in figura, abbiamo verificato che la resistività del rame aumenta con la temperatura. Fornisci un'interpretazione microscopica di tale fenomeno.*



Il test è stato proposto in due momenti successivi, subito dopo avere eseguito gli esperimenti qualitativi finalizzati ad evidenziare l'effetto Joule e l'influenza della temperatura sulla resistenza del rame (Sequenza 2) e subito dopo la costruzione del modello classico della conduzione elettrica e le attività di modelling correlate (Sequenza 3).

Gli esiti emersi dalla prima delle due verifiche (controllo 1) evidenziano che l'osservazione dei due fenomeni produce dei significativi effetti sulle descrizioni fornite dagli allievi rispetto alla situazione d'ingresso. Innanzitutto si osserva che tutti gli allievi rispondono alle domande poste utilizzando elementi di analisi microscopica. La figura 5.15 rappresenta le transizioni di classe fenomenografica effettuate dagli allievi rispetto alla situazione d'ingresso, in termini di classificazione M.

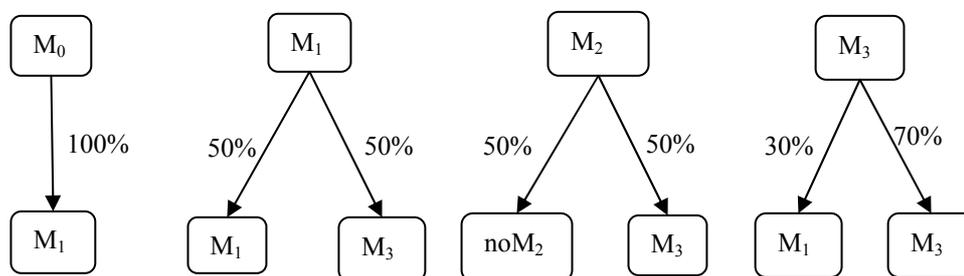


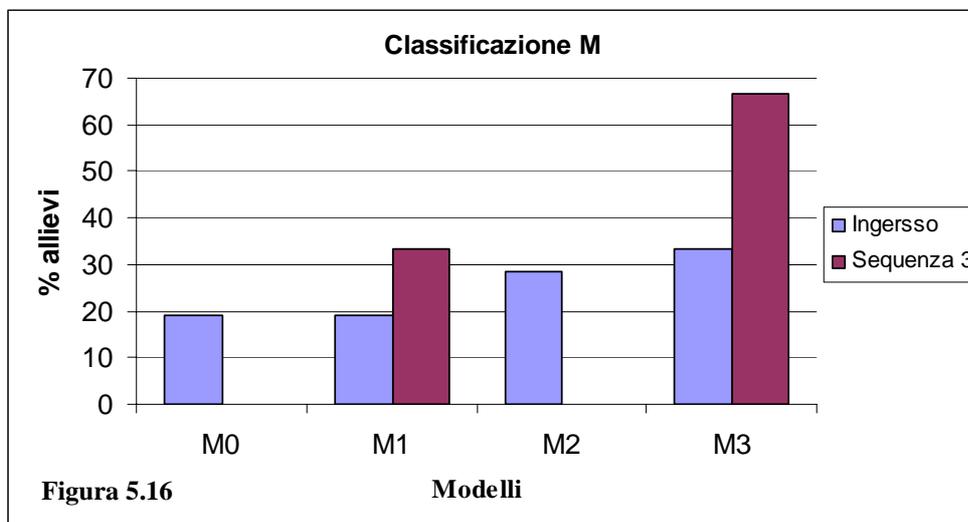
Figura 5.15

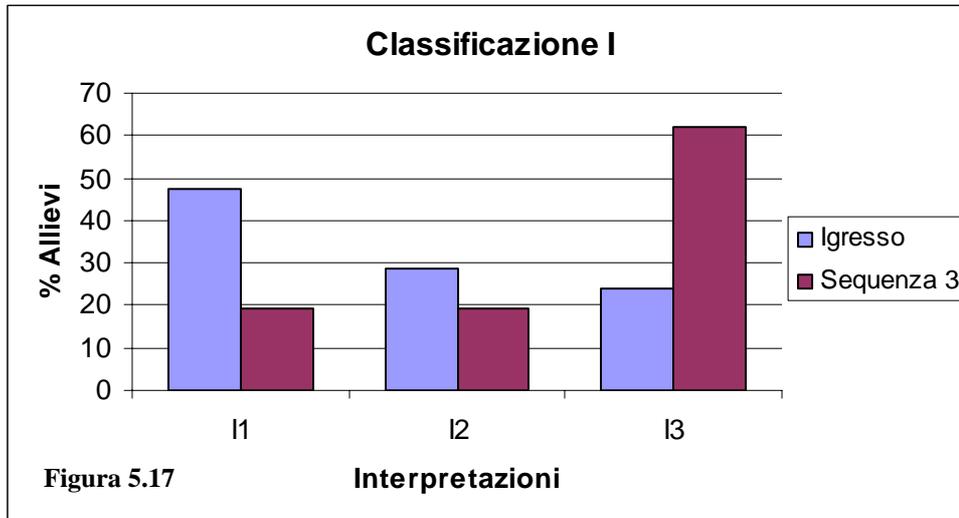
Come si può osservare, tutti gli allievi che in ingresso non avevano evidenziato alcun modello (M₀) effettuano la transizione ad un modello di tipo M₁ (modello a soli portatori di carica). Alcuni degli allievi che in ingresso avevano evidenziato un modello del tipo M₁ rimangono in tale classe, sebbene la natura delle interpretazioni migliora, altri, invece, passano alla modello M₃. Gli allievi che in ingresso si trovavano nella classe M₃ rimangono in tale classe, ad eccezione di due, nelle cui interpretazioni non entra più in gioco la struttura ionica del metallo. Ciò che si evidenzia, inoltre, è che tutti gli allievi che in ingresso evidenziavano il modello ad elettroni legati (M₂), abbandonano tale modello; in particolare, il 60% effettua la transizione al modello al più corretto modello M₃, mentre il 40% effettua una transizione ad uno modello “instabile” (rispetto alla classificazione adotta) cui possiamo riferirci come modello no-M₂.

In particolare, il modello no-M₂ è caratterizzato dalla presenza di elettroni (non più legati) e da un meccanismo dissipativo dovuto, in alcuni casi ad una sorta di attrito, in altri ad un moto disordinato che, opponendosi al moto ordinato indotto dal campo, si manifesta come una forza che riduce l'effetto del campo.

L'emergere di questi due nuovi tipi d'interpretazione, di cui non si trova traccia durante le fasi precedenti, coinvolge non soltanto allievi la cui classe di partenza è M_2 , ma anche altri studenti (incluso alcuni che in ingresso avevano evidenziato il modello M_3). Alcune di tali interpretazioni saranno analizzate nel dettaglio nel paragrafo successivo.

Durante la successiva sequenza 3 le osservazioni sperimentali vengono organizzate in un quadro coerente, al fine di introdurre il modello di Drude-Lorentz. Le rilevazioni effettuate alla fine della sequenza mostrano come il quadro di parziale instabilità, evidenziatosi durante l'implementazione della sequenza 2, si ricompone. Tutti gli allievi ritornano ad esprimere modelli per cui i criteri di classificazione fenomenografica adottati in ingresso risultano globalmente adeguati. In particolare, il grafico di figura 5.16 confronta la situazione al termine della sequenza 3 con la situazione d'ingresso, in termini di classificazione M, mentre la figura 5.17 si riferisce all'analogo confronto in termini di classificazione I.





I grafici riportati nelle figure precedenti evidenziano un significativo miglioramento rispetto alla situazione d'ingresso, sia in termini di struttura dei modelli che in termini di competenze interpretative. In particolare, scompaiono le classi M_0 ed M_2 e si ha un incremento significativo del numero di allievi che evidenziano il modello M_3 . Il trend positivo nell'apprendimento è evidenziato anche dal miglioramento generalizzato nelle competenze interpretative degli allievi. Il grafico di figura 5.17 mostra, infatti, come la distribuzione dei livelli d'interpretazione risulta decisamente migliorata rispetto alla situazione d'ingresso: se in ingresso quasi il 50 % degli allievi non risultava in grado di fornire interpretazioni microscopiche dei fenomeni proposti, alla fine della sequenza 3 tale percentuale si riduce a meno del 20%, di converso circa il 60 % degli allievi è in grado d'interpretare correttamente i fenomeni osservati.

La figura 5.18 si riferisce alle transizioni di classe fenomenografica (ingresso- fine sequenza 2 - fine sequenza 3) relativamente alle classificazione M. Tale rappresentazione è utile al fine di caratterizzare le traiettorie d'apprendimento degli allievi.

Modelli

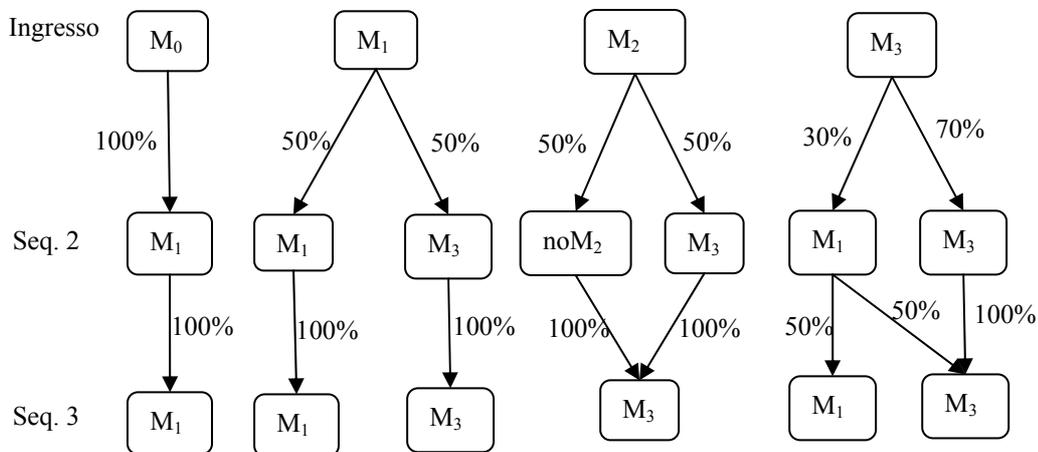


Figura 5.18

Come si può osservare, le traiettorie d'apprendimento di tutti gli allievi risultano positive, ad eccezione di un solo allievo che evidenzia un andamento regressivo, passando dalla classe M₃ alla classe M₁, corrispondente ad un modello più povero. Scendendo più nel dettaglio, riteniamo utile sottolineare i seguenti aspetti che emergono dall'analisi:

- tutti gli allievi che in ingresso non avevano evidenziato alcun modello microscopico (M₀) evidenziano, alla fine della sequenza 3, un modello a soli elettroni (M₁). Si osserva, però, che la transizione M₀→M₁ si verifica a seguito delle osservazioni sperimentali effettuate durante la sequenza 2. Pertanto, per tali allievi la sequenza 3 risulta inefficace (anche in termini di competenze interpretative). Analoghe considerazioni si applicano ai due terzi agli allievi che inizialmente hanno evidenziato il modello M₁ (sebbene per tali allievi migliorano le competenze interpretative, in quanto passano alla classe I₂).
- Gli allievi che inizialmente appartenevano alla classe M₂ (modello ad elettroni legati) passano tutti alla classe M₃; anche il loro livello d'interpretazione migliora decisamente, passando da I₂ ad I₃. Per il 50% di questi allievi il cambiamento concettuale si realizza totalmente a seguito della sequenza 2. Per il restante 50 % il cambiamento si realizza in modo

più graduale. Infatti, come sarà esemplificato nel paragrafo successivo, le osservazioni sperimentali effettuate durante la sequenza 2 innescano un conflitto cognitivo che non si risolve del tutto e che determina l'abbandono del modello M_2 ed il passaggio a modelli provvisori no- M_2 . Tale conflitto si risolve soltanto a seguito della sequenza 3, in cui agli allievi vengono offerti adeguati supporti che consentono il passaggio al più adeguato modello M_3 .

Al fine di completare l'informazione contenuta nel grafico di figura 5.17 (classificazione I), la figura 5.19 rappresenta le transizioni ingresso-fine sequenza 3 relative ai livelli d'interpretazione dei fenomeni.

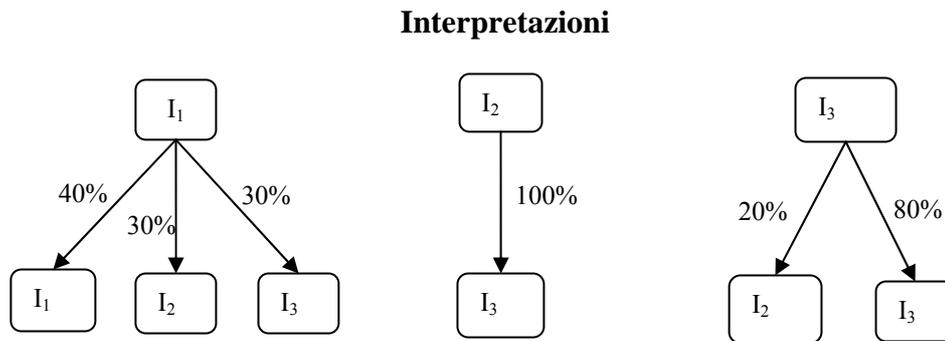


Figura 5.19

5.2.2 Analisi di casi particolari in termini di reti semantiche e classi di coordinazione

La necessità di trovare un'interpretazione coerente dei due fenomeni osservati durante la sequenza 2 (effetto Joule e variazione della resistenza del rame con la temperatura), induce, in una buona percentuale di allievi, l'attivazione di schemi d'interpretazione, non riscontrati durante le indagini d'ingresso ne, tanto meno, durante le precedenti discussioni in classe. Tali interpretazioni sono centrate su due concetti: "attrito" e dualismo "ordine - disordine". Al fine di esemplificare come tali concetti vengono utilizzati dagli allievi per interpretare i due fenomeni, nel seguito riportiamo ed analizziamo alcune delle risposte fornite, utilizzando gli strumenti dell'analisi concettuale.

Attrito

Così un allievo, che chiameremo Pasquale, interpreta l'effetto joule:

Inizialmente il potenziale accelera le cariche libere, finché non si arriva ad una velocità costante media delle stesse. Se la velocità è costante allora il lavoro fornito si trasforma interamente in ATTRITO²⁷. L'attrito genera calore. Quindi il calore (energia dissipata) è indice di attrito, che è indice della resistenza del conduttore. A PARI TENSIONE + calore => - ATTRITO.

(leggi + calore (leggi Resistenza)
dissipato)

Analizziamo la risposta fornita dall'allievo. La prima parte del ragionamento può essere così riprodotta: poiché, a regime, le cariche libere si muovono con velocità (media) costante il lavoro compiuto dal campo viene *trasformato* in attrito che a sua volta genera calore. In altri termini, l'allievo l'introduce l'attrito interpretandolo non tanto come meccanismo che trasforma energia meccanica in energia termica, ma come un'ulteriore forma di energia che media la trasformazione di energia meccanica in termica.

L'interpretazione dell'effetto Joule, sebbene basata sull'applicazione di concetti macroscopici (come l'attrito) a realtà microscopiche e inficiata da un'erronea interpretazione dell'attrito, potrebbe concludersi qui. Tuttavia l'allievo estende la catena causale, da un lato collegando l'attrito alla resistenza elettrica, dall'altro introducendo una sorta di principio di conservazione, che coinvolge due grandezze, l'attrito ed il calore. La conclusione del ragionamento è, pertanto, che quanto maggiore è il calore prodotto tanto minore sarà l'attrito, cioè la resistenza elettrica del conduttore. Sebbene l'estensione del ragionamento che conduce a quest'ultima conclusione non sia necessaria per interpretare l'effetto Joule, essa costituisce il presupposto su cui l'allievo fonda l'interpretazione del secondo fenomeno. Infatti, la risposta che lo studente fornisce alla seconda domanda è la seguente:

Se il conduttore non riesce a dissipare il calore dell'attrito (perché il ΔT si è ridotto per la presenza di una sorgente di calore) allora:

²⁷ Per enfatizzare il concetto centrale, cioè l'attrito, del suo ragionamento, l'allievo utilizza sempre caratteri maiuscoli.

- *Calore* => + *ATTRITO*

Riteniamo di potere interpretare questa risposta nel seguente modo: poiché il riscaldamento del conduttore riduce la differenza di temperatura tra conduttore ed ambiente esterno, il conduttore non riesce a dissipare il calore prodotto per attrito, pertanto, per il principio di conservazione introdotto prima, l'attrito sarà maggiore, cioè la resistenza elettrica sarà più grande.

Come vediamo, dunque, al fine di fornire un'interpretazione coerente e globale dei due fenomeni, l'allievo genera "in vivo"²⁸ un modello esplicativo, richiamando e adattando, in modo erroneo, al contesto problematico diverse risorse cognitive preesistenti.

E' interessante provare ad analizzare il comportamento dell'allievo utilizzando gli strumenti interpretativi, in particolare, p-prims (diSessa, 1993) e classi di coordinazione (diSessa e Sherin, 1998), del modello cognitivo illustrato nel capitolo 2.

Osserviamo, anzitutto, che la strategia di lettura adottata complessivamente dall'allievo conduce alla selezione dei seguenti elementi significativi dei due fenomeni: *lavoro meccanico, calore, resistenza elettrica, differenza di temperatura, trasformazione e attrito*. Quest'ultimo rappresenta il concetto chiave che permette di connettere tutti gli altri elementi. La figura 5.20 illustra uno schema di associazioni che connette i diversi elementi di conoscenza in modo scientificamente coerente (se si esclude l'identificazione tra calore ed energia termica, lavoro ed energia).

²⁸ Riteniamo che il modello venga generato in vivo poiché non vi è alcuna traccia di tale interpretazione nel test d'ingresso, né durante le discussioni con gli allievi che hanno preceduto l'esecuzione degli esperimenti.

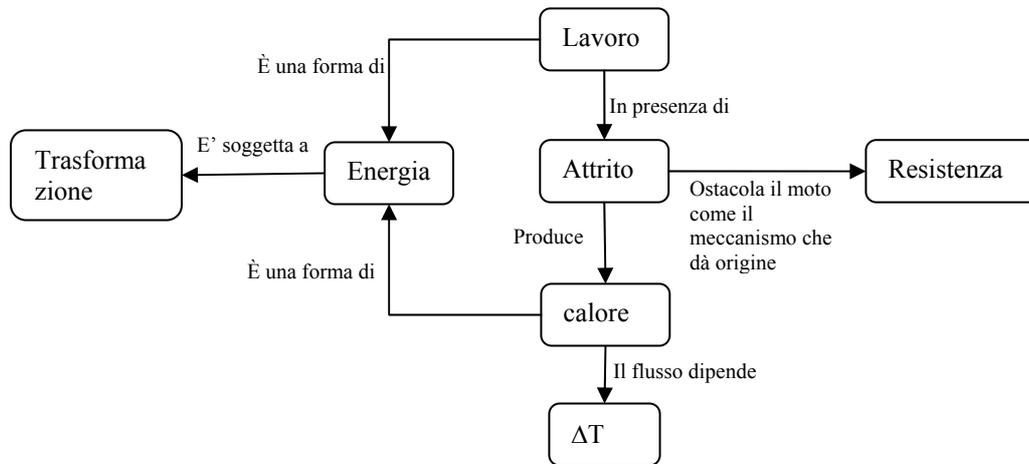


Figura 5.20.

In figura 5.21 è, invece, rappresentato il modo in cui l'allievo connette gli stessi elementi.

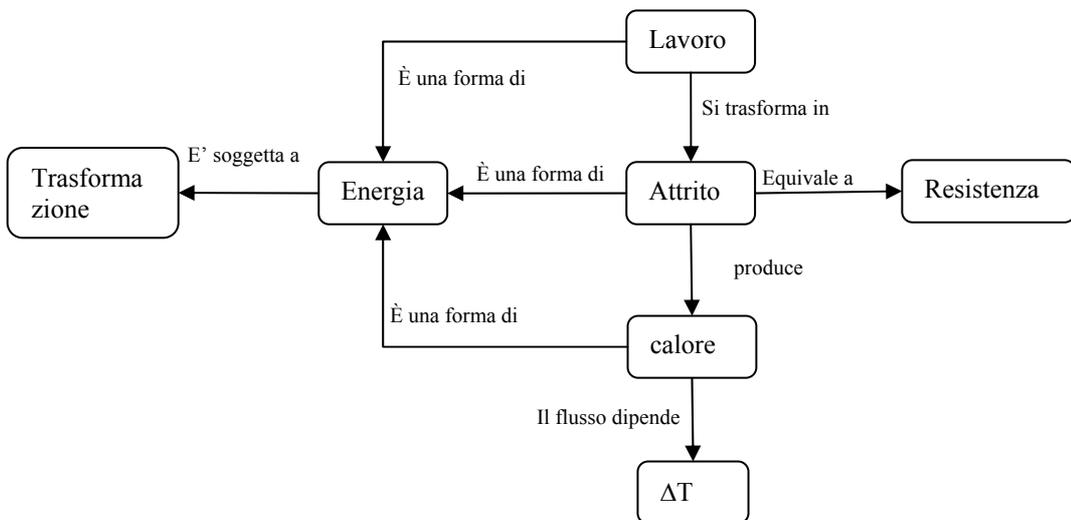


Figura 5.21

Come vediamo, il processo di costruzione del modello esplicativo implica una differenza profonda della struttura semantica delle due reti concettuali, cioè della configurazione, ma soprattutto, del significato dei collegamenti. Tale modificazione coinvolge, tuttavia, soltanto il nodo fondamentale della rete concettuale, ossia il concetto d'attrito, lasciando immutate le relazioni tra i concetti periferici.

Riguardiamo il concetto d'attrito come classe di coordinazione e proviamo ad analizzare i diversi modi in cui tale classe viene utilizzata e applicata dall'allievo. Notiamo che l'allievo utilizza due diverse strategie di lettura per l'attrito: in termini dinamici, come agente che si oppone al moto di un oggetto (o, più, in generale, come agente che si oppone a un dato risultato) e, in termini energetici, come tramite tra lavoro meccanico e calore; di conseguenza l'allievo riconosce l'attrito a partire dal moto (se un corpo soggetto ad una forza si muove a velocità costante c'è attrito) o a partire da trasformazioni d'energia (se il lavoro meccanico si trasforma in calore c'è attrito).

La lettura in termini dinamici caratterizza lo span della classe di coordinazione "Attrito" attivata dall'allievo, ossia l'abilità di riconoscere ed applicare il concetto in diverse situazioni. Egli, infatti, estendendo alla realtà microscopica del conduttore elettrico la proprietà dell'attrito di opporsi al moto, identifica la resistenza elettrica del conduttore con l'attrito (identificazione che è uno dei passi fondamentali per la costruzione del modello). Esprimendoci in termini di risorse cognitive a grana fine, riteniamo di poter affermare che l'allievo attivi la primitiva fenomenologica ternaria denominata "Ohm's P-prim" (o una parte di essa), secondo la quale "più sforzo implica più risultato e più resistenza implica meno risultato". La naturale applicazione di tale P-prim (che è uno degli elementi che caratterizza una rete causale *ben formata* della classe di coordinazione "attrito") alla conduzione elettrica, in particolare alla terna ddp, resistenza, corrente, conduce l'allievo a stabilire un'equivalenza tra attrito e resistenza elettrica²⁹.

La lettura in termini energetici conduce, invece, l'allievo a stabilire una diretta, ma erronea, associazione tra attrito ed energia. Per stabilire tale associazione il meccanismo cognitivo attivato dall'allievo consiste nell'identificare uno degli attributi dell'oggetto (ossia la proprietà dell'attrito di

²⁹ Osserviamo che l'identificazione tra origine della resistenza elettrica e forza d'attrito è un aspetto presente anche nei modelli storici della conduzione. Nella sua versione originaria il modello di Drude, sebbene come semplice artificio formale, assimila l'effetto medio degli urti di un elettrone contro le "molecole" del conduttore ad una forza d'attrito dipendente dalla velocità. Soltanto successivamente la trattazione statistica di Lorentz utilizza l'equazione di diffusione.

mediare la trasformazione di lavoro in calore) con l'oggetto (ossia l'attrito). L'allievo, dunque, utilizza una diversa "coordinazione" per l'attrito rispetto a quella che utilizzerebbe un esperto: egli, infatti, identifica la forza attrito con l'energia dissipata a causa dell'attrito.

I passi successivi della costruzione del modello sono fondati su un'ulteriore risorsa che può essere così espressa: *trasformazione implica conservazione*. L'applicazione di tale risorsa al contesto in esame, si traduce nel seguente modo: se l'attrito (resistenza) si trasforma in calore, allora l'ammontare totale delle due entità si conserva; pertanto, se c'è più calore c'è meno resistenza e, viceversa, se c'è meno calore dissipato c'è più resistenza.

Ciò che riteniamo utile evidenziare è lo sforzo compiuto dall'allievo per coordinare le osservazioni con un ampio set di risorse cognitive preesistenti (in parte spontanee, in parte frutto dell'istruzione precedente), al fine di costruire un modello esplicativo. Tuttavia, rispetto al compito assegnato, il modello proposto risulta inadeguato per due ragioni: sia perché non è un modello totalmente fondato su elementi microscopici, sia perché evidenzia diversi elementi di incoerenza. La prima carenza deriva dall'attivazione di una classe di coordinazione (l'attrito, che è un concetto macroscopico) inadeguata rispetto al compito assegnato (ossia un'interpretazione microscopica); la seconda carenza deriva, invece, da evidenti difetti nella struttura della classe di coordinazione attivata dall'allievo, difetti che si manifestano, sia nelle strategie di lettura che caratterizzano la classe (ad esempio, il modo in cui l'allievo "vede" l'attrito da un punto di vista energetico), sia nell'uso improprio di alcune risorse cognitive che ne caratterizzano la rete causale (ad esempio, l'uso della Ohm's P-prim per stabilire un'equivalenza tra attrito e resistenza elettrica, ossia per estendere il concetto di attrito al mondo microscopico).

E' evidente che il cambiamento concettuale dell'allievo (peraltro andato a buon fine, come evidenziano gli esiti delle verifiche della sequenza 3) ha richiesto un sostanziale mutamento di prospettiva finalizzato, principalmente, a favorire l'attivazione di strategie di lettura non più fondate sul concetto d'attrito.

Ordine - disordine

Come già osservato, diversi allievi utilizzano schemi di interpretazione centrati sull'uso dei concetti di ordine e disordine. Riportiamo un esempio di tale categoria di interpretazione.

Così un'allieva, che chiameremo Marina, risponde alla domanda sull'effetto Joule:

Le cariche per effetto del campo dovrebbero muoversi in modo ordinato, ma qualcosa all'interno del conduttore tende a disordinarle e per questo aumenta la temperatura e viene dissipata energia termica.

La stessa allieva risponde nel modo seguente alla seconda domanda:

La temperatura del rame aumenta e questo si lega ad un moto disordinato delle cariche; ne consegue che è come se ci fosse una forza che si oppone sempre più al campo elettrico tendente all'ordine: questa forza è la resistenza specifica che si oppone al moto ordinato di cariche ovvero alla corrente.

Come vediamo le risposte fornite dall'allieva sono abbastanza coerenti e non necessitano di interpretazione. Notiamo, innanzitutto, che, come nel caso delle risposte di Pasquale, l'interpretazione dei due fenomeni fornita da Marina non è completamente microscopica. Tale interpretazione, infatti, invoca due categorie fenomenologiche complementari, ordine e disordine, che rappresentano proprietà di insieme di un sistema di corpi (nella fattispecie cariche elettriche elementari), ma non esplicita i meccanismi microscopici che inducono il passaggio dall'ordine al disordine.

Osserviamo, inoltre, che le risposte date dall'allieva contengono un aspetto che è comune a tutte le altre risposte basate sul concetto di disordine, ossia il fatto che l'aumento del disordine implica un aumento di temperatura e/o la dissipazione di energia e, viceversa, che l'aumento di temperatura implica un aumento di disordine. L'interpretazione di Marina è, tuttavia, più articolata in quanto contiene alcuni elementi non chiaramente esplicitati nelle altre interpretazioni.

Per analizzare il modello proposto dall'allieva procediamo come nel caso di Pasquale, ovvero cercando di esplicitarne la struttura semantica. Osserviamo, anzitutto, che l'allieva seleziona i seguenti elementi di conoscenza: *campo*

elettrico, ordine (moto ordinato), disordine, energia termica, temperatura, forza, resistenza, corrente.

La rete semantica mediante la quale l'allieva connette tali elementi è rappresentata in figura 5.22.

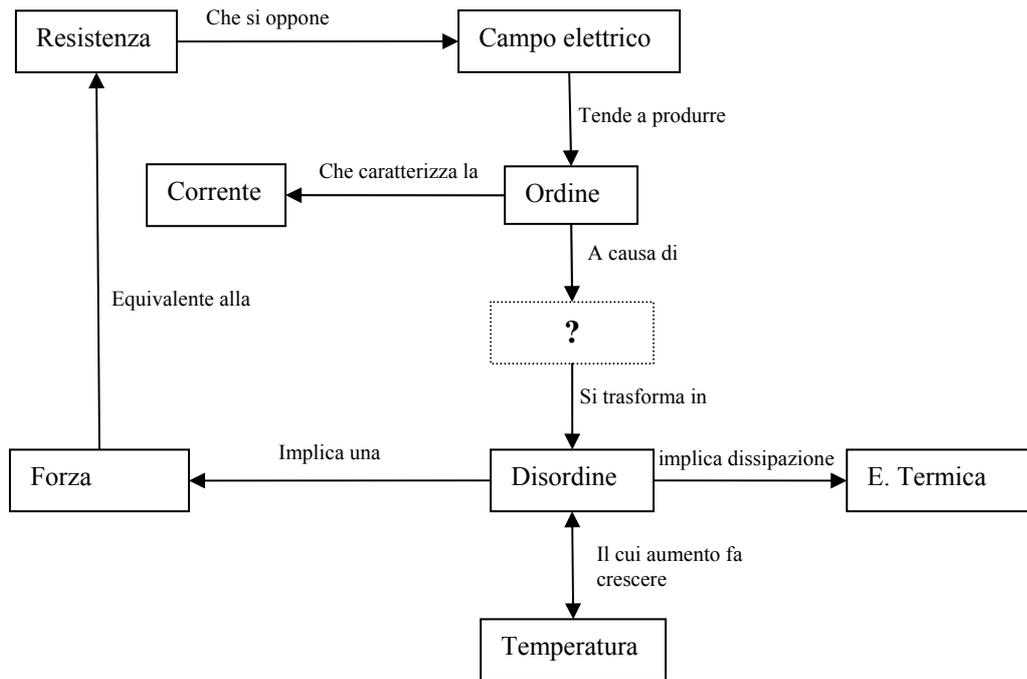


Figura 5.22

L'interpretazione che Marina propone dell'effetto Joule è basata sulla catena inferenziale che connette i concetti di campo elettrico, ordine, disordine ed energia termica. L'interpretazione del secondo fenomeno si basa, invece, sulla catena che parte dal concetto di temperatura e connette i concetti di disordine, forza, resistenza, campo elettrico, ordine, corrente. Come si può osservare, ciò che impedisce all'allieva di costruire un modello esplicativo totalmente microscopico dei due fenomeni è la mancanza di un collegamento diretto tra ordine e disordine, ossia di un'entità microscopica (il reticolo cristallino), responsabile della conversione del moto ordinato indotto dal campo in moto disordinato.

Al contrario del caso precedente, il cambiamento concettuale di Marina non ha implicato trasformazioni profonde. Il cambiamento richiesto è, infatti, di

tipo incrementale, in quanto comporta l'integrazione di un unico blocco di conoscenza, il reticolo cristallino.

Osserviamo, inoltre, che alcuni degli altri allievi che hanno fornito interpretazioni basate sul concetto di disordine hanno evidenziato un modello meno ricco e coerente di quello descritto e ciò ha determinato, in alcuni casi, un esito non del tutto positivo del successivo processo d'apprendimento.

I due esempi riportati sono emblematici. Essi evidenziano un aspetto rilevante della ricerca didattica sui modelli microscopici. Le difficoltà insite nell'apprendimento degli aspetti microscopici dei fenomeni (che implica la capacità di riuscire a “vedere” l'invisibile) richiede un notevole sforzo da parte degli allievi, sforzo che presuppone l'attivazione di un ampio e variegato repertorio di conoscenze e di risorse cognitive. Ciò ha, evidentemente, delle influenze significative sia sull'insegnamento che sui metodi di analisi e di valutazione dell'apprendimento: l'ampio set di risorse implicate dall'apprendimento si riflette, infatti, nella necessità di predisporre un set di strumenti didattici e di analisi altrettanto ampio e diversificato.

5.2.3 Competenze d'interpretazione quantitativa

Al fine di completare l'analisi dei dati estratti durante la sequenza 3 riportiamo un ulteriore elemento che il controllo d'apprendimento intendeva valutare, vale a dire le competenze relative all'elaborazione quantitativa del modello. In particolare, dopo aver ottenuto l'andamento della resistività del metallo in funzione della temperatura (previsto dal modello di Drude –Lorentz), tramite la simulazione NetLogo, agli allievi è stato richiesto di giustificare analiticamente la dipendenza funzionale di ρ da T (ρ risulta proporzionale a $T^{1/2}$).

La domanda posta agli studenti è la seguente:

Sapresti interpretare la dipendenza funzionale di ρ da T (cioè l'esponente di T) che hai ottenuto utilizzando il modello microscopico introdotto?

Nelle tue deduzioni tieni conto dei seguenti fatti:

a. Come abbiamo visto, la resistività nel modello di Drude-Lorentz può essere espressa come:

$$\rho = \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau}$$

b. Il reciproco del tempo di volo $1/\tau$ che compare in tale espressione corrisponde alla frequenza f con cui gli elettroni urtano contro gli ioni (probabilità di scattering). La frequenza f dipende dalla dimensione degli ioni (cioè dalla loro area A) e dalla velocità termica (v_m) con cui si muovono gli elettroni.

c. Tieni conto che agli elettroni liberi si applica il principio di equipartizione dell'energia.

Come si può osservare la domanda fornisce tutti gli elementi necessari per determinare la soluzione. In particolare, il procedimento risolutivo richiede soltanto tre passi:

1. esplicitare la dipendenza delle frequenza f da v_m ($f \propto v_m$)
2. sostituire l'espressione di f nella formula di ρ ($\rho \propto v_m$)
3. utilizzare il principio di equipartizione dell'energia per esprimere v_m in funzione della temperatura ($v_m \propto T^{1/2}$).

L'analisi delle risposte fornite dagli allievi evidenzia che il 44% degli allievi riesce a completare la deduzione, mentre il restante 56% degli allievi non riesce a portare fino in fondo il ragionamento o si limita a fornire una giustificazione qualitativa senza utilizzare il modello matematico.

Osserviamo che il gruppo di allievi che risponde correttamente alla domanda appartiene alle classi M_3 ed I_3 . Per tali allievi, dunque, gli esiti del percorso formativo sono estremamente positivi: le loro conoscenze e competenze interpretative risultano infatti consolidate sia negli aspetti qualitativi che quantitativi. Alcuni allievi appartenenti alle classi M_3 , I_3 (il 30 %) evidenziano tuttavia un livello d'interpretazione quantitativa carente.

5.2.4 Valutazione degli esiti delle sequenze 2 e 3

Al fine di valutare gli esiti delle sequenze 2 e 3, in ciò che segue, verranno sintetizzati i risultati delle osservazioni effettuate e verrà fornita una risposta alle domande sperimentali.

Sequenza 2

Le domande sperimentali cui l'implementazione della sequenza intendeva fornire una risposta sono:

1. *In che modo allievi utilizzano le osservazioni effettuate durante gli esperimenti macroscopici per modificare i propri modelli microscopici?*
2. *In che misura gli strumenti e le strategie utilizzate risultano efficaci in relazione al presupposto pedagogico che ne ha ispirato la progettazione?*

La risposta alla prima domanda è già stata fornita nei paragrafi precedenti. L'analisi effettuata evidenzia che la concreta osservazione dei due fenomeni modifica in modo significativo le interpretazioni degli allievi (rispetto a quanto osservato in ingresso e durante le discussioni precedenti). Quasi tutti gli allievi, infatti, utilizzano le informazioni macroscopiche estratte dalle osservazioni sperimentali per apportare delle modifiche (anche sostanziali) ai modelli microscopici evidenziati precedentemente. Tali modificazioni si concretizzano in diversi modi:

- nell'aggiunta di nuovi elementi non presenti nel modello precedente (ad esempio, i portatori di carica o il reticolo cristallino);
- nell'abbandono di alcuni elementi non compatibili con le osservazioni effettuate, ad esempio, l'abbandono dell'idea che gli elettroni risentono in modo significativo di interazioni attrattive (modello ad elettroni legati);
- nella sostituzione di elementi non compatibili con le osservazioni (ad esempio, interazioni attrattive con interazioni di tipo impulsivo);
- nell'estensione della funzionalità del modello (al fine d'interpretare anche l'effetto Joule);
- in una modifica sostanziale del modello.

Ciò che si osserva in quest'ultimo caso è che la necessità di trovare un'interpretazione coerente dei due fenomeni osservati induce la costruzione di modelli esplicativi (precedentemente non riscontrati) basati su due concetti: attrito e transizione ordine - disordine. Nel tentativo di coordinare le osservazioni sperimentali con le conoscenze e le risorse cognitive preesistenti, questi allievi attivano schemi d'interpretazione in cui conoscenze microscopiche, spesso

frammentarie, frutto dell'istruzione precedente vengono intergrate con conoscenze spontanee.

Per quanto riguarda la seconda domanda sperimentale, osserviamo che il presupposto pedagogico (che include anche l'ipotesi sugli effetti della sequenza) che ha ispirato la progettazione didattica è che le informazioni tratte dall'osservazione dei due fenomeni può consentire a quegli allievi il cui modello microscopico risulta carente di arricchire o modificare tale modello, precisandolo, in particolare, in quegli aspetti che riguardano i meccanismi d'interazione tra i costituenti elementari del modello. In particolare, uno dei risultati attesi è che gli allievi che hanno evidenziato il modello spontaneo "ad elettroni legati" abbandonino tale modello.

I risultati ottenuti confermano la validità di tale ipotesi. In particolare, ciò che abbiamo osservato può essere così sintetizzato:

- la stragrande maggioranza degli allievi arricchisce il proprio modello microscopico, sia in termini di componenti sia in termini di interpretazioni; in particolare, si osserva che circa il 65 % degli allievi (contro i 35% in ingresso) fa intervenire nelle interpretazioni un meccanismo d'interazione tipo impulsivo;
- tutti gli allievi che in ingresso avevano evidenziato il modello ad elettroni legati abbandonano tale modello. In particolare, come si evince dal diagramma di figura 5.18, il 50% di questi effettua la transizione al più corretto modello M₃.

Sequenza 3

Le domande sperimentali cui l'implementazione della sequenza intendeva fornire una risposta sono:

1. *In che misura le attività proposte favoriscono il cambiamento concettuale degli allievi il cui modello spontaneo risulta ancora inadeguato?*
2. *In che misura gli strumenti e le attività di modelling predisposte supportano il consolidamento delle competenze interpretative degli allievi?*

L'ipotesi che abbiamo formulato in relazione alla domanda 1 è che l'utilizzazione di strategie di costruzione del modello microscopico fondate il più possibile su evidenze e fatti accessibili agli allievi e di cui essi hanno diretta

esperienza può favorire e stimolare il cambiamento concettuale (soprattutto di quelli per i quali il processo di transizione dal modello spontaneo a un modello scientificamente più adeguato non si è del tutto realizzata a seguito del conflitto cognitivo attivato durante la sequenza precedente) o il processo consolidamento per gli allievi che hanno evidenziato conoscenze più adeguate.

Relativamente alla prima domanda di ricerca, come abbiamo illustrato nel paragrafo 5.2.1, osserviamo che gli esiti globali degli interventi sono estremamente positivi. Tuttavia, per ciò che riguarda gli effetti della sequenza 3, le evidenze sperimentali mostrano che l'evoluzione dell'apprendimento dipende in modo significativo dal livello di conoscenze e competenze evidenziato degli allievi all'inizio della sequenza (che a sua volta dipende da quello evidenziato in ingresso). In particolare (si veda figura 5.18 paragrafo 5.2.1), la maggior parte gli allievi che alla fine della sequenza 2 evidenziavano un modello che prevede soltanto portatori di carica (M_1), non evolvono il loro modello. Per tali allievi, che rappresentano tuttavia un percentuale relativamente piccola (circa il 30%), la sequenza 3 risulta inefficace. La sequenza risulta, invece, efficace per gli allievi che durante la sequenza 2 avevano abbandonato il modello ad elettroni legati. Per questi allievi, infatti, il processo di evoluzione concettuale si completa con l'abbandono (definitivo) del modello M_2 e la sua sostituzione con il modello scientifico. Il cambiamento concettuale di tali allievi è confermato dal fatto che esso coinvolge non soltanto la struttura del modello ma anche le competenze interpretative: tutti gli allievi che in ingresso avevano evidenziato il modello M_2 ed interpretazioni non del tutto compatibili con quelle scientifiche (I_2), alla fine della sequenza 3 interpretano correttamente i fenomeni proposti (in modo qualitativo).

Per ciò che riguarda la seconda domanda di ricerca, ricordiamo che l'ipotesi che abbiamo formulato è che, per le ragioni esposte nel paragrafo 4.3.3 (sequenza 3), l'utilizzazione delle strategie e degli strumenti che caratterizzano la sequenza stimola e facilita il processo di elaborazione quantitativa degli elementi del modello matematico finalizzata alla giustificazione di andamenti macroscopici osservati (ancorché nell'ambito di esperimenti virtuali).

La risposta alla seconda domanda si basa sugli esiti dell'analisi illustrata nel paragrafo 5.2.3. Abbiamo visto, in particolare, che soltanto gli allievi che evidenziano un adeguata capacità d'interpretazione qualitativa degli andamenti osservati è in grado di dedurre gli andamenti quantitativi a partire dall'elaborazione del modello matematico. Ciò induce a ritenere che la capacità di utilizzare il modello matematico del modello microscopico, al fine di giustificare proprietà emergenti a livello macroscopico, presuppone un adeguato livello di comprensione qualitativa delle connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici del modello, non limitata a semplici abilità di manipolazione formale.

Poiché le ricadute in termini di competenze di analisi qualitativa e quantitativa dell'intervento formativo non possono essere disgiunte, riteniamo di potere fornire la seguente risposta alla domanda di ricerca:

L'implementazione della sequenza 3 supporta il consolidamento delle competenze interpretative di tipo quantitativo di quegli allievi che evidenziano adeguate competenze di interpretazione qualitativa.

5.2.5 Esiti delle sequenze 4 e 5

Durante la sequenza 4 viene introdotta nel modello l'influenza delle vibrazioni reticolari e, utilizzando l'ambiente di simulazione NetLogo, viene ricavato il nuovo andamento della resistività del metallo in funzione della temperatura. Nonostante le modifiche apportate al modello, l'andamento simulato non si accorda con quello sperimentale.

Il controllo d'apprendimento è stato effettuato alla fine della sequenza, sulla base delle risposte alle domande contenute nella scheda guida riportata in appendice M1 (attività 2). Le verifiche intendevano accertare quanto gli strumenti e le strategie implementate potessero favorire il consolidamento delle competenze di analisi quantitativa degli allievi. Un altro aspetto che s'intendeva evidenziare riguarda le modalità mediante le quali gli allievi utilizzano le conoscenze acquisite al fine di formulare ipotesi correttive per ricomporre le contraddizioni tra previsioni del modello e osservazioni sperimentali.

Esprimendoci in termini più precisi, le domande di ricerca cui il controllo d'apprendimento intendeva fornire una risposta sono le seguenti:

3. *In che misura gli strumenti e le attività di modelling predisposti supportano il consolidamento delle competenze interpretative degli allievi?*
4. *In che misura e sulla base di quali elementi del modello gli allievi sono in grado di formulare ipotesi correttive in modo autonomo?*

Gli elementi necessari a rispondere alla prima delle due domande sono stati tratti d'analisi delle risposte fornite al seguente quesito:

Sapresti interpretare la dipendenza funzionale di ρ da T (cioè l'esponente di T) che hai ottenuto utilizzando il modello microscopico?

Nelle tue deduzioni tieni conto dei seguenti fatti:

a. Come abbiamo visto, la resistività può essere espressa come:

$$\rho = \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau}$$

b. Il reciproco del tempo di volo $1/\tau$ che compare in tale espressione corrisponde alla frequenza f con cui gli elettroni urtano contro gli ioni (probabilità di scattering).

Come si può notare, tale domanda è sostanzialmente identica a quella posta alla fine della sequenza 3. I suggerimenti forniti agli allievi sono tuttavia meno dettagliati e la soluzione del problema richiede una procedura più complessa:

1. individuare la dipendenza della frequenza f da v_m ed A_{eff} ($f \propto v_m A_{\text{eff}}$)
2. sostituire l'espressione di f nella formula di ρ ($\rho \propto A_{\text{eff}} v_m$)
3. utilizzare il principio di equipartizione dell'energia per esprimere v_m in funzione della temperatura ($v_m \propto T^{1/2}$).
4. utilizzare il principio di equipartizione dell'energia per esprimere A_{eff} in funzione della temperatura ($A_{\text{eff}} \propto x_0^2 \propto T$).

Dall'analisi delle risposte fornite dagli allievi emerge un significativo miglioramento delle competenze d'interpretazione quantitativa. Infatti, se alla fine della sequenza 3 soltanto il 44% degli allievi era riuscito a risolvere il problema

analogo, alla fine della sequenza 4 la percentuale di allievi che riesce a completare la deduzione sale a circa il 60%. Si conferma, inoltre, un elemento emerso durante l'analisi relativa alla sequenza 3, ovvero che il gruppo di allievi che riesce a risolvere il problema quantitativo appartiene (con qualche rara eccezione) all'intersezione delle classi M_3 e I_3 (con riferimento alla classificazione effettuata alla fine della sequenza 3). In altri termini, si conferma il dato che la capacità di elaborazione quantitativa del modello presuppone l'acquisizione di adeguate competenze di analisi qualitativa.

Il quesito successivo posto agli allievi è il seguente:

Perché il modello non è compatibile con i risultati sperimentali?

Che tipo di modifica sarebbe necessario apportare al modello per ottenere una dipendenza lineare di ρ da T ?

Avanza delle ipotesi:

Tale domanda è stata posta per una duplice ragione. La prima è connessa alla necessità di acquisire elementi relativi alla seconda domanda di ricerca. La seconda motivazione è di tipo squisitamente didattico. La domanda mirava, infatti, a stimolare gli allievi a riflettere sul percorso concettuale seguito e ad organizzare le proprie conoscenze in modo da individuare autonomamente strategie risolutive. Si intendeva, in questo modo, preparare il terreno per la successiva revisione quantistica del modello.

L'analisi delle risposte fornite dagli allievi evidenzia che circa il 70% degli allievi prova a giustificare l'incompatibilità del modello con le evidenze sperimentali e prospetta ipotesi di modifica. Il rimanente 30% non fornisce alcuna risposta.

Tra gli allievi che rispondono al quesito, la maggior parte evidenzia una strategia risolutiva basata sulla formula che lega la resistività alle proprietà dinamiche degli elettroni (velocità termica) e degli ioni (ampiezza d'oscillazione) dipendenti dalla temperatura. Le soluzioni prospettate riguardano modifiche alla dipendenza funzionale di tali proprietà dalla temperatura e rientrano in tre categorie:

- modifiche alla dipendenza funzionale della v_m (v_m indipendente dalla temperatura);
- modifiche alla dipendenza funzionale di A_{eff} (A_{eff} proporzionale alla radice quadrata della temperatura);
- modifiche alla dipendenza funzionale del prodotto $A_{eff} * v_m$ ($A_{eff} * v_m$ proporzionale alla temperatura);

Bisogna osservare, tuttavia, che nella maggior parte dei casi tale ipotesi assumono le caratteristiche di soluzioni ad hoc, non supportate da alcuna giustificazione teorica.

Soltanto le risposte di due allievi contengono elementi teorici, fondati, in particolare, su riflessioni critiche relative a possibili errori nel percorso concettuale seguito durante il percorso formativo. In particolare, un allievo, partendo dal presupposto che la separazione del contributo di A_{eff} e di quello di v_m per ottenere la dipendenza della resistività dalla temperatura non è giustificabile, tramite un ragionamento non del tutto coerente, perviene alla conclusione che la dipendenza della resistività da $T^{3/2}$ non è corretta. Egli, dunque, contesta la correttezza delle deduzioni (che egli stesso ha effettuato rispondendo alla domanda 1) basate sull'elaborazione modello.

Un altro allievo invoca invece la circostanza (corretta) che gli elettroni non obbediscono alla statistica classica quanto piuttosto alla statistica di Fermi-Dirac.

Sequenza 5

Durante l'implementazione della sequenza 5, partendo da una discussione critica delle risposte al quesito riportato nel paragrafo precedente, il modello viene rivisitato in senso quantistico introducendo le idee chiave che conducono alla statistica di Fermi-Dirac per gli elettroni di conduzione. Il modello viene, dunque, elaborato mediante l'ambiente di simulazione NetLogo e viene ricavata la dipendenza della resistività dalla temperatura che, questa volta, si accorda perfettamente con quella ricavata sperimentalmente.

Per le ragioni esposte nel paragrafo 4.3.3 (sequenza 5), abbiamo formulato la seguente ipotesi circa gli effetti della sequenza:

a seguito dell'intervento formativo si ritiene che, in buona misura, gli allievi che hanno già evidenziato il possesso di un adeguato modello classico effettuino la transizione al modello quantistico.

La domanda sperimentale riguarda la conferma o meno di tale ipotesi.

Evidenze circa gli effetti dell'intervento sono state tratte dalle risposte fornite dagli allievi alle domande poste nel test d'uscita. Al fine di valutare la correttezza dell'ipotesi formulata anticipiamo alcuni dei risultati emersi dall'analisi delle risposte.

- Alla fine del percorso formativo il 60% degli allievi interpreta i fenomeni proposti correttamente utilizzando un modello quantistico.
- Tali allievi alla fine della sequenza 3 avevano evidenziato un modello M_3 ed un livello d'interpretazione I_3 (ad eccezione di un solo allievo il cui livello d'interpretazione era I_2)

Come si può osservare tutti gli allievi che prima dell'intervento in esame avevano evidenziato un adeguato modello classico effettuano la transizione al modello quantistico.

L'ipotesi circa gli effetti della sequenza 5 risulta, così, corroborata.

5.3 Indagini d'uscita

Gli obiettivi principali delle indagini d'uscita sono stati illustrati nel precedente capitolo (par. 4.2.4). Ricordiamo, in particolare, che tali indagini sono state effettuate al fine di ricavare tre diversi tipi di informazione:

- informazioni relative all'impatto globale del processo formativo in termini di evoluzione delle conoscenze e competenze degli allievi rispetto alla situazione rilevata d'ingresso;
- informazioni circa la capacità di estendere le conoscenze e le competenze acquisite all'analisi di fenomeni transitori;
- informazioni relative al punto di vista dei discenti circa l'esperienza formativa ed il proprio percorso d'apprendimento;

Gli strumenti d'indagine utilizzati per estrarre tali informazioni sono:

- un protocollo d'uscita a risposta aperta (identico a quello d'ingresso)
- un protocollo contenete domande – problema miranti ad accertare alcuni aspetti significativi dell'apprendimento, tra cui il grado di estensione delle competenze (sconda parte del protocollo d'uscita riportato in appendice P2)
- un test di tipo metacognitivo relativo al punto di vista dei discenti sull'esperienza formativa (appendice P3).

5.3.1 Analisi delle variabili cognitive in uscita e confronto ingresso-uscita

Al fine di caratterizzare gli effetti globali del percorso formativo sull'apprendimento, le risposte fornite dagli allievi al test d'uscita sono state analizzate utilizzando gli stessi metodi e gli stessi criteri adottati in ingresso. In ciò che segue vengono riportati gli esiti di tali analisi in relazione a tre delle variabili cognitive oggetto dell'indagine d'ingresso (conoscenze fenomenologiche di base, caratteristiche strutturali dei modelli, caratteristiche funzionali dei modelli) e vengono confrontati con i risultati delle indagini in itinere e dell'analisi d'ingresso.

Conoscenze di base

Gli esiti del test d'uscita evidenziano un sensibile miglioramento nelle descrizioni fornite dagli allievi alla domanda riportata nel paragrafo 5.1.3. Infatti, il 70 % degli allievi (contro circa 50 % ingresso) fornisce una risposta articolata che contiene gli elementi sufficienti a descrivere il fenomeno e che stabilisce relazioni causali tra i diversi concetti utilizzati. Una buona percentuale di allievi, inoltre, descrive il fenomeno introducendo elementi di analisi microscopica. Nella figura 5.23 sono confrontate le risposte di alcuni allievi che in ingresso avevano evidenziato un livello di descrizione L_1 e il cui livello di descrizione risulta notevolmente migliorato.

	Risposta fornite in ingresso	Risposte fornite in uscita
Alunno 1	<i>Si ha un passaggio di corrente. Vi è una differenza di potenziale. R dipende dalla resistività.</i>	<i>Il generatore di corrente mantiene la D.D.P. costante ai poli. A causa della D.D.P. le cariche libere si muoveranno. Questo moto crea una corrente che passa attraverso il conduttore. Il conduttore offre una resistenza al passaggio della carica. La corrente elettrica sarà inversamente proporzionale alla resistenza e proporzionale alla differenza di potenziale della batteria perché è la stessa di quella ai capi del filo in quanto il filo che collega il generatore al conduttore di rame ha una resistenza trascurabile.</i>
Alunno 2	<i>Passa corrente elettrica</i>	<i>La batteria comporta una differenza di potenziale costante. Inserendo il filo di rame si ha un passaggio di corrente che obbedisce alla legge di Ohm $V = R i$, quindi $R = V/i$. Quindi se la resistenza è più grande la corrente sarà più piccola. Inoltre si osserverà l'effetto Joule cioè un aumento di temperatura dovuto al passaggio di corrente elettrica</i>

Figura 5.23

Caratteristiche strutturali e funzionali dei modelli

Il grafico di figura 5.24 confronta le caratteristiche dei modelli microscopici evidenziate dagli allievi in termini di classificazione M, in ingresso,

alla fine della sequenza 3 e in uscita. Come si può osservare, l'andamento positivo rilevato durante il monitoraggio in itinere si consolida: alla fine dell'intervento più del 70% degli allievi esibisce un modello strutturalmente analogo a quello scientifico, che contempla, cioè, portatori liberi che interagiscono tramite urti con il reticolo ionico.

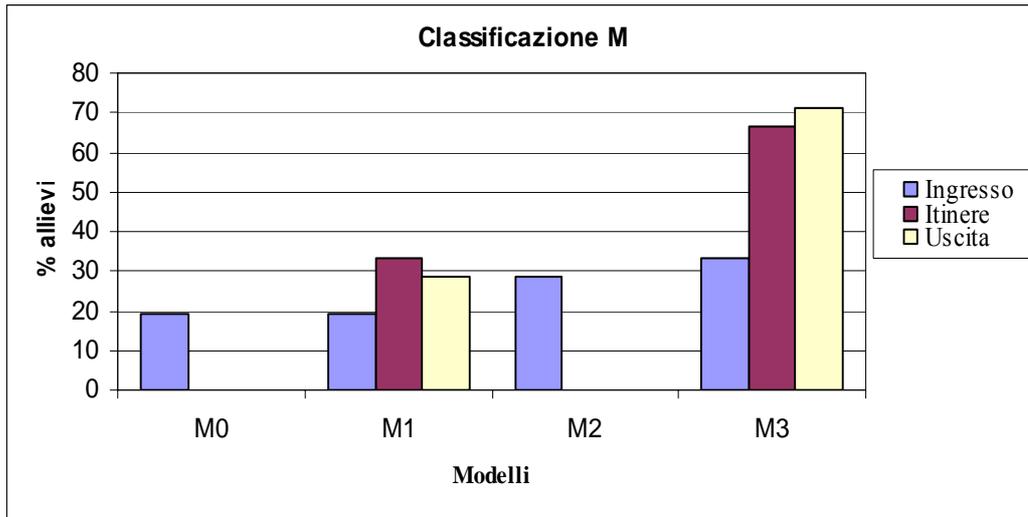


Figura 5.24

Il grafico di figura 5.25 si riferisce all'analogo confronto in termini di classificazione I (natura delle interpretazioni). E' facile rendersi conto che le competenze interpretative degli allievi risultano migliorate in modo significativo rispetto alla situazione iniziale.

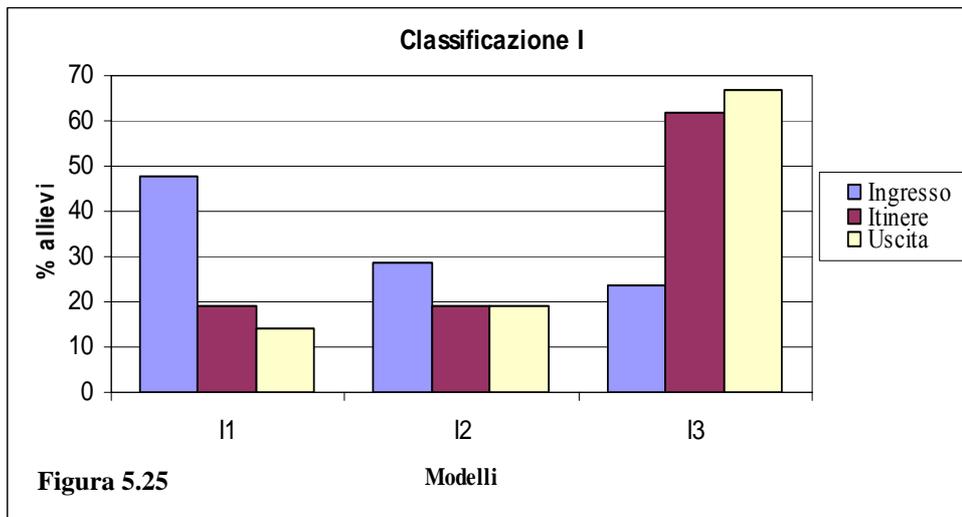


Figura 5.25

Riteniamo utile sottolineare tre ulteriori aspetti connessi all'evoluzione delle competenze interpretative.

1. Come anticipato nel paragrafo 5.2.5, si osserva che un'elevata percentuale degli allievi che in uscita appartengono alla classe I_3 fornisce interpretazioni fondate sul modello quantistico della conduzione nei metalli.
2. Inoltre, se in ingresso gli allievi che hanno evidenziato un livello di interpretazione I_3 si limitavano a fornire delle spiegazioni qualitative, in uscita un'elevata percentuale di allievi I_3 sostanzia le sue interpretazioni con un'analisi quantitativa fondata su un uso pertinente degli aspetti matematici del modello microscopico. A conferma di ciò, in tabella 5.8 sono confrontate alcune risposte fornite dagli allievi, in ingresso e in uscita, alla domanda relativa agli effetti della temperatura sulla risposta del conduttore.
3. La maggior parte degli allievi per i quali una revisione sostanziale del modello spontaneo non si realizza a seguito delle prime fasi del percorso (le prime tre sequenze didattiche), evidenziano un processo d'apprendimento fortemente influenzato dalle conoscenze spontanee: i modelli e le interpretazioni che tali allievi esprimono in uscita rappresentano una precisazione delle conoscenze spontanee evidenziate in ingresso.

Tabella 5.8	Risposte fornite in ingresso	Risposte fornite in uscita
Alunno 1	<p><i>Aumenta l'agitazione termica dovuta alla somministrazione di calore → il metallo diminuisce la sua R</i></p>	<p><i>La I diminuisce. Aumenta la resistività, in quanto aumenta l'oscillazione del nucleo attorno la posizione di equilibrio e l'elettrone è maggiormente ostacolato nel suo cammino. Essendo x_0 l'ampiezza d'oscillazione per l'equipartizione dell'energia essendo $\frac{1}{2} k x_0^2 = \frac{1}{2} K_B T \rightarrow x_0^2 \propto T$. Essendo $\rho = (m/ne^2) l/\tau$, dove $l/\tau \propto A_{eff} v_m$ dove $A_{eff} = \pi x_0^2 \propto T \rightarrow \rho \propto A_{eff} \propto T$</i></p>
Alunno 2	<p><i>Il riscaldamento produce un movimento maggiore delle cariche elettriche. Ma non sono sicura che questo sia legato all'intensità di corrente generata.</i></p>	<p><i>Si, all'aumentare della temperatura, aumenta la resistività del rame e dai dati sperimentali si vede che $\rho(T) \propto T$. Gli elettroni liberi si muovono con una velocità che non dipende dalla temperatura ed urtano contro la struttura degli ioni, i quali vibrano attorno ad una posizione di equilibrio → $\rho = C A_{eff} v_m \propto T$ essendo $A_{eff} = \pi x_0^2 \propto T$ (dal principio di equipartizione dell'energia) e $v_m = v_F$ per T non molto grande (dall'ipotesi di spettro discreto e dal principio di esclusione di Pauli)</i></p>

Il grafico 3D di figura 5.26 si riferisce, infine, alle relazioni tra caratteristiche strutturali e funzionali del modello microscopico, ossia modelli e interpretazioni.

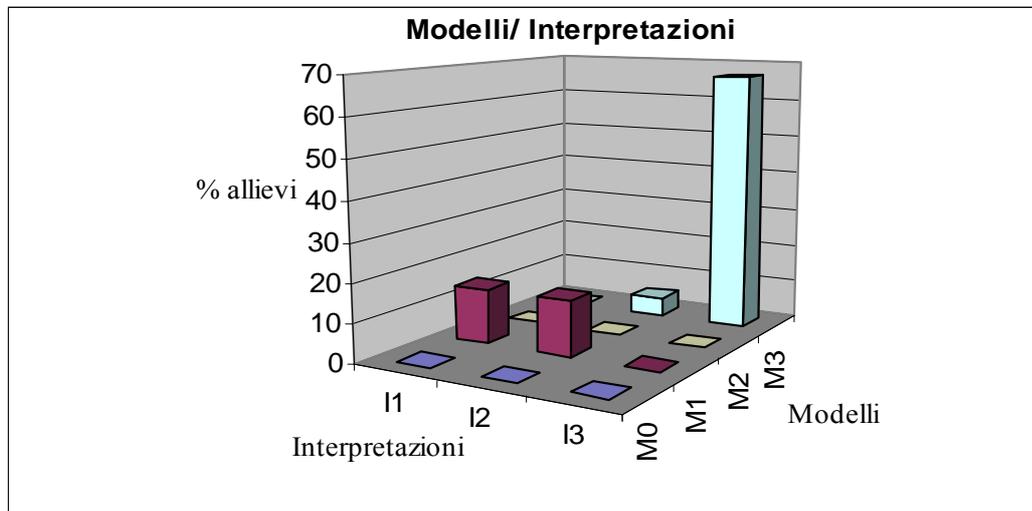


Figura 5.26

In relazione a tale rappresentazione, riteniamo utile sottolineare i seguenti aspetti:

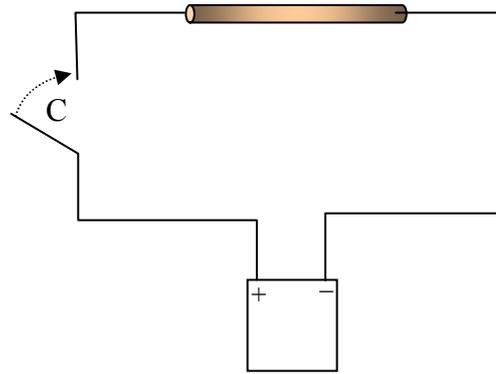
- le correlazioni tra modelli e interpretazioni si rinforza rispetto alla situazione d'ingresso. Si evidenzia, infatti, una significativa riduzione dei casi anomali relativi a carenze nelle capacità di elaborazione ed applicazione dei modelli microscopici;
- rispetto alla situazione d'ingresso si osserva, non soltanto uno sviluppo generalizzato delle conoscenze e competenze disciplinari (conoscenze macroscopiche e microscopiche, competenze di analisi macroscopica e microscopica dei fenomeni,) ma anche un'armonizzazione delle prestazioni degli allievi, ossia delle relazioni tra conoscenze possedute e loro utilizzazione per l'interpretazione di fenomeni.

5.3.2 Analisi di fenomeni elettrici transitori

Al fine di acquisire ulteriori elementi di valutazione circa l'efficacia del percorso formativo, agli allievi stato posto un quesito relativo all'analisi semiquantitativa degli andamenti di tre diverse grandezze (temperatura, corrente elettrica e resistività) durante la fase successiva l'accensione di un circuito.

La domanda posta agli allievi è la seguente:

La figura rappresenta un circuito formato da una batteria, da alcuni cavi di collegamento, da un interruttore (C) e da un conduttore elettrico. Al tempo $t=0$ l'interruttore viene chiuso.



1. Disegna il grafico qualitativo della temperatura del conduttore in funzione del tempo dall'istante in cui l'interruttore viene chiuso.



2. Disegna il grafico della corrente I che attraversa il conduttore in funzione del tempo



3. Disegna il grafico della resistività del conduttore in funzione del tempo



4. Evidenzia le relazioni tra gli andamenti di $T(t)$, $I(t)$ e $\rho(t)$

5. Fornisci un'interpretazione microscopica di tali andamenti e delle loro relazioni.

L'analisi del fenomeno richiede l'integrazione di diversi elementi di conoscenza introdotti durante il percorso formativo. La previsione degli andamenti delle tre grandezze fisiche, tuttavia, non richiede necessariamente un'analisi microscopica; essa può essere fondata, infatti, su tre leggi fenomenologiche: l'effetto Joule, che permette di prevedere l'andamento della temperatura del conduttore, la relazione fenomenologica che lega la resistenza del conduttore alla temperatura, che consente di correlare l'andamento delle resistenza con quello delle temperatura e le leggi di Ohm, che consentono di ricavare l'andamento delle corrente elettrica da quello della resistività. E' evidente, d'altra parte, che la soluzione del problema può essere fondata anche su un'adeguata elaborazione del modello microscopico.

Dall'esame delle risposte s'intendevano ricavare due diverse informazioni:

- verificare, in primo luogo, in che misura le conoscenze acquisite consentono agli allievi di prevedere l'evoluzione del fenomeno transitorio;
- valutare in che misura le conoscenze microscopiche influenzano la capacità di prevedere l'andamento delle grandezze fisiche.

Al fine di ricavare tali informazioni le risposte degli allievi sono state caratterizzate sulla base delle tre variabili binarie riportate in tabella 5.9.

Tabella 5.9

Variabile	Descrittore	Valore	Esiti (% allievi)
A	Riproduce l'andamento del fenomeno	Vero =1 Falso = 0	52,9
R	Individua le relazioni tra gli andamenti delle grandezze	Vero =1 Falso = 0	52,9
M	Interpreta microscopicamente gli andamenti delle grandezze e le loro relazioni	Vero =1 Falso = 0	41,2

L'ultima colonna della tabella riporta, invece, i risultati della correzione del test. Come si può osservare il 53% circa degli allievi riesce a riprodurre gli andamenti e a giustificare adeguatamente le relazioni tra essi, mentre una percentuale del 41 % (dunque, circa 80% degli allievi che hanno risposto correttamente) è in grado di fornire una completa interpretazione microscopica del fenomeno. Osserviamo, inoltre, che il 90 % degli allievi che riescono ad interpretare correttamente l'andamento delle grandezze fisiche appartengono all'intersezione delle classi M_3 ed I_3 . Le tre variabili cognitive sono state sottoposte ad analisi implicativa. La figura 5.27 rappresenta il grafo implicativo ottenuto. Come abbiamo già osservato a partire da un semplice esame qualitativo dei dati, esso mostra che, in termini statistici, la capacità d'interpretazione microscopica implica, con un elevato livello di significatività (96%), la capacità di analisi macroscopica.

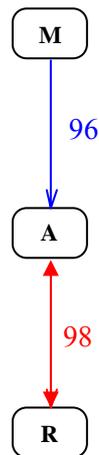


Figura 5.27

Riteniamo che le evidenze sperimentali e i risultati dell'analisi statistica permettano di concludere che, in relazione al campione di allievi analizzato, una conoscenza dei fenomeni di conduzione basata su un'adeguata comprensione del modello microscopico favorisce la capacità di interpretare l'andamento di fenomeni macroscopici. Ciò conferma e completa alcuni dei risultati emersi dalle verifiche d'ingresso (si veda la discussione di par. 5.1.6 sulle connessioni tra competenze interpretative e livelli di descrizione).

5.3.3 Il punto di vista dei discenti sull'esperienza formativa

Il test relativo al punto di vista degli allievi sull'esperienza formativa (appendice P3) mirava ad far emergere il punto di vista dei discenti su diversi aspetti. Ciò che si intendeva evidenziare era la valutazione degli allievi circa gli aspetti positivi e negativi del percorso e dell'esperienza formativa e, in particolare:

- le caratteristiche dell'ambiente formativo e dell'organizzazione didattica che influenzano negativamente l'apprendimento;
- le caratteristiche e gli strumenti che risultano più efficaci.

In relazione al primo aspetto, si osserva che gli allievi il cui processo d'apprendimento non è andato del tutto a buon fine evidenziano due caratteristiche negative del percorso: i tempi ristretti, che hanno impedito una completa assimilazione, e la necessità di un'ulteriore semplificazione dei contenuti. Al contrario, gli allievi che hanno sviluppato adeguate competenze rilevano l'opportunità di ulteriori approfondimenti relativi, in particolare, al modello quantistico e agli aspetti storici del percorso.

Per ciò che riguarda gli elementi di maggior efficacia del percorso formativo, tutti gli allievi concordano sulla valenza positiva dell'ambiente virtuale di simulazione e visualizzazione, in quanto, citando alcune risposte, “...creano uno stretto legame tra modello teorico e modello mentale (visivo)”, “...aiutano la comprensione del modello, spostano la trattazione da matematica a visiva”. Altri allievi enfatizzano l'efficacia dell'impianto didattico caratterizzato “...dall'alternanza dei registri” e da un processo di “...costruzione dei modelli microscopici basato su osservazioni sperimentali”.

Le opinioni dei discenti forniscono ulteriori ed utili elementi di valutazione. Esse, da un lato, corroborano la validità di alcune scelte didattiche, dall'altro completano le informazioni circa alcuni aspetti critici dell'organizzazione didattica. Tali informazioni sono state utilizzate per apportare delle modifiche all'ambiente didattico, in vista della successiva implementazione, illustrata nel capitolo seguente.

5.4 Sintesi dei risultati e valutazione finale

E' questo il paragrafo conclusivo del capitolo dedicato alla sintesi dei risultati dell'esperimento d'insegnamento e alla valutazione finale dell'efficacia dell'ambiente formativo implementato. In particolare, in ciò che segue, si riassumeranno gli elementi emersi dalle indagini effettuate, si fornirà una risposta alle domande di ricerca e si metteranno in evidenza gli elementi di forza e gli aspetti critici dell'impianto formativo.

Il sistema di verifica dell'apprendimento mirava a tracciare l'evoluzione di del set di conoscenze e competenze degli allievi direttamente correlate con obiettivi formativi definiti nel par. 4.3.1 e a raccogliere elementi utili a rispondere alle domande di ricerca della sperimentazione. Si sono condotti tre diversi tipi d'indagine:

- indagini d'ingresso.
- monitoraggio in itinere.
- indagini d'uscita.

Le indagini d'ingresso sono state effettuate allo scopo di caratterizzare lo stato cognitivo d'ingresso, anche al fine di raccogliere elementi utili per rispondere alle prime tre domande di ricerca.

Il monitoraggio in itinere ha avuto lo scopo di evidenziare le correlazioni tra il processo d'apprendimento degli allievi e le caratteristiche dei segmenti formativi, ciò al fine di raccogliere elementi utili per rispondere alla quarta domanda di ricerca relativa alla valutazione delle componenti e delle caratteristiche dell'ambiente didattico progettato.

Le indagini d'uscita hanno permesso, infine, di valutare gli effetti globali del percorso formativo e del processo d'insegnamento/apprendimento.

In ciò che segue, riassumendo e correlando le informazioni tratte dalle diverse indagini effettuate, si fornirà una risposta alle domande di ricerca e .si valuterà la correttezza dell'ipotesi generale del progetto di ricerca, in relazione al contesto formativo esaminato.

5.4.1 Risposta alla prima domanda di ricerca

La prima domanda di ricerca è la seguente:

Quali sono i modelli microscopici della conduzione elettrica pre-istruzione evidenziati dagli allievi?

La caratterizzazione dei modelli spontanei degli allievi è stata effettuata utilizzando gli strumenti dell'analisi fenomenografica. Sulla base degli esiti di tale analisi è stato possibile raggruppare gli allievi in quattro classi (si veda par. 5.1.4):

- **Classe M₀**: gli allievi che appartengono a questa classe non hanno evidenziato alcun modello microscopico della conduzione elettrica
- **Classe M₁**: a questa classe appartengono allievi che evidenziano un modello caratterizzato da soli portatori di carica. Alcuni di questi allievi evidenziano un modello di tipo “idraulico”, in cui le cariche fluiscono liberamente da un polo all'altro del conduttore (proprio come un flusso idraulico), in altri un modello tipo “domino”, in cui la corrente elettrica (e il trasferimento di energia) è associata non al moto dei portatori quanto piuttosto ad un fenomeno di propagazione dello stato elettrico simile all'effetto domino.
- **Classe M₂**: a questa classe appartengono gli allievi che hanno evidenziato un modello qui battezzato “ad elettroni legati”, caratterizzato dal fatto che gli elettroni di conduzione del metallo risentono di interazioni attrattive che ne limitano il movimento. In alcuni casi tale modello si manifesta come il “modello Jumping” riportato in letteratura (Wittmann, 2002), in altri come un modello in cui gli elettroni, pur non essendo fortemente vincolati agli atomi del metallo, vengono attratti da questi ultimi, in altri ancora si manifesta come un modello elettrostatico, nel quale il campo elettrico induce una separazione di carica.
- **Classe M₃**: a quest'ultima classe appartengono allievi il cui modello è strutturalmente simile al modello classico della conduzione, prevedendo elettroni liberi che interagiscono tramite urti con gli ioni fissi del metallo.

5.4.2 Risposta alla seconda domanda di ricerca

La seconda domanda di ricerca è:

in che modo i modelli posseduti dagli allievi vengono utilizzati per interpretare/prevedere fenomeni?

L'analisi delle risposte fornite dagli allievi al test d'ingresso ha permesso di caratterizzare le interpretazioni introducendo una classificazione che contempla tre livelli d'interpretazione: il livello I_1 corrisponde ad una interpretazione descrittiva, che non include elementi di analisi microscopica e non chiarisce relazioni causali, il livello I_2 che corrisponde ad un'interpretazione basata sugli elementi del modello microscopico ma che risulta in conflitto con l'interpretazione scientifica, il livello I_3 che corrisponde ad un'interpretazione microscopica sostanzialmente coincidente con quella scientifica.

Nel paragrafo 5.1.5 abbiamo mostrato che, sebbene, in media, il livello d'interpretazione dei fenomeni si arricchisce al crescere della completezza delle conoscenze microscopiche, tuttavia, le correlazioni tra competenze esplicative e conoscenze microscopiche non sono molto marcate: diversi casi, infatti, sfuggono a tale regola. Abbiamo osservato, in particolare, che allievi che possiedono modelli microscopici diversi evidenziano lo stesso livello d'interpretazione e che, viceversa, allievi che possiedono modelli microscopici sostanzialmente coincidenti forniscono interpretazioni qualitativamente dissimili.

Una possibile interpretazione di tale evidenza può essere avanzata sulla base di quanto abbiamo osservato nel paragrafo 5.1.6, ossia il fatto che le competenze esplicative sono indipendenti, in una certa misura, dal livello di descrizione dei fenomeni. Ciò che possiamo concludere è, pertanto, che le competenze d'interpretazione microscopica presuppongono (come è ovvio) adeguati elementi di conoscenza, ma dipendono anche dall'attivazione di risorse procedurali che sono indipendenti dal particolare tipo di informazioni (elementi di conoscenza) che tali risorse elaborano.

Come già osservato precedentemente, tali considerazioni hanno indotto delle modifiche al percorso preventivato, finalizzate al potenziamento delle attività che prevedono l'applicazione di procedure di tipo logico deduttivo.

5.4.3 Risposta alla terza domanda di ricerca

La terza domanda di ricerca è:

quali sono gli aspetti delle conoscenze pregresse degli allievi che possono influenzare negativamente il processo d'apprendimento e lo sviluppo di adeguate competenze interpretative?

Nel paragrafo 5.1.6 abbiamo mostrato che la qualità dell'interpretazione fornite dagli allievi è fortemente dipendente dal tipo d'interazioni previste dal modello spontaneo. Tale evidenza sperimentale ha permesso di concludere che un'inadeguata rappresentazione delle interazioni che si verificano tra i costituenti microscopici del sistema (che è uno degli elementi che caratterizza la struttura semantica del modello mentale) è un aspetto delle conoscenze spontanee, relative alla natura microscopica della conduzione elettrica, che ostacola il completo manifestarsi del potenziale esplicativo del modello individuale, ossia la capacità di elaborare le informazioni contenute nel modello individuale al fine di interpretare e prevedere fenomeni.

5.4.4 Risposta alla quarta domanda di ricerca

La quarta ed ultima domanda di ricerca è:

in che misura e sotto quali condizioni l'ambiente didattico e gli strumenti pedagogici progettati possono stimolare e supportare un'adeguata evoluzione delle conoscenze e competenze disciplinari degli allievi?

La natura e l'ampiezza della domanda richiede una risposta adeguatamente articolata fondata su un riesame delle procedure utilizzate per raccogliere le informazioni necessarie a fornire tale risposta e un'analisi retrospettiva dell'intero percorso d'insegnamento e apprendimento.

Al fine di valutare l'efficacia delle percorso d'insegnamento/apprendimento si è implementato un ricco e diversificato sistema di monitoraggio che consentisse di correlare le sequenze didattiche, in cui è stato suddiviso l'intero percorso, al processo d'apprendimento degli allievi. Ciascuna sequenza d'insegnamento/apprendimento è stata progettata sulla base di presupposti pedagogici e ipotesi di ricerca adeguatamente esplicitate e mirava a favorire il

graduale sviluppo di conoscenze e competenze direttamente correlate agli obiettivi formativi del percorso didattico. In particolare, ciascuna sequenza mirava a conseguire due obiettivi: da un lato favorire l'evoluzione di alcune conoscenze e competenze degli allievi, dall'altro raccogliere evidenze circa la correttezza dei presupposti pedagogici e delle ipotesi circa gli effetti sull'apprendimento che ne hanno ispirato la progettazione.

L'implementazione di ciascuna sequenza ha assunto, dunque, le caratteristiche di un autoconsistente *micro-esperimento d'insegnamento* (in contrapposizione al *macro – esperimento* rappresentato dall'intero percorso), che si pone un delimitato set di obiettivi, è fondato su ipotesi adeguatamente esplicitate, è finalizzato a rispondere ad alcune domande sperimentali.

La risposta a tali domande di ricerca costituisce, da un lato, lo strumento mediante il quale è stata valutata l'efficacia degli strumenti, dei materiali e delle scelte didattiche che caratterizzano alcuni segmenti del percorso didattico, dall'altro, lo strumento attraverso il quale valutare la correttezza dell'ipotesi generale che caratterizza l'intero progetto.

E' conveniente suddividere l'intero percorso in tre segmenti: il segmento 1, che comprende le prime due sequenze didattiche, il segmento 2 che coincide con la sequenza 3, ed il segmento 3 che comprende le sequenze 4 e 5. Tale suddivisione è motivata dal fatto che in corrispondenza dell'inizio e delle fine di questi segmenti sono stati effettuati controlli finalizzati a caratterizzare i modelli microscopici della conduzione espressi dagli allievi. I dati raccolti a seguito di tali controlli consentono, dunque, di valutare l'effetto dei singoli segmenti sullo sviluppo delle conoscenze e competenze degli allievi.

Informazioni circa gli effetti dei tre segmenti didattici possono essere desunte dall'analisi della figura 5.28. Essa rappresenta le traiettorie d'apprendimento seguite dagli allievi i termini di classificazione M.

Modelli

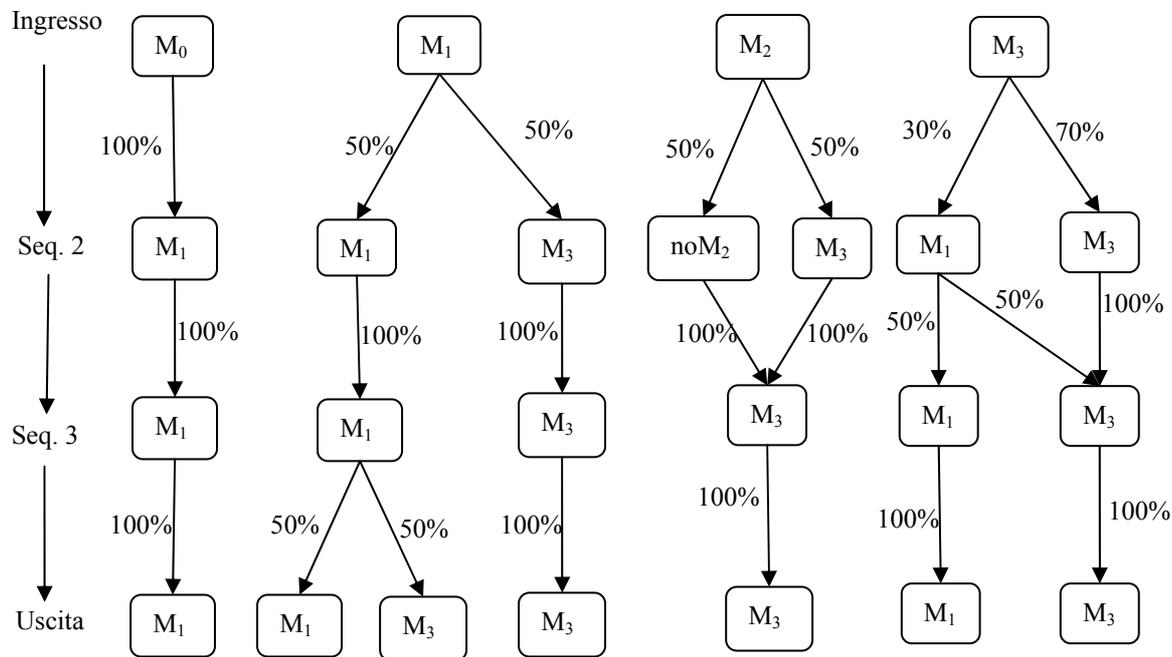


Figura 5.28

Il segmento 1, compreso tra la rilevazione d'ingresso ed il controllo effettuato alla fine della sequenza 2, rappresenta la fase introduttiva del percorso in cui vengono richiamate le conoscenze macroscopiche di base (relative all'elettrostatica e alla conduzione elettrica) e vengono proposte semplici osservazioni sperimentali dalle quali gli allievi potessero trarre informazioni utili ad evolvere i propri modelli. Un'analisi dettagliata degli effetti di tale porzione del percorso è riportata nei paragrafi 5.2.1, 5.2.2 e 5.2.3. E' questa una fase cruciale dell'iter formativo che ha prodotto effetti significativi sullo sviluppo delle conoscenze degli allievi e che ha influenzato in modo marcato la successiva evoluzione cognitiva. Le osservazioni effettuate e le attività proposte hanno indotto una ristrutturazione, in molti casi profonda, delle conoscenze spontanee e degli schemi d'interpretazione³⁰, determinata dalla necessità di includere nei propri modelli le nuove informazioni tratte dalle osservazioni sperimentali.

³⁰ Si veda, in particolare, la discussione del par. 5.2.4 in cui si riportano i risultati di un'analisi fine di alcuni casi particolari.

L'analisi delle traiettorie cognitive riportate in figura 5.28 e l'esame di altre informazioni riportate nei paragrafi precedenti, evidenzia, tuttavia, che gli effetti a lungo termine del segmento 1 dipendono dallo stato iniziale degli allievi. Gli allievi che in ingresso avevano evidenziato conoscenze più povere e competenze interpretative carenti (allievi appartenenti alla classe M_0 e, in parte, alla classe M_1) non riescono a utilizzare le informazioni fornite per apportare le modifiche necessarie per la piena realizzazione del cambiamento concettuale. Sebbene le conoscenze di tali allievi registrino un'evoluzione, il loro processo d'apprendimento si arresta ad uno stadio intermedio e, ad eccezione di qualche caso, gli stimoli e le attività di supporto offerti durante le fasi successive del percorso non sono sufficienti per riattivare tale processo. Per tali allievi il processo d'apprendimento risulta fortemente influenzato dalle conoscenze spontanee che, in uscita, risultano rinforzate, piuttosto che sostituite da conoscenze più adeguate (si veda par. 5.3.1).

Le attività e le strategie didattiche che caratterizzano il segmento 1 risultano, invece, estremamente efficaci per alcuni allievi inclusi, in ingresso, nella classe M_1 e per tutti gli allievi appartenenti alle classe M_2 . Le osservazioni sperimentali effettuate durante la sequenza 2, attivano in questi allievi un salutare conflitto cognitivo, a seguito del quale essi abbandonano il modello spontaneo, per sostituirlo (alcuni a seguito della successiva sequenza 3) con un modello sostanzialmente coincidente con il modello classico.

La piena attivazione del ciclo didattico, caratterizzato da una stretta integrazione, e un costante rimando, tra osservazioni macroscopiche ed esperimenti e attività di modellizzazione microscopica supportata dall'uso dell'ambiente virtuale di simulazione e visualizzazione progettato, durante le fasi successive del percorso didattico, ha permesso a circa il 70% degli allievi di completare e consolidare il processo d'apprendimento.

In particolare, le attività proposte durante la sequenza 3 hanno fornito agli allievi, che durante la sequenza precedente avevano abbandonato un modello spontaneo inadeguato, utili supporti per sostituirlo con il modello classico della conduzione.

Le fasi successive del percorso (segmento 3) hanno permesso di evidenziare che tutti gli allievi che alla fine della sequenza 3 hanno sviluppato un adeguato modello microscopico sono riusciti ad evolvere ulteriormente il proprio modello, effettuando la transizione al modello quantistico e consolidando le proprie competenze interpretative e predittive, sia negli aspetti qualitativi che quantitativi. In particolare, alla fine del percorso il 65% degli allievi evidenzia un soddisfacente livello di realizzazione degli obiettivi didattici definiti nel paragrafo 4.3.1.

In ultima analisi, possiamo fornire la seguente risposta alla domanda di ricerca:

i risultati dell'esperimento d'insegnamento evidenziano che l'ambiente didattico e gli strumenti pedagogici implementati supportano un'adeguata evoluzione delle conoscenze e competenze disciplinari degli allievi, a condizione che lo sviluppo delle conoscenze sia fondato sull'elaborazione autonoma delle conoscenze macroscopiche e delle informazioni tratte da osservazioni macroscopiche. Si osserva, infatti, che gli allievi che non riescono a revisionare autonomamente i propri modelli microscopici sulla base delle osservazioni sperimentali (proposte durante la prima fase del percorso), tendono a mantenere modelli e interpretazioni fortemente influenzati dalle conoscenze spontanee.

Sulla base delle evidenze tratte dalle indagini effettuate riteniamo che gli aspetti e le componenti dell'ambiente didattico che risultano più efficaci sono:

- la stretta connessione tra osservazioni macroscopiche e procedure di costruzione dei modelli microscopici che hanno caratterizzato organizzazione dei contenuti ed il ciclo didattico implementato (si veda anche la discussione riportata nel paragrafo seguente);
- le strategie di costruzione e revisione dei modelli centrate sulle simulazioni e gli ambienti virtuali progettati;
- la costruzione del modello microscopico fondata sulle osservazioni effettuate con i semplici esperimenti che caratterizzano la sequenza 2.

Riteniamo, inoltre, che le caratteristiche dell'ambiente e dell'organizzazione didattica che necessitano di modifiche sono:

- i tempi: un incremento della durata del percorso e una riduzione della durata dei singoli interventi, in modo da favorire una migliore l'assimilazione dei concetti.
- la fase iniziale del iter formativo in cui si evidenziano gli aspetti macroscopici dei fenomeni di conduzione e si conducono le osservazioni su cui fondare la costruzione del modello classico. In particolare, si ritiene necessario arricchire tale fase del percorso, mediante individuazione di soluzioni didattiche che possano favorire l'apprendimento degli allievi più deboli.

5.4.5 Valutazione della correttezza del presupposto pedagogico fondamentale e ulteriori osservazioni

A conclusione di questo capitolo riteniamo opportuno sottolineare alcuni aspetti generali emersi dalle indagini.

La prima considerazione riguarda gli effetti globali del processo d'insegnamento/ apprendimento. Gli esiti delle indagini d'uscita evidenziano, non soltanto uno sviluppo generalizzato delle conoscenze e competenze disciplinari, ma anche un'armonizzazione delle prestazioni degli allievi, che si manifesta in una marcata correlazione tra conoscenze possedute (classificazione M) e loro utilizzazione per l'interpretazione di fenomeni (classificazione I). Per quanto illustrato precedentemente, a proposito delle evidenze circa l'indipendenza delle competenze esplicative dal contesto problematico, riteniamo che lo sviluppo di tali competenze (confermate anche dalla discussione di par 5.3.2) costituisca uno degli esiti didattici più significativi del percorso formativo.

La seconda considerazione riguarda le relazioni tra conoscenze microscopiche e comprensione dei fenomeni macroscopici. Le indagini d'ingresso hanno permesso di evidenziare che gli allievi che non hanno sviluppato adeguati modelli dei processi microscopici trovano difficoltà a fornire spiegazioni qualitative dei fenomeni macroscopici. Gli esiti del test finale (par. 5.3.2) completano tale informazione, in quanto mostrano che un'adeguata comprensione del modello microscopico favorisce la capacità di interpretare l'andamento di fenomeni macroscopici che richiedono analisi relativamente complesse. Pertanto,

se nel paragrafo precedente abbiamo sottolineato il fatto che un appropriato sviluppo dei modelli microscopici della conduzione è fondato su una corretta e autonoma elaborazione di informazioni tratte osservazioni macroscopiche, la precedente considerazione permette formulare l'affermazione complementare, ossia che lo sviluppo di appropriate conoscenze dei processi microscopici favorisce la capacità di estrarre dai fenomeni macroscopici informazioni finalizzate alla loro interpretazione.

Riteniamo che quest'ultima considerazione, che sottolinea la stretta interdipendenza tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze, costituisca una conferma sperimentale del presupposto pedagogico che ha ispirato l'intero progetto di ricerca discusso in questa tesi e che ha guidato la progettazione delle diverse componenti dell'ambiente didattico.

Capitolo 6. Revisione del progetto didattico e seconda fase di verifica

Sulla base degli esiti dell'esperimento pilota sono state apportate alcune modifiche al progetto didattico. Per le ragioni espresse nel par. 5.4.4, tali modifiche hanno riguardato sia l'organizzazione temporale degli interventi didattici, sia l'organizzazione didattica della fase iniziale dell'iter formativo. Il progetto didattico, così revisionato, è stato sperimentato in una quinta classe del "Liceo scientifico Galileo Galilei" di Palermo. In questo capitolo si illustreranno le principali caratteristiche dell'ambiente didattico, mettendo in evidenza le differenze rispetto alla sperimentazione pilota. Si riporteranno, inoltre, alcuni dei risultati dell'indagine effettuata, confrontandoli con gli esiti dell'esperimento pilota.

Si rileva che il sistema di controllo dell'apprendimento ha utilizzato un set di strumenti di verifica più ampio di quello utilizzato durante l'indagine pilota (incluse registrazioni audio e protocolli strutturati). Tuttavia, al fine di operare un confronto diretto tra le due sperimentazioni, si riporteranno soltanto le informazioni estratte utilizzando criteri, metodologie e strumenti di indagine analoghi a quelli utilizzati durante l'indagine pilota. Per ciò che riguarda i dettagli metodologici si rimanda, pertanto, a quanto illustrato nei capitoli precedenti.

6.1 Contesto sperimentale, obiettivi dell'indagine e revisione del progetto didattico

In ciò che segue verrà precisata la natura del contesto sperimentale, evidenziandone i vincoli e le caratteristiche. Verranno, inoltre, esplicitati gli obiettivi e le domande di ricerca dell'indagine, la struttura e le componenti del percorso didattico sperimentato.

6.1.1 Caratterizzazione del contesto sperimentale

Ambientazione

La sperimentazione è stata effettuata durante le ore curricolari (e in parte extra - curricolari) del corso di fisica di una V classe del “Liceo Scientifico Galileo Galilei” di Palermo. La durata complessiva della sperimentazione è stata di 12 ore (più altre 4 ore di attività pomeridiane³¹) e ad essa hanno partecipato 20 studenti. L’attività di docenza è stata condotta dallo scrivente; durante gli interventi erano, inoltre, presenti il docente di fisica della classe (che è anche supervisore SSIS) e due allievi SSIS (che avevano partecipato come discenti all’esperienza pilota) con il ruolo di osservatori e tutor per le attività sperimentali.

Vincoli

I vincoli esterni all’implementazione del progetto sono stati determinati dalla necessità di adattare l’iter formativo all’organizzazione dell’istituzione scolastica e alla necessità, espressa dal docente della classe, di adattare il percorso formativo alle esigenze della programmazione curricolare di fisica (inerenti anche la valutazione degli allievi).

In particolare, i vincoli principali di cui si è dovuto tener conto sono i seguenti:

- la durata complessiva della sperimentazione (12 ore curricolari) e l’organizzazione temporale degli interventi (la durata delle singole sessioni è stata compresa tra un ora e due ore);
- la necessità di organizzare in modo accurato le attività previste in funzione della disponibilità dei laboratori;
- la necessità, espressa dal docente della classe, di enfatizzare aspetti del percorso che potessero costituire elementi di stimolo e motivazione per gli allievi;

³¹ Tale attività extracurricolare ha riguardato la trattazione della teoria a bande e ad essa hanno partecipato, a titolo volontario, otto allievi.

- la necessità di predisporre materiali aggiuntivi di approfondimento e supporto per lo studio a casa e di prove di verifica finalizzate alla valutazione istituzionale degli allievi³².

Natura degli allievi e variabili climatiche

Il gruppo di allievi che ha partecipato alle attività era abbastanza eterogeneo, sia in relazione al livello di motivazione che al livello delle conoscenze di base. In particolare, sulla base delle informazioni tratte durante le prime fasi della sperimentazione e di quelle fornite dal docente di fisica della classe, soltanto il 40% circa degli allievi ha evidenziato conoscenze di base adeguate, mentre per il restante 60% tali conoscenze sono risultate carenti. Analoghe carenze si sono riscontrate nei livelli di motivazione. Infatti, come rilevato dal docente di fisica, già dall'inizio dell'anno scolastico, l'interesse nei confronti della disciplina e l'impegno degli allievi era calato notevolmente rispetto agli anni precedenti. Il tentativo di ravvivare l'interesse e la motivazione degli allievi nei confronti della fisica, è stato uno dei motivi che ha spinto il docente a partecipare al progetto di sperimentazione. Da qui la sua richiesta di potenziare tutte quelle attività che potessero stimolare l'interesse e l'impegno degli allievi.

6.1.2 Obiettivi della sperimentazione e domande di ricerca

In termini generali, lo scopo principale della sperimentazione era quello di completare le informazioni estratte dalla prima indagine sperimentale, sia in termini di valutazione delle concezioni spontanee e loro variabilità in funzione dell'età e del livello d'istruzione degli allievi, sia in termini di valutazione dell'efficacia delle scelte progettuali. Inoltre, si intendeva valutare in che misura il percorso formativo potesse stimolare l'interesse degli allievi e orientare il loro successivo percorso di studi verso scelte universitarie di tipo scientifico (in particolare, verso il corso di laurea in fisica).

³² Tali prove di verifica aggiuntive sono state preparate dai due allievi SISIS, nell'ambito delle attività connesse al tirocinio, sotto la supervisione dello scrivente e del docente di classe.

Le domande di ricerca cui la sperimentazione mirava di fornire una risposta possono essere così formulate:

1. Quali sono i modelli microscopici della conduzione elettrica pre-istruzione evidenziati dagli allievi (in termini di struttura e funzionalità)? E in che misura essi differiscono da quelli (espressi da allievi laureati) rilevati nell'ambito della sperimentazione pilota?
2. In che misura gli esiti della presente indagine confermano i risultati dell'esperimento pilota?
3. In che misura l'ambiente didattico predisposto può orientare le scelte universitarie degli allievi, stimolando l'interesse verso lo studio della fisica?

6.1.3 Il percorso didattico

Come si è detto, l'impianto didattico sperimentato presenta alcune differenze rispetto a quello implementato nell'ambito dell'esperimento pilota. Alcune modifiche sono state determinate dagli esiti dell'esperimento pilota, altre dalla necessità di rispondere alle peculiarità della domanda formativa espressa dai dagli allievi. Le principali modifiche sono le seguenti:

- un'articolazione del percorso formativo in sessioni di breve durata (al più due ore) al fine di favorire una migliore assimilazione dei concetti;
- il potenziamento delle attività pratiche condotte autonomamente dagli allievi e l'attivazione di strategie didattiche finalizzate a stimolare l'interesse e la motivazione degli allievi più deboli;
- la predisposizione di interventi e lo stimolo di discussioni relative alle modalità di costruzione e progresso della conoscenza scientifica, con particolare attenzione ai rapporti tra modelli scientifici ed osservazioni sperimentali. Ciò al fine di stimolare l'interesse degli allievi più dotati;
- la modifica della prima parte del percorso formativo, quella relativa alle osservazioni qualitative, mediante l'inclusione di una sequenza

didattica centrata sull'analogia gravitazionale dei fenomeni elettrici illustrata nel paragrafo 3. 5;

La tabella 6.1 rappresenta l'articolazione in sequenze didattiche del percorso formativo. Se si eccettua la sequenza S1, relativa all'analogia gravitazionale dei fenomeni elettrici, il percorso si è sviluppato secondo quanto già illustrato nel capitolo 4 (si veda, in particolare, il paragrafo 4.3 per la descrizione dettagliata del percorso concettuale e delle sequenze da S2 a S6).

Sequenza	Argomento
<i>S0</i>	Elettrostatica e leggi di Ohm da un punto di vista macroscopico
<i>S1</i>	Analogia meccanica della conduzione elettrica
<i>S2</i>	Effetti elettrotermici
<i>S3</i>	Costruzione di un modello microscopico della conduzione
<i>S4</i>	Andamento di $\rho(T)$ e confronto con le previsioni del modello
<i>S5</i>	Prima revisione del modello (influenza delle vibrazioni reticolari)
<i>S6</i>	Seconda revisione del modello (quantizzazione dei livelli elettronici e statistica di Fermi - Dirac)

La sequenza S0, relativa alle conoscenze di base, è stata trattata dal docente di fisica della classe, nell'ambito della ordinaria attività curricolare. Durante lo svolgimento di tale sequenza sono stati affrontati i contenuti che tradizionalmente caratterizzano la trattazione dell'elettrostatica e della corrente elettrica da un punto di vista macroscopico (fenomeni di elettrizzazione, forza elettrica, campo elettrico, potenziale elettrico e differenza di potenziale, conduttori in equilibrio elettrostatico, corrente elettrica e leggi di Ohm).

Durante la sequenza S1 è stata introdotta l'analogia meccanica dei fenomeni elettrici illustrata nel paragrafo 3.5 ed è stato proposto l'esperimento del "piano inclinato ad ostacoli" la cui scheda guida è riportata in appendice A1. Le sequenze successive sono state implementate in modo sostanzialmente analogo a quanto descritto nei capitoli 4 e 5. Inoltre, un gruppo di allievi ha partecipato, su base volontaria, ad un attività sulla teoria a bande, centrata sull'uso degli strumenti e le strategie didattiche descritte nel capitolo 3.

6.2 Situazione d'ingresso e confronto con gli esiti dell'esperimento pilota

In questo paragrafo si descriveranno gli esiti delle indagini d'ingresso e si confronteranno con quelli dell'indagine pilota al fine di individuare regolarità e differenze. Gli aspetti delle conoscenze d'ingresso sottoposti ad indagine, così come gli strumenti di verifica, i criteri di classificazione e i metodi di analisi, sono analoghi a quelli utilizzati per l'indagine pilota.

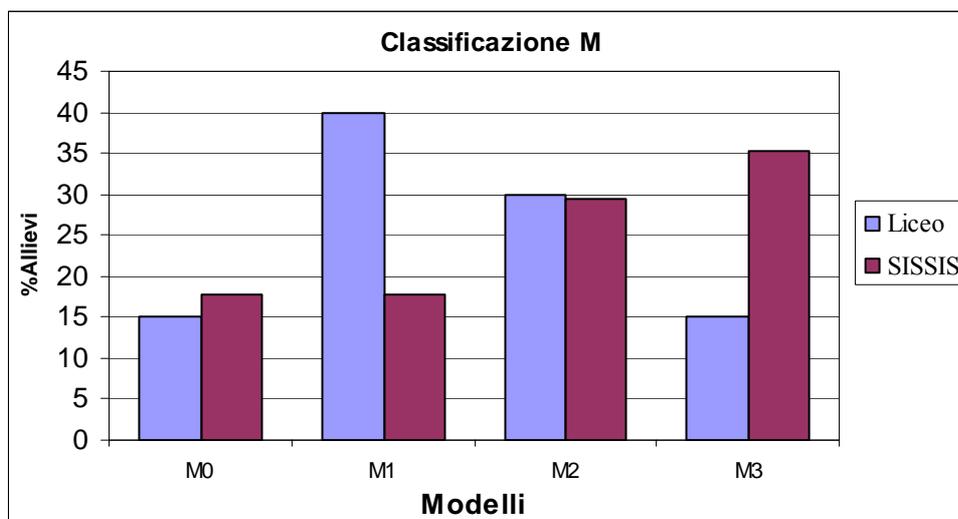
6.2.1 Conoscenze di base e modelli spontanei della conduzione elettrica

La caratterizzazione delle conoscenze di base è stata effettuata in modo analogo a quanto illustrato nel paragrafo 5.1.3. In termini quantitativi risulta che circa il 62 % degli allievi è da includere nella classe L_1 (livello basso), il rimanente 38 % nella classe L_2 (livello alto). Il confronto con la corrispondente analisi dell'indagine pilota³³ evidenzia una situazione decisamente più carente.

Modelli spontanei della conduzione elettrica: classificazione M

Nel grafico di figura 6.1 è riportata la distribuzione percentuale dei modelli emersi dal campione di allievi, in termini di componenti e struttura (classificazione M). Nello stesso grafico, a scopo di confronto, è riportata la distribuzione emersa dall'indagine pilota.

³³ I risultati dell'esperimento pilota hanno evidenziato che la classe L_1 comprende il 48% degli allievi.


Figura 6.1

Come si può notare vi sono delle differenze nella distribuzione dei modelli emersi dalle due sperimentazioni ma anche delle regolarità. Osserviamo, innanzitutto, che globalmente la distribuzione dei modelli spontanei degli allievi SSIS risulta maggiormente spostata verso rappresentazioni sostanzialmente concordi con il modello scientifico. Le differenze più marcate riguardano il modello M_1 (modello a soli elettroni) e il modello M_3 (modello a elettroni liberi + struttura fissa): le percentuali di allievi che nelle due sperimentazioni evidenziano questi due modelli risultano invertite. Al contrario, risultano sostanzialmente identiche le percentuali di allievi che non esprimono alcun modello microscopico (M_0) e quelli che esprimono il “modello ad elettroni legati” (M_2). In particolare, in relazione al modello M_2 , le discussioni con gli allievi condotte successivamente alla somministrazione del protocollo d’ingresso, hanno evidenziato chiaramente che il modello ad elettroni legati è originato dal fatto che gli allievi, nell’interpretare il processo di conduzione elettrica, richiamano il modello di atomo isolato, così come appreso in chimica, e non tengono conto delle modificazioni della struttura elettronica dovuta all’interazione tra gli atomi del metallo. Riteniamo (anche alla luce della sostanziale coincidenza delle percentuali relative al modello M_2) che anche nel caso degli allievi SSIS la presenza del modello M_2 abbia la stessa

origine e che sia da imputare, dunque, a cattivi esiti dell'istruzione di scuola superiore, non corretti dall'istruzione universitaria³⁴.

Classificazione in termini di funzionalità esplicativa del modello spontaneo

La classificazione in termini di competenze interpretative degli allievi è stata effettuata in modo analogo a quanto descritto nell'ambito dell'esperimento pilota. Il grafico di figura 6.2 riporta gli esiti della classificazione in termini di classificazione I, unitamente alla distribuzione dei livelli relativi agli allievi SSIS.

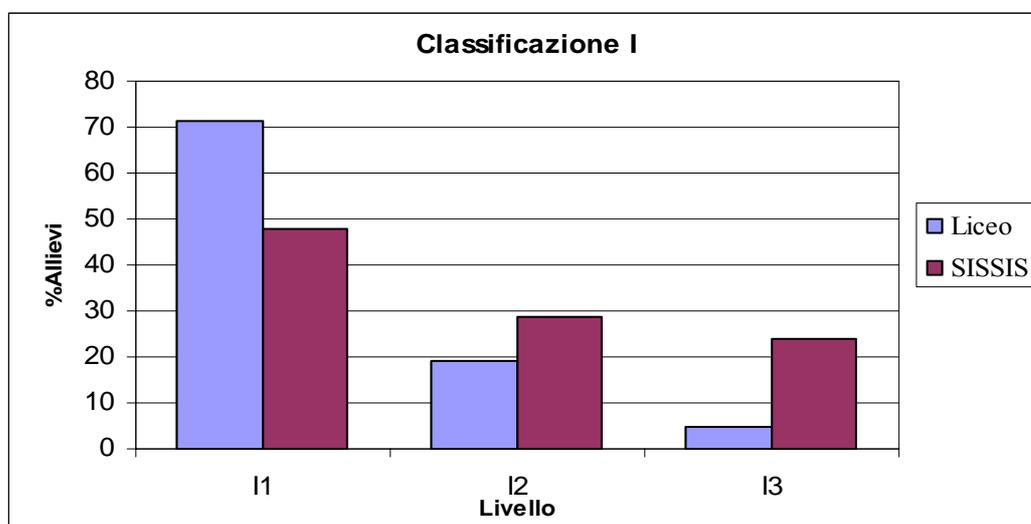


Figura 6.2

Come si può osservare il livello d'interpretazione degli studenti liceali risulta globalmente più carente di quello evidenziato dagli allievi insegnanti. Si osserva che circa il 70 % degli allievi evidenzia un livello d'interpretazione I₁. In particolare, alcuni (il 20 %) non forniscono alcuna risposta ai quesiti posti, gli altri, pur fornendo una interpretazione, non riescono a connettere le conoscenze possedute per interpretare i fenomeni proposti. Circa il 20 % degli allievi appartiene alla classe I₂. Tali allievi utilizzano il modello microscopico posseduto, tuttavia le interpretazioni fornite non sono compatibili con le corrispondenti interpretazioni scientifiche e, spesso, risultano in conflitto con l'esperienza. Si

³⁴ Riteniamo, al contrario, che, a seguito dell'introduzione di un modello elementare della conduzione nei semiconduttori, il modello ad elettroni legati possa essere rinforzato dall'istruzione universitaria. In molte trattazioni elementari, infatti, la corrente elettrica in un semiconduttore viene interpretata come dovuta alla rottura dei legami covalenti, determinata dall'agitazione termica, e al conseguente salto di un elettrone di valenza da una molecola all'altra.

conferma, inoltre, in termini statistici, un risultato emerso dall'indagine pilota, ovvero la circostanza che gli allievi che forniscono un'interpretazioni microscopiche non coerenti con le interpretazioni scientifiche appartengono alla classe M_2 . In particolare, tali allievi interpretano la resistenza elettrica come dovuta alle interazioni attrattive tra elettroni di conduzione e ioni. Soltanto un allievo fornisce un'interpretazione microscopica adeguata sia della resistenza elettrica che dell'influenza della temperatura sulle proprietà elettriche del metallo.

6.2.2 Correlazioni tra conoscenze di base, struttura e funzionalità dei modelli individuali

L'analisi delle correlazioni tra le diverse variabili cognitive oggetto d'indagine conferma i risultati dell'esperimento pilota. A tal fine è utile esaminare i grafici riportati di seguito, confrontandoli con quelli riportati nel paragrafo 5.1.5.

La figura 6.3 confronta le distribuzioni dei modelli individuali della conduzione per gli studenti L_1 e gli studenti L_2 . Come si può osservare, un più alto livello di conoscenze macroscopiche di base (studenti L_2) corrisponde, in media, ad un più alto livello di conoscenze microscopiche: infatti, i modelli microscopici evidenziati dagli allievi L_2 sono, in media, più prossimi al modello scientifico di riferimento (M_3); mentre gli allievi L_1 evidenziano in media modelli microscopici più poveri.

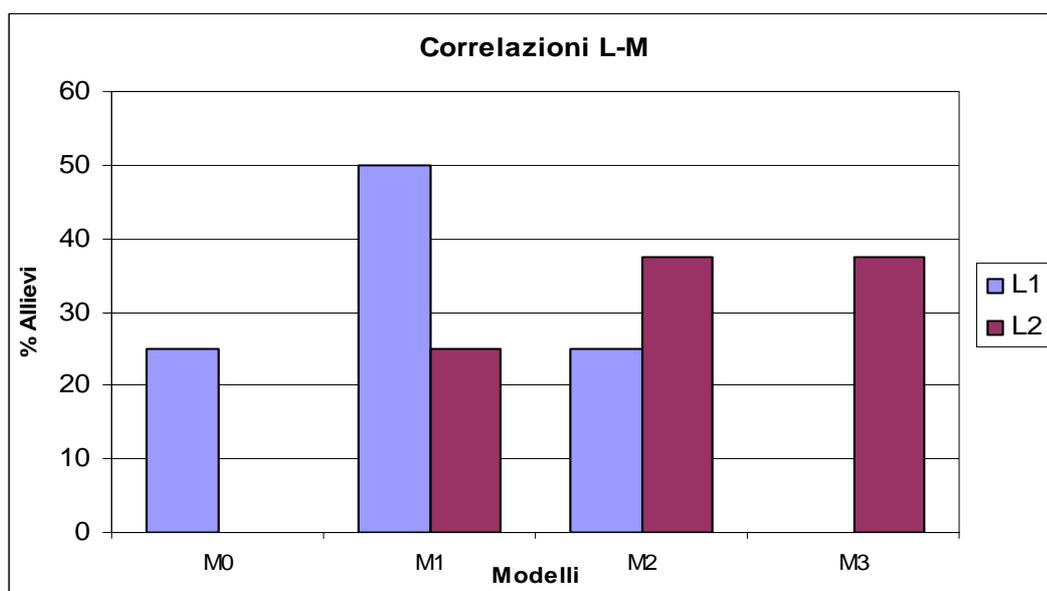


Figura 6.3

Il grafico di figura 6.4, si riferisce, invece, al legame tra la variabile L e la variabile I. Le correlazioni tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze è riscontrabile anche in termini di classificazione I, anche se in modo meno marcato.

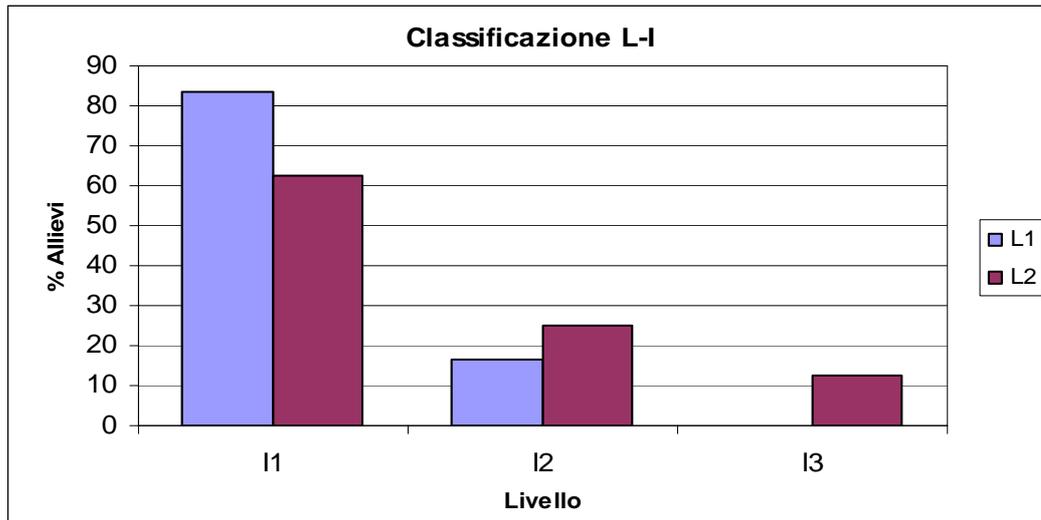


Figura 6.4

Il grafico di figura 6.5 si riferisce, infine, alle relazioni tra caratteristiche strutturali e funzionali del modello microscopico.

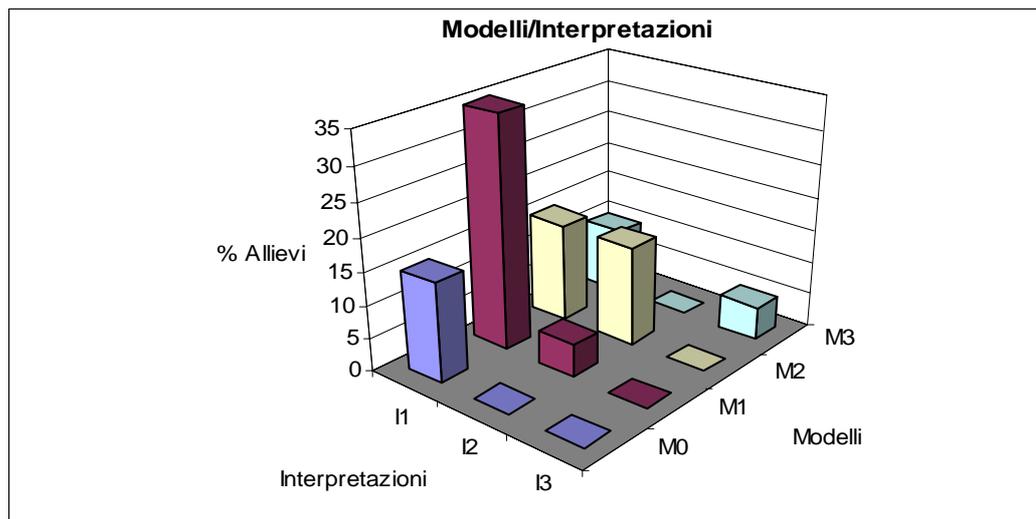


Figura 6.5

Sebbene tale rappresentazione confermi l'esistenza di una correlazione tra modello posseduto e livello d'interpretazione, tali correlazioni risultano più deboli

di quelle evidenziate dall'indagine pilota. In particolare si osserva che una buona percentuale di allievi che evidenzia il modello M_3 non è in grado di utilizzare tale modello per interpretare i fenomeni proposti. Più, in generale, i dati raccolti durante le indagini d'ingresso mostrano che il campione di studenti liceali evidenzia livelli d'interpretazione dei fenomeni, sia macroscopici che microscopici, globalmente inferiori rispetto agli allievi SSIS, come era peraltro d'attendarsi considerato il diverso grado di istruzione e maturità culturale dei due diversi campioni di allievi.

6.2.3 Competenze interpretative, livelli di descrizione dei fenomeni e aspetti critici delle conoscenze

Nell'ambito dell'analisi della situazione d'ingresso dell'esperimento pilota sono emerse alcune interessanti evidenze relative alle connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze degli allievi. In particolare, l'analisi dei dati ha posto in evidenza due elementi. In primo luogo, il fatto che l'attivazione di competenze interpretative è, in una certa misura, indipendente dal livello di descrizione e rappresentazione dei fenomeni, e, in particolare, il fatto che il possesso e la capacità di correlare le conoscenze microscopiche è connessa con la capacità di fornire spiegazioni qualitative anche dei fenomeni macroscopici. Al fine di confermare (o meno) tali evidenze sperimentali i dati delle due sperimentazioni sono stati accorpati, in modo da poter disporre di una più ampia statistica, e sono stati sottoposti ad analisi implicativa. Le variabili cognitive sottoposte ad analisi sono analoghe a quelle riportate nel paragrafo 6.1.6 e la loro descrizione è richiamata in tabella 6.2.

Tabella 6.2

Nome della variabile	Descrizione	Valore
Cmac	L'allievo possiede conoscenze macroscopiche relative ai fenomeni di conduzione	1 = vero 0 = falso
Rmac	L'allievo stabilisce relazioni tra i concetti macroscopici	1 = vero 0 = falso
Cmic	L'allievo possiede conoscenze microscopiche relative alla conduzione	1 = vero 0 = falso
Imic	L'allievo interpreta, da un punto di vista microscopico, i fenomeni proposti	1 = vero 0 = falso

La figura 6.6 rappresenta i risultati dell'analisi implicativa. Come si può osservare il diagramma evidenzia che la capacità di interpretare i fenomeni elettrici a livello microscopico (Imic) è connessa la capacità di stabilire relazioni tra i concetti a livello macroscopico (Rmac) (con una significatività del 95%). Inoltre i risultati ottenuti permettono di trarre, da un lato, la conclusione (banale) che la capacità di correlare i concetti macroscopici (Rmac) implica il possesso di tali concetti (Cmac), dall'altro che la capacità di interpretare i fenomeni a livello macroscopico implica il possesso di conoscenze microscopiche.

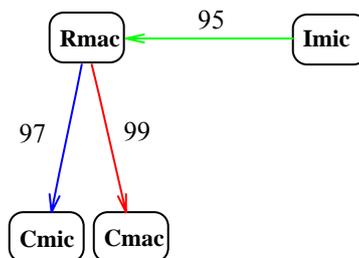


Figura 6.6

Riteniamo che gli esiti dell'analisi statistica confermino le correlazioni tra variabili cognitive evidenziate dall'indagine pilota, incrementandone il livello di significatività statistica. Essi confermano, infatti, le strette relazioni che intercorrono tra conoscenze microscopiche e macroscopiche e la relativa indipendenza delle capacità d'interpretazione dal livello di descrizione dei fenomeni.

Un altro degli elementi emersi dalla prima indagine sperimentale riguarda gli aspetti critici delle conoscenze microscopiche. Abbiamo visto, infatti, che uno degli aspetti delle conoscenze spontanee che può inficiare le competenze esplicative e predittive degli allievi sia riscontrabile in una inadeguata rappresentazione delle interazioni che si verificano tra i costituenti microscopici del sistema (in particolare tra elettroni e ioni). Al fine di sottoporre ad ulteriore verifica tale evidenza sperimentale, i dati estratti dalle due sperimentazioni sono stati accorpati e sono stati elaborati statisticamente in modo analogo a quanto illustrato nel paragrafo 5.1.7. I risultati dell'analisi implicativa sono rappresentati dal grafo implicativo di figura 6.7 (per il significato dei simboli si rimanda al paragrafo 5.1.7)

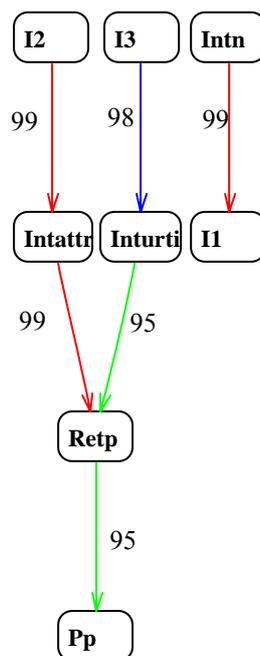


Figura 6.7

Come è facile rendersi conto osservando il grafo implicativo riportato in figura, i risultati dell'analisi confermano pienamente gli elementi emersi dell'indagine pilota, incrementandone la significatività statistica. Possiamo così concludere che l'ipotesi circa l'influenza critica della natura e del tipo d'interazioni previste dal modello individuale sulle competenze interpretative e predittive degli allievi risulta confermata dagli esiti globali delle due sperimentazioni.

Possiamo, inoltre, aggiungere che i due risultati sperimentali illustrati in questo paragrafo sembrerebbero essere indipendenti dal livello d'istruzione degli allievi sottoposti ad indagine e, in quanto tali, riteniamo possano configurarsi come risultati generalizzabili della ricerca, cioè svincolati dal particolare contesto naturalistico oggetto d'indagine.

6.3 La situazione d'uscita e confronto con gli esiti dell'esperimento pilota

In questo paragrafo riportiamo gli esiti delle indagini d'uscita, condotte utilizzando metodologie e strumenti d'indagine analoghi a quelli utilizzati nell'ambito dell'indagine pilota. Si opereranno due tipi di confronto: un confronto di tipo ingresso/uscita, finalizzato alla valutazione interna del processo d'insegnamento/apprendimento, e un confronto tra gli esiti globali delle due sperimentazioni, al fine di valutare l'effetto delle modifiche apportate al progetto didattico.

6.3.1 Modelli microscopici evidenziati in uscita e confronto ingresso/uscita

Il grafico di figura 6.8 confronta le caratteristiche dei modelli microscopici evidenziate dagli allievi in termini di classificazione M, in ingresso e in uscita. Come si può osservare, il grafico evidenzia un andamento estremamente positivo del processo d'apprendimento: alla fine dell'intervento più del 70% degli allievi (contro soltanto il 14% in ingresso) esibisce un modello strutturalmente analogo a quello scientifico, che contempla, cioè, portatori liberi che interagiscono tramite urti con il reticolo ionico.

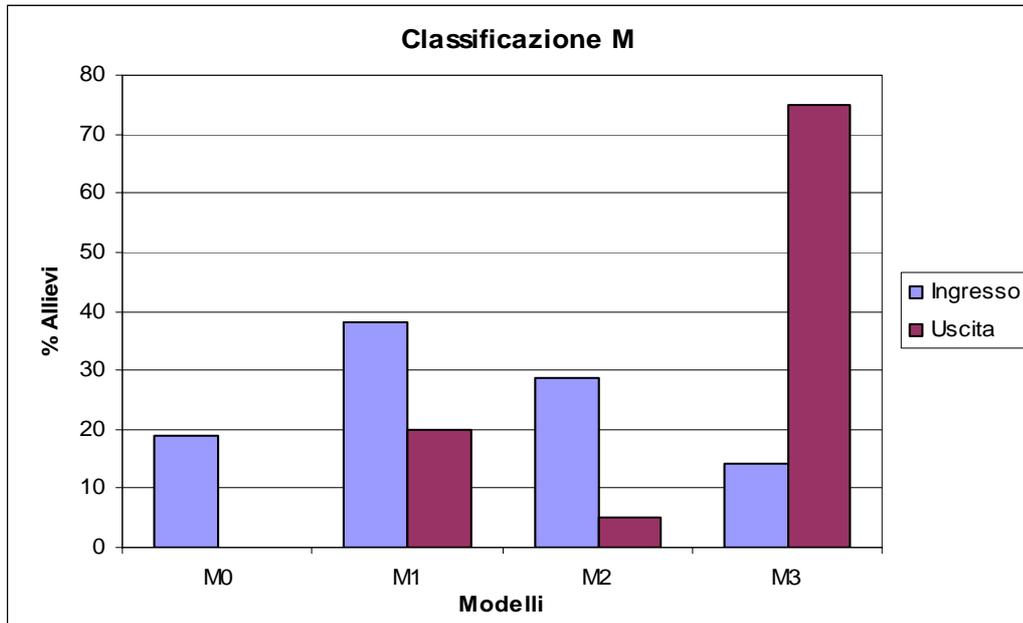


Figura 6.8

Il grafico di figura 6.9 si riferisce, invece, al confronto ingresso/uscita in termini di classificazione I (natura delle interpretazioni). Tale rappresentazione conferma gli esiti positivi del processo d'apprendimento. Infatti, se da un lato il numero di allievi che in ingresso non erano in grado di fornire risulta dimezzato, dall'altro la percentuale di allievi che in uscita evidenzia un livello d'interpretazione microscopica adeguata (I₃) risulta notevolmente cresciuto (di circa 8 volte) rispetto alla situazione d'ingresso.

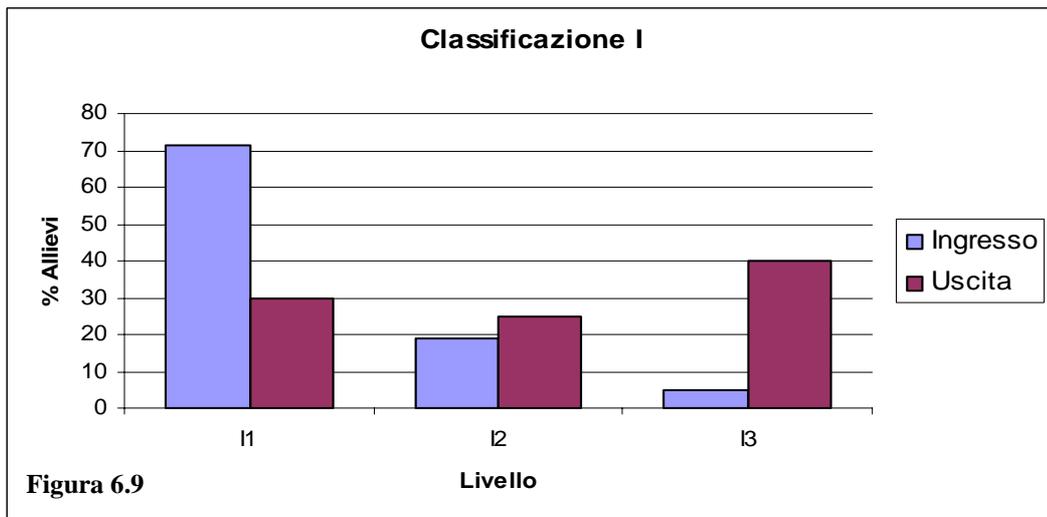


Figura 6.9

Il grafico 3D di figura 6.10 si riferisce, infine, alle relazioni tra caratteristiche strutturali e funzionali del modello microscopico, ossia modelli e interpretazioni.

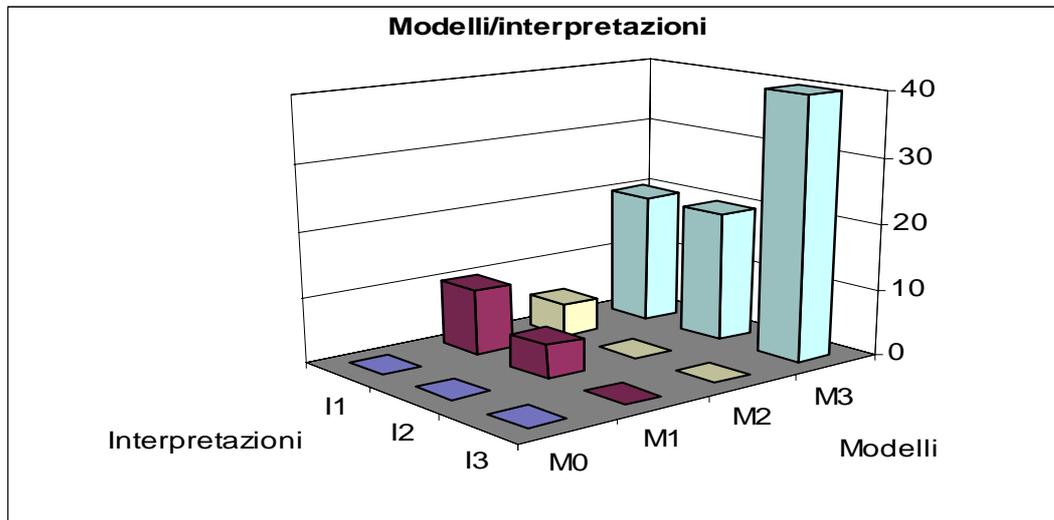


Figura 6.10

Come si può osservare la situazione d'uscita risulta notevolmente migliorata rispetto a quella d'ingresso. Infatti, più del 70% degli allievi evidenzia un modello di tipo M₃. In particolare, percentuale relativamente elevata di allievi (circa il 40%) è in grado di interpretare i fenomeni proposti utilizzando il modello quantistico della conduzione nei metalli.

6.3.2 Confronto con gli esiti dell'indagine pilota

Il confronto tra gli esiti delle due sperimentazioni non può essere realizzato mediante una comparazione in termini assoluti dei dati d'uscita. Infatti, considerata le notevoli differenze, evidenziate dalle indagini d'ingresso, tra i due campioni di allievi, al fine di ottenere informazioni significative è necessario riferire i dati d'uscita di ciascuna sperimentazione alla corrispondente situazione rilevata in ingresso. Un modo semplice per ottenere tale risultato, in relazione a una data classificazione, consiste nel confrontare le differenze percentuali rispetto alla situazione d'ingresso. Consideriamo, ad esempio, la classificazione M. Sia n_{M_i} il numero di allievi che in ingresso appartengono alla classe M_i e sia N_{M_i} il

numero di allievi che in uscita appartengono alla medesima classe. La differenza percentuale tra questi due numeri rispetto alla situazione d'ingresso è:

$$D_{M_i} = \frac{N_{M_i} - n_{M_i}}{n_{M_i}} 100$$

In modo del tutto analogo è possibile costruire il parametro D_{I_i} relativo alla classificazione I. E' questo il parametro che utilizzeremo per confrontare gli esiti delle due sperimentazioni in termini di classificazione M ed I.

Le distribuzioni delle D_M e D_I , per le classificazioni M ed I sono riportate rispettivamente nelle figure 6.11 e 6.12.

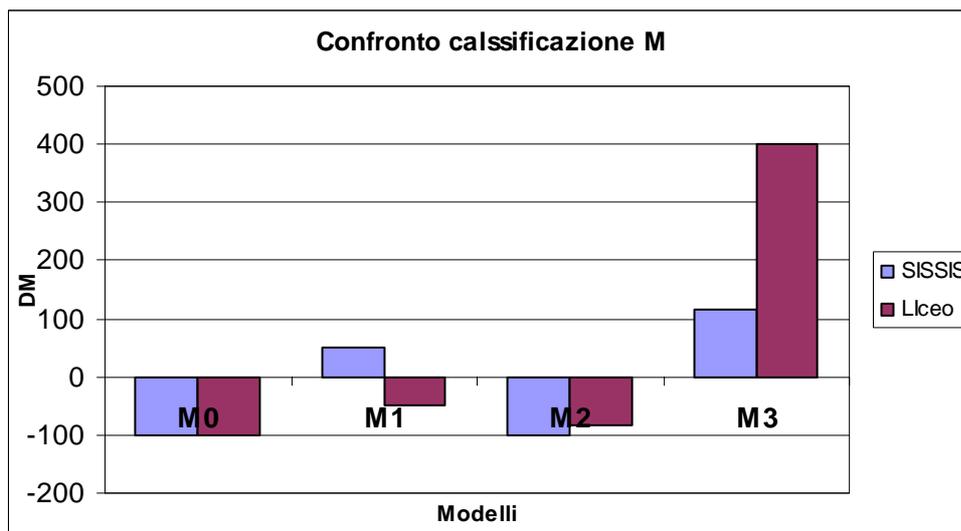


Figura 6.11

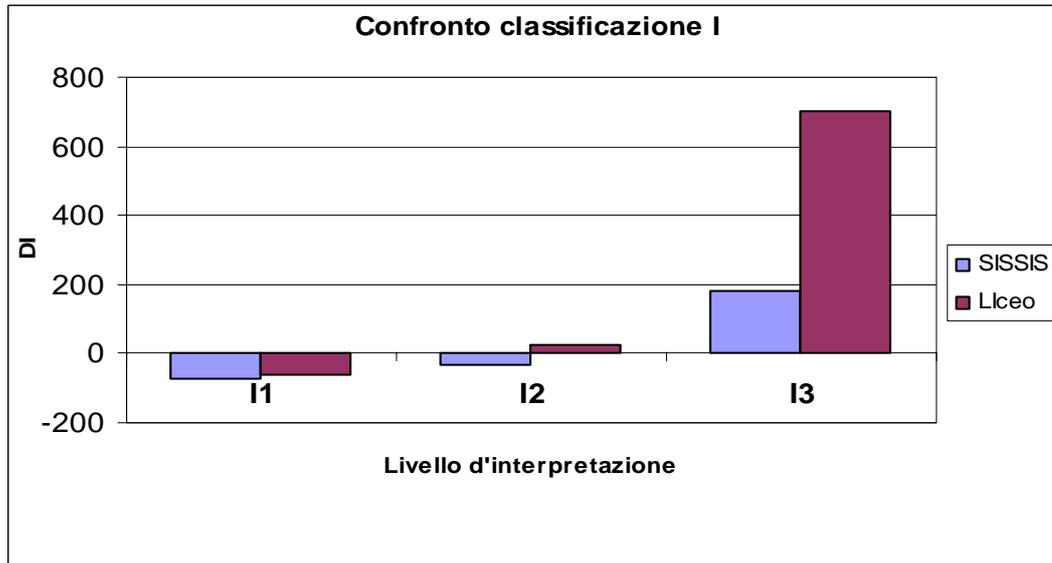


Figura 6.12

Riferendoci alla classificazione M (fig. 6.11) il dato più significativo riguarda il modello M_3 . Come si può osservare per gli studenti liceali la variazione percentuale D_{M_3} rispetto alla situazione d'ingresso risulta circa 4 volte maggiore di quella relativa agli allievi SSIS. Un analogo considerazione si può applicare alla classificazione I. Si osserva, infatti, che la D_{I_3} relativa agli studenti di liceo risulta anch'essa circa quattro volte maggiore di quella relativa agli allievi SSIS.

Al fine di completare l'informazione contenuta nei due grafici precedentemente illustrati, in figura 6.13 sono rappresentate, per entrambi i campioni di allievi, le transizioni ingresso/uscita tra classi M.

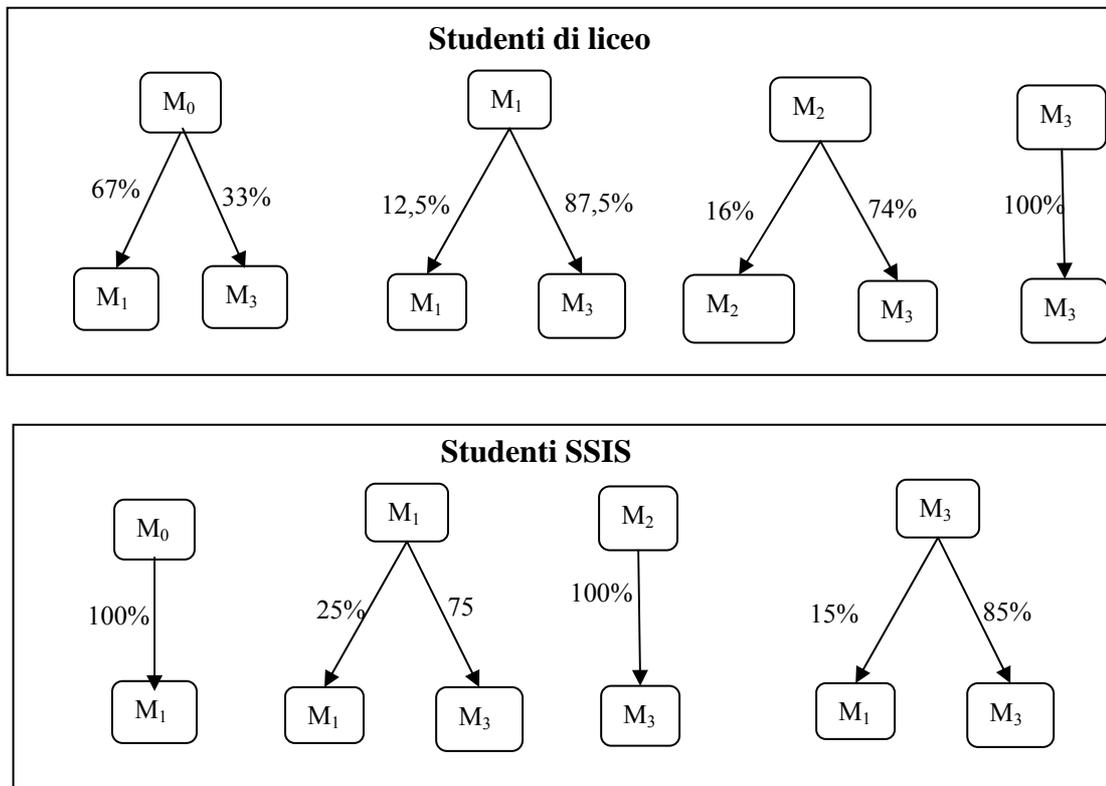


Figura 6.13

Ciò che riteniamo utile evidenziare è il percorso d'apprendimento degli allievi che in ingresso avevano evidenziato i modelli più poveri M_0 ed M_1 . In relazione agli allievi di liceo che in ingresso non avevano espresso alcun modello microscopico (classe M_0), notiamo che alcuni di essi riescono ad effettuare la transizione al modello M_3 , più prossimo al modello scientifico, mentre gli allievi SSIS appartenenti in ingresso alla classe M_0 si fermano al modello elementare M_1 (modello a soli portatori). In relazioni alla classe M_1 notiamo che, rispetto agli allievi SSIS, una percentuale maggiore di studenti di liceo effettua la transizione al modello M_3 .

Riteniamo che le precedenti analisi permettano di trarre due conclusioni:

- 1) tenendo opportunamente conto delle diverse caratteristiche evidenziate dagli allievi in ingresso, gli esiti percorso formativo degli studenti di liceo risulta globalmente migliore di quello degli allievi SSIS;
- 2) i risultati del confronto dei percorsi d'apprendimento dei due campioni di allievi sembrano evidenziare che il percorso didattico rivolto agli studenti di liceo

ha favorito maggiormente l'apprendimento degli allievi che in ingresso avevano evidenziato modelli più poveri.

Nel paragrafo 6.4 approfondiremo tali aspetti, evidenziandone le correlazioni con il processo d'apprendimento relativo alle prima fase del percorso didattico (in particolare le sequenze 1 e 2).

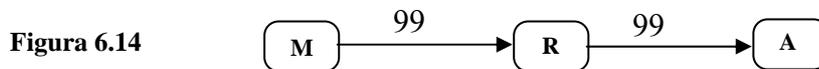
6.3.3 Esiti relativi all'analisi dei fenomeni transitori

In modo del tutto analogo a quanto illustrato in relazione all'esperimento pilota, nell'ambito delle indagini d'uscita agli allievi stato posto il quesito relativo all'analisi semiquantitativa degli andamenti di tre diverse grandezze (temperatura, corrente elettrica e resistività) durante la fase successiva l'accensione di un circuito. Il quesito posto è quello riportato nel paragrafo 5.3.2. Dall'analisi delle risposte si intendevano confermare le evidenze raccolte nell'ambito della sperimentazione pilota. Come abbiamo fatto in precedenza, i dati delle due sperimentazioni sono stati accorpati, in modo da far emergere le distribuzioni delle tre variabili binarie A, R ed M definite nel paragrafo 5.3.2 e richiamate in tabella 6.3. L'ultima colonna della tabella riporta i risultati della correzione del test relativa all'insieme costituito dagli studenti liceali e dall'unione dei due campioni di allievi.

Tabella 6.3

Variabile	Descrittore	Valore	Esiti (%)	
			Liceo	Globale
A	Riproduce l'andamento del fenomeno	Vero =1 Falso = 0	62	53
R	Individua le relazioni tra gli andamenti delle grandezze	Vero =1 Falso = 0	52	53
M	Interpreta microscopicamente gli andamenti di tutte le grandezze e le loro relazioni	Vero =1 Falso = 0	34	37

Il grafo implicativo è riportato in figura 6.14.



I risultati ottenuti nel contesto dell'indagine pilota sono pienamente confermati. Si osserva, infatti, che la capacità d'interpretare i fenomeni al livello microscopico (M) implica, con un grado di significatività estremamente elevato (99%), la capacità di analizzare le relazioni tra gli andamenti delle grandezze fisiche anche a livello macroscopico. Riteniamo, pertanto, che gli esiti globali delle due sperimentazioni, relativi ad un campione significativo di allievi (41), forniscono chiare evidenze del fatto che una conoscenza dei fenomeni di conduzione basata su un'adeguata comprensione del modello microscopico favorisce la capacità di interpretare l'andamento di fenomeni macroscopici. Ciò conferma e completa i risultati riportati nel precedente paragrafo 6.2.3 e quelli emersi dagli esiti dell'indagine pilota.

6.4 Alcuni elementi emersi dalle indagini in itinere

Al fine di evidenziare le relazioni tra alcune componenti dell'ambiente di didattico ed il processo di apprendimento degli allievi, in questo paragrafo si analizzeranno le caratteristiche della prima fase dell'iter formativo e si illustreranno gli esiti di alcune delle verifiche effettuate. In particolare, si focalizzerà l'attenzione sul segmento didattico costituito dalla sequenza 1, relativa all'analogia gravitazionale della conduzione elettrica, e sulla sequenza 2 relativa le osservazioni macroscopiche descritte nel paragrafo 3.3. Per semplicità, nel seguito, ci riferiremo a tale porzione del percorso didattico con il termine "segmento 1".

6.4.1 Sequenza 1: analogia gravitazionale della conduzione elettrica.

Come si è argomentato nel paragrafo 3.5, un elemento che può influenzare negativamente la comprensione dei fenomeni elettrici è la mancanza di una

adeguata focalizzazione su modelli microscopici che possano favorire la transizione tra l'elettrostatica e la conduzione elettrica. Al fine di colmare tale gap è stata progettata e implementata una sequenza basata sull'analogia gravitazionale dei fenomeni elettrostatici e dei fenomeni di conduzione illustrata nel paragrafo 3.5. Tale sequenza utilizza dei semplici artefatti meccanici al fine di supportare gli allievi nella costruzione di una rappresentazione analogica (isomorfa) dei processi microscopici inerenti sia l'equilibrio elettrostatico che la conduzione elettrica. Si intendeva, inoltre, favorire l'acquisizione di alcuni concetti relativi a parametri microscopici quali la velocità di drift.

La sequenza didattica si articola in due fasi.

I. Nella prima fase, seguendo il procedimento illustrato nel paragrafo 3.5, si costruisce l'analogia tra sistema elettrico e sistema meccanico (piano inclinato su cui si trova una sferetta). In particolare, l'intervento didattico mira ad evidenziare che:

1. un conduttore carico in equilibrio elettrostatico è equivalente ad un piano orizzontale su cui sono poggiate delle palline;
2. un conduttore carico collegato a terra presenta delle analogie con un piano inclinato su cui si muove un corpo;
3. il moto di un elettrone all'interno di un conduttore collegato ad un generatore in c.c. presenta delle analogie con il moto di un corpo su un piano inclinato su cui sono presenti degli ostacoli e che, raggiunta la base del piano, viene riportato alla posizione di partenza.

II. Nella seconda fase gli allievi, suddivisi in gruppi, eseguono un esperimento relativo al moto di una pallina lungo un piano inclinato su cui è stato disposto un reticolo regolare di ostacoli (chiodi), che rappresenta l'analogo meccanico del conduttore elettrico attraverso cui si muove un elettrone. Gli allievi eseguono l'esperimento sulla base delle informazioni contenute nella scheda guida riportata in appendice A1 e rispondono ai quesiti richiesti dal protocollo.

Le ipotesi pedagogiche che stanno alla base della sequenza didattica sono le seguenti: l'utilizzazione di una strategia didattica fondata, da un lato, su un modello microscopico elementare introdotto in elettrostatica e, dall'altro, sull'uso

dell'analogia meccanica può favorire la costruzione del modello classico della conduzione; inoltre, le similitudini tra conduzione elettrica e moto della sferetta sul piano inclinato ad ostacoli può favorire la costruzione di modelli di alcuni processi microscopici che hanno luogo in un conduttore (come l'effetto Joule e l'interpretazione microscopica della resistenza elettrica); l'analogia permette, infine, di evidenziare le proprietà di parametri microscopici, quali la velocità di drift e il tempo di rilassamento, essenziali per la costruzione del modello matematico della conduzione elettrica.

La sequenza 1 è stata seguita dalla sequenza 2 relativa alle osservazioni macroscopiche dei fenomeni elettro – termici (paragrafi 3.3 e 4.3.3).

In particolare, la domanda a cui intendiamo fornire una risposta è la seguente:

In che misura l'inclusione nel percorso della sequenza relativa analogia meccanica favorisce l'apprendimento degli allievi più deboli?

6.4.2 Esiti del segmento didattico costituito dalle sequenze 1 e 2

In ciò che segue, al fine di rispondere alla domanda che ci siamo posti, si esamineranno alcuni degli elementi emersi dal monitoraggio effettuato durante l'implementazione delle due sequenze didattiche. In particolare, si riporteranno le informazioni estratte dall'analisi delle risposte fornite dagli allievi ai seguenti quesiti contenute nella scheda guida relativa all'analogia meccanica (appendice A1):

Prova a precisare le analogie tra il sistema meccanico studiato ed un conduttore attraversato da corrente continua. In particolare:

- a. A che cosa corrisponde nel caso elettrico la sferetta che si muove sul piano?*
- b. A che cosa corrispondono nel caso elettrico i chiodi?*
- c. A che cosa corrisponde nel caso elettrico la componente della forza di gravità lungo la direzione del piano inclinato?*

E, inoltre, alle domande relative all'interpretazione microscopica dell'effetto Joule e della variazione della resistenza elettrica di un conduttore al crescere delle temperatura, contenute nel protocollo relativo alla sequenza 2 (si veda appendice A2 e par. 5.2.1).

Al fine di operare un confronto con gli esiti dell'indagine pilota, tali informazioni saranno riportate in termini di classificazione M .

In figura 6.15 sono rappresentate le transizioni di classe, relative alla classificazione M, verificatesi a seguito segmento 1 del percorso (sequenza 1+ sequenza 2). In figura 6.16 sono rappresentate le analoghe transizioni (Ingresso-fine S2) relative agli allievi SSIS.

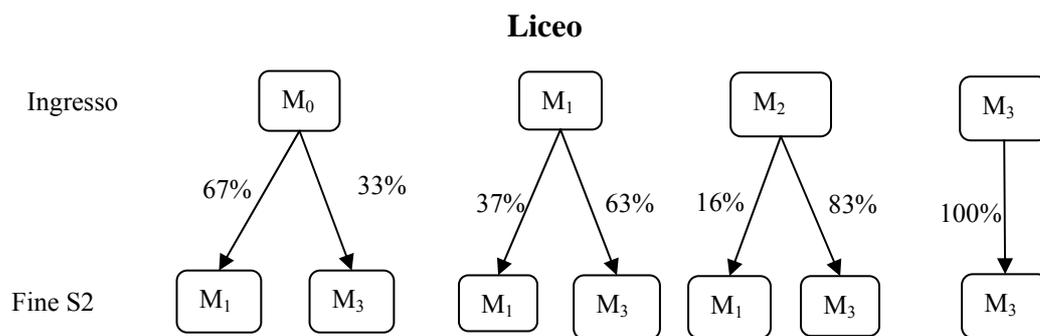


Figura 6.15

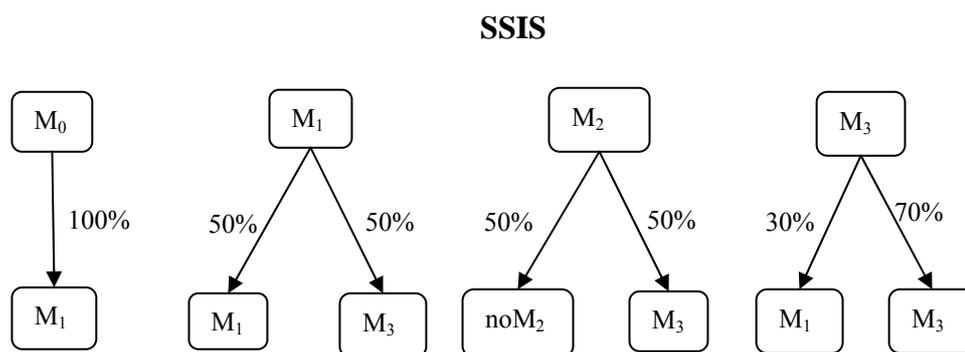


Figura 6.16

I risultati del confronto tra gli esiti due sperimentazioni, corrispondenti al segmento 1 del percorso, confermano quanto riportato nel paragrafo 6.3.2, in cui un analogo confronto tra gli esiti delle due sperimentazioni, in relazione alle

transizioni ingresso/uscita, aveva permesso di evidenziare che il percorso didattico rivolto agli studenti di liceo ha favorito maggiormente l'apprendimento degli allievi che in ingresso avevano evidenziato modelli più poveri. Il fatto, poi, che tale differenza nei percorsi d'apprendimento dei due diversi gruppi di allievi si manifesti a partire dalla fase fenomenologica del percorso didattico, permette di avanzare l'ipotesi che le differenze riscontrate nei percorsi d'apprendimento degli allievi siano state determinate dalle modifiche apportate al progetto didattico. D'altra parte, rispetto all'indagine pilota, la modifica più sostanziale al percorso didattico, relativo al segmento 1, riguarda l'inclusione della sequenza relativa all'analogia gravitazionale.

Riteniamo, pertanto, che vi siano buone ragioni per affermare che l'inclusione nel percorso didattico dell'analogia gravitazionale abbia favorito l'apprendimento degli allievi e, in particolare, di quelli che in ingresso avevano evidenziato modelli microscopici più poveri (o del tutto assenti).

6.5 Sintesi dei risultati e valutazione

In questo paragrafo conclusivo si riassumeranno gli elementi emersi dalle indagini effettuate, si fornirà una risposta alle domande di ricerca e si esprimerà una valutazione globale sugli esiti della sperimentazione.

6.5.1 Risposta alla prima domanda di ricerca

La prima domanda di ricerca è la seguente:

Quali sono i modelli microscopici della conduzione elettrica evidenziati dagli allievi (in termini di struttura e funzionalità)? E in che misura essi differiscono da quelli (espressi da allievi laureati) rilevati nell'ambito della sperimentazione pilota?

Le informazioni estratte durante le indagini d'ingresso hanno evidenziato che i modelli spontanei della conduzione elettrica espressi dagli studenti di liceo sono classificabili in modo analogo a quelli evidenziati dagli allievi SSIS. Dal confronto dei dati delle due sperimentazioni effettuate emergono, tuttavia, alcune differenze. Tali differenze attengono aspetti sia qualitativi che quantitativi.

Gli aspetti qualitativi riguardano, principalmente gli allievi inclusi nella classe M_1 (modello a soli portatori). Abbiamo osservato, infatti, che alcuni studenti di liceo, inclusi in tale classe, interpretano la resistenza elettrica utilizzando il concetto di attrito (due allievi) o ricorrendo al dualismo ordine – disordine (un allievo). Nel caso degli allievi SSIS tale schemi d’interpretazione non sono stati rilevati in ingresso, ma, come illustrato dettagliatamente nel par. 5.2.2, soltanto in una fase successiva del processo didattico (a seguito della sequenza 2).

Le differenze quantitative riguardano, invece, il modo in cui i modelli spontanei della conduzione elettrica sono distribuiti per i due diversi campioni di allievi. Al fine di evidenziare tali differenze nelle tabelle 6.4 e 6.5 sono riassunti i dati globali relativi, rispettivamente, alle classificazioni M ed I. Nelle due tabelle sono riportati sia i dati d’ingresso che quelli di uscita e in esse è evidenziato il contributo dei due diversi gruppi di allievi.

Tabella 6.4. Distribuzione dei modelli sul campione totale di 41 allievi e contributo dei singoli gruppi di allievi. Classificazione M

Modello	M_0 (nessuno)		M_1 (a soli portatori)		M_2 (ad elettroni legati)		M_3 (elettroni + struttura)	
	Ingresso	Uscita	Ingresso	Uscita	Ingresso	Uscita	Ingresso	Uscita
Globale	17,1% (7/41)	0	29,3% (12/41)	24,4 (10/41)	29,3% (12/41)	2,4 (1/41)	24,4 (10/41)	73,2 (30/41)
Liceo	42,9% (3/7)	0	66,7% (8/12)	40,0 (4/10)	50,0% (6/12)	100,0 (1/1)	30,0% (3/10)	50,0 (15/30)
SSIS	57,1% (4/7)	0	33,3% (4/12)	60,0 (6/10)	50,0% (6/12)	0,0	70,0% (7/10)	50,0 (15/30)

Tabella 6.5. Distribuzione dei modelli sul campione totale di 41 allievi e contributo dei singoli gruppi di allievi. Classificazione I.

Livello d'interpretazione	I1		I2		I3	
	Ingresso	Uscita	Ingresso	Uscita	Ingresso	Uscita
Globale	61,0 (25/41)	24,4 (10/41)	24,4 (10/41)	22,0 (9/41)	14,6 (6/41)	53,7 (22/41)
Liceo	60,0 (15/25)	70,0 (7/10)	40,0 (4/10)	55,6 (5/9)	16,7 (1/6)	36,4 (8/22)
SSIS	40,0 (10/25)	30,0 (3/10)	60,0 (6/10)	44,4 (4/9)	83,3 (5/6)	63,6 (14/22)

Analizziamo prima la situazione d'ingresso. Come si può osservare il campione di studenti di liceo esibisce modelli globalmente più poveri. Un'elevata percentuale di allievi evidenzia il modello a soli portatori e soltanto pochi allievi esprimono un modello microscopico completo. Per tale popolazione di allievi anche la qualità delle interpretazioni (tab. 6.5) risulta decisamente più carente che per gli allievi SSIS. Soltanto un allievo, ad esempio, fornisce interpretazioni coerenti con le interpretazioni culturalmente accettate (modello classico), mentre la maggioranza degli allievi non è in grado di fornire interpretazioni microscopiche, limitandosi a fornire spiegazioni fenomenologiche dei fenomeni proposti. La distribuzione dei modelli individuali corrispondenti alle due popolazioni evidenzia l'esistenza di una progressione, in funzione dell'età e del grado d'istruzione degli allievi, da semplici modelli fenomenologici verso i modelli scientifici culturalmente accettati. Tuttavia, tale evoluzione sembrerebbe non coinvolgere il modello ad elettroni legati: in relazione a tale modello entrambe le popolazioni esprimono, infatti, percentuali sostanzialmente coincidenti. Abbiamo già osservato nel paragrafo 6.2.1 che ciò è presumibilmente determinato dal fatto che tale modello è il frutto dello sviluppo di concezioni alternative dovuto a cattivi esiti dell'istruzione superiore, esiti che non sono corretti (ma, al contrario, probabilmente rinforzati) dall'istruzione universitaria.

I dati d'uscita presentano una situazione molto differente. Come si può osservare, le caratteristiche strutturali dei modelli della conduzione elettrica evidenziati dalle due popolazioni di allievi presentano distribuzioni molto simili. Per entrambe le popolazioni, infatti, in uscita sono presenti soltanto i modelli M_1 ed il modello M_3 (ad eccezione di un unico allievo di liceo che esprime il modello M_2) e più del 70% evidenzia il modello M_3 , senza differenze quantitative tra le due popolazioni. Riteniamo di poter affermare che gli interventi realizzati hanno, dunque, permesso agli studenti di liceo di ridurre il gap formativo relativo alle conoscenze microscopiche sulla conduzione elettrica evidenziato in ingresso.

Un'ultima considerazione riguarda la situazione d'uscita relativa alle competenze interpretative degli allievi. I dati riportati nella tabella 6.5 indicano che in termini assoluti le prestazioni degli studenti di liceo sono inferiori a quelle degli allievi insegnanti. Abbiamo già osservato (par. 6.3.2), tuttavia, che uno dei motivi che può avere determinato tale situazione è il fatto che i livelli di partenza degli studenti di liceo erano molto più carenti. Infatti, se le situazioni d'uscita dei due campioni viene riferita alle corrispondenti situazioni d'ingresso, l'incremento globale delle prestazioni interpretative risulta maggiore per gli studenti di liceo.

Nondimeno, riteniamo che, in relazione alle differenze evidenziate rispetto alla classificazione I, sia possibile avanzare un'altra ipotesi. In alcuni studi già citati precedentemente (ad esempio, Borges e Gilbert, 1999) si sono raccolte evidenze del fatto che le concezioni spontanee sui processi microscopici espresse da individui di diversa età e livello d'istruzione sono qualitativamente differenti ed esibiscono un profilo di evoluzione verso modelli più adeguati e coerenti al crescere dell'età e dell'esperienza. I risultati da noi ottenuti possono essere interpretati osservando che l'influenza dell'età e della maturità culturale dell'individuo, sull'adeguatezza e coerenza delle sue concezioni, si manifesti, più che in termini di sviluppo di conoscenze microscopiche di tipo strutturale, in termini di sviluppo di competenze di tipo procedurale, ovvero della capacità di connettere ed elaborare le conoscenze possedute al fine di fornire interpretazioni e previsioni dei fenomeni osservati. Sebbene i dati raccolti non permettano di giustificare pienamente tale ipotesi, riteniamo che tale argomento possa

giustificare la discrepanza tra gli esiti delle due sperimentazioni in termini di prestazioni interpretative degli allievi.

6.5.2 Risposta alla seconda domanda di ricerca

La seconda domanda di ricerca è la seguente:

In che misura gli esiti della presente indagine confermano i risultati dell'esperimento pilota?

Gli esiti dell'indagine confermano i principali risultati dell'esperimento pilota, ampliandone il livello di significatività statistica. In particolare, i risultati conseguiti sono i seguenti:

1. uno dei risultati dell'indagine pilota (si veda par. 5.4.4) confermato dagli esiti della presente sperimentazione riguarda il fatto che un appropriato sviluppo dei modelli microscopici della conduzione è fondato su una corretta e autonoma elaborazione di informazioni tratte osservazioni macroscopiche. Abbiamo, infatti, osservato che gli allievi che non riescono a revisionare autonomamente i propri modelli microscopici sulla base delle osservazioni sperimentali (proposte durante la prima fase del percorso), tendono a mantenere modelli e interpretazioni fortemente influenzati dalle conoscenze spontanee. Osserviamo, inoltre, che il potenziamento della prima fase dell'iter formativo, tramite l'inclusione della sequenza sull'analogia meccanica della conduzione, è giustificato proprio da tale evidenza sperimentale.
2. L'indagine conferma, inoltre, un risultato complementare a quello espresso al precedente punto 1. Esso riguarda le connessioni tra competenze d'interpretazione microscopica e competenze d'interpretazione macroscopica. Quanto illustrato nei paragrafi 6.2.3 e 6.3.4 permette di affermare che lo sviluppo di appropriate conoscenze dei processi microscopici favorisce la capacità di estrarre dai fenomeni macroscopici informazioni finalizzate alla loro interpretazione.

3. Un altro risultato confermato dall'indagine riguarda gli aspetti critici delle conoscenze spontanee. Gli esiti dell'analisi statistica, riportati nel paragrafo 6.2.3, confermano, infatti, che uno degli elementi che inficia le competenze esplicative degli allievi sia riscontrabile in una inadeguata rappresentazione delle interazioni che si verificano tra i costituenti microscopici del sistema (in particolare tra elettroni e ioni). Gli allievi che manifestano un'erronea conoscenza delle interazioni tra le particelle previste dal modello microscopico non sono, infatti, in grado di fornire interpretazioni adeguate dei fenomeni osservati.

I risultati di cui ai precedenti punti 1 e 2, che evidenziano le intime relazioni tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze, costituiscono un'ulteriore conferma sperimentale del presupposto pedagogico che ha ispirato l'intero progetto di ricerca discusso in questa tesi. Tale ipotesi fondamentale ha guidato non soltanto la progettazione delle diverse componenti dell'ambiente didattico ma anche le modifiche apportate al progetto in vista della seconda fase di verifica discussa in questo capitolo.

Riteniamo, inoltre, che i risultati precedenti, in quanto emersi in relazione a contesti naturalistici con caratteristiche differenti, costituiscano esiti della ricerca di portata generale, ovvero indipendenti dal contesto.

6.5.3 Risposta alla terza domanda di ricerca

La terza domanda di ricerca è:

In che misura l'ambiente didattico predisposto può orientare le scelte universitarie degli allievi, stimolando l'interesse verso lo studio della fisica?

Al fine di valutare quanto il processo didattico abbia favorito la crescita dei livelli di motivazione degli allievi ed orientato le loro scelte universitarie si sono raccolte diverse evidenze. In particolare, gli elementi di valutazione utilizzati sono i seguenti:

- indagini relative alle future scelte universitarie degli allievi effettuate all'inizio e alla fine delle attività;

- la proposizione di sessioni pomeridiane opzionali, a cui gli allievi potevano partecipare su base volontaria. Come illustrato nel paragrafo 6.1.3 tali attività extracurricolari hanno riguardato la teoria a bande e approfondimenti sulla meccanica quantistica³⁵.
- un'intervista di gruppo relativa al giudizio degli allievi sulle attività svolte.

I dati raccolti hanno evidenziato l'estremo interesse mostrato dagli allievi. A tal fine riportiamo alcuni dati.

Dalle indagini relative alle future scelte universitarie degli allievi è emerso che all'inizio del percorso un solo allievo ha espresso la volontà di iscriversi al corso di laurea in fisica. Alla fine delle attività quattro allievi intendevano iscriversi a fisica. Le informazioni raccolte successivamente confermano che due dei quattro allievi hanno effettivamente scelto tale corso di laurea. Riteniamo che questo sia un dato estremamente significativo.

La proposta di approfondimenti pomeridiani sulla teoria a bande e la meccanica quantistica ha raccolto grande favore tra gli allievi. Nonostante la volontarietà della partecipazione, il 40 % (8 allievi su 20) degli allievi ha partecipato a tali attività, mostrando un notevole interesse verso gli argomenti proposti.

Dalle indagini relative al giudizio degli allievi sull'esperienza formativa sono emersi ulteriori elementi positivi. Gli allievi hanno accolto e vissuto con interesse l'esperienza formativa e sono stati stimolati ad approfondire autonomamente gli aspetti matematici dei modelli della conduzione elettrica.

Tra gli aspetti che hanno maggiormente interessato gli allievi vi sono le relazioni tra processo di costruzione e revisione dei modelli e osservazioni fenomenologiche e la transizione alla meccanica quantistica.

Riportiamo alcune delle opinioni espresse dagli allievi che mettono in evidenza gli aspetti che hanno suscitato maggiore interesse. Uno studente invitato

³⁵ Dalla scheda guida riportata in appendice MQ2 è possibile desumere la traccia didattica relativa agli interventi realizzati.

ad esprimere la sua opinioni circa lo svolgimento e l'efficacia del corso ha così risposto:

“ho trovato interessante il percorso perché si capisce qual è il lavoro del fisico, cioè il costruire dei modelli temporanei che vengono modificati e migliorati confrontandoli con gli esperimenti.”

Un altro allievo afferma:

“quello che mi ha affascinato è la relazione che lega i modelli fisici e la matematica. Si parte da un modello semplice, ma poi con la matematica è possibile spiegare fenomeni complicati.”

E un altro ancora:

“ho trovato molto interessante il passaggio alla meccanica quantistica, anche se difficile e strano. Mi piacerebbe capire meglio l'equazione di Shroedinger.”

Riteniamo che tali affermazioni, oltre a indicare l'interesse degli allievi verso la proposta didattica, evidenzino come gli essi abbiano colto i concetti generali e gli aspetti epistemologici dell'impresa scientifica su cui il progetto didattico è fondato e che intendeva veicolare.

Concludiamo osservando che lo stimolo didattico e l'effetto motivante dell'esperienza didattica ha avuto ricadute durature sul clima della classe. L'insegnante di fisica riporta, infatti, che ha seguito dell'intervento l'interesse e l'impegno degli allievi sono cresciuti in modo significativo, con effetti positivi sul rendimento. In particolare, gli allievi hanno chiesto all'insegnante di approfondire ulteriormente gli aspetti legati ai modelli quantistici. L'insegnante ha accolto tale richiesta e gli allievi hanno partecipato a due seminari, tenuti da esperti, in cui sono stati affrontati i problemi relativi alle differenze tra stato classico e quantistico di una particella ed alcuni degli aspetti epistemologici della meccanica quantistica.

Capitolo 7. Considerazioni conclusive

7.1 Visione d'insieme

Il progetto di ricerca discusso in questa tesi ha affrontato i principali aspetti, di natura metodologica, pedagogica e didattica, relativi alla formulazione e la validazione sperimentale di una proposta educativa riguardante i modelli microscopici dei solidi e le proprietà elettriche della materia, concretamente spendibile in scenari formativi naturalistici e variabili. Le limitazioni imposte alla variabilità riguardano le conoscenze di base che gli allievi devono possedere (si veda par. 2.5.3). Nel concreto il progetto didattico è stato sperimentato nell'ambito di un laboratorio SSIS e in una V classe del Liceo Scientifico.

Per le motivazioni espresse nel capitolo 1 e nel paragrafo 3.1.4, che riguardano, da un lato, le peculiari esigenze della ricerca, dall'altro, la relativa carenza di studi precedenti sull'argomento, i principali obiettivi perseguiti dalla ricerca sono i seguenti:

- 1.** individuazione dei modelli mentali e concezioni spontanee degli allievi sui modelli microscopici della conduzione elettrica e loro variabilità (anche per allievi di diversa età e livello d'istruzione);
- 2.** individuazione di correlazioni significative tra aspetti microscopici e macroscopici delle conoscenze degli allievi;
- 3.** individuazione e verifica sperimentale di ipotesi pedagogiche che possano orientare la progettazione didattica;
- 4.** progettazione e verifica sperimentale di materiali, strumenti didattici, strategie pedagogiche miranti a favorire il cambiamento concettuale e l'evoluzione dei modelli mentali e delle prestazioni cognitive dei discenti;
- 5.** individuazione di criteri di classificazione delle conoscenze, metodi d'indagine e strumenti di analisi che permettano di caratterizzare le traiettorie d'apprendimento degli allievi e far emergere le correlazioni tra

le componenti degli ambienti educativi progettati e sviluppo delle conoscenze e competenze disciplinari dei discenti.

Il percorso progettuale ha implicato, inoltre, la necessità di individuare un metodo di ricerca affidabile e flessibile che potesse orientare e organizzare le diverse fasi di sviluppo della ricerca, garantendo il raggiungimento degli obiettivi. Il metodo di ricerca adottato coniuga, adattandole, le caratteristiche di due approcci noti in letteratura con il nome di *ricerca basata su progetti (Design Based Research: DBR)* e ricerca orientata alla produzione di *sequenze d'insegnamento/apprendimento (teaching/learning sequences: TLS)*. L'applicazione di tale metodo, le cui caratteristiche sono state illustrate nel paragrafo 2.5, ha permesso di soddisfare le finalità e le principali esigenze della progetto di ricerca. In particolare, esso ha permesso di focalizzare la ricerca sulla produzione di ambienti didattici orientati verso l'innovazione e finalizzati all'applicazione a complessi contesti naturalistici e ha consentito di raggiungere gli obiettivi della ricerca (in termini sia di produzione di percorsi e strumenti formativi che di avanzamento di conoscenze teoriche) in modo efficiente e, riteniamo, affidabile.

L'indagine si è sviluppata passando attraverso due successivi cicli di progettazione, verifica, valutazione e ottimizzazione (revisione del progetto didattico). Le diverse fasi di ricerca possono situarsi in due diverse dimensioni operative: la dimensione progettuale e la dimensione della verifica. Alla dimensione progettuale appartengono tutti quegli elementi e quelle attività che hanno contribuito alla costruzione del prodotto didattico e che lo caratterizzano: elementi che derivano dall'analisi disciplinare, gli obiettivi pedagogici, i materiali e gli strumenti d'insegnamento/apprendimento, l'organizzazione didattica, i criteri di revisione e così via. Mentre la dimensione della verifica è caratterizzata da tutti gli elementi e le attività connesse con il controllo dell'apprendimento e della qualità delle componenti del prodotto didattico: i criteri e i metodi d'analisi, gli strumenti d'analisi, l'organizzazione del sistema di controllo e monitoraggio. Grande attenzione è stata dedicata all'esplicitazione dei criteri, dei metodi e degli aspetti operativi che caratterizzano le due dimensioni della ricerca.

In particolare, il metodo di progettazione didattica utilizzato nella ricerca è basato su una duplice analisi a-priori: un'analisi disciplinare, di tipo storico ed epistemologico, e un'analisi psico - cognitiva, finalizzata a individuare conoscenze spontanee e potenziali difficoltà d'apprendimento. Tali analisi sono state integrate con ulteriori informazioni, ricavate empiricamente durante diverse fasi del percorso progettuale, finalizzate ad adattare il progetto didattico alle realtà formative cui esso è concretamente rivolto.

La sintesi degli elementi emersi dai due tipi di analisi, integrati con le ipotesi che discendono dal quadro teorico illustrato nel capitolo 2, ha permesso di fissare molti degli elementi di base e l'architettura del progetto didattico, fornendo, inoltre, utili spunti per la definizione dei principali strumenti e materiali didattici progettati. In particolare, questa prima fase del processo progettuale ha consentito di realizzare seguenti obiettivi: attuare il processo di elementarizzazione dei contenuti disciplinari, individuare, in modo preliminare, la domanda d'apprendimento degli allievi, individuare la significatività educativa dell'argomento e le ipotesi pedagogiche fondamentali su cui si basa lo sviluppo dell'intero progetto didattico. In particolare, il presupposto pedagogico fondamentale, così individuato, è che lo sviluppo di adeguate competenze di analisi e di interpretazione dei fenomeni, soprattutto nell'ambito di un percorso che prevede la transizione alla meccanica quantistica, possa essere favorito da approcci didattici che enfatizzino le connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze fisiche. In termini più precisi, si è ritenuto che una corretta e autonoma elaborazione di informazioni tratte da osservazioni macroscopiche possa favorire lo sviluppo di adeguati modelli dei processi microscopici e che, viceversa, lo sviluppo di adeguati modelli microscopici favorisca la capacità di estrarre dai fenomeni macroscopici informazioni finalizzate alla loro interpretazione.

Dalla sintesi tra tale presupposto pedagogico e gli aspetti più generali, introdotti nel capitolo 2, della prospettiva pedagogica (che deriva da un'integrazione della teoria dell'adattamento di Piaget, con le esigenze di negoziazione sociale della conoscenza di derivazione Vygotskiana e con il

riconoscimento delle strette analogie tra modelli mentali e modelli scientifici) discendono gli elementi principali che caratterizzano l'ambiente didattico progettato. Tra questi, le strategie pedagogiche ed il ciclo didattico che organizza e struttura l'adattamento educativo dei contenuti disciplinari. Tale ciclo (par. 3.2.4) implementa il presupposto pedagogico fondamentale ed è caratterizzato da una stretta integrazione, e un costante rimando, tra osservazioni macroscopiche ed esperimenti (par. 3.3 e 3.5) e attività di modellizzazione microscopica, supportata dall'uso di ambienti di visualizzazione, simulazione e sperimentazione virtuale (par. 3.4 e 3.5). Il ciclo didattico progettato comprende quattro fasi:

1. osservazioni fenomenologiche e organizzazione delle informazioni raccolte (ad esempio tramite la formulazione di un modello descrittivo);
2. costruzione di un modello microscopico (sulla base delle informazioni e di ipotesi teoriche) o modifica del modello (se la fase è stata attraversata più di una volta);
3. elaborazione del modello e previsione di comportamenti macroscopici (relativi a fenomeni o sistemi diversi da quelli di partenza);
4. Confronto tra previsioni del modello e andamenti osservati;

Come si è detto, le strategie didattiche definite organizzano e strutturano l'utilizzo di strumenti e procedure di modellizzazione e attività di sperimentazione appositamente progettate per favorire e supportare l'apprendimento degli allievi.

I principali strumenti di modellizzazione progettati sono i seguenti:

- il modello di visualizzazione e simulazione NetLogo "Conduzione".
Tale strumento rappresenta un ambiente didattico virtuale di modeling e di sperimentazione che permette di implementare alcune delle principali ipotesi che hanno caratterizzato l'evoluzione della teoria elettronica dei metalli. Esso consente di impostare le caratteristiche del modello microscopico, di visualizzare i processi microscopici implicati nella conduzione elettrica e di eseguire simulazioni dinamiche. I risultati di tali simulazioni rappresentano andamenti di grandezze macroscopiche (ad esempio di $\rho(T)$) che possono essere confrontati con i corrispondenti andamenti sperimentali. L'esito di tale

confronto permette, così, di stabilire se la “teoria” sottesa dal modello selezionato si accorda o meno con la “realtà” dei fenomeni. Esso permette, inoltre, di evidenziare come differenti ipotesi microscopiche, riguardanti le proprietà delle particelle e delle loro interazioni, influenzano sensibilmente le proprietà emergenti a livello macroscopico.

- La simulazione visual basic “Generatore di bande”. E’ questo uno strumento computazionale che consente di determinare e visualizzare gli autovalori di un elettrone in un reticolo cristallino unidimensionale, il cui potenziale è approssimato da una successione di buche di potenziale quadrate. La simulazione costituisce un supporto didattico estremamente versatile che permette di evidenziare, in modo relativamente semplice, molti degli aspetti della teoria a bande dei solidi.
- Un approccio didattico basato su un’analogia gravitazionale dei fenomeni elettrici (par. 3.5). L’introduzione di tale modello analogico è finalizzato, da un lato, ad aiutare gli allievi a creare le adeguate connessioni tra modelli microscopici elettrostatici ed elettrodinamici, dall’altro, a favorire la costruzione di una rappresentazione mentale dei meccanismi microscopici della corrente e della resistenza elettrica.

In relazione agli aspetti fenomenologici e sperimentali che caratterizzano il progetto didattico ricordiamo:

- Alcune osservazioni qualitative relative alle reciproche influenze tra stato termico e stato elettrico di un conduttore e di un semiconduttore.
- due diverse procedure sperimentali (una di più semplice realizzazione, l’altra più complessa) finalizzate a ricavare l’andamento quantitativo della resistività di un conduttore metallico e di un semiconduttore in funzione della temperatura.
- Delle attività sperimentali centrate sull’analogia gravitazionale dei fenomeni elettrici finalizzata a promuovere la costruzione di una rappresentazione mentale dei processi di conduzione e a favorire la

comprensione di alcuni dei concetti chiave della teoria ad elettroni liberi.

In relazione alla dimensione della verifica, come si è detto, si sono realizzate due diverse sperimentazioni, rivolte a due popolazioni di allievi con caratteristiche diverse, sia per età che per il livello d'istruzione. In termini generali, tali sperimentazioni sono state realizzate al fine di raccogliere elementi utili alla realizzazione degli obiettivi della ricerca e per fornire una risposta alle domande di ricerca, in termini più specifici, allo scopo di valutare l'efficacia delle componenti del progetto didattico e la correttezza delle ipotesi che ne hanno ispirato la progettazione. Al fine di riassumere gli aspetti salienti del sistema di verifica e valutazione implementato, osserviamo che l'intero progetto di ricerca è caratterizzato da un sistema gerarchico di obiettivi e di domande di ricerca. Tale sistema consta di tre livelli gerarchici: il livello gerarchico più elevato è costituito dagli obiettivi e le domande di ricerca generali, il secondo dagli obiettivi e le domande di ricerca che caratterizzano le singole indagini sperimentali, il terzo livello è, infine, costituito dagli obiettivi operativi e le domande sperimentali che caratterizzano le sequenze d'insegnamento/apprendimento che compongono i percorsi didattici sperimentati. Ciascuna sequenza è stata, infatti, progettata e implementata in modo da rappresentare un autoconsistente *micro-esperimento d'insegnamento* (in contrapposizione al *macro - esperimento* rappresentato dall'intero percorso d'insegnamento/apprendimento), che si pone un delimitato set di obiettivi, è fondato su ipotesi adeguatamente esplicitate, è finalizzato a rispondere ad alcune domande sperimentali ed è caratterizzato da un sistema di controllo e verifica appositamente progettato. Le evidenze sperimentali raccolte a seguito dell'applicazione di una sequenza costituiscono lo strumento operativo che ha permesso di realizzare gli obiettivi di ciascuna sperimentazione e di fornire una risposta alle domande di ricerca che la caratterizzano. Risalendo lungo la catena gerarchica, gli obiettivi conseguiti e la sintesi degli elementi raccolti, a seguito delle singole sperimentazioni, ha permesso di realizzare gli obiettivi della ricerca e di rispondere alle domande generali di ricerca.

Al fine di valutare gli esiti di ciascuna indagine sperimentale si è predisposto un ricco e diversificato sistema di controllo e monitoraggio. Tale sistema ha implementato due diversi tipi d'analisi. Un'analisi che possiamo chiamare *macroscopica*, relativa, cioè, all'impatto globale dell'ambiente didattico e del processo d'insegnamento/apprendimento ed un'analisi, per così dire, *microscopica*, relativa ad aspetti locali del processo didattico. L'analisi globale si basa su un confronto di tipo ingresso/ uscita, mentre l'analisi locale è stata realizzata attraverso un monitoraggio effettuato durante lo sviluppo delle singole sequenze. Sebbene i due tipi di analisi, singolarmente considerati, hanno fornito, di per sé, significativi elementi di valutazione, la correlazione tra i risultati delle due analisi ha consentito di far emergere significative relazioni tra aspetti globali e aspetti locali del processo formativo e dell'apprendimento degli allievi.

Un'ultima considerazione riguarda i metodi e gli strumenti mediante i quali si sono analizzate le conoscenze degli allievi e le dinamiche d'apprendimento. In particolare, al fine di caratterizzare i modelli mentali degli allievi sulla conduzione elettrica e la loro evoluzione, a partire da un'analisi delle similitudini tra modelli scientifici e modelli individuali, si è introdotto un duplice criterio di analisi e classificazione fenomenografica: un criterio di tipo diretto (classificazione M), che guarda direttamente alle componenti e alla struttura dei modelli individuali, e un criterio, per così dire indiretto, focalizzato sull'analisi delle modalità con cui gli allievi utilizzano il modello per interpretare e prevedere fenomeni e processi (classificazione I). Questo secondo tipo di analisi conduce, pertanto, ad una classificazione in termini, più che di conoscenze, di competenze interpretative e predittive, permettendo di evidenziare come il modello individuale "funziona" in pratica. Entrambi i criteri assumono come riferimento le conoscenze scientifiche (modelli e interpretazioni) e pertanto, anche se in modo qualitativo, caratterizzano la discrepanza tra conoscenze individuali e conoscenze scientifiche. Tale metodo di analisi si è rilevato particolarmente efficace sia perché ha permesso di caratterizzare le conoscenze evidenziate dagli allievi in ingresso e in uscita e le traiettorie d'apprendimento, sia perché ha permesso di evidenziare le

interazioni tra le componenti dell'ambiente didattico ed il processo d'apprendimento degli allievi.

Al fine di evidenziare gli effetti di particolari momenti del processo didattico (in particolare, la risposta degli allievi alle situazioni di conflitto cognitivo) e di caratterizzare alcuni aspetti specifici del processo d'apprendimento, si è ritenuto opportuno effettuare un esame qualitativo di singoli casi emblematici utilizzando gli strumenti dell'analisi concettuale. Tale analisi è stata realizzata mediante la costruzione della rete semantica relativa agli schemi d'interpretazione utilizzati da alcuni allievi ed effettuando una dettagliata analisi di tali schemi in termini di risorse cognitive a grana fine (P-prims) e classi di coordinazione (si veda par 5.2.2).

Allo scopo di gestire il gran numero di variabili cognitive con cui sono state caratterizzate le conoscenze evidenziate dagli allievi, in modo da farne emergere le correlazioni, si è sperimentato l'utilizzo di un metodo noto con il nome di "analisi statistica implicativa". Tale strumento d'analisi, mutuato dalla ricerca in didattica della matematica, ha permesso di evidenziare significative relazioni tra aspetti diversi delle conoscenze degli allievi.

7.2 Sintesi dei risultati e risposta alle domande di ricerca

Molti dei risultati della ricerca sono già stati riportati nei capitoli 5 e 6, unitamente ad una preliminare risposta alle domande di ricerca. In questo paragrafo, a partire da una sintesi delle informazioni ricavate e dalle evidenze emerse durante le diverse fasi d'indagine, si fornirà una risposta conclusiva alle domande di ricerca, evidenziando i principali risultati conseguiti.

7.2.1 Elementi emersi in relazione alla prima domanda di ricerca

La prima domanda che ci siamo posti è la seguente:

Quali sono e come sono distribuiti i modelli spontanei e le concezioni degli allievi relativi ai modelli microscopici della conduzione elettrica? E quali sono le evidenze circa la loro variabilità in funzione dell'età e del livello d'istruzione?

La risposta a tale domanda può essere fornita sulla base degli esiti dei due esperimenti d'insegnamento effettuati.

I modelli mentali degli allievi sui processi microscopici della conduzione sono stati caratterizzati sulla base del duplice criterio di classificazione richiamato nel paragrafo precedente, ossia in termini di componenti e struttura del modello individuale (classificazione M) e in termini di funzionalità esplicativa e predittiva del modello individuale (classificazione I).

In relazione alla situazione d'ingresso dei due campioni di allievi sottoposti ad indagine (in totale 41 allievi)³⁶, le due classificazioni sono state operate, principalmente, sulla base delle risposte fornite al protocollo d'ingresso (riportato in appendice P1). Per quanto riguarda la classificazione M, l'analisi delle risposte è stata effettuata cercando di individuare le caratteristiche dominanti che caratterizzano i modelli evidenziati dagli allievi e costruendo le classi sulla base di tali caratteristiche. Da tale analisi emerge che è possibile introdurre una partizione del campione di allievi nelle quattro diverse classi riportate di seguito.

- **Classe M₀**: gli allievi che appartengono a questa classe non esprimono alcun modello microscopico della conduzione elettrica
- **Classe M₁**: a questa classe appartengono allievi che evidenziano un modello caratterizzato da soli portatori liberi di carica. Alcuni allievi evidenziano un modello di tipo idraulico, in cui le cariche (in alcuni casi sia positive che negative) generate dalla batteria fluiscono liberamente da un polo all'altro del conduttore (proprio come un flusso idraulico); altri un modello tipo "domino", in cui, gli elettroni, liberi, si urtano fra di loro e consentono il trasferimento di energia (o corrente elettrica). Altri ancora un modello in cui il moto delle cariche libere è ostacolato da una forza d'attrito la cui origine non è, tuttavia, specificata. Infine, alcuni allievi esprimono un modello microscopico a soli portatori in cui interviene un meccanismo (non meglio

³⁶ I dati relativi ai singoli campioni di allievi sono riportati nel capitolo 5 per il campione Sissis, costituito da 21 allievi, e nel capitolo 6 per il campione di liceali, costituito da 20 allievi.

specificato) di conversione del moto ordinato in moto disordinato degli elettroni.

- **Classe M₂**: a questa classe appartengono gli allievi che hanno evidenziato un modello qui battezzato “ad elettroni legati”, caratterizzato dal fatto che gli elettroni di conduzione del metallo risentono di interazioni attrattive che ne limitano il movimento. In alcuni casi tale modello si manifesta come il “modello Jumping” riportato in letteratura (Wittmann, 2002), in cui la corrente consiste nel salto di un elettrone da un atomo all’altro; in altri si manifesta come un modello elettrostatico, nel quale il campo elettrico induce una separazione di carica; in altri ancora come un modello in cui gli elettroni risentono di interazioni coulombiane di tipo attrattivo dovute alle cariche positive presenti nel metallo.
- **Classe M₃**: a quest’ultima classe appartengono allievi il cui modello è strutturalmente simile al modello classico della conduzione, prevedendo elettroni liberi che interagiscono tramite urti con gli ioni del metallo.

In figura 7.1 sono riportate le distribuzioni dei modelli mentali in termini di classificazione M. Nella figura sono evidenziati i contributi dei due diversi campioni di allievi analizzati. Le differenze tra i due campioni saranno analizzate più avanti.

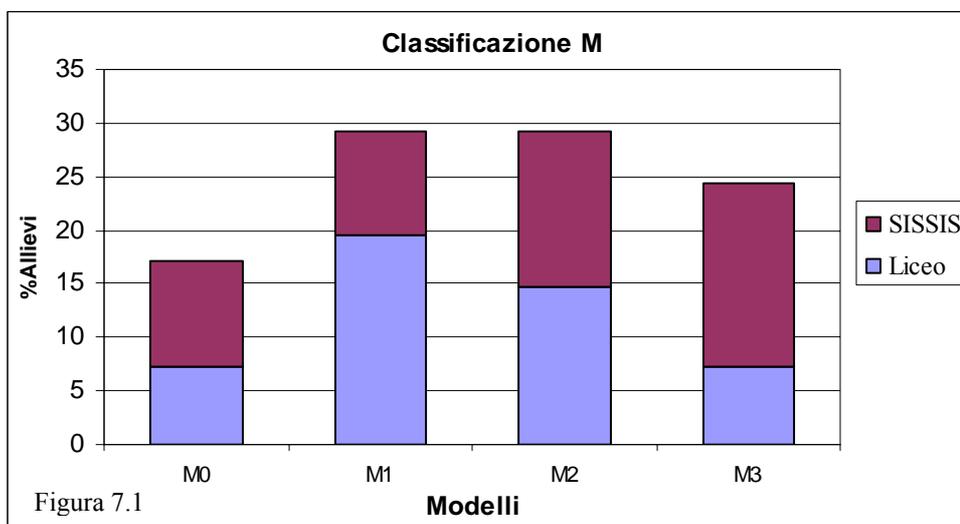


Figura 7.1

L'analisi delle risposte fornite dagli allievi al test d'ingresso ha permesso di caratterizzare in che modo gli allievi utilizzano gli elementi dei modelli posseduti per interpretare alcuni fenomeni. Ciò è stato effettuato introducendo una classificazione che contempla tre livelli d'interpretazione: il livello I_1 corrisponde ad una interpretazione descrittiva, che non include elementi di analisi microscopica e non chiarisce relazioni causali, il livello I_2 che corrisponde ad un'interpretazione basata sugli elementi del modello microscopico ma che risulta in conflitto con l'interpretazione scientifica, il livello I_3 che corrisponde ad un'interpretazione microscopica sostanzialmente coincidente con quella scientifica. La figura 7.2 rappresenta le distribuzioni dei livelli d'interpretazione degli allievi fornite (classificazione I), così come emerso dall'analisi del protocollo d'ingresso. Come nel grafico precedente, nella figura sono evidenziati i contributi delle due diverse popolazioni di allievi sottoposti ad indagine.

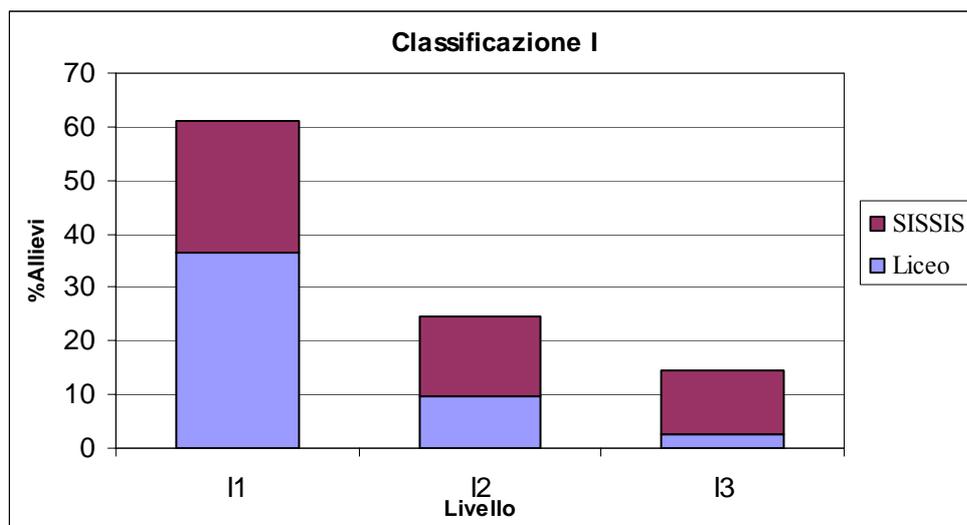


Figura 7.2

Come si può osservare, un'elevata percentuale di allievi (circa 60 %) evidenzia un livello di descrizione I_1 . In particolare, alcuni (circa il 20 % di tali allievi) non forniscono alcuna risposta ai quesiti posti, gli altri, pur fornendo una spiegazione, manifestano un'inadeguata capacità di connettere le conoscenze microscopiche possedute per interpretare i fenomeni proposti. Circa il 25 % degli allievi appartiene alla classe I_2 . Tali allievi utilizzano il modello microscopico posseduto, tuttavia le interpretazioni fornite non sono compatibili con le

corrispondenti interpretazioni scientifiche e, spesso, risultano in conflitto con l'esperienza. Osserviamo che, ad eccezione di pochi allievi, tutti gli studenti che hanno evidenziato un modello microscopico del tipo M_2 (modello ad elettroni legati) forniscono interpretazioni del tipo I_2 . In particolare, tali allievi, elaborando il modello microscopico posseduto, interpretano la resistenza elettrica come dovuta alle interazioni attrattive (o ai legami) tra elettroni di conduzione e ioni e concludono che un aumento della temperatura del conduttore incrementa la mobilità dei portatori di carica provocando, in questo modo, una diminuzione (anziché un aumento) della la resistenza elettrica conduttore. Tale interpretazione pur essendo scorretta è una diretta conseguenza dell'elaborazione del modello M_2 . Notiamo, infine, che soltanto il 15 % circa dell'intero campione (6 allievi su 41), fornisce una spiegazione del tipo I_3 . Tali allievi appartengono tutti alla classe M_3 . Questi allievi, dunque, oltre a possedere conoscenze relative ai modelli microscopici coerenti con il modello scientifico di riferimento, mostrano di saper elaborare correttamente le informazioni possedute, attivando un adeguato set di relazioni causali.

Per ciò che attiene gli aspetti principali emersi dalle correlazioni tra caratteristiche strutturali e funzionali dei modelli evidenziati dagli allievi, le evidenze raccolte permettono di affermare che, in media, quanto più il modello individuale è prossimo al modello scientifico tanto più la funzionalità del modello è prossima alla funzionalità del modello scientifico. Sebbene tali correlazioni non siano (in relazione alla situazione d'ingresso) molto marcate, tuttavia sono emerse alcune regolarità. In primo luogo, il fatto che il possesso di un modello mentale con caratteristiche strutturali prossime ad modello scientifico è una condizione necessaria (ma non sufficiente) per il completo manifestarsi del potenziale esplicativo del modello individuale. Infatti, gli allievi che manifestano un adeguato livello d'interpretazione microscopica appartengono tutti alla classe M_3 . Gli allievi che evidenziano i modelli più poveri di tipo M_1 , non sono in grado di fornire interpretazioni microscopiche e il loro livello d'interpretazione è confrontabile con quello degli allievi che non manifestano alcun modello microscopico (M_0), mentre gli allievi che hanno evidenziato il modello M_2

(elettroni legati) utilizzano il modello microscopico ma forniscono interpretazioni che configgono con l'esperienza.

Sulla base delle analisi statistiche effettuate sono emersi alcuni elementi che consentono di interpretare tali evidenze. Innanzitutto, il fatto che un'inadeguata rappresentazione delle interazioni che si verificano tra i costituenti microscopici del sistema (che è uno degli elementi che caratterizza la struttura semantica del modello mentale) è uno degli aspetti delle conoscenze spontanee, relative alla natura microscopica della conduzione elettrica, che ostacola il completo manifestarsi del potenziale esplicativo del modello individuale (ossia della capacità di elaborare le informazioni contenute nel modello individuale al fine di interpretare e prevedere fenomeni). In secondo luogo la circostanza che le competenze esplicative sono, in una certa misura, indipendenti dal livello di descrizione dei fenomeni. Il modo in cui abbiamo interpretato tale evidenza è che tali competenze implicano l'attivazione di risorse cognitive di tipo procedurale che non dipendono dagli elementi di conoscenza che tali procedure elaborano.

Per ciò che riguarda la seconda parte della domanda di ricerca, quelle relative alle differenze tra le conoscenze spontanee evidenziate dai due diversi campioni di allievi, un'analisi dettagliata è riportata nei paragrafi 6.2.1 e 6.5.1 (in relazione sia alla situazione d'ingresso che a quella d'uscita). Qui riassumiamo i principali risultati relativi alla situazione rilevata in ingresso. Dal confronto dei dati delle due sperimentazioni, rappresentati nelle figura 7.1 e 7.2, emergono alcune differenze ma anche alcune significative regolarità. In relazione alla classificazione M_i , si osserva che globalmente la distribuzione dei modelli spontanei degli allievi SSIS risulta maggiormente spostata verso rappresentazioni sostanzialmente concordi con il modello scientifico. Le differenze più marcate riguardano il modello M_1 (modello a soli elettroni) e il modello M_3 (modello a elettroni liberi + struttura fissa), le cui percentuali risultano sostanzialmente invertite. Al contrario, risultano sostanzialmente identiche le percentuali di allievi che non esprimono alcun modello microscopico (M_0) e quelli che esprimono il "modello ad elettroni legati" (M_2). In relazione al modello M_2 , gli esiti delle indagini hanno evidenziato chiaramente che il modello ad elettroni legati è

originato dal fatto che gli allievi, nell'interpretare il processo di conduzione elettrica, richiamano il modello di atomo isolato, così come appreso in chimica, e non tengono conto delle modificazioni della struttura elettronica dovute all'interazione tra gli atomi del metallo. Alla luce dei dati raccolti durante la prima sperimentazione, riteniamo che anche nel caso degli allievi SSIS la presenza del modello M_2 abbia la stessa origine e che sia da imputare, dunque, a cattivi esiti dell'istruzione di scuola superiore, non corretti (ma in alcuni casi rinforzati) dall'istruzione universitaria (si veda par. 6.2.1).

Anche in relazione alle competenze interpretative (classificazione I), il livello d'interpretazione degli studenti liceali risulta globalmente più carente di quello evidenziato dagli allievi insegnanti. Si osserva che circa il 70 % degli allievi evidenzia un livello d'interpretazione I_1 e circa il 20 % degli allievi evidenzia un livello d'interpretazione I_2 . In relazione a questi ultimi si conferma, inoltre, in termini statistici, un risultato emerso dall'indagine pilota, ovvero la circostanza che gli allievi che forniscono un'interpretazioni microscopiche non coerenti con le interpretazioni scientifiche appartengono alla classe M_2 . Soltanto un allievo fornisce un'interpretazione microscopica adeguata sia della resistenza elettrica che dell'influenza della temperatura sulle proprietà elettriche del metallo. Ciò che emerge da tale analisi comparativa è che i modelli pre-istruzione relativi ai processi microscopici della conduzione elettrica espressi dagli allievi di liceo sono globalmente più lontani da quelli accettati scientificamente. Limitatamente alla situazione d'ingresso, ciò conferma i risultati riportati in alcuni studi precedenti (ad esempio, Borges e Gilbert, 1999) e relativi al fatto che le concezioni spontanee sui processi microscopici espresse da individui di diversa età e livello d'istruzione sono qualitativamente differenti ed esibiscono un profilo di evoluzione verso modelli più adeguati e coerenti al crescere dell'età e dell'esperienza.

Gli esiti di tale analisi comparativa saranno ulteriormente commentati e precisati nel successivo paragrafo 7.2.4, in cui si evidenzieranno gli effetti dell'istruzione sull'evoluzione dei modelli dei due campioni di allievi.

7.2.2 Elementi emersi in relazione alla seconda domanda di ricerca

La seconda domanda di ricerca è la seguente:

Quali sono le evidenze che la ricerca fornisce circa le connessioni tra aspetti microscopici e macroscopici delle conoscenze evidenziate dagli allievi?

Le evidenze sperimentali raccolte durante le due sperimentazioni, in corrispondenza di diversi momenti del processo d'insegnamento/apprendimento, hanno messo in luce che tra componenti macroscopiche e microscopiche delle conoscenze e competenze degli allievi esistono delle intime e sinergiche relazioni. I risultati conseguiti permettono di precisare l'osservazione circa le correlazioni tra competenze interpretative e livelli di descrizione dei fenomeni riportata nel paragrafo precedente. In particolare, le analisi statistiche condotte permettono di concludere che il possesso (o lo sviluppo) di appropriate conoscenze dei processi microscopici favorisce la capacità di estrarre dai fenomeni macroscopici informazioni finalizzate alla loro interpretazione. Abbiamo, infatti, osservato che la capacità d'interpretare i fenomeni al livello microscopico (che presuppone, per quanto detto nel paragrafo precedente, il possesso di adeguate conoscenze microscopiche) implica la capacità di analizzare fenomeni e processi (anche relativamente complessi) anche a livello macroscopico. Un altro degli esiti generali della ricerca riguarda un'osservazione complementare alla precedente. Abbiamo evidenziato sperimentalmente che un appropriato sviluppo dei modelli microscopici della conduzione è fondato su una corretta e autonoma elaborazione di informazioni tratte osservazioni macroscopiche. Si osserva, infatti, che gli allievi che non riescono a revisionare autonomamente i propri modelli microscopici sulla base delle osservazioni sperimentali (proposte durante la prima fase del percorso), tendono a mantenere modelli e interpretazioni fortemente influenzati dalle conoscenze spontanee.

Riteniamo che i risultati riportati sopra si configurino come esiti generalizzabili della presente ricerca, in quanto verificati in relazione ad una popolazione di allievi con caratteristiche cognitive, età e natura delle conoscenze di base molto differenti. Tali risultati, inoltre, rappresentano significative e complete evidenze sperimentali, generate in un contesto relativamente ampio e

diversificato di allievi, che contribuiscono a corroborare alcune ipotesi avanzate, ma soltanto parzialmente confermate, nell'ambito di studi precedenti (Eylon e Ganiel, 1990; Tacker, 1999; Tacker, 2003).

7.2.3 Elementi emersi in relazione alla terza domanda di ricerca

La terza domanda di ricerca è la seguente:

Quali sono le ipotesi e i presupposti fondamentali di cui si deve tener conto al fine di favorire e facilitare l'apprendimento dei modelli della conduzione elettrica e lo sviluppo di competenze interpretative?

La risposta a tale domanda discende, in modo naturale, da quanto illustrato nel paragrafo precedente. Infatti, il presupposto pedagogico fondamentale, formulato sulla base dell'analisi a priori (di tipo storico-epistemologico e degli studi pedagogici precedenti), è che lo sviluppo di adeguate competenze di analisi e di interpretazione dei fenomeni possa essere favorito da approcci didattici che enfatizzino le connessioni tra aspetti macroscopici e microscopici delle conoscenze fisiche. Tale ipotesi generale è stata esplicitata in termini di due ipotesi complementari. La prima è che una corretta e autonoma elaborazione di informazioni tratte da osservazioni macroscopiche possa favorire lo sviluppo di adeguati modelli dei processi microscopici; la seconda, complementare alla prima, è che lo sviluppo di adeguati modelli microscopici favorisca la capacità interpretare i fenomeni macroscopici. Se, da un lato, tali ipotesi hanno influenzato criticamente le principali scelte pedagogiche, la strutturazione e l'organizzazione percorso, d'altro, la verifica della loro correttezza ha rappresentato uno degli obiettivi principali delle sperimentazioni effettuate.

Riteniamo che i risultati riportati nel paragrafo precedente corroborino la validità di entrambe queste ipotesi e, di conseguenza, confermino la correttezza del presupposto pedagogico fondamentale. Si ritiene che tale risultato rappresenti una chiaro indizio dell'autoconsistenza dell'intero progetto discusso in questa tesi.

7.2.4 Elementi emersi in relazione alla quarta domanda di ricerca

La quarta domanda di ricerca è la seguente:

In che misura e sotto quali condizioni i materiali, gli strumenti e i processi didattici attivati favoriscono un'adeguata evoluzione delle conoscenze e competenze disciplinari degli allievi?

La risposta a quest'ultima domanda di ricerca può essere fornita sulla base dell'analisi riportata nei paragrafi 5.4.4 e 6.5.1. In particolare, gli esiti delle due sperimentazioni consentono di affermare che globalmente gli esiti didattici e formativi degli interventi realizzati sono significativi, in quanto tutti gli allievi hanno evidenziato conoscenze e competenze d'uscita decisamente più prossime alle conoscenze scientifiche di quanto evidenziato in ingresso (per i dati quantitativi si veda, ad esempio, i paragrafi 5.4 e 6.5). L'analisi dei percorsi d'apprendimento degli allievi ha messo in luce, tuttavia, che l'ambiente didattico e gli strumenti pedagogici progettati possono supportare un'adeguata evoluzione delle conoscenze e competenze disciplinari degli allievi a condizione che l'apprendimento sia fondato sull'elaborazione autonoma delle informazioni tratte da osservazioni macroscopiche (proposte durante la prima fase del percorso formativo). Come già richiamato, infatti, gli allievi che non riescono a revisionare autonomamente i propri modelli microscopici, sulla base delle osservazioni sperimentali, tendono a mantenere e, in alcuni casi, a rinforzare modelli e schemi d'interpretazione fortemente influenzati dalle conoscenze spontanee. Ciò coinvolge, prevalentemente, gli allievi che in ingresso hanno evidenziato modelli più poveri e frammentari. Tali considerazioni sono confermate dagli esiti della seconda sperimentazione, nell'ambito della quale è stato proposto agli allievi un percorso potenziato nella parte relativa alle osservazioni qualitative³⁷. L'analisi dei percorsi d'apprendimento ha, infatti, evidenziato che, come conseguenza del potenziamento della fase osservativa del percorso didattico, una percentuale maggiore di allievi appartenenti alle classi M_0 ed M_1 è riuscita a sviluppare adeguate conoscenze.

³⁷ Tramite l'inclusione di attività relative all'analogia gravitazionale dei fenomeni elettrici.

Un'ultima considerazione riguarda il confronto tra i percorsi d'apprendimento evidenziati dalle due diverse popolazioni di allievi. Rispetto alla situazione pre-istruzione, illustrata nel paragrafo 7.2.1, i dati d'uscita rappresentano una situazione molto differente. Si è osservato (par. 6.5.1), infatti, che le caratteristiche strutturali dei modelli della conduzione elettrica evidenziati dalle due popolazioni di allievi presentano distribuzioni molto simili: per entrambe le popolazioni in uscita sono presenti soltanto i modelli M_1 ed il modello M_3 (ad eccezione di un unico allievo di liceo che esprime il modello M_2), senza differenze quantitative significative tra le due popolazioni.

Per quanto riguarda la situazione d'uscita relativa alle competenze interpretative, i dati indicano che in termini assoluti le prestazioni evidenziate dagli studenti di liceo sono inferiori a quelle degli allievi insegnanti. Abbiamo già osservato (par. 6.3.2) che uno dei motivi che può avere determinato tale situazione è il fatto che i livelli di partenza degli studenti di liceo erano molto più carenti. Infatti, se la situazione d'uscita dei due campioni viene riferita alle corrispondenti situazioni d'ingresso, l'incremento globale delle prestazioni interpretative risulta maggiore per gli studenti di liceo. Tuttavia, ricollegandoci a quanto illustrato nel paragrafo 7.2.1, a proposito dell'influenza dell'età e del livello d'istruzione sulle conoscenze degli allievi, possiamo avanzare una diversa ipotesi, vale a dire che tale influenza si manifesti, più che in termini di sviluppo di conoscenze di tipo strutturale, in termini di sviluppo di competenze di tipo procedurale, ovvero della capacità di connettere ed elaborare le conoscenze possedute al fine di fornire interpretazioni e previsioni dei fenomeni osservati.

Bibliografia

- Artigue, M. (1988). "Ingenierie didactique. Recherches en didactique des Mathematiques". 9(3), 281–308.
- Bao, L. and Redish E. F. (2001). Concentration Analysis: A Quantitative Assessment of Student States. PERS of American Journal of Physics, 69(7), S45-S53.
- Barnes, B. (1974). Scientific knowledge and sociological theory. London: Routledge.
- Bellomonte, L. and R.M. Sperandeo (1996). "Computer simulation of electric conductivity in a solid using classical mechanics". Computer in Physics 10 (4), 376-384.
- Benseghir, A. and Closset J. (1996). "The electrostatics – electrokinetics transition: historical and educational difficulties". Int. J. Sci. Educ. 18 179–91
- Bonura, A. (2002). "Introduzione alla Fisica". Paravia - Torino
- Bonura, A., Capizzo M. C., and Fazio C., "A Pedagogical Approach to Modelling Electric Conduction in Solids". Girep 2006
- Borges A. T., Gilbert J. K. (1999). "Mental models of electricity" International Journal of Science Education, Volume 21, Issue 1.
- Borghini, L., De Ambrosis, A., and Mascheretti, P. (2007). "Microscopic models for bridging electrostatics and currents", Physics Education 42 (2).

- Bridgman, M. P. W. (1924). "Rapport sur les phenomenes de conductibilité dans les métaux et leur explication théorique", atti della quarta conferenza di Solvay, Bruxelles 1924.
- Brousseau, G. (1983). Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques. *Recherches en didactique des mathématiques*. 4, 3, 165-198.
- Bruner, J. (1966). *Toward a Theory of Instruction*. Cambridge, MA, Harvard University Press.
- Buty, C., Tiberghien ,A, (2004). Learning hypotheses and an associated tool to design and to analyse teaching–learning sequences. *INT. J. SCI. EDUC.*, 16 APRIL 2004, VOL. 26, NO. 5, 579–604
- Chan, C., J. Burtis, et al. (1997). "Knowledge building as a mediator of conflict in conceptual change." *Cognition and Instruction*.
- Chi, M. T. H. (1992). *Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science*. *Cognitive Models of Science: Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. . R. G.). Minneapolis, MN, University of Minnesota Press.
- Chinn, C. and W. Brewer (1993). Factors that influence how people respond to anomalous data. *Fifteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Boulder, CO, Cognitive Science Society.
- Cobb, P. (2005). *Where is the mind? A coordination of sociocultural and cognitive constructivist perspectives*. *Constructivism: Theory, Perspectives and Practice*. C. T. Fosnot. New York, Teachers College Press
- Cobb, P. Stephan, M. McClain, K., & Gravemeijer, K. (2001). Participating in classroom mathematical practices. *The Journal of the Learning Sciences*, 10, 113- 163.
- Cohen, D. (1987). Behaviorism. *The Oxford Companion to the Mind*. R. L. Gregory. New York, Oxford University Press: 71.

- Collins, A., Joseph D. e Bielaczyc K. (2004). "Design research: Theoretical and methodological issues". *The Journal of the Learning Sciences*, n. 1, pp. 15-42.
- Collins, A. (1992), *Toward a design science of education*. In E. Scanlon e T. O'Shea (a cura di), *New directions in educational technology*, Berlin, Springer, pp. 15-22.
- Collins, H. (1985). *Changing order*. London: Sage.
- Cosgrove, M. and R. Osborne (1985). *Lesson frameworks for changing children's ideas. Learning in science: the implications of children's science*. R. Osborne and P. Freyberg. Auckland, Heineman.
- D'Amore, B. (1999). *Elementi di didattica della matematica*. Bologna: Pitagora.
- de Kronig R. L. and W. G. Penney, (1931) "Quantum mechanics of electrons in crystal lattices," *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 130, 499–513.
- De Posada, J. M. (1997). "Conceptions of High School Students Concerning the Internal Structure of Metals and Their Electric Conduction: Structure and Evolution". *Science Education*, 81(4), 445-467.
- Design-Based Research Collective (2003). "Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry". *Educational Researcher*, n. 1, pp. 5-8.
- Dewey, J. (1960). *The quest for certainty*. New York: Capricorn.
- diSessa, A. A. and J. F. Wagner (2005) in *Transfer of Learning From a Modern Multidisciplinary Perspective*, edited by J. Mestre (Information Age, Greenwich, CT, 2005), pp. 121–154.
- diSessa, A. A. (1988). *Knowledge in pieces*. In G. Foreman & P. Pufall (Eds.), *Constructivism in the computer age* (pp. 49-70). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- diSessa, A. A. (1993). "Towards an epistemology of physics." *Cognition and Instruction* 10(2-3):105-225.

- diSessa, A. A. and B. L. Sherin (1998). "What changes in conceptual change?"
International Journal of Science Education 20(10): 1155-1192. Phillips,
D.C. (ed.) (2000) Constructivism in Education: Opinions and Second
Opinions on controversial issues: 99th Yearbook of the National Society
for the Study of education. Part 1. Chicago, Illinois. The University of
Chicago Press.
- diSessa, A. and J. Wagner (2005). What Coordination Has to Say about Transfer.
Transfer of Learning from a Modern Multidisciplinary Perspective. J. P.
Mestre. Greenwich, CT, information Age Publishing Inc.
- Drude, P.(1900). "Zur Elektronentheorie der Metalle", AP, 1 (1900), 566-613;
AP, 3, 369-402.
- Eckertm, M. et al (1992). "The root of solid-state physics before quantum
mechanics", in Hoddeson et al [1992b], 3-87.
- Eggen, P. D. and D. P. Kauchak (2004). Educational psychology : windows on
classrooms. NJ, Upper Saddle River.
- Entwistle, N. (1997). Introduction: Phenomenography in higher education. Higher
Education Research and Development, 16, 127-134.
- Eylon B. S. and U. Ganiel (1990). "Macro-Micro Relationships: The Missing Link
Between Electrostatics and Electrodynamics in Students' Reasoning, Int. J.
Sci. Educ. 12, 79-94
- Festinger, L. (1957). A Theory of Cognitive Dissonance. Stanford, CA, Stanford
University Press.
- Giere, R.N , Explaining Science, A Cognitive Approach. University of Chicago,
Chicago, 1988.
- Gilbert, J. K. and C. J. Boulter (1998). Learning Science through models and
modeling. International Handbook of Science Education. K. Tobin and B.
Frazer.

- Gras, R. (1996). *L'implication statistique (Nuovelle méthode exploratoire de données)*, R.D.M., La Pensée Sauvage, Grenoble, 1996.
- Greca, I.M and M.A.(Moreira 2002) "Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physic" *Sci. Educ.* 86-1, 106-121.
- Greca, I.M. and M.A Moreira. (2000) "Mental models, conceptual models, and modeling," *Int. J. Sci. Educ.* 22 (1), 1–11
- Guzetti, B.J., Snyder, T.E., Glass, G.V., and Gamas W.S. (1993). Promoting conceptual change in science : A comparative meta-analysis of instructional interventions from reading education and science education. *Reading Research Quarterly* 28, 116-159.
- Hammer, D. (1996). More than misconceptions: multiple perspectives on student knowledge and reasoning and an appropriate role for education research. *American Journal of Physics*, 64 (10), 1316-1325.
- Hammer, D. (2000). Student resources for learning physics. *American Journal of Physics*, 68(S1), 552-559.
- Hestenes, D. Wells, M. and Swackhammer, G. (1992). "Force Concept Inventory," *Phys. Teach.* 30, 141–158.
- Hewson, P. W. (1981). "A conceptual change approach to learning science." *European Journal of Science Education* 3(4): 383-396.
- Hirvonen, P. E. (2007). "Surface-charge-based micro-models— a solid foundation for learning about direct current circuits" *Eur. J. Phys.* 28, 581–592
- Hoddeson, L. Baym G. (1992). "The development of the quantum mechanical electron theory of metals, *Pro. R. Soc. Lond. A* 371, 8-23, 1980; L. Hoddeson, G. Baym, M. Eckert "The development of the quantum mechanical electron theory of metals", in Hoddeson et al. [1992b], 88-181.
- Hrepic, Z. (2002). Identifying students' mental models of sound propagation. *Physics*. Manhattan, KS, Kansas State University.

- Johnson-Laird (1983). *Mental Models*. Cambridge, Harvard University Press.
- Gentner, D. and A. L. Stevens (1983). *Mental Models*. Hillsdale, Lawrence Erlbaum.
- Kaiser, W. (2001). "Electron gas theory: free electron in bulk matter", in "Histories of the electron: the birth of microphysics", The MIT Press 2001.
- Karrqvist, C. (1985). In R.Duit, W. Jung; and C. von Rhonec (eds), "Aspect of Understanding Electricity (Kiel, Germany: IPN) 215-226.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengieber, H. and Komorek, M. (1995) A model of Educational Reconstruction. Paper presented at The NARST annual meeting, San Francisco, CA.
- Keesom, W. H. (1913) "On the theory of free electrons in metals", Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW), 16 I, 1913, Amsterdam, , pp. 236-245. B.
- Kittel C., (1976). "Introduction to Solid State Physics" .Wiley, New York, 1976, 5th ed., pp. 191–192.
- Kolbas R.M., Holonyak N., (1984). "Man-Made quantum wells: A new perspective on the finite square-well problem". *Am. J. Phys.* 52(5).
- Koumaras, P., Psillos, D., and Kariotoglou, P. (1997). Causal structures and counterintuitive experiments in electricity. *International Journal of Science Education*. 19, 617 - 630.
- Levrini,L. and diSessa, A. (2008). How students learn from multiple contexts and definitions: Proper time as a coordination class. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 4, 010107
- Lijnse, P.L. (1994) La recherche-d'veloppement: une voie vers une 'structure didactique' de la physique empiriquement fond'ee. *Didaskalia*, 3, 93–108.
- Linjse, P.L. (1995) 'Developmental Research' as a way to an empirically based 'Didactical Structure' of science, *Science Education*, 79(2), 189–199.

- Lorentz, H. A. (1905). "Le mouvement des électrons dans les métaux" Archives Neerlandaise des Sciences exactes et naturelles, [2] 10 (1905), 336-371; H. A. Lorentz "The theory of electrons" (reprint del 1923)
- Magnusson, S.J., Templin, M., and Boyle, R.A. (1997). Dynamic science assessment: A new approach for investigating conceptual change. *Journal of the Learning Sciences*, 6(1), 91-142.
- Marton, F. (1981). Phenomenography. Describing conceptions of the world around us. *Instructional Science*, 10, 177-200
- Marton, F. (1994). Phenomenography. In T. Husen and T. N. Postlethwaite (Eds.), *The international encyclopedia of education* (2nd ed., Vol. 8, pp. 4424-4429). Oxford, U.K.: Pergamon.
- Méheut, M. and Psillos, D. (2004). Teaching-Learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, 26, 515-536.
- Minstrell, J. (1992). Facets of students' knowledge and relevant instruction. In R. Duit, F. Goldberg, & H. Niedderer (Eds.), *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies* (pp. 110-128). Kiel: IPN.
- Morrison M. and Morgan M.(1999). "Models as mediating instruments," in *Models as Mediators*, edited by M. Morrison and M. Morgan (Cambridge U.P., Cambridge, 1999), pp. 10–37.
- Novak, J. (1977). *A theory of education*. Ithaca, Cornell University Press.
- Nussbaum J. (1989). "Classroom conceptual change: philosophical perspectives. " *International Journal of Science Education* 11, 530-540.
- Osborne, R. (1983). "Towards modifying children's idea about electricity". *Res. Sci. Tec. Ed.* 1(1), 73-82.
- Pallant, A. & Tinker, R.F. (2004). Reasoning with Atomic-Scale Molecular Dynamic Models. *Journal of Science Education and Technology*, 13, 51-6

- Park, J. (2006). "Modeling Analysis of Students' Processes of Generating Scientific Explanatory Hypotheses." *International Journal of Science Education* 28(5): 469-489.
- Phillips, D. C. (1995). "The good, the bad and the ugly: The many faces of constructivism." *Educational Researcher* 24(7): 5-12.
- Piaget, J. (1964). "Development and Learning." *Journal of Research in Science Teaching* 2(3):176-186.
- Pippard "Electron in solid", *Twentieth Century Physics, Vol III*, American Institute of Physics Press, New York
- Posner, B., K. Strike, et al. (1982). "Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change." *Science Education* 66: 211-227.
- Proc. Roy. Soc. "The beginnings of solid state physics", A371, 1980, 3-177.
- Psillos, D. and MéHeut, M. (co-ords.) (2001) Teaching–learning sequences as a means for linking research to development. In D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselves, G. Bisdikian, G. Fassoulopoulos, E. Hatzikraniotis and M. Kallery (eds.) *Proceedings of the Third International Conference on Science Education Research in the Knowledge Based Society* (Thessaloniki: Art of Text Publications), 226–241.
- Psillos, D., Koumaras, P. and Valassiades, O. (1987). Students' representations of electric current before, during and after instruction on DC circuits. *Journal of Research in Science and Technological Education*. 5, 185-189.
- Redish, E. F. (2004). *A Theoretical Framework for Physics Education Research: Modeling Student Thinking*. International School of Physics, "Enrico Fermi", Course CLVI, Varenna, Italy, Società Italiana di Fisica.
- Reiner, M., J. D. Slotta, et al. (2000). "Naive physics reasoning: A commitment to substance based conceptions." *Cognition and Instruction* 18(1): 1-34.

- Resnick, M. & Wilensky, U. (1998). Diving into Complexity: Developing Probabilistic Decentralized Thinking Through Role-Playing Activities. *Journal of the Learning Sciences*, 7(2), 153-171.
- Richardson, O.W. (1929). "Thermionic phenomena and the laws which govern them" Nobel Lecture, December 12, 1929.
- Schwedes, H. and Schmidt, D. (1992). Conceptual change and theoretical comments. In R. Duit, F. Goldberg and H. Niedderer (eds.) *Research in physics learning : theoretical issues and empirical studies*. Kiel : IPN, 188-202.
- Scott, P. H., Asoko, H.M. and Driver, R.H. (1992). Teaching for conceptual change : a review of strategies. In R. Duit, F. Goldberg and H. Niedderer (eds) *Research in physics learning : theoretical issues and empirical studies*. Kiel : IPN, 310-329.
- Shipstone, D. M. (1985). "Electricity in simple DC circuits". In R. Driver, E. Guesne, A. Tiberghien (eds), *Children's idea in science* (Milton Keynes, England: Open University Press).
- Skinner, B. F. (1953). *Science and Human Behavior*. New York, Macmillan.
- Smith, J., diSessa, A. and Roschelle, J. (1993). Misconceptions reconceived: a constructivist analysis of knowledge in transition. *The Journal of the Learning Science*, 3 (2), 115-163.
- Squire K.D. (2005), Resuscitating research in educational technology: Using game-based learning research as a lens for looking at design-based Research, «*Educational Technology*», n. 1, p. 8 e segg.
- Steinberg, R. N. and Sabella, M. S. (1997). Performance on multiple-choice diagnostics and complementary exam problems. *Physics Teacher*, 35 (3), 150-163.
- Stockmayer, S. M., Treagust, D.F. (1996). Images of electricity: hw do novices and experts model electric current? *Int. J. Sci. Educ.* 18 (2), 163–178

- Thacker, B. A. (2003). "A study of the nature of students' models of microscopic processes in the context of modern physics experiments" *Am. J. Phys.* 71 (6).
- Thacker, B. A. Ganiel, U. ,and Boys, D. (1999) "Macroscopic phenomena and microscopic processes: Student understanding of transients in direct current electric circuits," *Am. J. Phys.* 67, Physics Education Research Supplement, S25–S31.
- Thornton, R. K. and 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.* 4, 338–352.
- Thornton, R., K. (1995). *Conceptual dynamics: Changing students views of force and motion.* In C. Tarsitani, C. Bernandini & M. Vincentini (Eds.), *Thinking Physics for Teaching* (pp. 157-183) London, UK: Plenum.
- Tiberghien A (1984). "Revue critique sur les recherches visant à élucider le sens des notions de circuits électriques pour des élèves de 8 à 16 ans". *Recherches en Didactique de la Physique, Les Actes du premier Atelier International: la Londe les Maures* (Paris: CNRS) pp 91–107
- Viennot, L. (1979). "Spontaneous reasoning in elementary dynamics." *European Journal of Science Education* 1: 205-211
- von Glasersfeld, E. (1991). *Cognition, construction of knowledge, and teaching.* In M. R. Matthews (Ed.), *History, philosophy, and science teaching* (pp. 117-132). New York: Teachers College Press. (Reprinted from *Synthese*, 1989, 80(1), 121-140.)
- von Glasersfeld, E. (1993). *Questions and answers about radical constructivism.* In K. Tobin (Ed.), *The practice of Constructivism in Science Education*, Hove. Lawrence Erlbaum.
- Vosniadou, S. (1994). "Capturing and modeling the process of conceptual change." *Learning and Instruction* 4: 45-69.

- Vosniadou, S. (2002). On the nature of naïve physics. Reconsidering conceptual change: Issues in theory and practice L. Limón and M. Mason. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in Society: The development of Higher Psychological Processes*. Cambridge, Harvard University Press
- Wien, W. (1913). Berl. Ber.
- Wittmann, M. C. et al. (2002). Investigating student understanding of quantum physics: Spontaneous models of conductivity *Am. J. Phys.* 70 (3).
- Woolfolk, A. (2001). *Educational psychology*. Needham Heights, MA, Allyn and Bacon

Ringraziamenti

Durante il corso della mia ricerca ho avuto la fortuna di poter contare sull'aiuto ed il supporto di numerose persone. Ed è grazie al loro impagabile contributo che la ricerca discussa in questa tesi ha assunto la forma attuale. I miei ringraziamenti vanno alla Professoressa Rosa Maria Sperandeo Mineo, coordinatrice del GriaF dell'Università di Palermo, e al mio Tutor, Dottor Claudio Fazio, per l'aiuto fornitomi, in varie forme, durante le fasi della ricerca e per i preziosi suggerimenti e le critiche che hanno orientato il mio lavoro, riconducendolo, quando necessario, su terreni più solidi. Desidero ringraziare, inoltre, il Professore Filippo Spagnolo, coordinatore del Dottorato di Ricerca, per gli stimoli derivanti dalla diversificata attività formativa da lui predisposta e per la grande disponibilità mostrata durante tutto il corso di studi. La mia sincera gratitudine va inoltre a coloro che hanno contribuito alla mia formazione e al buon esito della mia ricerca. In particolare, al Professore Arturo Russo dell'Università di Palermo, per il materiale generosamente fornitomi e per l'autorevole sostegno offertomi in relazione all'approfondimento degli aspetti storici della mia ricerca. Al Professore Roberto Zingales dell'Università di Palermo, per i preziosi suggerimenti relativi ad alcuni argomenti di chimica connessi alla mia attività di ricerca. Al Professore Marcello Briguglia, supervisore Sissis e illuminato docente di Fisica, per aver condiviso, coraggiosamente, il mio progetto, permettendomi di sperimentarlo in una sua V classe del Liceo Scientifico Galileo Galilei di Palermo, nonostante l'approssimarsi degli esami di maturità. Alla Professoressa Filippa Alicata e agli allievi Sissis, Ing. Luciano Curcio e Ing. Stefano Spezia, per il loro prezioso contributo ad alcune fasi sperimentali della ricerca. Ai miei colleghi dottorandi e a quelli del GriaF con cui abbiamo condiviso questi tre anni di intenso lavoro. Ed, infine, alla mia famiglia per aver sopportato la mia assenza e, in certi casi, la mia presenza.

APPENDICI

APPENDICE P1: Protocollo d'ingresso

APPENDICE P2: Protocollo d'uscita

APPENDICE P3: Test finale metacognitivo proposto agli allievi SSIS

APPENDICE A1: Scheda attività su analogia meccanica della conduzione elettrica

APPENDICE A2: Scheda relativa all'interpretazione di fenomeni elettrotermici

APPENDICE M1: Scheda attività su Modelli NetLogo ed esperimenti virtuali

APPENDICE MQ1: Scheda attività su Soluzione numerica dell'equazione di Shroedinger per buche di potenziale accoppiate

APPENDICE MQ2: Scheda attività con generatore di bande

APPENDICE P1

Protocollo d'ingresso

Nome e cognome.....

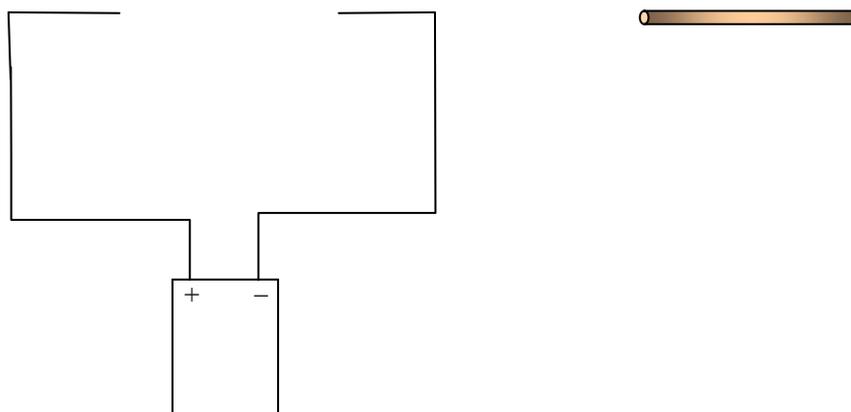
Classe(/laurea).....

Data.....

A. La figura rappresenta un chiodo di ferro. Descrivi la sua struttura microscopica aiutandoti con un disegno.



B. La figura rappresenta un sistema costituito da una batteria e da due cavetti di collegamento (con resistenza trascurabile).



B1. Descrivi che cosa accade quando tra i due poli della batteria viene inserito il filo di rame rappresentato a destra. Ti suggeriamo alcuni termini che puoi usare nella tua spiegazione: Forza elettrica, differenza di potenziale, campo elettrico, carica elettrica, corrente elettrica, tensione, resistenza elettrica, resistività. (N.B. Non è necessario che la tua spiegazione contenga tutti i termini riportati sopra ma soltanto quelli che ritieni pertinenti ed eventualmente altri non elencati).

B2. Prova a fornire un'interpretazione microscopica della conduzione elettrica in un filo di rame, aiutandoti con un disegno per evidenziare i processi microscopici che si verificano al suo interno e descrivendo il moto di un singolo elettrone.

C. Qual è l'origine microscopica della resistenza elettrica di un metallo e da quali parametri microscopici dipende?

D. Supponi, adesso, che il filo di rame venga riscaldato (usando, per esempio, la fiamma di un accendino). L'innalzamento della temperatura del filo produce degli effetti? Se la risposta è affermativa, quali sono le grandezze elettriche che cambiano e in che modo? Motiva la tua risposta sulla base del modello microscopico che hai illustrato in B2.

APPENDICE P2

Test finale

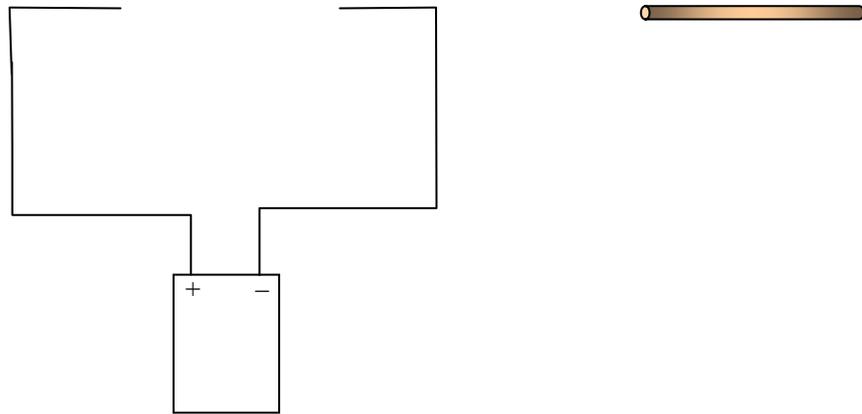
Nome e cognome.....

Classe

Data.....

I parte

A. La figura rappresenta un sistema costituito da una batteria e da due cavetti di collegamento (con resistenza trascurabile).



A1. Descrivi che cosa accade quando tra i due poli della batteria viene inserito il filo di rame rappresentato a destra.

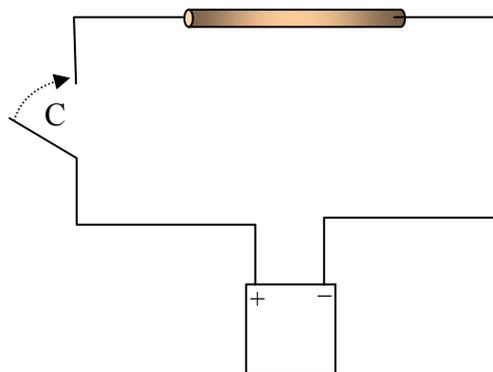
A2. Prova a fornire un'interpretazione microscopica della conduzione elettrica in un filo di rame, aiutandoti con un disegno per evidenziare i processi microscopici che si verificano al suo interno e descrivendo il moto di un singolo elettrone.

A3. Qual è l'origine microscopica della resistenza elettrica di un metallo e da quali parametri microscopici dipende?

A4. Supponi, adesso, che il filo di rame venga riscaldato (usando, per esempio, la fiamma di un accendino). L'innalzamento della temperatura del filo produce degli effetti? Se la risposta è affermativa, quali sono le grandezze elettriche che cambiano e in che modo? Motiva la tua risposta sulla base del modello microscopico che hai illustrato in A2.

II Parte

B. La figura rappresenta un circuito formato da una batteria, da alcuni cavi di collegamento, da un interruttore (C) e da un conduttore elettrico. Al tempo $t=0$ l'interruttore viene chiuso.



B1. Disegna il grafico qualitativo della temperatura del conduttore in funzione del tempo dall'istante in cui l'interruttore viene chiuso.



B2. Disegna il grafico della corrente I che attraversa il conduttore in funzione del tempo



B3. Disegna il grafico della resistività del conduttore in funzione della temperatura



B4. Evidenzia le relazioni tra gli andamenti di $T(t)$, $I(t)$ e $\rho(T)$

B 5. Fornisci un'interpretazione microscopica di tali andamenti e delle loro relazioni.

C. Illustra le ipotesi e gli elementi principali su cui si fonda il modello microscopico della conduzione elettrica nei metalli, evidenziando perché il modello di Drude risulta inadeguato.

D. Le proprietà elettriche di un conduttore potrebbero essere sfruttate per misurare la temperatura (cioè per costruire un termometro)? Se lo ritieni possibile, fornisci una spiegazione.

APPENDICE P3

SCHEMA DATI

Nome e cognome.....

Laurea.....

Scuola superiore frequentata

Come è cambiato il tuo modello microscopico della materia e della conducibilità elettrica dopo il percorso proposto?

C'è qualche aspetto della trattazione che risulta ancora poco chiaro?

C'è qualche aspetto del percorso che avresti eliminato/aggiunto/ modificato?

Ti è sembrata valida la scelta degli strumenti? Quale degli strumenti proposti ritieni più efficaci da un punto di vista didattico? E perché?

APPENDICE A1

<p>Scheda attività. Equivalente meccanico della conduzione elettrica</p> <p>Nome e cognome.....</p> <p>Classe.....</p> <p>Data.....</p>
--

Durante la discussione precedente sono emerse delle strette analogie tra fenomeni elettrici e fenomeni meccanici. In particolare abbiamo visto che:

- 4. un conduttore carico in equilibrio elettrostatico é equivalente ad un piano orizzontale su cui sono poggiate delle palline.
- 5. Un conduttore carico collegato a terra presenta delle analogie con un piano inclinato su cui si muove un corpo.
- 6. Il moto di un elettrone all'interno di un conduttore collegato ad un generatore in c.c. presenta delle analogie con il moto di un corpo su un piano inclinato che, raggiunta la base del piano, viene riportato alla posizione di partenza.

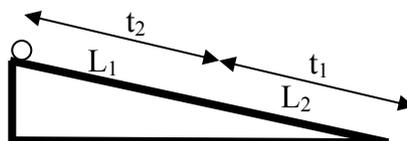
In questo terzo caso tuttavia il sistema elettrico e quello meccanico non sono perfettamente equivalenti. Sapresti illustrare le differenze tra il moto di un elettrone che partecipa alla corrente elettrica e il moto di una pallina sul piano inclinato?

Per rendere più stretta l'analogia consideriamo un piano inclinato su cui è stato predisposto un reticolo regolare di ostacoli (ad esempio dei chiodi) e proviamo a ricavare delle informazioni sui modelli microscopici della conduzione elettrica a partire da tale semplice analogia meccanica.

Esperimento

Lo scopo dell'esperimento è quello di ricavare le proprietà del moto di una sferetta che rotola sul piano inclinato su cui è stato fissato un reticolo regolare di chiodi.

In particolare, vogliamo verificare quali sono gli effetti del reticolo sul moto della sferetta. Per farlo lasciamo cadere la sferetta dalla cima del piano e misuriamo i tempi impiegati dalla sferetta per percorrere la metà superiore e la metà inferiore del piano.



Esegui le misure diverse volte e riporta i valori misurati nella tabella seguente.

Prova n.	t_1 (metà superiore)	t_2 (metà inferiore)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

Analizza i dati

A partire dai valori riportati in tabella ricava i tempi medi in $\langle t_1 \rangle$ e $\langle t_2 \rangle$ con i relativi errori. Calcola, quindi, i valori delle velocità medie della sferetta $\langle v_1 \rangle$ e $\langle v_2 \rangle$, con i relativi errori, nei due tratti L_1 ed L_2 del percorso. Riporta i valori ottenuti nella tabella seguente.

$L_1 = L_2 =$	$D =$
$\langle t_1 \rangle =$	$\sigma_{\langle t_1 \rangle} =$

$\langle t_2 \rangle =$	$\sigma_{\langle t_2 \rangle} =$
$\langle v_1 \rangle =$	$\sigma_{\langle v_1 \rangle} =$
$\langle v_2 \rangle =$	$\sigma_{\langle v_2 \rangle} =$

Rispondi alle seguenti domande

2. Sulla base dei risultati sperimentali ottenuti è possibile affermare che la sferetta ha percorso i due tratti con velocità uguale? Motiva la risposta

3. Da quali parametri dipende la velocità media della sferetta? Motiva la risposta

4. Se ripetessimo l'esperimento:

a. aumentando l'inclinazione del piano, la velocità media della sferetta risulterebbe maggiore, minore o uguale? Motiva la risposta

b. con una sferetta di raggio maggiore la velocità media della sferetta risulterebbe maggiore, minore o uguale? Motiva la risposta

c. Riducendo la distanza dei chiodi la velocità media della sferetta risulterebbe maggiore, minore o uguale? Motiva la risposta

5. Durante il moto della sferetta la sua energia meccanica si mantiene costante? Se la risposta è no, che fine fa l'energia meccanica perduta?

6. Prova adesso a precisare le analogie tra il sistema meccanico studiato ed un conduttore attraversato da corrente continua. In particolare:

a. A che cosa corrisponde nel caso elettrico la sferetta che si muove sul piano?

b. A che cosa corrispondono nel caso elettrico i chiodi?

c. A che cosa corrisponde nel caso elettrico la componente della forza di gravità lungo la direzione del piano inclinato?

7. La componente della velocità media, lungo la direzione del campo elettrico, di un elettrone che partecipa alla corrente elettrica è costante o varia? Se ritieni sia costante, che cos'è che impedisce all'elettrone di accelerare?

8. Prova a fornire un'interpretazione microscopica della resistenza elettrica

9. In che cosa consiste l'effetto Joule?

10. Analizzando da un punto di vista energetico il fenomeno meccanico studiato, si verifica un fenomeno analogo all'effetto Joule? Spiega

11. Prova a fornire un'interpretazione microscopica dell'effetto Joule che si verifica quando un conduttore è attraversato da corrente elettrica.

12. Quali sono le differenze tra il sistema meccanico studiato ed il passaggio di corrente elettrica in un conduttore?

Eventuali commenti:

APPENDICE A2

Scheda attività: fenomeni elettrotermici

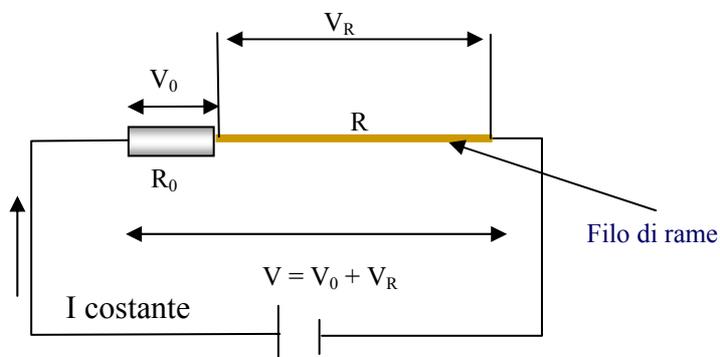
Nome e cognome.....

Laurea/Classe:.....

Data:.....

A. Perché in un conduttore elettrico si verifica l'effetto Joule? Prova a interpretare la conversione di energia implicata da tale fenomeno da un punto di vista microscopico, cioè in termini di processi e interazioni che coinvolgono le particelle di cui è costituito il metallo.

B. Utilizzando il circuito rappresentato in figura abbiamo verificato, qualitativamente, la relazione esistente tra temperatura del filo e resistenza elettrica.



1. Descrivi che cosa abbiamo osservato:

2. I risultati dell'esperimento confermano ciò che ti aspettavi?

3. Perché la resistenza del rame aumenta al crescere della temperatura? Fornisci un'interpretazione microscopica del fenomeno.

APPENDICE M1

Esperimenti virtuali con ambiente Net Logo

Nome e cognome.....

Laurea/Classe:.....

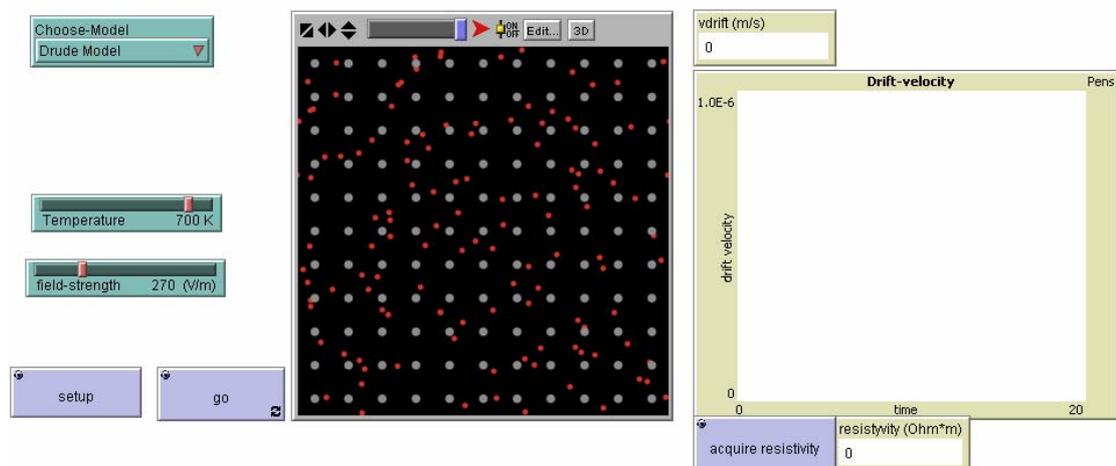
Data:.....

Utilizzando le ipotesi della teoria elettronica dei metalli è stato costruito un modello microscopico virtuale di metallo (modello NetLogo). Esso consente di simulare l'evoluzione e la risposta del sistema al variare di due parametri esterni, la temperatura ed il campo elettrico applicato al conduttore, e fornisce in uscita il valore della velocità di drift degli elettroni (in funzione del tempo) ed il valore della resistività del metallo.

La simulazione considera un piccolo volume di rame che contiene lo stesso numero di ioni e di elettroni liberi. Sono contemplati tre diversi modelli microscopici della conduzione nei metalli, che differiscono l'uno dall'altro per le diverse ipotesi applicate al moto e alla statistica delle particelle del sistema (elettroni e ioni). I tre modelli sono rispettivamente denominati: "Modello di Drude", "Full Classic Model" e "Fermi Model".

Come si usa

La figura rappresenta l'interfaccia utente del modello.



Per usare il programma è necessario procedere nel modo seguente:

scegliere uno dei tre modelli, tramite l'elemento d'interfaccia "Choose-Model";
Selezionare un valore di temperatura ed un valore di campo elettrico
Premere il pulsante "setup"; verranno creati gli ioni e gli elettroni; le dimensioni degli ioni sono costanti nel modello di Drude, dipendenti dalla temperatura negli altri due.

Premere il pulsante "go" per far partire la simulazione.

Gli outputs del programma sono la velocità di drift degli elettroni e la resistività del metallo. Per ottenere il valore istantaneo di quest'ultima è necessario premere, durante il run, il pulsante "acquire resistivity".

Avvertenza: durante la simulazione, il grafico "Drift-velocity" mostra la velocità di drift degli elettroni come funzione del tempo. Per raggiungere la condizione di regime la velocità di drift impiega qualche tempo (dipende dal computer in uso), soltanto allora il valore della resistività sarà attendibile.

ATTIVITA' 1A. Andamento di ρ (T) nel Modello Drude

Proviamo a ricavare l'andamento quantitativo di ρ (T) considerando il modello di Drude che tiene conto delle oscillazioni degli ioni del reticolo. Durante la lezione precedente nel abbiamo visto che il modello di Drude considera le due seguenti ipotesi:

- I. Il moto degli elettroni obbedisce alla statistica di Maxwell-Boltzmann (l'energia cinetica media degli elettroni è proporzionale alla temperatura del metallo)
- II. Gli ioni sono fermi.

Rispondi alle seguenti domande

Prima di procedere con l'esperimento prova a familiarizzare con il sistema. A tal fine, scegli il modello Drude e, mantenendo costante il valore del campo elettrico, prova a lanciare il programma diverse volte modificando ogni volta il valore della temperatura.

a. Quali sono le proprietà degli elettroni che cambiano al crescere della temperatura?

b. Quali sono le proprietà degli ioni che cambiano al crescere della temperatura?

c. Prova a fare una previsione circa l'andamento di ρ in funzione di T, fornendone una giustificazione teorica

Esegui l'esperimento

1. Seleziona il modello "Drude model", fissa il valore del campo elettrico $E = 270 \text{ V/m}$ e un valore della temperatura T , avvia la simulazione, attendi che la velocità di deriva in funzione del tempo si stabilizzi ed acquisisci il valore della resistività.
2. Ricava la stessa misura per altri valori della temperatura mantenendo costante il valore del campo.
3. Riporta i dati ottenuti (temperature e corrispondenti valori di resistività) in un foglio excel e costruisci il grafico (grafico a dispersione) di ρ in funzione di T .
4. Interpola i dati (*aggiungi linea di tendenza*) con una legge di potenza.

Inoltre, Alla luce di quanto hai appreso in relazione al modello microscopico della conduzione prova a precisare le risposte che hai dato alle due domande del relativo ai due fenomeni elettrotermici osservati.

1. Perché si verifica l'effetto Joule?

2. Perché la resistività di un conduttore aumenta con la temperatura?

ATTIVITA' 1B (seconda parte)

Rispondi alle domande

1. Che tipo di dipendenza $\rho(T)$ hai ottenuto con il modello di Drude? (scrivi la funzione approssimando l'esponente di T all'intero o al semi-intero più prossimo)
2. Tale dipendenza è compatibile con l'andamento che abbiamo ricavato dai dati sperimentali? Motiva la risposta

3. Sapresti interpretare la dipendenza di ρ da T (cioè l'esponente di T) che hai ottenuto utilizzando il modello microscopico introdotto? Fornisci una giustificazione per tale andamento sulla base delle ipotesi I e II e dei seguenti fatti:
- a. Come abbiamo visto, la resistività nel modello di Drude-Lorentz può essere espressa come:

$$\rho = \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau}$$

- b. Il reciproco del tempo di volo $1/\tau$ che compare in tale espressione corrisponde alla frequenza f con cui gli elettroni urtano contro gli ioni (probabilità di scattering). La frequenza f dipende dalla dimensione degli ioni (cioè dalla loro area A) e dalla velocità termica (v_m) con cui si muovono gli elettroni.
- c. Tieni conto che agli elettroni liberi si applica il principio di equipartizione dell'energia.

4. Perché il modello non è compatibile con i risultati sperimentali? Che tipo di modifica sarebbe necessario apportare al modello per ottenere una dipendenza lineare di $\rho(T)$?

Avanza delle ipotesi:

ATTIVITA' 2. Andamento di ρ (T) nel modello Full-Classic

Nome e cognome.....

Data.....

Proviamo, adesso, a ricavare l'andamento quantitativo di ρ (T) considerando il modello Full Classic che tiene conto delle oscillazioni degli ioni del reticolo. Ricordiamo che in tale modello vengono considerate le due seguenti ipotesi:

I. Il moto degli elettroni obbedisce alla statistica di Maxwell-Boltzmann (l'energia cinetica media degli elettroni è proporzionale alla temperatura del metallo), come nel modello di Drude

II. Per simulare le oscillazioni del reticolo si suppone che l'ostacolo offerto dagli ioni al moto degli elettroni dipenda dall'ampiezza d'oscillazione e non dalle loro effettive dimensioni, (cioè che il raggio degli ioni sia uguale all'ampiezza d'oscillazione). In altri termini, si suppone che l'area efficace A_{eff} dello ione sia πr^2 , dove r rappresenta l'ampiezza con cui lo ione oscilla.

Prima di procedere con l'esperimento utilizza la simulazione per rispondere alle seguenti domande.

- a. Quali sono le proprietà degli elettroni che cambiano al crescere della temperatura?

- b. Quali sono le proprietà degli ioni che cambiano al crescere della temperatura?

- c. Prova a fare una previsione circa l'andamento di ρ in funzione di T, motivando la tua risposta.

Esegui l'esperimento

1. Seleziona il modello "Full classic Model", fissa il valore del campo elettrico $E = 270$ V/m e un valore della temperatura T, avvia la simulazione, attendi che la velocità di deriva in funzione del tempo si stabilizzi ed acquisisci il valore della resistività.
2. Ricava la stessa misura per altri valori della temperatura mantenendo costante il valore del campo.

3. Riporta i dati ottenuti (temperature e corrispondenti valori di resistività) in un foglio excel e costruisci il grafico (grafico a dispersione) di ρ in funzione di T.
4. Interpola i dati (*aggiungi linea di tendenza*) con una legge di potenza.

Rispondi alle domande

1. Che tipo di dipendenza $\rho(T)$ hai ottenuto con il modello che tiene conto delle oscillazioni degli ioni? (scrivi la funzione approssimando l'esponente di T all'intero o al semi-intero più prossimo)
2. Tale dipendenza è compatibile con l'andamento sperimentale? Motiva la risposta
3. Sapresti interpretare la dipendenza funzionale di ρ da T (cioè l'esponente di T) che hai ottenuto alla luce del modello microscopico .
Nelle tue deduzioni tieni conto dei seguenti fatti:
 - a. Come abbiamo visto, la resistività può essere espressa come:
$$\rho = \frac{m}{ne^2} \frac{1}{\tau}$$
 - b. Il reciproco del tempo di volo $1/\tau$ che compare in tale espressione corrisponde alla frequenza f con cui gli elettroni urtano contro gli ioni (probabilità di scattering).
4. Che tipo di modifica bisognerebbe apportare al modello per ottenere una dipendenza lineare di $\rho(T)$?

ATTIVITA' 3. Andamento di ρ (T) nel modello di Fermi

Nome e cognome.....

Data.....

Proviamo, adesso, a ricavare l'andamento quantitativo di ρ (T) considerando il modello di Fermi che tiene conto della natura quantistica degli elettroni. In tale modello vengono considerate le due seguenti ipotesi:

- I. Il gas di elettroni liberi segue la statistica di Fermi-Dirac, secondo la quale l'energia cinetica media degli elettroni e , di conseguenza, la loro velocità quadratica media è diversa da zero anche per $T = 0$ e risulta pressoché indipendente dalla temperatura.
- II. Per gli ioni valgono le ipotesi già illustrate nell'attività 2 (Modello Full Classic).

Prima di procedere con l'esperimento prova a familiarizzare con il sistema. A tal fine, scegli il modello "Fermi Model" e, mantenendo costante il valore del campo elettrico, prova a lanciare il programma diverse volte modificando ogni volta il valore della temperatura.

- a. La velocità termica degli elettroni cambia al crescere della temperatura?
- b. Quali sono le proprietà degli ioni che cambiano al crescere della temperatura?
- c. Prova a fare una previsione circa l'andamento di ρ in funzione di T, fornendone una giustificazione teorica

Esegui l'esperimento

1. Seleziona il modello "Fermi Model", fissa il valore del campo elettrico $E = 270$ V/m e un valore della temperatura T, avvia la simulazione, attendi che la velocità di deriva in funzione del tempo si stabilizzi ed acquisisci il valore della resistività.
2. Ricava la stessa misura per altri valori della temperatura mantenendo costante il valore del campo.
3. Riporta i dati ottenuti (temperature e corrispondenti valori di resistività) in un foglio excel e costruisci il grafico (grafico a dispersione) di ρ in funzione di T.
4. Interpola i dati (*aggiungi linea di tendenza*) con una legge di potenza.

Rispondi alle domande

1. Che tipo di dipendenza $\rho(T)$ hai ottenuto con il modello che tiene conto delle oscillazioni degli ioni e delle proprietà quantistiche degli elettroni? (scrivi la funzione approssimando l'esponente di T all'intero o al semi-intero più prossimo)
2. Tale dipendenza è compatibile con l'andamento sperimentale?
3. Sapresti interpretare la dipendenza funzionale di ρ da T (cioè l'esponente di T) che hai ottenuto alla luce del modello microscopico utilizzato.

APPENDICE MQ1

Scheda attività.

Soluzione numerica dell'equazione di Shroedinger per buche di potenziale

La presente attività riguarda gli aspetti operativi relativi al modello di cristallo unidimensionale. In particolare, dopo aver introdotto un metodo numerico relativo alla risoluzione dell'equazione di Shroedinger per una particella sottoposta ad un potenziale unidimensionale, si propongono alcune attività, da svolgere tramite l'uso di excel, riguardanti il modello di cristallo a buche di potenziale.

Soluzione numerica dell'equazione di Shroedinger

Consideriamo una particella di massa m sottoposta ad un potenziale unidimensionale $V(x)$. L'equazione di Shroedinger per la particella è:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + V_0 \psi(x) = E \psi(x)$$

Poniamo, per semplicità, $\hbar^2/2m = 1$, e denotiamo la funzione d'onda con il simbolo $f(x)$. L'equazione di Shroedinger può essere, dunque, espressa nella seguente forma:

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = (V(x) - E) f(x)$$

Sostituiamo la variabile continua x con una sequenza discreta equispaziata $x_0 = 0$, $x_1 = dx$, $x_2 = 2dx$, $x_n = ndx$.

In questo modo la derivata seconda di $f(x)$ può essere approssimata da:

$$\left(\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \right)_{x=x_j} = \frac{f(x_{j+1}) - 2f(x_j) + f(x_{j-1}))}{(dx)^2}$$

Cosicché l'equazione differenziale diventa:

$$\frac{f(x_{j+1}) - 2f(x_j) + f(x_{j-1}))}{(dx)^2} = (V(x_j) - E)f(x_j)$$

Da cui:

$$f(x_{j+1}) = (2 + (dx)^2(V(x_j) - E))f(x_j) - f(x_{j-1})$$

Se sono noti i valori di $f(x_j)$, $f(x_{j-1})$, $V(x)$ ed E , l'equazione precedente consente di determinare quello di $f(x_{j+1})$.

Il valore di $V(x)$ è noto ed il valore di E può essere specificato (anche se, in generale, non corrisponderà ad uno stato stazionario). L'equazione differenziale richiede, inoltre, la conoscenza due condizioni iniziali, ad esempio, il valore della funzione $f(x)$ e della sua derivata $f'(x)$ in x_0 , da cui è possibile ricavare il valore di $f(x_1)$, essendo, al primo ordine:

$$f(x_1) = f'(x_0) * dx + f(x_0)$$

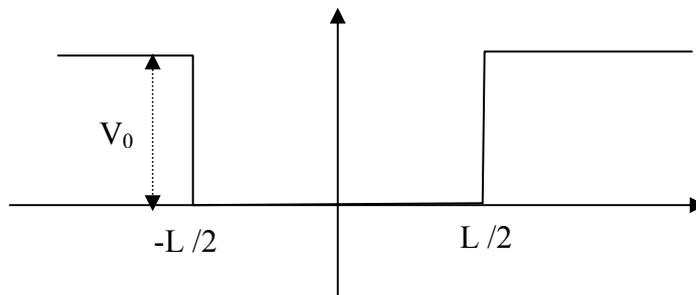
Pertanto, a partire dai valori di $f(x_0)$ ed di $f(x_1)$, possiamo ricavare quello di $f(x_2)$, noto quest'ultimo ricaviamo il successivo e così via.

Utilizzando il foglio elettronico è, quindi, possibile ricavare, riga per riga, i valori della funzione d'onda corrispondente ad un dato valore di E .

Ribadiamo, tuttavia, che le soluzioni accettabili fisicamente (quelle che corrispondono a stati stazionari per la particella) sono quelle che corrispondono a determinati valori dell'energia E . Tali valori vanno determinati imponendo opportune condizioni a contorno alla soluzione (ad esempio l'annullarsi della funzione d'onda per x tendente a infinito, o in determinati intervalli) che dipendono dai dettagli del potenziale. La procedura da seguire sarà descritta in relazione al caso in cui il potenziale rappresenti una serie di buche a pareti finite.

L'uso del foglio elettronico per buche di potenziale

Consideriamo una particella quantistica in una buca di potenziale quadrata.



Sia V_0 l'altezza della buca, 0 il valore minimo del potenziale ed L la sua ampiezza. Fissando l'origine del sistema di riferimento in corrispondenza del centro della buca il potenziale risulterà espresso da:

$$\begin{aligned} V(x) &= V_0 \text{ per } x < -L/2 \\ V(x) &= 0 \text{ per } -L/2 < x < L/2 \\ V(x) &= V_0 \text{ per } x > L/2 \end{aligned}$$

Richiamiamo alcune delle proprietà della soluzione dell'equazione d'onda (che può essere ottenuta analiticamente):

1. gli autostati della particella sono alternativamente funzioni simmetriche o antisimmetriche rispetto all'origine. In particolare, lo stato fondamentale è una funzione simmetrica, il primo stato eccitato una funzione antisimmetrica e così via. Ciò implica che è sufficiente ricavare la soluzione nell'intervallo delle x positive.
2. All'esterno della buca di potenziale la funzione d'onda deve tendere a zero esponenzialmente. In particolare per $x > L/2$ la funzione d'onda è proporzionale a:

$$e^{-\alpha x} \text{ con } \alpha = (V_0 - E)^{1/2}$$

mentre all'interno della buca è proporzionale a $\cos(kx)$ per funzioni simmetriche, ed è proporzionale a $\sin(kx)$ per funzioni antisimmetriche, dove $k = E^{1/2}$.

Procedura numerica

Considerato che le funzioni d'onda hanno parità definita è sufficiente ricavare la soluzione soltanto per $x > 0$ (cioè, in $x_0 = 0$, $x_1 = dx$ etc.).

Consideriamo, prima, funzioni simmetriche, per cui è necessario porre $f(0) = 1$, $f'(0) = 0$, da cui è possibile ricavare il valore di $f(x_1 = dx)$. Osserviamo che non possiamo trovare la corretta normalizzazione della funzione d'onda se non l'abbiamo ricavata in tutto l'intervallo, ma ciò non è essenziale ai fini dell'analisi della proprietà della funzione d'onda.

Per risolvere il problema con excel è opportuno procedere nel modo seguente:

1. Definire i valori delle costanti V_0 , E (che è conveniente porre inizialmente uguale a 0), ampiezza della buca a , ampiezza della barriera b , i valori di $f(0)$ e $f'(0)$.
2. Predisporre quattro colonne in cui riportare i valori di x_j , $V(x_j)$, $G = 2 + dx^2 (V(x_j) - E)$ e $f(x_j) = (G * f(x_{j-1}) - f(x_{j-2}))$ (per $j \geq 2$; i valori di $f(x_0)$ e $f(x_1)$ sono dati).
3. La funzione d'onda così ottenuta diverge per valori di x esterni alla buca, pertanto non corrisponde ad una autofunzione. Per determinare le soluzioni corrette (autofunzioni e corrispondenti autovalori) bisognerà far variare l'energia E , determinando quei valori in corrispondenza dei quali il valore della

funzione d'onda risulta nullo per x sufficientemente maggiore di $L/2$, ad esempio, a partire da $x_{\max} = L/2 + a$.

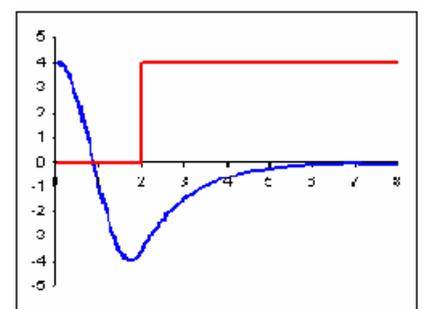
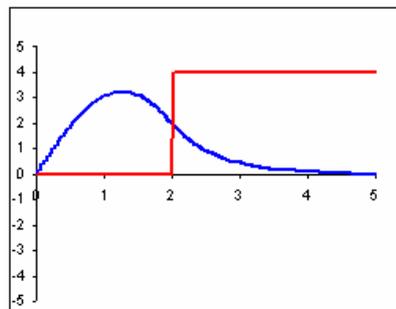
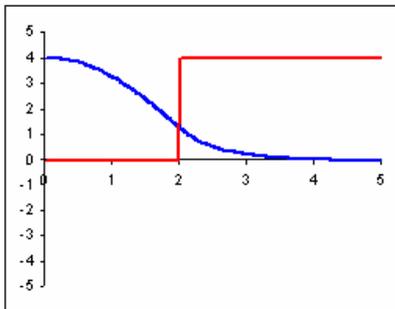
Automatizzazione della procedura

Un modo per rendere automatica la procedura potrebbe essere quello di utilizzare l'istruzione "ricerca obiettivo" di excel (si trova nel menù strumenti). Supponiamo, ad esempio, che il valore dell'energia sia riportato nella cella B1 e che abbiate riportato nella cella F4 il valore di $f(x_{\max})$ (è meglio tuttavia utilizzare $f(x_{\max})^2$). Pertanto, attivate la funzione "ricerca obiettivo" inserendo F4 nel dialog box "Imposta cella", 0 nel dialog box "Al valore" e B1 nel box "Cambiando la cella".

In alternativa, è possibile utilizzare gli strumenti visual basic di excel per modificare il contenuto della cella B1 (da 0 a V_0) per mezzo di una barra di scorrimento. Osservando il grafico della funzione d'onda, al variare di E , è possibile individuare visivamente i valori dell'energia in corrispondenza dei quali $f(x_{\max})$ passa da valori positivi a negativi.

Osserviamo, infine, che per determinare le autofunzioni dispari sarà sufficiente considerare $f(0) = 0$ ed $f'(0) = 1$.

Le funzioni riportate in figura sono state ottenute con la procedura sopra descritta e corrispondono allo stato fondamentale, al primo ed al secondo stato eccitato per la particella.



La procedura numerica può essere direttamente estesa al caso in cui il potenziale rappresenta una serie arbitraria di buche di potenziale.

Attività

1. Determinare le autofunzioni e gli autovalori (per gli stati legati, cioè per $E < V_0$) relativi ad una buca di potenziale quadrata nel caso in cui $V_0 = 2$, ampiezza buca $a = 4$.
2. In relazione al modello di cristallo unidimensionale:
3. quante bande di energia si generano nel caso in cui al posto di una singola buca se ne considerano N ?

4. Sarebbe possibile stabilire, con le sole informazioni disponibili, se il problema ad N buche corrisponde ad un conduttore, un semiconduttore o un isolante?
- 5.
6. Estendere la procedura al caso in cui le buche di potenziale siano più di una. Si consideri, in particolare, il caso relativo a 3 buche di potenziale con $V_0 = 2$, $a = 4$ e l'ampiezza della barriera $b = 1$.

APPENDICE MQ2

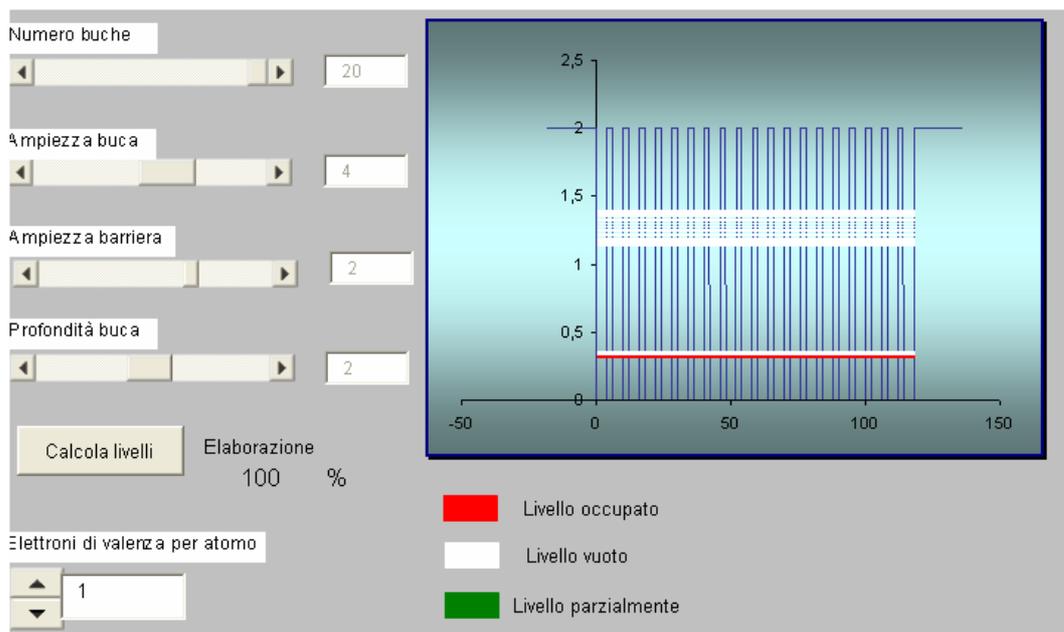
Teoria a bande. Scheda guida

La presente scheda si riferisce alla simulazione Excel denominata “Generatore di Bande” che implementa il modello di cristallo unidimensionale. In particolare, la simulazione consente di determinare i livelli energetici di un elettrone in un reticolo cristallino unidimensionale il cui potenziale è approssimato da una successione di buche di potenziale.

La simulazione consente di variare il numero di buche di potenziale, cioè gli ioni del cristallo (da un minimo di 1 ad un massimo di 20), l’ampiezza di ciascuna buca, l’ampiezza della barriera, la profondità della buca, cioè il valore massimo del potenziale (il minimo si suppone uguale a 0) e il numero di elettroni di valenza del singolo atomo (sono previsti soltanto due valori 1 e 2).

Una volta fissati i parametri è possibile calcolare i livelli energetici del sistema evidenziando la formazione di bande di energia.

La cartella di lavoro Excel contiene due fogli, denominati rispettivamente “calcolo autovalori” e “Foglio 4”. Quest’ultimo contiene l’interfaccia utente (figura 1)



Una volta selezionati i parametri di input, tramite le barre di scorrimento, è possibile, premendo il pulsante “Calcola livelli” generare i livelli energetici, che vengono visualizzati nel grafico (In unità ridotte; si è posto $\hbar^2/2m = 1$).

Il foglio di lavoro “calcolo autovalori” (figura 2) contiene i valori numerici relativi alla simulazione. In particolare, La colonna H, riporta i valori calcolati dei livelli d’energia, mentre la cella K13 contiene il numero di livelli trovati.

	A	H	I	J	K
1					
2		3,99900000			
3		0,031622777			
4		1,999749984			
5					
6					
7	ab				
8	0				
9	4				
10	3				
11	4				
12	3	Livelli d'energia	m11	m21	kautvalori
13	4	0,392097218	-3,07029E-06	0,995079415	3
14	3	1,530882464	4,7969E-07	-0,99993961	
15	4	3,231553576	-2,96916E-05	1,000608674	
16	3				
17	4				
18	3				
19	4				
20	3				
21	4				

Avvertenza. La simulazione si apre in sola lettura. Se dovete salvare eventuali modifiche utilizzate un altro nome per il programma, lasciando inalterato il programma originale. Tenete conto che il programma è ancora in una versione di prova, pertanto, se dovessero sorgere dei problemi durante il run, chiudete il programma senza salvare e riavviate lo (eventualmente modificando il valore dei parametri).

I Attività.

1. Dopo avere impostato il numero di atomi al valore 1, l'ampiezza della buca al valore 4, l'ampiezza della barriera ad 1, la profondità della buca a 2, generare i livelli energetici di singolo atomo.

Quanti livelli hai ottenuto?

Esegui nuovamente la simulazione cambiando la valenza (se era 1 impostala a 2 o viceversa)

Che cosa è cambiato rispetto al caso precedente?

II Attività

1. Supponi adesso di considerare 2 atomi (cioè due buche di potenziale).

Prova ad ipotizzare che cosa cambia rispetto al caso di singolo atomo. In particolare, Quanti livelli energetici si formeranno?

2. Adesso esegui la simulazione impostando al valore 2 il numero di atomi (e lasciando invariati tutti gli altri parametri).

Quanti livelli hai ottenuto?

Il risultato conferma le tue previsioni?

III Attività

1. Supponi adesso di considerare 4 atomi
Prova ad ipotizzare che cosa cambia rispetto al caso di singolo atomo. In particolare, Quanti livelli energetici si formeranno?

2. Esegui la simulazione impostando al valore 4 il numero di atomi (e lasciando invariati tutti gli altri parametri).

Quanti livelli hai ottenuto?

Il risultato conferma le tue previsioni?

IV Attività

1. Supponi adesso di considerare 20 atomi.
Prova ad ipotizzare che cosa cambia rispetto al caso di singolo atomo. In particolare, Quanti livelli energetici si formeranno?

2. Esegui la simulazione impostando al valore 20 il numero di atomi (e lasciando invariati tutti gli altri parametri).

Quanti livelli hai ottenuto?

Il risultato conferma le tue previsioni?

V Attività

Da che cosa dipende il fatto che un dato solido cristallino sia un conduttore, un semiconduttore o un isolante?

1. Fai girare la simulazione impostando ad 1 la valenza atomica.

a. Che cosa si osserva?

b. Il cristallo considerato è un conduttore, un semiconduttore o un isolante?
(motiva la risposta)

2. Fai girare la simulazione impostando a 2 la valenza atomica.

- a. Qual è la differenza rispetto al caso precedente?
- b. Il cristallo considerato è un conduttore, un semiconduttore o un isolante? (motiva la risposta)

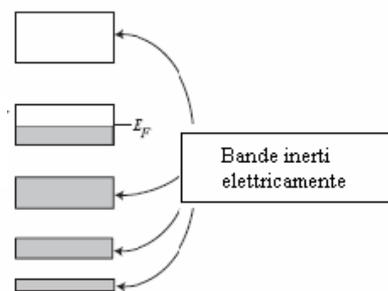
VI Attività

Alla luce delle considerazioni fatte sulla concentrazione degli elettroni di conduzione in un semiconduttore:

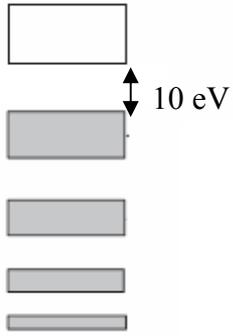
- a. al crescere della temperatura la resistività di un semiconduttore aumenta o diminuisce?
- b. Perché?

VII attività

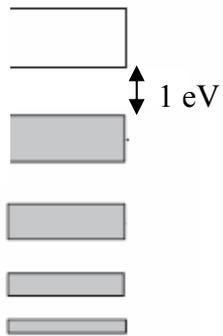
In figura è mostrato il diagramma a bande di alcuni materiali. Individua quale dei diagrammi rappresenta un conduttore un semiconduttore, un isolante spiegando la tua scelta.



Tipo di materiale:
Perché:



Tipo di materiale:
Perché:



Tipo di materiale:
Perché: