



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

SCUOLA DI SCIENZE MATEMATICHE,
FISICHE E NATURALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN SCIENZE FISICHE E ASTROFISICHE

Insegnare la fisica dei sistemi complessi con
i (video) giochi: un'indagine esplorativa

Teaching complex systems physics by
(video) games: an exploratory investigation

Candidato

Alessio Focardi (Matricola 6468048)

Relatore

Prof. Franco Bagnoli

Anno Accademico 2023/2024

Tesi non ancora discussa

Insegnare la fisica dei sistemi complessi con i (video) giochi: un'indagine esplorativa

Tesi di Laurea Magistrale. Università degli Studi di Firenze

© 2024 Alessio Focardi. Tutti i diritti riservati

Questa tesi è stata composta con $\text{\LaTeX}$ e la classe UniFiTh.

Email dell'autore: alessio.focardi2@edu.unifi.it

*Dedicato ai miei nonni, alle mie nonne e a mio babbo, che mi hanno regalato i più
bei ricordi della mia infanzia, e a mia mamma che mi ha cresciuto affrontando
grandi difficoltà.*

Sommario

Molti indizi fanno pensare che la fisica sia effettivamente una materia difficile per chi la studia.

Lo scopo di questo lavoro di tesi vuole essere sia quello di indagare una metodologia didattica diversa rispetto a quella frontale, sia quello di considerare temi e argomenti solitamente non studiati e analizzati durante il periodo della scuola secondaria di secondo grado.

Per quanto riguarda la metodologia ci siamo occupati in particolare dell'utilizzo del videogioco come strumento ludico e didattico, cercando di sfruttarlo per veicolare alcuni concetti della fisica dei sistemi complessi, che normalmente non sono compresi nel curriculum della scuola superiore.

Il videogioco possiede infatti molti aspetti in grado di renderlo un metodo di apprendimento didattico funzionale per la sua multisensorialità (essendo visivo, tattile, verbale e grafico) e permette così di essere un'ottima chiave di accesso alla classe, in generale molto eterogenea.

Il carattere ludico del gioco rende inoltre possibile il coinvolgimento attivo della classe, alleggerendo l'apprendimento e permettendo un distacco dalla routine della didattica "erogativa".

Crediamo che questo approccio all'insegnamento possa essere utile a studentesse e studenti per promuovere il riconoscimento di strutture in fenomeni legati a discipline che sono reputate molto diverse tra loro.

L'Universo che viene spesso rappresentato nel contesto scolastico è un Universo fatto da fenomeni lineari, ed è proprio per questa ragione che abbiamo deciso di dare spazio a fenomeni descritti da una dinamica non lineare, in cui una piccola perturbazione delle condizioni iniziali possa portare il sistema in una direzione completamente diversa, oppure allo studio di sistemi con interazioni collettive.

Questi fenomeni sono infatti onnipresenti nella vita di tutti i giorni, e questa discrepanza può generare l'impressione che la fisica "scolastica" sia completamente scollegata dalla realtà "vera".

Per realizzare questo obiettivo abbiamo sviluppato alcuni videogiochi il cui argomento scientifico centrale non fosse compreso nel curriculum della scuola secondaria di secondo grado, come ad esempio fenomeni non lineari, sensibilità alle condizioni iniziali e transizioni di fase.

Alla realizzazione è quindi seguita la progettazione della proposta didattica. Abbiamo infatti fatto provare i giochi a studenti e studentesse di tutte le classi (complessivamente dieci) di indirizzo scientifico ed economico sociale di una scuola fiorentina, facendoli giocare per circa due ore.

Durante l'attività sono state somministrate alcune domande in modo da guidare i giocatori e le giocatrici e da capire se effettivamente i giochi stessi fossero stati compresi.

A fine attività abbiamo poi inviato un questionario concernente domande fra le quali spiccano quelle relative al gradimento e alla difficoltà trovata in ogni singolo gioco, concedendo anche la possibilità di fare critiche.

Dall'analisi delle loro risposte siamo felici di poter affermare che tutti i giochi proposti sono piaciuti, nonostante gli ostacoli che studentesse e studenti affermano

di aver trovato nel loro svolgimento. Dalle critiche, sia positive che negative, fatte da studenti e studentesse emerge sia la volontà di svolgere attività scolastiche diverse dalla didattica frontale, sia il piacere nel divertirsi imparando.

Una delle più grandi difficoltà è stata quella di concentrare l'attività in meno di due ore e, probabilmente, un'attività strutturata di questo tipo potrebbe richiedere anche il doppio del tempo per essere svolta nel modo più ottimale possibile.

Una maggior disponibilità di ore potrebbe fornire la possibilità a studenti e studentesse di prendere maggior confidenza con le dinamiche di gioco, creando anche un legame più forte fra docente e classe.

In futuro pensiamo pertanto di continuare a proporre l'attività anche ad altre scuole, richiedendo finestre temporali maggiori o suddividendo l'attività in più sessioni di gioco, e concentrandoci maggiormente sugli aspetti didattici (ad esempio lasciando più spazio per la discussione e la *peer instruction*) e ludici, diminuendo le domande poste per via scritta.

Ringraziamenti

Grazie Benedetta, per avermi sempre supportato, anche nei periodi più difficili.

Indice

1	Introduzione	1
2	La didattica della fisica	5
2.1	Una breve introduzione alla storia della didattica della fisica	6
2.1.1	Il cognitivismo	7
2.1.2	Una introduzione al cambiamento concettuale	9
2.1.3	Il costruttivismo	10
2.2	Le euristiche cognitive	12
2.2.1	Pensieri lenti, pensieri veloci	13
2.2.2	L'uso della memoria e degli schemi cognitivi	14
2.3	Dal sapere accademico alla figura dell'insegnante	16
2.4	La didattica delle scienze come campo disciplinare autonomo	17
2.5	Concezioni comuni e cambiamento concettuale	18
2.5.1	Pensiero comune e pensiero scientifico	20
2.5.2	Concezioni comuni	21
2.5.3	Cambiamento concettuale	22
2.6	Alcune criticità nelle metodologie di insegnamento	25
2.7	Il ruolo del laboratorio nella didattica della fisica	26
2.7.1	L'importanza del laboratorio nella fisica	27
2.7.2	Il laboratorio nel contesto scolastico	29
2.8	L'utilizzo del computer nella didattica della fisica	30
2.8.1	La simulazione e la costruzione di modelli fisici	31
2.9	Alcuni esempi di metodologie didattiche alternative	33
2.9.1	I <i>concept test</i> e la <i>Peer Instruction</i>	33
2.9.2	La <i>flipped classroom</i>	35
2.9.3	<i>Learning by playing</i>	35
2.9.4	Fisica, magia e narrazione	36
2.10	Il problema della valutazione	37
2.10.1	Le diverse facce della valutazione	37
2.10.2	Un breve excursus sul modello per obiettivi e il modello per processi	39
2.10.3	Ancora sulla valutazione	42
3	Una introduzione al <i>gaming</i>	47
3.1	Una introduzione alla psicologia del gioco	48
3.1.1	Perché giochiamo?	50

3.1.2	La gestione delle risorse cognitive durante il gioco	53
3.2	Come condurre un gioco	54
3.2.1	Progettazione dell'intervento e scelta del gioco	54
3.2.2	Apertura e start game	54
3.2.3	Lancio dell'attività e <i>skill game</i>	55
3.2.4	<i>Debriefing</i>	55
3.2.5	Valutazione dei risultati	56
4	Modelli fisici e (video) giochi	57
4.1	La teoria della percolazione applicata alla propagazione degli incendi nella foresta	57
4.1.1	I nostri modelli	59
4.1.2	Proposta didattica relativa alla <i>site percolation</i>	61
4.1.3	Proposta didattica relativa alla <i>mixed percolation</i>	63
4.2	Caos deterministico e pendoli magnetici	66
4.2.1	Proposta didattica relativa al pendolo magnetico	69
4.3	Il modello di Kuramoto come spiegazione della sincronizzazione delle lucciole	71
4.3.1	Proposta didattica sulla sincronizzazione delle lucciole	75
5	Procedura sperimentale e analisi qualitativa del lavoro	79
5.1	La procedura sperimentale	79
5.2	Analisi qualitativa sulle risposte ricevute attraverso il modulo Google	81
5.2.1	Utilizzo di giochi e videogiochi	81
5.2.2	Gradimento dei giochi e difficoltà trovate	82
5.3	Analisi qualitativa delle risposte ottenute sui fogli cartacei	87
6	Conclusioni	93

Capitolo 1

Introduzione

Molti indizi fanno pensare che la fisica sia effettivamente una materia difficile per chi la studia [1].

Nonostante già Aristotele avesse scritto un trattato con questo nome, ciò che indichiamo come fisica, con una concezione più moderna, inizia di fatto con gli studi di Galileo e Newton, rendendola quindi una disciplina piuttosto giovane. Al contrario la matematica è ben più antica: l'aritmetica elementare è probabilmente antecedente l'Homo sapiens (molti animali sanno contare fino a qualche unità), molte scoperte algebriche e geometriche risalgono ad almeno cinquemila anni fa, persino il calcolo infinitesimale, in una versione abbozzata, risale ad almeno Archimede.

Risulta poi sorprendente il fatto che la matematica è stata elaborata indipendentemente in diverse parti del mondo.

A cosa è dovuta questa difficoltà percepita della fisica? Una risposta possibile è che una sua origine possa essere cognitiva. Esistono infatti delle *misconceptions* molto comuni fra studentesse e studenti che risiedono nel conflitto fra fisica newtoniana ed esperienza di tutti i giorni.

Persino osservazioni su bambini molto piccoli [2] e su animali [3] mostrano la presenza di una sorta di “fisica intuitiva” insita già dalla nascita e che viene consolidata con l'esperienza.

Lo scopo di questo lavoro di tesi vuole essere sia quello di indagare una metodologia didattica per quanto riguarda la fisica diversa rispetto a quella frontale, sia quello di considerare temi e argomenti solitamente non studiati e analizzati durante il periodo della scuola secondaria di secondo grado.

Per quanto riguarda la metodologia ci siamo occupati in particolare dell'utilizzo del videogioco come strumento ludico e didattico, cercando di usarlo per veicolare alcuni concetti della fisica dei sistemi complessi, che normalmente non sono compresi nel curriculum della scuola superiore [4].

Il videogioco possiede infatti molti aspetti in grado di renderlo un metodo di apprendimento didattico funzionale dato che è multisensoriale (visivo, tattile, verbale e grafico) e permette così di essere un'ottima chiave di accesso alla classe, in generale molto eterogenea.

Il carattere ludico del gioco rende inoltre possibile il coinvolgimento attivo della classe, alleggerendo l'apprendimento e permettendo un distacco dalla routine della didattica “erogativa”.

Sebbene fisica e videogiochi possano apparire come universi distanti, è presente un forte legame fra le due che pone le sue radici nel secondo dopoguerra, in particolare con la nascita dei primi videogiochi¹.

Uno dei primi (forse proprio il primo) dispositivo elettronico con cui giocare, il Nimatron, è infatti stato progettato da un fisico nucleare che aveva contribuito al Progetto Manhattan: Edward Condon.

Condon nasce ad Alamogordo, in Texas, la stessa città in cui, per una strana coincidenza, saranno seppellite e nascoste anni dopo centinaia di cartucce invendute dell'Atari (ma questa è un'altra storia).

Il Nimatron si ispira ad un antico gioco strategico chiamato *Nim* in cui due giocatori durante il loro turno di gioco rimuovono uno o più oggetti da alcune pile e in cui risulta vincitore chi prende l'ultimo oggetto o lo lascia prendere all'avversario.

Il Nimatron venne presentato alla Fiera Mondiale di New York del 1939-1940 ed ha un grande successo nel periodo della manifestazione, con più di centomila partite effettuate, per la maggior parte vinte dalla macchina.

Uno dei motivi del suo successo è probabilmente dovuto alla presenza di due elementi che risulteranno fondamentali nel contesto videoludico: la partita era facilmente visibile dal pubblico, rendendolo quindi partecipe e capace di emozionarsi; la partita era giocata, come già accennato, contro la macchina, resa però più lenta nei suoi processi decisionali in modo da dare l'impressione di scontrarsi con un avversario di pari livello in modo da non far sentire frustrati i giocatori e le giocatrici.

Se il Nimatron non è forse ancora considerabile come un vero e proprio videogioco, per molti lo sarà *Tennis For Two*, inventato da William Higinbotham ed in grado di simulare una partita di tennis.

Anche Higinbotham è un fisico, e anche lui ha lavorato alla bomba atomica, in particolare al suo sistema di innesco. Profondamente segnato dalla guerra decide di fondare il primo movimento di non proliferazione delle armi nucleari.

L'istituto per cui lavora, il Brookhaven National Laboratory, organizza ogni anno una piccola esposizione per studentesse e studenti e per curiosi e proprio per questa occasione Higinbotham sviluppa e propone quello che probabilmente è il primo videogioco della storia, creato per intrattenere, con una grafica aggiornata in tempo reale ed utilizzabile dal pubblico: *Tennis For Two*.

Assieme al gioco Higinbotham crea anche il primo gamepad della storia, ovvero una scatola metallica con un tasto per servire e colpire la palla, assieme ad una manopola per decidere l'angolo di impatto.

Tennis For Two viene presentato per la prima volta il 18 ottobre del 1958 e per tre giorni le persone aspettano in fila, in attesa di poter giocare. Dall'anno successivo verrà proposto anche il suo sequel, in cui è possibile giocare partite di tennis anche su altri pianeti, tramite l'introduzione di alcuni parametri fisici.

Ovviamente ci sono molti altri videogiochi in cui la fisica gioca un ruolo fondamentale (basti citare *Asteroids* [6]), e comunque in tutti i giochi realistici viene impiegata una *physics engine* [7] per implementare il comportamento "normale" degli oggetti, a meno che non venga esplicitamente richiesto un comportamento "non fisico".

¹Questa piccola introduzione storica non sarebbe stata possibile senza la lettura della fonte [5]

Sia l'aspetto dell'utilizzo del gioco e del videogioco per insegnare qualcosa, sia la didattica della fisica dei sistemi complessi non sono novità, si veda per esempio l'attività del Centro di Ricerca Interdipartimentale Giochi per il Cambiamento Sociale (GiX) dell'Università di Firenze [8], o al recente lavoro di tesi di Veronica Ilari [9].

Crediamo che questo approccio all'insegnamento possa essere utile a studentesse e studenti per promuovere il riconoscimento di strutture comuni in fenomeni legati a discipline che sono reputate molto diverse tra loro, e quello di far presente come non sia sufficiente la conoscenza delle leggi di base o la capacità di simulare un sistema per la sua comprensione.

L'immagine comune della scienza è infatti probabilmente la stessa che aveva Laplace quando nel 1814 scriveva²:

Dobbiamo dunque considerare lo stato presente dell'universo come effetto del suo stato anteriore e come causa del suo stato futuro. Un'intelligenza che, per un dato istante, conoscesse tutte le forze di cui è animata la natura e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se per di più fosse abbastanza profonda per sottomettere questi dati all'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo e dell'atomo più leggero: nulla sarebbe incerto ai suoi occhi e l'avvenire, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi.

Purtroppo (o per fortuna), questa capacità di previsione teorica non si realizza neppure nella fisica classica, a causa della impossibilità della conoscenza esatta di tutte le variabili necessarie.

Il "sogno" di Laplace è oggi realizzabile (in maniera approssimata) usando un computer. Ma già dalle prime simulazioni di Lorenz nel 1963 ci si rese conto che nei sistemi caotici una piccola variazione nelle condizioni iniziali può amplificarsi a tutto il sistema.

Anche nei sistemi che non hanno una dinamica caotica ma presentano sensibilità alle condizioni iniziali (per esempio un bacino di attrazione frattale), ci sono condizioni iniziali per cui una piccola modifica può indurre cambiamenti macroscopici.

Inoltre, nei sistemi estesi, in cui è presente un gran numero di elementi in interazione, si possono avere transizioni di fase e/o cambiamenti macroscopici al variare, anche di poco, di un parametro di controllo.

È anche importante esaminare l'assunzione comune che una maggior precisione possa portare a previsioni più accurate e valide per un periodo di tempo più esteso. A seconda delle non linearità del sistema, una maggiore precisione può tradursi in un miglioramento più o meno grande; solo in un Universo lineare avremmo un miglioramento costante.

Però questo è l'Universo che viene spesso rappresentato nel contesto scolastico, ed è proprio per questa ragione che abbiamo deciso di dare spazio a fenomeni descritti da una dinamica non lineare, in cui una piccola perturbazione delle condizioni iniziali possa portare il sistema in una direzione completamente diversa, oppure allo studio di sistemi con interazioni collettive.

La motivazione per cui questo tipo di sistemi fisici non vengono trattati a scuola può essere da una parte data dal fatto che studentesse e studenti non hanno svi-

²Fonte [10], pagina 138.

luppato le tecniche matematiche propedeutiche a tale scopo, dall'altra spesso non è presente l'abitudine di utilizzare il computer come strumento di indagine.

Questo fatto limita però fortemente la didattica, in quanto i fenomeni non lineari sono onnipresenti nella vita di tutti i giorni, e genera l'impressione che la fisica "scolastica" sia completamente scollegata dalla realtà "vera".

Crediamo dunque che accompagnando studenti e studentesse verso una scienza più "reale", benché meno sicura, possa avere anche la funzione di proteggerli da una futura presa di coscienza sul tema, che però potrebbe avvenire in modo brusco portandoli verso la sfiducia nella scienza stessa.

Questo lavoro di tesi si compone di quattro parti.

La prima parte affronta l'analisi della didattica della fisica, utilizzando sia un approccio storico che uno pratico, in cui verranno affrontate alcune criticità riguardanti l'insegnamento e l'apprendimento.

Nella seconda parte analizzeremo il gioco come attività ludica e strumento didattico, andando a svolgere considerazioni psicologiche e soffermandoci anche sulla sua progettazione.

Nella terza parte introdurremo alcuni modelli fisici su cui sono basati alcuni videogiochi che abbiamo sviluppato, assieme ad una descrizione dei videogiochi stessi e alla proposta didattica che abbiamo realizzato.

L'ultima parte riguarda invece la procedura sperimentale che abbiamo attuato nella nostra ricerca: presentazione dei videogiochi in classi liceali di indirizzo scientifico ed economico sociale, domande effettuate a studentesse e studenti in forma anonima ed infine un'analisi delle risposte ricevute.

Crediamo che questa suddivisione possa essere utile anche al lettore o alla lettrice che voglia scorrere velocemente un singolo capitolo di interesse, nonostante il nostro lavoro risulti sicuramente più completo se analizzato nella sua interezza.

Capitolo 2

La didattica della fisica

In questo capitolo verrà analizzata la didattica della fisica, un campo disciplinare autonomo rispetto sia alla fisica stessa sia rispetto alla psicologia e pedagogia. Per farlo abbiamo utilizzato come fonti principali i libri “Didattica della fisica” di Ugo Besson [11] e “Didattica della fisica” a cura di Matilde Vicentini e Michela Mayer [12]. Per una trattazione relativa ad aspetti più prettamente disciplinari e meno centrati sulla pedagogia consigliamo anche il libro di Arnold B. Arons “Guida all’insegnamento della fisica” [13].

Insegnamento e apprendimento, sebbene collegate fra loro, risultano essere due attività distinte spesso considerate separate: la prima, l’insegnamento, compito del o della docente, l’altra, l’apprendimento, delle studentesse o degli studenti. La didattica della fisica è quella disciplina che studia l’insegnamento, ovvero l’attività intenzionale finalizzata a produrre un apprendimento da parte di uno o più allievi o allieve, nella fattispecie della fisica. Risulta necessario distinguerla da altre branche del sapere quali la pedagogia e la psicologia dell’apprendimento sebbene si occupi di trattare fenomeni e problemi collegati con le particolarità della disciplina oggetto di insegnamento.

La didattica delle discipline si pone in contrasto con due idee, opposte fra loro, sull’insegnamento. La prima è l’idea di una didattica generale, indipendente dai contenuti, secondo cui chi sa insegnare, sa insegnare ogni argomento (si pensi ad esempio al sottotitolo della *Didactica Magna* di Comenio “l’arte universale d’insegnare tutto a tutti”). L’idea contrapposta è invece quella basata sui contenuti, per cui solo chi conosce a fondo la materia la sa insegnare bene.

La didattica delle discipline porta avanti la convinzione che occorra analizzare e studiare i problemi e le soluzioni relative all’apprendimento dei contenuti specifici, ciò riguarda diversi aspetti.

- Una riflessione critica sull’organizzazione concettuale e i fondamenti del contenuto, per poi proporre una ricostruzione coerente per l’insegnamento.
- Lo studio dei processi cognitivi innati (o pre-esistenti) e di quelli specifici necessari per apprendere un determinato contenuto, con i suoi particolari ostacoli, modelli mentali, ragionamenti e così via.
- La definizione di un percorso cognitivo con obiettivi specifici, graduati secondo l’età degli allievi e delle allieve e le loro conoscenze pregresse.

- La realizzazione e la sperimentazione di percorsi di insegnamento e apprendimento su particolari segmenti curriculari, indicando contenuti, obiettivi, metodi, strumenti, strategie cognitive.
- La progettazione o sperimentazione di materiali didattici particolari quali libri (cartacei, online o multimediali), dispense, schede, audiovisivi, esperimenti, software, ecc.
- L'organizzazione di percorsi di formazione per insegnanti.

Da questa suddivisione si possono quindi far nascere alcuni filoni principali di ricerca didattica, da cui si diramano temi specifici: le concezioni e i processi mentali degli allievi, le strategie di cambiamento concettuale, l'elaborazione di sequenze di insegnamento e di apprendimento, la tutela e la mediazione, il ruolo delle espressioni linguistiche, il linguaggio e le argomentazioni scientifiche degli studenti e delle studentesse, le attività pratiche e di laboratorio, l'utilizzo di strumenti informatici e di mezzi audiovisivi, l'analisi dei contenuti disciplinari, la risoluzione di problemi, l'analisi delle pratiche degli e delle insegnanti, il ruolo della storia e della filosofia della scienza, la didattica informale e museale, l'elaborazione e l'analisi di programmi, le interazioni fra discipline affini, la formazione degli insegnanti ecc.

2.1 Una breve introduzione alla storia della didattica della fisica

La teoria dell'educazione dominante nella prima metà del ventesimo secolo è quella dell'attivismo e delle scuole nuove, le quali fanno riferimento alla motivazione, la socializzazione, l'antiautoritarismo, la sinergia fra scuola ed esperienza ambientale e sociale, il rispetto del ritmo personale di apprendimento, l'acquisizione di nuove nozioni basata sull'indagine e la risoluzione dei problemi. Dagli anni Cinquanta l'insoddisfazione per i risultati dell'apprendimento scientifico, uniti alla necessità di rigore e controllo degli obiettivi, dei contenuti e delle procedure, fa crescere l'interesse verso il comportamentismo.

Il comportamentismo viene profondamente influenzato dalla ricerca di Pavlov e si basa sull'assunto che il comportamento dell'individuo sia l'unica unità di analisi scientificamente studiabile della psicologia, in quanto unica istanza psicologica direttamente osservabile. Il metodo di indagine del comportamentismo si basa quindi essenzialmente sull'associazione tra stimolo (ambiente) e risposta (comportamento).

Il comportamentismo si concentra su parametri oggettivamente osservabili e misurabili, su meccanismi di stimolo e rinforzo, e sulla definizione operativa di obiettivi, abilità e risultati. Nel comportamentismo risulta centrale il problema della valutazione, vengono create classificazioni gerarchiche di obiettivi didattici descritti in termini di operazioni e processi osservabili.

Ci si rende però presto conto che questo schema può valere per apprendimenti semplici e mnemonici, non per quelli che richiedono l'elaborazione di informazione e creatività.

A fine anni Cinquanta, soprattutto negli Stati Uniti, inizia un vasto movimento di riforma dell'insegnamento scientifico, dovuto alla competizione con l'Unione Sovietica e alla constatazione dei progressi sovietici evidenziati in modo plateale dal

lancio dello Sputnik (1957). Varie istituzioni governative puntano al rinnovamento dell'insegnamento scientifico, con lo scopo di motivare i giovani allo studio della scienza e formare i futuri dirigenti in grado di guidare lo sviluppo tecnologico necessario. In questo periodo vengono elaborati progetti e libri in diverse discipline scientifiche e tecniche. Per la fisica vale la pena ricordare il PSSC (*Physical Science Study Commitee*) [14], sviluppato da un gruppo di fisici diretto da Jerrold Zacharias ed il PPC (*Project Physics Course*) [15], sviluppato dalla Harvard University. Questi programmi promuovono un'innovazione nell'insegnamento della scienza sotto vari punti di vista: quello dei contenuti, delle strategie didattiche, delle metodologie dell'insegnamento e apprendimento e delle tecnologie di supporto mediale.

Un evento chiave è la conferenza di Wood Hole del 1959 [16], negli Stati Uniti, sotto la direzione di Bruner. In questo evento si trovano riuniti sia esperti di varie discipline scientifiche, sia esperti di discipline quali storia, letteratura, arte, psicologia e pedagogia, con lo scopo di individuare modalità più efficienti per migliorare l'apprendimento delle scienze a scuola. La relazione finale di questa conferenza, redatta da Bruner stesso, ha portato alla realizzazione di un libro dal titolo *The Process of Education* [17] tradotto in molte lingue fra cui l'italiano (Il processo educativo, 2002 [18]). Dal libro emergono idee come la centralità del ruolo della struttura, ovvero le discipline organizzate come “*complessi organizzati e coerenti di conoscenze*”, l'apprendimento a spirale, cioè prima ad un livello più intuitivo e poi approfondendo ciclicamente i contenuti, e l'importanza di utilizzare i tre tipi di rappresentazione: attiva, fondata sull'esperienza; iconica, fondata sulle immagini; simbolica, fondata sulla parola, sui numeri e sulle formule. Viene affermato che un insegnamento efficace è un compito complesso e che “*presentare fenomeni fisici in modo che risultino interessanti, esatti e comprensibili, richiede una profonda intelligenza insieme ad un onesto scrupolo*”.

Ogni argomento deve avere una sua struttura, ed è apprendendo la natura di quest'ultima che è possibile afferrare il significato essenziale dell'argomento. La struttura di una disciplina è costituita dalle sue idee fondamentali e generali, dai principi organizzatori che permettono un inquadramento organico delle conoscenze e dai dati dell'esperienza. Questi principi permettono quindi la sistemazione ed il progresso del sapere, portando ad una istruzione efficace.

Un insegnamento centrato sulla struttura possiede due vantaggi: da una parte una maggiore capacità di memorizzazione davanti a ciò che è organizzato e strutturato in modo significativo; dall'altra si realizza un transfer di apprendimento, le idee generali apprese possono essere infatti utilizzate per affrontare problemi che si presentano in futuro.

L'apprendimento deve mettere in accordo la struttura psicologica del soggetto con la struttura logica e scientifica dell'oggetto, da ciò discendono due linee di ricerca didattica successive: la struttura delle discipline e lo studio delle rappresentazioni mentali degli allievi e delle allieve.

2.1.1 Il cognitivismo

Durante gli anni Sessanta si afferma il quadro teorico del cognitivismo, soprattutto grazie a studiosi come Piaget, Vygotskij e Ausubel. Il cognitivismo pone al centro il ruolo attivo della mente come sede di processi di elaborazione delle informazioni

e dà importanza a ciò che il discente o la discente conosce già, affermando che un nuovo apprendimento acquisisce un senso solo se viene inserito in un ambiente di conoscenze già possedute. Riguardo a ciò è famosa la frase di Ausubel:

Se dovessi concentrare in un unico principio l'intera psicologia dell'educazione, direi che il singolo fattore più importante che influenza l'apprendimento sono le conoscenze che lo studente già possiede. Accertatele e comportatevi in conformità nel vostro insegnamento. [...] Il sussistere di preconconcetti è il fattore singolo più importante nell'acquisizione e nella ritenzione delle conoscenze in una data materia [...] questi preconconcetti sono sorprendentemente tenaci e resistenti all'eliminazione.

Vygotskij pone attenzione alla relazione fra strutture e processi mentali e strutture e processi culturali e sociali. Questa relazione è dovuta all'interazione fra individui e fra individui e cultura collettiva, in cui il linguaggio gioca un ruolo fondamentale.

Il cognitivismo è in contrasto con le teorie comportamentiste in quanto ritiene che l'apprendimento scolastico non può essere considerato di natura stimolo-risposta, ma coinvolge necessariamente processi cognitivi superiori. Secondo il cognitivismo lo studente o la studentessa assimilano le informazioni (per ricezione o per scoperta) all'interno della sua struttura cognitiva preesistente. Questo significa che per l'apprendimento il nuovo contenuto si deve collegare ad immagini, simboli e concetti già esistenti nella struttura cognitiva. Per questo motivo secondo Ausubel l'insegnante deve ricorrere a organizzatori cognitivi, come esempi, problemi e idee che formino la base a cui agganciare il nuovo contenuto. È possibile far ciò nello schema concettuale più generale già noto o attraverso idee familiari con cui le nuove idee possano essere comparate, integrate o differenziate.

Negli anni Sessanta si iniziano a sviluppare le ricerche sulle concezioni alternative degli studenti (*alternative conceptions movement*, ACM), da parte soprattutto di studiosi con una formazione scientifica, i quali scelgono di indirizzare i loro sforzi alla ricerca in questo campo. Ne sono esempi le tesi di dottorato di Driver, Viennot e Saltiel. Già a fine anni Ottanta viene segnalata da Driver [19] l'esistenza di centinaia di articoli sull'argomento, sebbene ad oggi l'ordine di grandezza sia sicuramente più elevato [20].

Sono sicuramente da citare le ricerche di Piaget e del suo gruppo sullo sviluppo cognitivo [21–23], in particolare la ricerca sullo sviluppo delle idee dei bambini e adolescenti sulla materia, il movimento, le forze, i fluidi, la luce e le spiegazioni fisiche. Il metodo di ricerca del gruppo di Piaget, basato sulle interviste cliniche, sarà poi ripreso dalla ricerca didattica successiva.

Piaget cerca indicazioni sullo sviluppo dei processi logici generali, in grado di condurre il bambino o la bambina dallo stadio pre-operatorio a quello delle operazioni concrete ed infine a quello delle operazioni formali. Questo processo spontaneo dovrebbe portare a quel tipo di capacità logiche formali che sono essenziali per l'apprendimento scientifico e matematico.

Tuttavia molte ricerche successive, come quelle di Violino e Di Giacomo [24] mostrarono che questa evoluzione non ha sempre luogo. Alte percentuali di studenti e studentesse non hanno ancora acquisito il livello delle operazioni formali ad una età

matura come i 18-20 anni, mentre per altri l'acquisizione non è comunque completa. Emerge poi che alcune capacità formali astratte non siano un patrimonio disponibile naturalmente dallo studente o dalla studentessa, e per questo devono costituire un obiettivo della formazione.

Importanti ricerche sono svolte da Bachelard, il quale analizza in modo profondo i dettagli della disciplina (fisica e chimica in primis) le specificità del pensiero, sottolineando soprattutto gli aspetti di rottura fra conoscenza scientifica e conoscenza comune. Bachelard introduce l'idea di ostacolo epistemologico e pedagogico, sottolineando l'importanza delle conoscenze già costituite degli allievi e allieeve.

In contrasto con Piaget, Bachelard [25] afferma che l'apprendimento delle scienze moderne non avviene come uno sviluppo spontaneo, attraverso una continuità fra idee del bambino o della bambina e le idee scientifiche, ma si costruisce in conflitto con il pensiero spontaneo.

Ciò è dovuto al fatto che il pensiero scientifico moderno non è per niente naturale, ma molto spesso è contro-intuitivo ed in contrasto con le apparenze e le idee comuni. Bachelard afferma che “*gli insegnanti non capiscono perché gli studenti non capiscono*”, costituendo quindi un ostacolo al loro apprendimento. Spesso gli studenti e le studentesse sbagliano non per distrazione o incapacità, ma perché la pensano diversamente. Gli errori non sono quindi semplicemente errori, ma differenti modelli interpretativi. È interessante la seguente affermazione corredata da un esempio di Bachelard stesso [25]:

L'adolescente arriva al corso di fisica con conoscenze empiriche già costituite: si tratta allora non tanto di acquisire una cultura, ma piuttosto di cambiarla, di rovesciare gli ostacoli già formati nella vita quotidiana. Un esempio: l'equilibrio dei corpi galleggianti è oggetto di una cultura familiare che è tessuta di errori. Più o meno chiaramente, si attribuisce un'attività al corpo che galleggia, meglio al corpo che nuota. Se si cerca di spingere un pezzo di legno sott'acqua, esso resiste. Non si attribuisce facilmente la resistenza all'acqua. È allora difficile far comprendere il principio di Archimede nella sua sorprendente semplicità matematica, se prima non si critica e non si disorganizza il complesso impuro delle intuizioni prime. In particolare, senza questa psicanalisi degli errori iniziali, non si farà mai capire che il corpo che emerge e il corpo completamente immerso obbediscono alla stessa legge.

2.1.2 Una introduzione al cambiamento concettuale

Una volta compresa e riconosciuta l'importanza delle rappresentazioni mentali degli allievi e delle allieeve, è necessario studiare e ricercare possibili strategie di cambiamento concettuale in modo da favorire il passaggio dalle concezioni alternative ad una concezione in linea con la scienza attuale e con gli obiettivi dell'insegnamento. Il problema del cambiamento concettuale apre quindi un nuovo importante campo di ricerca, ancora oggi molto attivo.

Esistono di fatto due filoni: alcuni autori sottolineano l'importanza della continuità fra idee comuni e conoscenza scientifica, considerando le pre-concezioni come risorse da rimodellare e arricchire; altri autori insistono invece sul ruolo delle rottu-

re e del conflitto cognitivo, considerando necessario un vero e proprio cambiamento concettuale. Questo secondo modello risente delle idee di Kuhn [26] sui periodi di rivoluzione scientifica e quelli normali nel corso della storia della scienza.

Uno dei maggiori esponenti riguardanti questa linea è Posner [27], il quale assieme ai suoi collaboratori ha elaborato una teoria del cambiamento concettuale basata proprio sul conflitto cognitivo, stabilendo indicazioni per ottenere tale cambiamento: insoddisfazione della vecchia concezione, intelligibilità, plausibilità e fecondità della nuova concezione. La nuova concezione deve poi potersi inserire in un ambiente concettuale complessivo in grado di costituire una particolare ecologia concettuale, ovvero l'insieme di credenze, idee metafisiche e analogie possedute dall'allievo o dall'allieva. Questa idea si collega ancora una volta a quelle di Kuhn [26] in particolar modo al concetto di paradigma per descrivere lo sviluppo della scienza.

Questa teoria è stata molto utilizzata nelle strategie d'insegnamento, ma dagli anni Novanta è stata anche criticata e rimessa in discussione dagli stessi autori. In particolare le critiche si sono concentrate sulla rilevanza di fattori non cognitivi, affettivi e irrazionali ed è stato osservato che provocare forti conflitti cognitivi può portare al rifiuto ed alla disaffezione da parte del discente o della discente.

Vygotskij [28] attribuisce alle interazioni sociali e al linguaggio un ruolo centrale nello sviluppo cognitivo, si parla dunque non più di conflitto cognitivo, bensì di conflitto socio-cognitivo come motore del cambiamento concettuale. Una possibile metodologia è quella che favorisce, ad esempio, la creazione di un dibattito scientifico in classe, rendendo significativamente importante la discussione fra pari.

2.1.3 Il costruttivismo

Pur basandosi sull'associazione tra lo studio dell'apprendimento e quello della memoria, il cognitivismo suppone una struttura cognitiva coerente per tutti i soggetti.

Il costruttivismo [29, 30] ha le sue origini negli anni Ottanta ed è considerato attualmente il quadro di riferimento comune della maggior parte degli studiosi di didattica e di problemi educativi. È caratterizzato dall'idea che la conoscenza sia il prodotto di una costruzione attiva del soggetto e che l'apprendimento si sviluppi attraverso particolari forme di negoziazione sociale. Le idee alla base di tale quadro teorico erano già presenti in autori come Bruner, Dewey, Piaget e Vygotskij ed il fatto che la conoscenza sia il risultato di una costruzione attiva permea gran parte della ricerca del XX secolo.

Il costruttivismo rifiuta l'idea dell'insegnante come semplice fornitore di informazioni e pone importanza sulla costruzione della conoscenza, non sulla sua riproduzione, cercando di concentrarsi sulla complessità del mondo reale ed evitando eccessive semplificazioni. Il discente assume un ruolo centrale mentre il progettista/docente assume invece un ruolo marginale.

Il costruttivismo è basato sull'analogia del ponteggio, o *scaffolding* in inglese, in cui per raggiungere una certa altezza bisogna prima costruire una base solida. Risulta quindi che l'insegnamento non può essere svolto in ordine arbitrario, ma ogni elemento deve essere collegato ai precedenti in modo da non oltrepassare una certa distanza cognitiva, poiché gli schemi che collegano i vari concetti devono essere attivati sequenzialmente per poter così rafforzare il loro legame.

È poi importante che i termini utilizzati siano scelti in modo accurato, ad esempio evitando di utilizzarli alternativamente in maniera colloquiale e specialistica, altrimenti verranno attivati schemi contrastanti.

Un esempio è costituito dai “principi” dell’apprendimento analizzati da Redish [31].

1. Le persone tendono a trovare pattern e raggruppare esperienze e osservazioni in modelli mentali. Questo è simile al funzionamento di una rete neurale con *supervised learning*: così come le reti neurali sono sensibili al set esempi proposti, ad esempio una rete neurale nel discriminare lupi e cani husky si basava sulla presenza di neve nell’immagine [32], gli studenti e le studentesse raggruppano ad esempio gli oggetti in base al colore.

Come primo corollario Redish [31] evidenzia che lo scopo dell’insegnamento della fisica è quello di permettere di elaborare i propri modelli mentali, come secondo corollario afferma che non è sufficiente soltanto che lo studente o la studentessa conosca gli elementi corretti della fisica, ma è anche necessario che vi abbia accesso nel momento appropriato. Ad esempio uno studente, o una ricercatrice, possono anche conoscere perfettamente un concetto, ma non venire in mente al momento opportuno dell’applicazione ad un problema. Uno dei collegamenti più importanti, e quindi da rinforzare, è quello che connette le esperienze della vita quotidiana con i concetti di fisica.

Redish [31] (corollario 1.3) evidenzia poi come la studentessa o lo studente possieda già propri concetti e collegamenti fra schemi, e che (corollario 1.4) i modelli devono essere costruiti, possibilmente facendo anziché guardando altri fare. Fare significa anche provare soluzioni, tentativi sbagliati compresi.

L’ultimo corollario sottolinea come la maggior parte degli studenti e studentesse non sviluppa i modelli mentali appropriati per imparare la fisica e questo potrebbe essere il problema principale dell’insegnamento. Questo è reso evidente dal Force Concept Inventory [33]. Questo test mostra che, nonostante il superamento dell’esame di fisica, la capacità di applicare quanto appreso a problemi qualitativi risulta limitata.

2. Si può imparare soltanto qualcosa che estende ciò che abbiamo già imparato. Questo significa anche che non possiamo imparare qualcosa che non si conosce per niente (corollario 2.1), quindi l’apprendimento deve essere graduale e basarsi su ciò che è già appreso e su un contesto già familiare.

Il secondo corollario afferma che impariamo essenzialmente attraverso l’analogia, mentre il terzo sottolinea l’importanza di esperimenti cruciali, cioè quelli che con più facilità tornano alla memoria. La memoria di questi esperimenti può essere facilitata da esperienze emozionali, alla preparazione attraverso la narrazione o alla teatralità nella preparazione stessa.

3. Risulta molto arduo il cambiamento di un modello mentale. Ciò può essere fatto, ad esempio, indebolendo la catena di attivazione degli schemi mostrando che le conseguenze di un ragionamento o di un’assunzione portano a contraddizioni.

Come corollario viene evidenziato come il sostituto per un modello mentale, ovvero una nuova concatenazione di schemi, deve essere comprensibile, plausibile, suscitare un forte conflitto con le predizioni del precedente modello e infine deve essere utile. Il gioco, la narrazione, la teatralizzazione e la magia possono essere utili a questi scopi.

4. Le persone hanno modelli mentali differenti e diverse procedure di apprendimento per cui (corollari 4.1 e 4.2) l'apprendimento è personale e non esiste un modo migliore di insegnare rivolto a tutti e tutte.

Il terzo corollario afferma che le esperienze personali possono essere poco adatte all'insegnamento, mentre il quarto che l'insegnante di fisica non dovrebbe parlare ma principalmente ascoltare.

2.2 Le euristiche cognitive

Come già illustrato nell'introduzione, osservazioni su bambini molto piccoli [2] e su animali [3] mostrano la presenza di una sorta di "fisica intuitiva" insita già dalla nascita e che viene consolidata con l'esperienza.

La fisica intuitiva identifica come normale il comportamento di oggetti inanimati, i quali sembrano sottostare alla fisica aristotelica: gli oggetti si fermano se non vengono spinti, se lasciati cadere lo fanno verso il basso, se spinti si muovono verso la direzione della spinta. D'altra parte questa fisica è molto ragionevole osservando il mondo che ci circonda, dominato dall'attrito viscoso.

Bambini di pochi mesi, ma anche pulcini da poco usciti dall'uovo, non si meravigliano quando osservano questo tipo di fenomeni, ma prestano molta attenzione se vedono oggetti in perenne movimento, che non seguono le "forze" esterne o che cambiano direzione.

Probabilmente questo tipo di comportamenti ha ragioni evolutive derivanti dal bisogno di distinguere in modo veloce tra oggetti inanimati e altri dotati di volontà e che possono essere prede o predatori.

Una delle difficoltà della fisica è dovuta quindi al fatto che non richiede soltanto l'apprendimento di concetti e relazioni nuove, ma anche la "contestualizzazione" della conoscenza acquisita, come se di fronte ad un fenomeno fisico della vita di tutti i giorni ci trovassimo ad affrontare un dilemma: dobbiamo affrontarlo come suggerisce l'intuito o come mi è stato insegnato nelle lezioni di fisica?

L'insegnamento della fisica procede, come molte altre discipline, fornendo concetti e mostrando come questi sono fra loro legati, utilizzando un carattere quantitativo e collegando leggi fisiche e manipolazione algebrica o geometrica delle grandezze. Queste sono tutte operazioni già difficili per l'essere umano, la cui mente non si è evoluta per effettuare questo tipo di calcoli, a cui viene aggiunta l'ulteriore difficoltà dovuta al conflitto fra modalità di pensiero, meno forte per discipline come la matematica o la chimica, le quali, pur avendo carattere quantitativo, non sono in gran parte relazionate ad esperienze corporali.

Lo studio delle basi cognitive legate all'apprendimento della fisica può e potrà migliorare le sue tecniche d'insegnamento e sviluppare strumenti di monitoraggio dell'apprendimento.

2.2.1 Pensieri lenti, pensieri veloci

Kahneman [34] sostiene che le decisioni delle persone sono basate su due tipi di pensiero: i pensieri lenti, quelli più astratti e più impegnativi in termini di risorse cognitive, e i pensieri veloci, i quali sono automatici e fortemente dipendenti dal contesto. Benché entrambi possano portare a decisioni razionali in base a principi normativi (teoria dei giochi, teoria delle probabilità o logica formale ad esempio), si osservano spesso comportamenti che violano questi criteri.

I pensieri lenti, nonostante si basino su forme di ragionamento controllate ed astratte, non sempre conducono infatti a decisioni razionali, dato che esiste la possibilità di commettere errori.

I pensieri veloci sono quelli che utilizziamo continuamente nella nostra quotidianità e ci consentono di prendere decisioni in pochissimo tempo (frazioni di secondo) riguardo molteplici aspetti importanti della nostra vita come la reazione quasi istantanea dopo il riconoscimento di stimoli minacciosi, ma anche la più banale scelta del dolce al ristorante quando il cameriere o la cameriera ci elenca la lista.

Nella maggioranza dei casi questo tipo di pensieri sono associati a decisioni razionali (in termini della nostra sopravvivenza) ma, se applicati in contesti non adatti come ad esempio un problema di fisica, possono facilmente portare a risposte errate.

Spesso ci affidiamo infatti a delle euristiche, quindi strategie basate su pensieri veloci, come l'“euristica delle disponibilità” in base al quale si stima un evento a seconda di quanti sia facile recuperare dalla nostra memoria degli esempi dell'evento stesso. Questo implica che l'esperienza passata, anche di eventi scorrelati logicamente rispetto al problema che si ha di fronte, può svolgere un ruolo importante e difficilmente analizzabile.

Questo ha anche delle connessioni con la teoria dei giochi. In genere, quando si cerca di modellizzare un gioco e i giocatori, vengono fatte delle assunzioni da cui discendono delle previsioni che la ricerca psicologica e le evidenze comportamentali contraddicono. Una delle assunzioni è quella per cui i giocatori e le giocatrici percepiscono il gioco e le loro azioni in modo chiaro e coerente, deve in tal caso valere l'assioma di invarianza secondo cui, se le scelte possibili sono formalmente equivalenti, chi decide lo farà in modo indipendente da come il problema viene rappresentato.

Tversky e Kahneman [35, 36] hanno però osservato che le persone, in alcune situazioni, violano tale principio. Ci si riferisce in questo caso ad un fenomeno chiamato “effetto del frame”, secondo il quale le persone sono più propense a prendere decisioni rischiose quando le opzioni fra cui scegliere sono descritte in termini di perdite, rispetto che in termini di guadagno.

Ad esempio, nel contesto della teoria dei giochi, ciò si osserva nella tendenza ad adottare strategie differenti in scenari di negoziazione in cui un individuo deve compiere una scelta: accettare un accordo negoziato o rifiutare e ricorrere ad un arbitrato (scelta più rischiosa).

Se il frame della negoziazione è in termini di guadagno, è più probabile che venga scelta la prima opzione; se invece le opzioni vengono contestualizzate in termini di perdita, è più probabile che venga scelta l'opzione più rischiosa, rifiuto e ricorso ad un arbitrato in questo caso [37, 38].

Secondo Camerer [39] uno dei principi di razionalità assunti nell'ambito della teoria dei giochi è il pensare che, in situazioni in cui non tutte le informazioni sono disponibili, i giocatori o le giocatrici coinvolte condividano le stesse aspettative riguardo agli aspetti incerti.

Numerosi studi hanno però riscontrato che gli individui tendono a sovrastimare le proprie abilità rispetto a quelle degli altri. Questo effetto viene chiamato “*overconfidence*”, cioè la presunzione di eccessiva sicurezza. L’*overconfidence* è una distorsione cognitiva che procede insieme alla sovrastima della probabilità di avere un colpo di fortuna rispetto ad un colpo di sfortuna, ed è collegata alla “illusione di conoscenza”, ovvero la tendenza a sopravvalutare ciò che si conosce e si comprende sul funzionamento del mondo. Non solo: si ritiene acquisita anche la conoscenza disponibile a livello di comunità in quanto facilmente accessibile [40].

Sperimentalmente però si osserva che la nostra comprensione del mondo che ci circonda è molto limitata, ne è un esempio l’esperimento di Lawson [41] in cui veniva chiesto a studenti universitari di completare un disegno schematico di una bicicletta in cui non erano presenti elementi come catena e pedali.

Sorprendentemente, nonostante la bicicletta sia un oggetto della vita di tutti i giorni ed il suo meccanismo sia semplice e ben visibile, circa la metà degli studenti e studentesse non riuscì a completare il disegno in modo corretto.

Lo stesso risultato è stato osservato anche scegliendo di selezionare il disegno della bicicletta corretto fra quattro opzioni e, con ancor più sbalordimento, anche ciclisti esperti non hanno avuto *performace* ottimali nel confrontarsi con questo genere di compiti.

Questo dovrebbe farci capire quanto sia schematica e superficiale la nostra conoscenza e comprensione di ciò che ci circonda, anche per quanto riguarda oggetti della nostra quotidianità che funzionano grazie a meccanismi tutto sommato semplici.

2.2.2 L’uso della memoria e degli schemi cognitivi

Seguendo Kahneman [34] esistono due tipi di sistemi che concorrono alla ricerca della risposta adeguata: il “sistema 1”, quello veloce e intuitivo, è fondato sulla percezione e sulla memoria associativa, il “sistema 2”, al contrario lento e pigro, è responsabile della trattazione ragionata e fondata sull’elaborazione e sul controllo.

Una volta posta una domanda difficile ad uno studente o ad una studentessa, questi avranno la tentazione di rispondere attivando il sistema 1, ovvero ricorrendo ad euristiche intuitive e le risposte che arrivano per prime potranno essere enunciate una di seguito all’altra pur essendo in conflitto.

Per attivare il sistema 2 è invece necessario uno sforzo cosciente e soltanto attraverso la sua continua attivazione per i problemi di fisica si potrà arrivare ad ottenere una risposta sia veloce che corretta, poiché si impara a riconoscere elementi familiari in situazioni nuove e ad agire con prontezza.

Tre tipi di memoria concorrono contemporaneamente nel processo di apprendimento e sono interconnessi e in costante dialogo:

- la memoria sensoriale, responsabile della codifica delle informazioni provenienti dall’esterno (con una durata di circa tre secondi);

- la memoria a lungo termine, che racchiude i dati processati e acquisiti stabilmente;
- la memoria di lavoro, veloce e immediata, ma con una capacità limitata [42], in grado di processare i dati provenienti da stimoli (memoria sensoriale) e da ricordi (memoria a lungo termine) e immagazzinare l'output in memorie esplicite nel sistema a lungo termine.

La memoria di lavoro, in particolare, è responsabile di processi complessi ed è proprio quella che entra in gioco quando si chiede a studenti e studentesse di risolvere un problema, dato che contiene tutte le informazioni per la sua risoluzione.

Essa ha però una capacità limitata, l'insegnante dovrebbe perciò fare attenzione al numero di concetti nuovi che introduce e quanto tempo viene offerto per immagazzinarli. In altre parole l'insegnante deve capire come calibrare il carico cognitivo della lezione, rimuovendo elementi di distrazione ed evitando di dare per scontate conoscenze pregresse.

Non tutta l'informazione che arriva dall'esterno viene assimilata, essendo veramente troppa per le nostre capacità cognitive e per la dimensione della memoria di lavoro. Inoltre l'attenzione risulta selettiva e ci permette di ignorare informazioni percepite come inutili (salvo casi di deficit dell'attenzione, in cui è spesso presente una difficoltà nel selezionare gli stimoli "utili"), oltre che dipendente da ciò che conosciamo già e dalla necessità di sapere qualcosa.

Esistono inoltre varie teorie sui filtri che utilizziamo: alcuni pensano che siano iniziali, ovvero che se l'informazione non passa dal filtro è irrecuperabile, altri pensano invece che i filtri siano tardivi, ovvero che l'informazione rimanga in background e possa essere recuperata.

La percezione è il processo di individuazione e organizzazione degli stimoli e di associazione di un significato, processo che attraversa due fasi: una *bottom-up* e l'altra *top-down*.

Nella prima fase avviene la scomposizione del fenomeno osservato in diverse caratteristiche, le quali sono selezionate e analizzate in modo da creare uno schema. Nella fase *top-down*, al contrario, gli schemi sono elaborati e combinati sfruttando le conoscenze pregresse.

La percezione è quindi pesantemente influenzata dal contesto, il quale è poi manipolato anche dagli schemi cognitivi. L'attivazione di uno schema dipende dal contesto, ovvero dalla presenza o meno di alcuni elementi e dato che un certo contesto può attivare più schemi contemporaneamente potrebbero sorgere situazioni di conflitto.

In fisica ne è un esempio l'utilizzo della "fisica intuitiva" rispetto a quella "appresa", la prima utilizzata spesso in contesti non scolastici, la seconda attivata per risolvere esercizi e problemi.

Il conflitto tra schemi viene aggirato dalle euristiche, che a loro volta dipendono dal contesto. Come mostrato da Kahneman [34] la scelta delle euristiche dipende anche dal tempo a disposizione: tanto più è breve, tanto più probabilmente verrà scelto lo schema più semplice e veloce.

Gli schemi vengono poi rafforzati quanto più sono utilizzati e legati a esperienze positive (predizioni corrette, esperimenti riusciti, risposte giuste, ecc.) oppure, al

contrario, sono indeboliti se poco utilizzati e legati ad esperienze negative. In realtà, probabilmente, le esperienze negative più che indebolire diminuiscono la fiducia collegata allo schema: questo viene sempre considerato, ma poi viene scartato.

Un altro ruolo importante può essere fornito dalle emozioni, ad esempio la sorpresa, dall'esperienza "sensoriale", oppure dalla narrazione, capace di rafforzare o indebolire la fiducia in uno schema. Ad esempio un'esperienza in cui una predizione viene confutata attraverso un esperimento "spettacolare" o "magico", rimane probabilmente più vivida nella memoria, allo stesso modo un esperimento costruito in prima persona dallo studente o dalla studentessa rimane più impresso rispetto ad uno creato dall'insegnante.

2.3 Dal sapere accademico alla figura dell'insegnante

La trasposizione didattica è un ingrediente fondamentale per il passaggio dal sapere accademico a quello da insegnare e insegnato. Una prima trasposizione è quella esterna, attuata da coloro che studiano e determinano il funzionamento didattico, i programmi e i libri di testo. Vi è poi una trasposizione interna, ad opera degli insegnanti.

La fisica dell'insegnante deve essere una costruzione intermedia fra la fisica del fisico e quella dell'allievo o allieva. La disciplina scolastica non deve essere la semplificazione della disciplina accademica, ma il risultato di un processo di rielaborazione che sfocia in un nuovo contenuto originale, con un suo contesto, un suo campo di validità, obiettivi e problemi da risolvere.

La trasposizione è necessaria e non può essere evitata, ma porta con sé diversi rischi, pertanto deve essere posta sotto sorveglianza e vigilanza epistemologica. La deformazione rispetto al modello della disciplina accademica deve essere poi accettata, controllata e valutata, in modo che non rimanga soltanto una somiglianza terminologica. Nella trasposizione del sapere è necessario stare attenti alla decontestualizzazione del contenuto scientifico rispetto ai problemi e riferimenti culturali in cui esso prende significato. Ciò potrebbe portare infatti ad una sensazione di artificiosità e di perdita di senso.

La trattazione scolastica richiede poi la suddivisione di un argomento in parti da presentare in successione, e di una sequenza di concetti che devono essere prima dissociati e isolati, e successivamente ricollegati e legati in una struttura ed in una rete concettuale.

Gli studi sulle concezioni alternative e sul cambiamento concettuale hanno contribuito alla comprensione del perché gli studenti e le studentesse non capiscono gli argomenti fisici insegnati e quali ostacoli incontrano. Da questi risultati possiamo imparare a costruire situazioni didattiche in grado di consentire agli studenti e alle studentesse di comprendere e migliorare il loro apprendimento. La ricerca didattica si è quindi concentrata sull'elaborazione e sperimentazione di percorsi e sequenze di insegnamento e di apprendimento (*Teaching learning sequences*, TLS) basate proprio sui risultati di ricerca degli ultimi decenni riguardanti le concezioni sul senso comune e i processi di apprendimento relativi a specifici contenuti scientifici.

Le ricerche si sono sviluppate sia sullo studio di approcci migliorativi di apprendimento relativi ad un singolo argomento o tema, sia su macroaree, come un

intero curriculum di uno o più anni di studio. Si possono realizzare inoltre sequenze con finalità di pura ricerca, in modo da ottenere risultati conoscitivi su particolari aspetti relativi ad un argomento scientifico, oppure con obiettivi di innovazione, migliorando l'efficacia di un certo insegnamento o introducendo nuovi contenuti e metodi in una determinata parte di curriculum scolastico.

Il nostro lavoro si concentra proprio su questo tipo di ricerca, senza tuttavia toccare esplicitamente argomenti trattati solitamente durante gli anni scolastici.

Si pone quindi il problema dello scarto fra le proposte di sequenze d'insegnamento della ricerca didattica e quello che è l'effettiva pratica e realtà scolastica. A questo scopo è stata sottolineata l'importanza dell'insegnante, concentrando ricerche sullo studio del suo ruolo come trasformatore delle intenzioni didattiche dei programmi o dei ricercatori [43, 44] e sull'elaborazione di progetti ed esperienze di formazione degli insegnanti [45–50].

Vengono considerati tre campi di conoscenze fondamentali per l'insegnante: la conoscenza della disciplina da insegnare (*Subject Matter Knowledge*, SMK), le conoscenze pedagogiche (*Pedagogical Knowledge*, PK) ed una conoscenza didattica della disciplina (*Pedagogical Content Knowledge*, PCK). In particolare quest'ultima è una componente che caratterizza i recenti approcci alla formazione dell'insegnante ed è oggetto di studio.

2.4 La didattica delle scienze come campo disciplinare autonomo

Abbiamo finora delineato una successione di temi prevalenti nella ricerca in didattica delle scienze e della fisica in particolare. Ciò è tuttavia una schematizzazione della realtà: molti temi e linee di pensiero sono contemporaneamente presenti e sono collegati fra loro, rendendo di fatto l'argomento ben più complesso.

Altri temi che non abbiamo trattato, ma che sono molto importanti per una visione d'insieme sono ad esempio i problemi, gli esperimenti, i modelli, le analogie, il linguaggio, il ruolo che hanno la storia e la filosofia della scienza, l'argomentazione scientifica, le tecnologie informatiche e il rapporto fra scienza, tecnica e società, la didattica informale e museale, ecc.

Questa complessità fa sì che sia necessario pensare alla didattica delle scienze e della fisica come ad un campo disciplinare autonomo distinto sia dalle singole discipline scientifiche che dalla pedagogia generale, benché sia comunque collegato ad esse.

La ricchezza di tematiche e l'evoluzione dei risultati e dei quadri interpretativi definiscono oggi uno specifico campo di conoscenze e metodi chiamato *science education* o *didactics of sciences*, composto da una propria comunità internazionale di riferimento, da studiosi che si esprimono e dibattono attraverso associazioni, congressi, riviste e libri. Esiste infatti una specifica comunità scientifica che si è sviluppata negli ultimi decenni, la quale fa riferimento a un insieme di riviste nazionali e internazionali, con corsi universitari e dottorati di ricerca.

Fino agli anni Sessanta gli Stati Uniti erano l'unico paese in cui la didattica della scienza era una disciplina accademica definita, con corsi specializzati, incarichi universitari, lavori di ricerca e dottorati. Anche in altri paesi erano ovviamente

presenti ricerche relative a questo argomento, ma facenti capo a singoli individui o piccoli gruppi di ricerca, non come parte di programmi istituzionali e non come settore di ricerca riconosciuto in modo esplicito.

Erano presenti sia in Italia che in altri paesi studi su vari aspetti dell'educazione e della pedagogia, a volte centrati su esempi e dettagli dell'insegnamento scientifico, tuttavia il fulcro dello studio non era certamente il problema della didattica della scienza. Negli Stati Uniti, al contrario, già nel 1916 iniziano le pubblicazioni della rivista che oggi è chiamata *Science Education* (fino al 1929 si chiamava invece *General Science Quarterly*). Nel 1928 nasce la *National Association for Research in Science Teaching* (NARST), la quale ha lo scopo di "promuovere studi scientifici sui problemi dell'insegnamento delle scienze e disseminare i risultati di tali studi".

La NARST si sofferma sull'esigenza e l'importanza di una connessione fra ricercatori e insegnanti, fra risultati della ricerca e la pratica scolastica. Tale connessione si rivelerà (e lo è tuttora) da subito problematica.

A questo scopo dal 1970 la NARST ha deciso di tenere il suo congresso annuale in collaborazione alternativamente con la *American Education Research Association* (AERA) e con la *National Science Teacher Association* (NSTA). Nel 1963 la NARST fonda la sua nuova rivista ufficiale, il *Journal of Research in Science Teaching*.

L'interesse internazionale per caratterizzare la didattica delle scienze come una disciplina accademica autonoma si manifesta soprattutto negli anni Sessanta, come effetto dei grandi progetti di riforma dell'insegnamento scientifico. Vediamo alcuni esempi.

Nel 1971 in Australia viene pubblicata la rivista *Research in Science Education* da parte della *Australian* (dal 1990 *Australasian*, per includere anche la Nuova Zelanda) *Science Education Research Association* (ASERA), fondata solo un anno prima.

All'inizio degli anni Sessanta si possono leggere le prime tesi di dottorato in didattica delle scienze in Gran Bretagna, negli anni successivi anche negli altri paesi europei. Nel 1979 nasce la rivista europea *European Journal of Science Education* (divenuta poi nel 1987 *International Journal of Science Education*), la quale nei primi numeri pubblica riassunti di alcune tesi di dottorato presentate in diversi paesi europei.

In Italia i dottorati di ricerca sono stati istituiti solo nel 1980, ma i primi dottorati in didattica della fisica si attivano solo dopo il 2000. È bene sottolineare tuttavia che già in precedenza diverse tesi di laurea avevano come oggetto ricerche in didattica delle scienze, in particolare della fisica.

Attualmente non sono molte le Università che possiedono un corso di laurea magistrale centrato sulla didattica della fisica e pochissime università propongono dottorati di ricerca in didattica della fisica, sia in dipartimenti di Fisica che di Scienze della formazione.

2.5 Concezioni comuni e cambiamento concettuale

Identifichiamo con conoscenza scientifica la conoscenza condivisa dai membri di una particolare comunità, quella scientifica, i quali fanno della ricerca riguardo la

descrizione e la comprensione dei fenomeni naturali e sociali l'interesse e lo scopo della loro attività.

Una delle differenze presenti fra conoscenza scientifica e conoscenza comune è che in quest'ultima la negoziazione della validità degli schemi interpretativi della realtà avviene per lo più in modo implicito, contrariamente a ciò che accade nella comunità scientifica, dove gli schemi sono esplicitati e la loro validità è provata da critiche e verifiche incrociate.

Ogni comunità scientifica definisce la propria base di conoscenza, sia dichiarativa che procedurale, con lo scopo di perseguire l'attività di ricerca. Questa base di conoscenza è formata dagli schemi interpretativi costruiti dalla comunità scientifica stessa nel corso della sua storia, e validati dalla conferma del loro potere predittivo. Possiamo quindi affermare che conoscenza scientifica e comune sono diverse sia per quanto riguarda la base di esperienze e di conoscenze, sia per quanto riguarda le modalità con cui evolvono.

Dato che entrambe vengono poi comunicate è interessante indagare una ulteriore differenza, stavolta sull'uso del linguaggio. La conoscenza scientifica non può prescindere dall'utilizzare in larga parte lo stesso linguaggio di quella comune. Sia parole che designano oggetti concreti (cane, gatto ecc.), sia quelle che designano oggetti astratti (amore, sincerità ecc.) possono risultare ambigui rispetto al linguaggio quotidiano.

Il linguaggio riveste un ruolo di primo piano nell'apprendimento [51] e può essere visto come uno strumento culturale psicologico del processo cognitivo che media i processi mentali di alto livello. I bambini e le bambine apprendono grazie al loro inserimento nella società, alle loro interazioni umane e attraverso l'osservazione, ed è il linguaggio lo strumento che utilizzano per costruire il loro pensiero complesso, combinando esperienze passate e future. Attraverso l'apprendimento di una parola implicitamente viene appresa la capacità di ragionare sul concetto e sul significato della parola stessa.

Una delle difficoltà legate all'apprendimento della fisica è proprio data dalla mancanza di un linguaggio scientifico svincolato da parole di senso comune [52] e ciò induce studenti e studentesse a costruire predizioni fisiche utilizzando il senso comune dei termini. Il termine di uso comune evoca inoltre schemi mentali che dipendono dall'esperienza personale, rendendo più difficoltosa la costruzione di nuovi schemi mentali specialistici liberi da preconcetti.

Si pensi, come esempio, all'utilizzo della parola vaso¹, utilizzata nel linguaggio comune per descrivere l'oggetto in cui posizionare fiori e piante, ma utilizzato in contesto scientifico per indicare vene e arterie.

Ancora più confusione viene generata dall'ambiguità di parole utilizzate per descrivere oggetti astratti, come lo sono forza, potenza, lavoro. Questi termini possono perdere tuttavia parte della loro ambiguità una volta data una precisa descrizione scientifica. D'altra parte esistono anche parole che vengono definite in ambito scientifico e si diffondono nel linguaggio comune, come ad esempio atomo o energia.

¹Questo esempio ed i successivi, sono stati presi dalla fonte [12].

Il quadro è complicato poi dal fatto che non esiste un'unica conoscenza scientifica, ma una pluralità di conoscenze scientifiche, pensiamo ad esempio al significato della parola "reazione" in fisica ed in chimica.

Risulta allora necessaria una negoziazione di significati nella comunicazione fra conoscenza scientifica e conoscenza comune.

L'esistenza di rappresentazioni mentali diverse fra i due tipi di conoscenza è quindi giustificata sia dalla diversa base esperienziale, in quanto l'esperienza comune non contiene quella di laboratorio, sia da un diverso uso del linguaggio.

Risulta quindi importante l'attività didattica finalizzata alla negoziazione dei significati.

2.5.1 Pensiero comune e pensiero scientifico

Risulta ormai certo che gli studenti e le studentesse non arrivano alle lezioni di fisica delle scuole secondarie di secondo grado (negli indirizzi in cui questa materia viene studiata) con la mente sgombra da idee sui fenomeni naturali che studieranno. Essi possiedono infatti già schemi interpretativi, idee e concezioni personali su molti fenomeni fisici, la cui conoscenza costituisce uno dei più importanti obiettivi della ricerca didattica².

Dagli anni Sessanta cresce un movimento che si occupa di ricerca sulle concezioni (la cui terminologia varia col tempo passando da *preconceptions* a *misconceptions* fino ad arrivare a *conceptual frameworks* e *alternative frameworks*) degli allievi e delle allieve su argomenti specifici di fisica e di altre scienze, focalizzandosi anche sul loro statuto conoscitivo ed il loro ruolo nell'apprendimento e insegnamento. Una interessante raccolta di risultati è fornita dai lavori collettivi o di sintesi di Driver, Guesne, Tiberghien [53] e di Viennot [10]. Anche in Italia si attivano gruppi universitari di ricerca sulle concezioni comuni degli studenti e delle studentesse.

Fa riflettere il fatto che si ritrovino concezioni comuni simili in ambienti geografici e culturali molto differenti fra loro, facendo sorgere l'idea di una specie di fisica spontanea. In realtà è evidente che persone che hanno affrontato o stanno affrontando studi di scuola secondaria superiore o universitaria avranno acquisito una mescolanza di idee generate dall'esperienza pratica nella vita quotidiana e di idee suggerite dall'insegnamento scolastico e dai media (social media compresi).

Già il bambino o la bambina in età pre-scolare forma modelli esplicativi e interpretativi personali dei fenomeni fisici che lo o la coinvolgono, sulla base delle proprie esperienze senso-motorie.

Sebbene le concezioni spontanee non costituiscano un insieme organico e coerente, mostrano una stabilità e un'efficacia non trascurabili in specifici e limitati ambiti, risultando addirittura inalterate o parzialmente modificate anche dopo lo studio scolastico delle discipline scientifiche.

La miscela composta da idee spontanee e regole e schemi mentali appresi a scuola può presentarsi sia come una reinterpretazione personale degli insegnamenti rice-

²Come già scritto, con gli studi di Piaget sullo sviluppo cognitivo e le spiegazioni fisiche e con i lavori di Bachelard sugli ostacoli epistemologici e le differenze fra conoscenza comune e scientifica era già emersa questa questione, così come le prime elaborazioni del cognitivismo dovute a Bruner e Ausubel in psicologia dell'apprendimento avevano già evidenziato l'importanza di ciò che già si conosce.

vuti alla luce delle idee pregresse, sia come una semplice coesistenza di due schemi esplicativi differenti, attivati alternativamente dalla studentessa o dallo studente a seconda della necessità. Addirittura alcune concezioni errate sembrano essere prodotte, suggerite o sostenute dall'insegnamento stesso, a causa dell'eccessiva semplificazione o abbreviazione. Sembra che esista in sostanza una specie di coerenza multipla, in cui l'allieva o l'allievo conserva e applica più modelli esplicativi, ognuno con la sua logica.

Gli allievi e le allieve mostrano per fortuna disponibilità a modificare o abbandonare la loro concezione, una volta messi a confronto con ragionamenti contrastanti che siano parzialmente basati sulle loro idee spontanee e che siano coerenti con le tipologie di spiegazioni da loro considerate accettabili ed efficaci.

2.5.2 Concezioni comuni

Esistono molti modi per rilevare le idee degli studenti e delle studentesse: interviste su situazioni sperimentali, questionari a scelta multipla o a libera risposta, costruzioni di mappe concettuali ecc. Nel caso dei questionari a scelta multipla diventano ad esempio importanti i distrattori (le risposte "sbagliate"), i quali devono essere scelti con cura e in relazione alle possibili concezioni alternative degli allievi e delle allieve³. È importante chiedere anche una breve giustificazione della risposta data.

Una variazione del metodo dell'intervista è offerto dal *teaching experiment*, utilizzato inizialmente per la matematica e applicato poi anche alla fisica [54]. Questo metodo è composto da una prima fase di libera espressione degli studenti e delle studentesse in risposta ad una certa situazione per poi passare ad un intervento di destabilizzazione da parte dell'insegnante. La destabilizzazione è eseguita alla presenza di un osservatore e organizzata seguendo un *learning cycle* composto prima dalla esplorazione del problema, viene poi introdotto il nuovo concetto o la nuova conoscenza, viene infine applicata la conoscenza acquisita. Questo tipo di approccio può essere un metodo efficace per sviluppare e valutare percorsi e strategie d'insegnamento attraverso brevi incontri con piccoli gruppi di studenti e studentesse, per poi passare alla sperimentazione nella classe al completo.

I metodi di elaborazione dei dati cambiano in base al tipo di ricerca e ai suoi obiettivi. Esistono ricerche che studiano le risposte di un piccolo numero di studentesse e di studenti, analizzando in profondità le risposte e le motivazioni rilevate; altre ricerche si concentrano su popolazioni numerose elaborando una statistica delle risposte e cercando di individuare idee e tendenze dominanti. La ricerca può inoltre avere lo scopo di studiare eventuali differenze legate all'ambiente culturale o sociale, oppure di capire l'evoluzione delle concezioni con l'età ed il livello di scolarizzazione.

In generale le metodologie di raccolta e di elaborazione dei dati sono simili a quelle relative alle ricerche psicologiche, sociali, educative, e proprio a queste fanno riferimento dal punto di vista dei metodi statistici (ricerche di tendenza, di correlazioni e di mappe concettuali), sia dell'analisi testuale e di contenuto.

Un rischio di queste ricerche è quello di sovrapporre ai dati ottenuti le tendenze di pensiero o le ipotesi personali di chi compie la ricerca, oppure di attribuire in

³Non è facile per un docente elaborare distrattori plausibili o che "esplorino" le concezioni alternative. Una tecnica molto valida consiste nel somministrare il test con risposta aperta, ed utilizzare le risposte degli studenti per elaborare i distrattori

modo improprio significati scientifici precisi alle parole utilizzate dalle studentesse e dagli studenti. Per evitare errori di questo tipo è necessario quindi che più ricercatori e ricercatrici leggano e interpretino le risposte.

Risulta interessante il metodo introdotto da Marton [55], chiamato fenomenografia, in cui si cerca di descrivere come le persone interpretano un particolare fenomeno, attraverso l'utilizzo di questionari scritti, interviste semi-strutturate o registrazioni audio-video.

Secondo molti autori le idee e le concezioni degli studenti e delle studentesse, anche se non corrette o non precisamente coincidenti con quelle scientifiche, possono non essere considerate solo come ostacoli, bensì possono costituire una base per poter costruire nuove strutture più articolate. Clement, Browin e Zietsman [56] parlano ad esempio di concezioni ancora, altri invece di argilla concettuale, cioè di un materiale a disposizione da modellare e per costruire nuove forme di ragionamento e di pensiero.

Compare quindi un apparente paradosso per cui le conoscenze esistenti sono allo stesso tempo un supporto e un ostacolo.

Alcuni studiosi, come Vosniadou [57] e Rowlands [58] ritengono che spesso le idee espresse da studenti e studentesse non siano concezioni preesistenti ben formate, ma schemi costituiti ad hoc in risposta ai quesiti. Secondo DiSessa [59] le allieve e gli allievi possiedono un insieme di strutture esplicative elementari e primitive, le quali sono state costruite attraverso l'astrazione e la generalizzazione delle osservazioni nella vita quotidiana.

Alcune concezioni hanno poi molto in comune con idee e teorie scientifiche del passato come quelle aristoteliche o legate alla teoria medievale dell'*impetus* nel caso della meccanica, quelle che fanno riferimento a raggi visivi uscenti dall'occhio per l'ottica o la concezione del calore come sostanza. Queste somiglianze hanno indotto alcuni ricercatori a proporre l'utilizzo di particolari segmenti di storia della scienza nell'insegnamento, in modo da favorire una presa di coscienza delle proprie concezioni. In questo modo gli allievi e le allieve possono riconoscere alcuni elementi delle proprie concezioni, per poi discuterle e modificarle in maniera più efficace.

Le ricerche hanno evidenziato una forte presenza delle spiegazioni causali nel pensiero comune. Le regole formali, che fanno uso di formule e relazioni funzionali, non sembrano soddisfare il bisogno di spiegazione degli allievi e delle allieve, il quale sembra maggiormente legato all'idea di immaginarsi quel che accade. Le studentesse e gli studenti mostrano infatti di sentire la necessità di una spiegazione causale, di un meccanismo in grado di spiegare la dinamica di fatti ed effetti che hanno portato ad un certo stato di cose. Questo tipo di problemi si presenta anche in matematica, dove l'implicazione ($\Rightarrow$) è spesso interpretata come relazione causale e cronologica [60].

2.5.3 Cambiamento concettuale

Secondo una prospettiva costruttivista l'apprendimento è un processo di costruzione di conoscenze in cui l'individuo valuta le informazioni provenienti dalla società e, attraverso i propri schemi di conoscenza, valuta e decide se e come modificare gli schemi in suo possesso.

Per quanto riguarda la fisica, alcuni schemi dovuti alla conoscenza spontanea degli studenti e studentesse, pur possedendo la stessa base esperienziale, possono essere molto diversi dagli schemi scientifici e portare ad incomprensioni nello sviluppo della conoscenza scientifica. Può costituire un'utile descrizione la metafora delle viti, ideata da Vygotskij per descrivere l'interazione fra linguaggio e pensiero, ed utilizzata da Pines e West [61] nella seguente forma:

Consideriamo i due tipi di conoscenza [...] la conoscenza spontanea e quella formale, che hanno origini differenti. La conoscenza spontanea è il prodotto ontogenetico relativamente lungo e interno ad una cultura, a sua volta all'interno di un ambiente fisico di esperienza; la conoscenza formale è un intervento pianificato imposto dalla scuola. Non vi è una demarcazione netta, sono entrambe esperienze, tuttavia la conoscenza spontanea ha, per così dire, una base fenomenologica più intimamente sperimentata rispetto alla conoscenza formale imposta dall'autorità della scienza e sotto gli auspici di un sistema educativo.

Possiamo immaginare che ciascun tipo di conoscenza sia rappresentato da una pianta di vite: la conoscenza spontanea che nasce dall'individuo che apprende sarà una pianta che cresce verso l'alto (per sottolineare che è parte dello sviluppo organico dell'individuo); la conoscenza formale sarà una pianta che si sviluppa verso il basso (una immagine che suggerisce l'imposizione dall'alto di una autorità sull'individuo).

Nella prospettiva costruttivista un apprendimento scientifico comporta che le due viti si intreccino in modo tale da perdere la propria individualità, nonostante la loro diversa origine. [...] È possibile immaginare molte diverse situazioni che si possono realizzare quando le due viti entrano a contatto. Si va da una situazione di immediata affinità fra le due piante che come risultato un intreccio senza problemi e perciò rapido e completo, ad una situazione di rifiuto totale in cui fra le due viti non si realizza alcun intreccio.

Watzlawick [62], nel contesto psicologico, presenta una scala gerarchica di due livelli di cambiamento (al quale ne possiamo aggiungere un terzo). Il primo livello si ha quando all'interno di un sistema di regole vengono aggiunti nuovi elementi di conoscenza o si differenziano concetti senza alterare le regole. Al contrario, il secondo livello di cambiamento riguarda la modifica delle regole del sistema e pertanto non può avvenire all'interno del sistema stesso ma ha bisogno di un passaggio ad un livello superiore. Questo secondo livello implica un cambiamento di prospettiva che a sua volta implica un'analisi della base di credenze, ma poiché questa è stata costruita attraverso esperienze sia di tipo cognitivo che affettivo, può sorgere una maggior resistenza all'analisi.

Ai due tipi di cambiamento potremmo aggiungerne un terzo riguardante le modifiche sostanziali al sistema di credenze, dunque di più ardua attuazione.

Notiamo che l'obiettivo di eradicare la conoscenza spontanea, ne attribuisce automaticamente un carattere di falsità, ponendo contemporaneamente in contrasto una conoscenza scientifica fatta da verità universalmente riconosciute. Ciò comporta

non solo un cambiamento di tipo cognitivo, ma anche di una base di credenze che coinvolge anche gli aspetti affettivi, e dunque del terzo tipo.

Al contrario, si può puntare a far convivere gli schemi spontanei con quelli scientifici, in modo da riconoscere ai primi alcuni caratteri di validità. In questo modo l'accettazione degli schemi scientifici non è più in termini di verità ma di maggior adattamento alle esigenze di vita, rimanendo pertanto un cambiamento del secondo tipo.

Notiamo tuttavia che sia gli schemi spontanei che scientifici possono convivere solo in un ottica più ampia che li contenga entrambi, in un contesto che determini le regole d'uso sia del primo che del secondo.

Le modalità per passare da una concezione difforme ad una coerente con gli obiettivi dell'insegnamento non sono tuttavia uniche. Alcuni autori come DiSessa, Clement, Brown, Vosniadou e Piaget sottolineano l'importanza degli elementi di continuità fra idee comuni e conoscenza scientifica; altri come Hewson, Strike, Posner e Bachelard ritengono essenziali la rottura e considerano necessario un cambiamento concettuale simile ad una personale rivoluzione scientifica che richiama esplicitamente le idee di Kuhn e il concetto piagetiano di accomodamento, contrapposto all'assimilazione.

Posner e collaboratori [27] hanno elaborato una teoria del cambiamento concettuale basata sul conflitto cognitivo e sulle condizioni necessarie perché esso si realizzi:

- insoddisfazione della vecchia concezione e intelligibilità, ovvero comprensione del significato e visualizzazione degli elementi della nuova conoscenza in modo coerente fra loro;
- plausibilità, ovvero riconoscimento della validità esplicativa e predittiva;
- fecondità della nuova concezione, ovvero utilità nella risoluzione di problemi precedentemente non risolvibili o suggerimento di nuove idee e possibilità.

Non di meno la nuova concezione deve inserirsi in un ambiente concettuale complessivo, il quale costituisce una particolare ecologia concettuale, ovvero l'insieme di credenze, idee metafisiche e analogie che caratterizzano l'allievo o l'allieva. Una sorta di corrispondente psicologico e pedagogico del concetto di paradigma di Kuhn.

Hestenes [63] propone una strategia simile, chiamata *dialectical teaching strategy*, che si basa su quattro fasi: formulazione esplicita delle credenze in senso comune, controllo della validità esterna empirica, controllo della consistenza interna e infine confronto fra credenze alternative sia di senso comune che del modello scientifico.

È bene notare tuttavia che negli anni Novanta queste strategie basate sul conflitto sono state criticate e messe in discussione anche dagli autori stessi [64]. Le motivazioni principali riguardano soprattutto l'importanza di fattori non cognitivi, ma affettivi e irrazionali. Si è notato che un forte conflitto cognitivo può avere l'effetto indesiderato di rifiuto o disaffezione da parte dell'allieva o dell'allievo.

Vygotskij [28] attribuisce sia alle interazioni sociali che al linguaggio un ruolo fondamentale nello sviluppo cognitivo, ci si riferisce pertanto ad un conflitto socio-cognitivo come motore del cambiamento concettuale e si suggeriscono situazioni didattiche in grado di favorire il dibattito scientifico in classe, anche attraverso la

relazione e la discussione fra pari. Secondo Vygotskij l'apprendimento sociale precede la competenza individuale poiché le funzioni mentali si formano in un processo con cui il bambino o la bambina si inserisce nell'ambiente sociale.

Alcuni autori, come Vosniadou [57] concepiscono l'apprendimento scientifico come graduale, in cui le strutture concettuali iniziali sono continuamente ristrutturare e arricchite. Potrebbero inoltre coesistere differenti modelli e rappresentazioni che il soggetto attiva a seconda delle situazioni e dei problemi posti. In questo caso l'insegnante avrebbe il compito di aggiungere nuovi modelli esplicativi nella mente dell'allievo o dell'allieva e di affinare le sue capacità di scelta del modello in base alla situazione [65]. Questo ragionamento è molto vicino a quello che utilizza un fisico o una fisica a seconda del contesto teorico o sperimentale con cui si confronta.

Secondo Andersson e Bach [66], gli approcci che si basano sull'esplicitamento delle pre-concezioni e sul loro superamento attraverso conflitti concettuali non hanno molto senso perché queste concezioni non sarebbero in realtà robuste e tenaci, ma piuttosto supposizioni e tentativi di indovinare. Gli studenti e le studentesse, pertanto, sarebbero pronti ad abbandonarli e bisognerebbe concentrarci sulla scoperta e l'apprezzamento del potere esplicativo dei modelli scientifici. Al contrario l'insegnante è bene che sia informato su tali pre-concezioni e sulle difficoltà possibili degli studenti e delle studentesse.

Autori come Psillos, Spyrtou, Kariotoglou [48] mostrano come spesso si tratta di passare da nozioni indifferenziate come calore e temperatura, forza, energia e quantità di moto, pressione e forza, intensità di corrente ed energia elettrica, a concetti distinti e ben definiti mediante un processo di differenziazione concettuale.

Altri autori come White, Gunstone [67] e Vosniadou [68] sottolineano l'importanza di una riflessione sulle caratteristiche delle proprie concezioni, ovvero una meta-riflessione, in grado di sviluppare un discorso non solo con le concezioni ma anche sulle concezioni. In questo modo l'allievo o l'allieva può acquisire maggiore coscienza e controllo del proprio processo di apprendimento.

Riassumendo possiamo dire che il modello iniziale di cambiamento concettuale di Posner e collaboratori [27] è stato perfezionato considerando il ruolo delle interazioni sociali e dell'affettività, e rivisto attraverso le idee sulla natura della scienza e della meta-cognizione sui processi personali di apprendimento. D'altra parte questo modello è stato anche criticato e sostituito con una visione più continuista del cambiamento concettuale, in cui si possono considerare le pre-concezioni come risorse o interpretando lo sviluppo concettuale come una ristrutturazione, riorganizzazione o ricategorizzazione di rappresentazioni mentali preesistenti dell'allieva dell'allievo. È stata poi considerata anche l'aggiunta di nuovi modelli mentali, insieme ad una migliorata capacità di attivare differenti rappresentazioni in base al contenuto ed al contesto.

2.6 Alcune criticità nelle metodologie di insegnamento

Una indagine canadese [69] mostra come in generale gli insegnanti possiedono una visione empirico-realista della scienza che li porta ad operare un tipo di insegnamento piuttosto tradizionale in cui non sono riconosciuti né lo statuto epistemologico degli studenti e delle studentesse in quanto riproduttori del sapere scientifico, né il

carattere sociale e costruito del sapere scientifico. Per quanto riguarda l'Italia, già un'indagine svolta nel 1985 sull'insegnamento della fisica [70], metteva in luce come nella scuola italiana il ricorso all'evidenza sperimentale fosse molto limitato.

L'attività di laboratorio si riduceva spesso a verificare i risultati previsti dalla teoria, costituendo di fatto un metodo per prendere confidenza con gli strumenti e con i metodi di calcolo, ma non fornendo un esempio di ricerca empirica.

I commenti degli e delle insegnanti che risposero all'indagine davano infatti un'immagine del laboratorio come “documentazione sperimentale” delle leggi fisiche studiate in classe, oppure di osservazione e misura come necessarie per la deduzione delle leggi, fino ad arrivare addirittura ad affermare la non necessità del laboratorio, in quanto sia sufficiente la “deduzione delle spiegazioni dei fenomeni fisici mediante la matematica”.

La discrepanza fra credenze e valori dichiarati e credenze e valori in uso è visibile anche in contesto universitario. Molti manuali (ma anche lezioni frontali), ad esempio, dopo aver presentato le sorti della scienza e l'importanza del metodo scientifico, fanno seguire un'esposizione astratta e basata sulla sola teoria e quando vengono presentati gli esperimenti non vengono quasi mai riportati i relativi dati presi dallo scienziato o dalla scienziata e le motivazioni che li hanno indirizzati alle loro conclusioni. Esiste quindi una scollatura fra il metodo scientifico trattato e la sua realizzazione, di fatto il metodo scientifico viene spesso invocato inizialmente come sorgente di autorità per poi essere dimentico e non messo in pratica.

Queste metodologie non consentono alle studentesse e agli studenti di migliorare le proprie capacità di apprendimento, ma inducono ad una maggior docilità verso un sapere scientifico estraneo e autoritario, proprio come l'immagine che si crea la scienza stessa. La mancanza di riflessione individuale sul procedere della scienza porta ad una mera accettazione di ciò che scienziati e scienziate, professori e professoresse, presentano, portando quindi ad un atteggiamento passivo e senza critiche nei confronti della scienza.

2.7 Il ruolo del laboratorio nella didattica della fisica

La fisica è una scienza sperimentale. È interessante notare come parole quali sperimentare, esperire, esperienze, esperimenti, abbiano una radice semantica comune e vengano utilizzate per indicare attività sia manuali che mentali con sfumature di significato in relazione a specifiche caratteristiche di ciascuna attività.

“Esperire” e “fare esperienze” sono solitamente legate ad attività in cui, passivamente, si riceve dall'ambiente informazioni. Si possono fare esperienze anche se non si è previsto di farle.

Diverso è il caso delle parole “sperimentare” e “fare esperimenti” in cui viene abbandonato il senso di passività in quanto attività prestabilite con lo scopo di ottenere informazioni.

Notiamo poi che una differenza fra le due attività è data dalle caratteristiche della realtà su cui agiscono: la prima è la realtà complessa del mondo naturale, la seconda quella del laboratorio, un mondo che, pur essendo naturale, è costruito dall'essere umano, quindi artificiale.

2.7.1 L'importanza del laboratorio nella fisica

Nella realtà del laboratorio gli oggetti devono essere noti, ovvero familiari, agli sperimentatori e alle sperimentatrici in modo da focalizzare al meglio l'attività di ricerca. Vi è però un'altra classe di oggetti, più astratti, che deve essere conosciuta: da una parte le teorie e i modelli, dall'altra le procedure di sperimentazione.

Risulta quindi che è proprio il mondo del laboratorio a costruire la realtà naturale della fisica, la quale rimane un riferimento esterno di assoluta importanza, da comprendere e controllare. È perciò fondamentale che le risposte alle domande poste in laboratorio abbiano senso anche nel mondo fuori dal laboratorio. In passato, quando il mondo del laboratorio risultava meno distante e meno diverso da quello esterno, poteva esistere la figura dello scienziato o della scienziata che, interagendo con la realtà naturale, fosse capace di costruire induttivamente la conoscenza scientifica. Ad oggi questo tipo di idea è stata praticamente abbandonata.

A questo scopo è interessante riportare le riflessioni di Pierre Duhem [71]:

L'importanza di questa operazione intellettuale secondo cui i fenomeni realmente osservati dal fisico sono interpretati secondo le teorie ammesse, non solo è sottolineata dalla forma che essa assume con il risultato dell'esperimento, ma si manifesta anche attraverso i mezzi impiegati dallo sperimentatore. È infatti impossibile realizzare strumenti esistenti nei laboratori di fisica se non si sostituisce, agli oggetti concreti componenti gli strumenti, una rappresentazione astratta e schematica che dia corpo al ragionamento matematico; e non si sottopone questa combinazione di astrazione e deduzioni a calcoli aderenti alle teorie [...].

Quando il fisico compie un esperimento ha di fronte simultaneamente due rappresentazioni ben distinte dello strumento su cui opera; una è l'immagine dello strumento concreto che manipola nella realtà, l'altra è una rappresentazione schematica dello strumento costruita con simboli forniti dalla teoria; è su tale strumento ideale e simbolico che egli ragiona, è ad esso che si applicano le leggi e le formule della fisica.

I principi consentono di definire ciò che s'intende quando diciamo che, eliminando le cause di errore con correzioni appropriate, aumenta la precisione di un'esperienza; vediamo, in effetti, che le correzioni altro non sono che perfezionamenti appropriati all'interpretazione teorica della esperienza.

Con il progresso della fisica, vediamo ridursi l'indeterminazione del numero delle asserzioni astratte che il fisico fa corrispondere ad uno stesso fatto concreto, e crescere l'approssimazione dei risultati sperimentali; e ciò non soltanto a causa della crescente precisione degli strumenti ma anche perché le teorie fisiche forniscono regole via via più soddisfacenti in grado di stabilire la corrispondenza dei fatti con le idee schematiche necessarie a rappresentarle.

Questa crescente precisione si acquista, è vero, attraverso una crescente complessità, dovendo osservare insieme al fatto principale una serie di fatti accessori e sottoporre poi le constatazioni brute dell'espe-

rienza a combinazione e trasformazione sempre più numerose e delicate; le trasformazioni subite dai dati immediati dell'esperienza sono le correzioni.

Se l'esperimento di fisica consistesse nella semplice constatazione di un fatto, sarebbe assurdo apportarvi delle correzioni; se l'osservatore ha visto attentamente, accuratamente, minuziosamente, è ridicolo dirgli che ciò che ha visto non è quello che avrebbe dovuto vedere e mettersi a fare qualche calcolo, indicandogli ciò che avrebbe dovuto invece constatare da sé.

Si comprende invece benissimo la funzione logica delle correzioni quando si tiene presente che un esperimento non è soltanto la constatazione di un insieme di fatti ma anche la loro traduzione secondo un linguaggio simbolico fatto di regole tratte dalle teorie fisiche. Ne risulta infatti che il fisico confronta incessantemente due strumenti, quello reale che manipola e quello reale e simbolico su cui ragiona [...].

Un esperimento di fisica non si riduce alla semplice constatazione di un fatto, si comprende allora facilmente come la certezza di un risultato sperimentale sia di tutt'altro ordine di quella di un fatto semplicemente constatato dai sensi, si comprende anche che certezze di natura tanto diversa vanno valutate con metodi completamente distinti [...].

Il profano crede che il risultato di un esperimento scientifico si distingua dall'osservazione volgare per un più alto grado di certezza; ma si sbaglia perché il resoconto di un esperimento di fisica non ha la stessa certezza immediata e relativamente semplice da controllare della testimonianza volgare e non scientifica. Meno certo di quest'ultima, l'esperimento di fisica la sopravanza tuttavia per il numero e la precisione dei dettagli che ci fa conoscere; in ciò consiste la sua vera e fondamentale superiorità.

Per vedere in modo migliore come conoscenze teoriche e attività sperimentali si intreccino può risultare utile una illustrazione schematica della ricerca sperimentale, la quale viene suddivisa in quattro fasi.

La prima fase è l'individuazione del problema, che dipende sia dalla creatività del ricercatore o della ricercatrice, sia dallo stato delle conoscenze nel campo di ricerca in cui opera. Può essere interessante notare che, molto spesso, quanto sia significativo il problema scelto è valutabile solo a posteriori dallo sviluppo stesso della conoscenza. Mentre è relativamente semplice trovare racconti e analisi riguardanti i grandi esperimenti scientifici, come quelli poi passati alla storia, risulta molto difficile fare la stessa cosa per quanto concerne i piccoli esperimenti che riempiono le pagine delle riviste scientifiche e contribuiscono cumulativamente allo sviluppo della conoscenza.

La seconda fase riguarda la progettazione dell'esperimento, in cui vengono definite le variabili da controllare e misurare, vengono decisi accorgimenti tecnici basati sulle conoscenze note, vengono progettati gli apparati di misura ecc. In questa fase la creatività ha a che fare con gli aspetti tecnici, mentre la conoscenza non risulta importante soltanto per quanto concerne l'aspetto teorico, ma anche l'insieme delle regole delle attività sperimentali. Un esempio è offerto dalla stima qualitativa degli

errori, in modo da capire se l'apparato di misura sia in grado di risolvere il problema considerato.

La terza fase è quella di raccolta dati, in cui sono richieste attenzione, pazienza e meticolosità nel rispettare le regole.

Infine, nell'ultima fase, ritorna ad essere importante la creatività. Questa quarta fase è quella dell'analisi dati e della loro interpretazione sia sulla base del fondamento teorico già esistente, sia alla luce di nuove teorie o modifiche delle teorie già accreditate.

2.7.2 Il laboratorio nel contesto scolastico

Risulta interessante riflettere riguardo la storia dell'insegnamento in laboratorio per quanto concerne il mondo occidentale [72]. L'insegnamento del laboratorio nasce nell'Ottocento per le esigenze delle industrie di avere ricercatori qualificati nell'ambito sperimentale. Dal punto di vista didattico, l'insegnamento in laboratorio, prima viene introdotto nelle Università per poi passare anche alla scuola secondaria, anche con l'obiettivo di dare un senso di rottura con l'insegnamento astratto e formale.

In genere in laboratorio vengono proposte attività già progettate nei minimi particolari dove il compito delle studentesse e degli studenti è quello di raccogliere i dati da inserire nelle formule con lo scopo di trovare un risultato numerico riguardante una certa osservabile fisica.

L'obiettivo di un laboratorio dovrebbe essere invece quello di far comprendere come teoria ed esperimento si intrecciano. Per questo motivo, idealmente, un laboratorio didattico dovrebbe simulare quello scientifico, ripercorrendo le quattro fasi descritte in precedenza.

Per quanto riguarda le prime due fasi si possono proporre, ad esempio, osservazioni ed esperimenti di tipo qualitativo, seguita dalla progettazione dell'esperimento quantitativo. L'analisi qualitativa relativa alla fenomenologia di interesse è molto utile per definire sia le schematizzazioni teoriche (sistema fisico considerato, variabili e parametri in gioco), sia i prerequisiti di contenuto per la progettazione dell'esperimento.

La terza fase, quella relativa alla raccolta dati, può essere proposta come esercizio con l'obiettivo non tanto di raccogliere i dati "giusti", ma di acquisire abilità manipolative come l'utilizzo corretto degli strumenti o la valutazione degli errori. È bene ricordare infatti che per quanto riguarda la formazione di studentesse e studenti della scuola secondaria la finalità è la formazione culturale. Pertanto non risulterà fondamentale tanto la correttezza dei dati raccolti quanto il vantaggio derivante dai dati "sbagliati" in modo da poter discutere su come applicare correttamente le regole del gioco sperimentale.

L'ultima fase, l'analisi dati, è molto importante per la comprensione del rapporto teoria/esperimento. Un'alternativa, nel caso che i dati presi siano non utilizzabili o come esercizio, può essere infine quella di proporre a studenti e studentesse di analizzare dati valutati come attendibili dalla comunità scientifica. Questo tipo di esercizio può avere un duplice vantaggio: da una parte fornisce l'opportunità di situare i dati nel contesto scientifico reale di riferimento, dall'altro permette di discutere i criteri di validità usati dalla comunità scientifica.

2.8 L'utilizzo del computer nella didattica della fisica

Non c'è dubbio che ogni campo dell'attività umana è stato pesantemente influenzato dall'avvento del calcolatore. Nel campo della formazione scolastica l'influenza maggiore è probabilmente avvenuta più per quanto riguarda la ricerca educativa che nella prassi scolastica, complice l'eccessiva inerzia del sistema educativo.

Grazie alla potenza di calcolo dei computer si è potuta creare una nuova forma di interazione utente-macchina, rendendo in questo modo possibile pensare ad applicazioni delle nuove tecnologie in un nuovo contesto, il costruttivismo culturale [73].

L'idea, simile al costruttivismo di stampo piagetiano, assume un assetto educativo in cui sia lo studente che l'adulto sono (o dovrebbero essere) attivi e mediati dall'interazione con gli artefatti culturali costruiti nel corso della storia dell'essere umano (libri, strumenti didattici di vario tipo e, ovviamente, anche i computer). Ogni strumento didattico ha una sua caratteristica peculiare e la sua validità e utilità risiede nella capacità di attivare interazioni opportune e differenti rispetto a quelle degli altri strumenti.

Nel caso del computer ci si può chiedere quale possa essere il suo utilizzo per ottimizzare l'interazione fra insegnamento e apprendimento.

Non ci occuperemo in questo contesto dell'alfabetizzazione e della formazione informatica, ma soltanto delle modalità di utilizzo del computer per quanto concerne la formazione scientifica, in particolare della fisica.

Uno dei maggiori vantaggi che l'utilizzo del computer può portare nell'apprendimento è dovuto alla possibilità di trasformare lo studente o la studentessa da oggetto passivo dell'insegnamento ad oggetto attivo del suo apprendimento. Ciò può essere fatto grazie ad una alta frequenza di interazione fra strumento e utente.

Data una certa strategia bisogna quindi definire il livello di interazione ottimale, composto da due fattori: il grado di interazione e la qualità di interazione. Il primo fa riferimento alla frequenza di interazione, possibilmente a frequenza abbastanza alta e differenziata [74].

La qualità di interazione dipende fortemente dal tipo di strategia considerata, ed una prima distinzione può essere quella fra software direttivo e aperto (con un largo spettro fra i due). Il software direttivo risponde con precisione ad un percorso didattico in cui allo studente o alla studentessa viene presentata una strada, composta da piccole deviazioni, in grado di indirizzare verso l'obiettivo finale che è l'apprendimento richiesto.

Il software di tipo aperto è invece caratterizzato da un alto grado di libertà e controllo dell'utente, il quale costruisce individualmente il suo percorso didattico. In questo contesto risulta fondamentale il ruolo dell'insegnante, con il compito di stimolare la studentessa o lo studente attraverso domande ed esempi opportuni, ma soprattutto in modo da far riflettere sul suo processo di apprendimento.

Varie sperimentazioni mostrano che tale approccio è necessario se si vuole puntare ad un apprendimento concettuale duraturo, in modo da aiutare studenti e studentesse nello sviluppo di capacità cognitive di alto livello (modellizzazione, transfer, apprendimento indipendente ecc.).

Ovviamente non esiste una formula magica o una strategia migliore delle altre, ma essa deve essere valutata in base al contesto e agli obiettivi. Un corso introdut-

tivo di fisica, infatti, anche a causa di momenti distinti di approfondimento (quello analitico, modellistico, numerico o sperimentale), richiede più strumenti didattici e possibilità di scegliere strategie diverse (simulazione, modellizzazione, laboratorio assistito dal computer, analisi numerica ecc.).

2.8.1 La simulazione e la costruzione di modelli fisici

Un software di simulazione è un programma in grado di implementare un modello matematico per riprodurre e presentare un tipo di processo o di fenomeno fisico. Generalmente esso può contenere vari livelli di interattività, ma non prevede una sostanziale modifica dei modelli trattati e non permette quindi di vedere lo studente o la studentessa come potenziale programmatore o programmatrice.

Bisogna stare attenti ad utilizzare simulazioni, in quanto possono offrire una valenza didattica più o meno positiva a seconda della metodologia didattica utilizzata, ma anche avere effetti indesiderati. Ne è un esempio quando viene sostituita la simulazione all'ordinario esperimento di laboratorio, sostituendo quindi il contatto con il fenomeno o con l'oggetto reale con la realtà selezionata ad un certo livello di astrazione e regolata da precise leggi matematiche, senza tuttavia dare una netta distinzione epistemologica fra fenomeno e modello fisico.

Il mescolamento del ruolo dell'osservazione sperimentale con quello dell'analisi di un modello comporta un errore didattico e logico nel ciclo che è caratteristico del metodo scientifico e che procede dalle osservazioni ai modelli e teorie per poi passare alle previsioni e quindi nuovamente alle osservazioni.

La simulazione di un processo fisico può diventare un aiuto didattico se utilizzata in modo da mostrare concetti e principi o per illustrare attraverso linguaggi diversi (numerico, grafico, simbolico ecc.) le relazioni che possono sussistere fra grandezze fisiche e la loro diversa dipendenza dai parametri fisici.

Le simulazioni possono quindi fornire un valido supporto didattico al processo di apprendimento quando vengono utilizzate direttamente e interattivamente dallo studente o studentessa. Alcune scelte o stimoli in grado di rendere più attivo lo studente o la studentessa sono ad esempio:

- La possibilità di selezionare, o meglio ancora costruire, il processo da simulare a seconda del proprio interesse;
- La possibilità di esplicitare una fase predittiva in cui lo studente o la studentessa possano descrivere le caratteristiche della loro rappresentazione mentale del fenomeno;
- Una fase di feedback in cui lo studente o la studentessa possano confrontare la loro previsione con i risultati della simulazione.

Questo approccio, replicando il metodo scientifico, è capace di stimolare la studentessa o lo studente a fare previsioni riguardo ai risultati di una modellizzazione di un processo fisico e a rivedere le proprie ipotesi grazie al confronto fra previsioni e risultati generati dalla simulazione al computer.

Partiamo con il definire cosa si intenda per "modello". Un modello di un oggetto è un altro oggetto che possiede alcune proprietà analoghe all'oggetto modellato, in

particolar modo riguardo alle caratteristiche che interessano chi costruisce il modello. Bisogna però considerare che il modello fisico di un oggetto non è un oggetto concreto, ma una sua rappresentazione mentale in grado di evidenziare alcune particolari caratteristiche che si vogliono mettere in luce, ad esempio il modello fisico di una molla è un oggetto che, se tirato da un estremo, si allunga in modo proporzionale alla forza applicata.

Un modello di un fenomeno naturale, pertanto, è un modello che si riferisce ad una realtà selezionata ad un dato livello di complessità in grado di evidenziare soltanto le caratteristiche oggetto di studio e che interessano il modellatore [75]. Un modello è quindi un oggetto surrogato, una rappresentazione mentale e/o concettuale di un oggetto o fenomeno reale, chiamato “referente del modello”.

Un modello può tuttavia avere anche più referenti, a seconda del contesto, pensiamo ad esempio al modello di oscillatore armonico, il quale può descrivere oggetti molto diversi fra loro come un solido elastico, un pendolo, un atomo o una molecola biatomica.

I modelli fisici sono modelli matematici che possiedono almeno tre caratteristiche [63]:

- Un insieme di variabili in grado di descrivere le proprietà intrinseche di un oggetto (ad esempio massa, carica, spin, ecc.), il suo stato (ad esempio posizione, velocità, ecc.) e le interazioni fra oggetto e ambiente (ad esempio interazioni meccaniche, termiche, elettriche, ecc.);
- Le equazioni del modello, in grado di descrivere la sua struttura e la sua evoluzione (ad esempio equazioni del moto e dei vincoli);
- Una interpretazione in grado di mettere in relazione le proprietà descrittive con quelle degli oggetti della classe di referenti del modello.

Queste proprietà, oltre ad essere sufficienti per riconoscere alcuni modelli significativi della fisica, sono anche utili a definire e riconoscere il processo cognitivo connesso alla costruzione del modello.

I modelli fisici oltre ad essere modelli matematici, ovvero aventi proprietà rappresentate da variabili quantitative, sono caratterizzati dal fatto che deve essere specificato il sistema dei principi base, cioè la teoria insieme alla sua base semantica. Se, ad esempio, si considerano modelli nel campo della meccanica classica, nella descrizione siamo vincolati alla dinamica newtoniana come teoria da applicare.

Hestenes [33, 63], nel formulare una teoria per la costruzione di modelli a scopo didattico ha definito quattro stadi.

- Descrizione, nella quale vengono definiti l’oggetto e le variabili del moto e le interazioni.
- Formulazione, in cui si applicano le leggi relative alle interazioni in modo da determinare l’equazione del moto per l’oggetto modello.
- Ramificazione, dove vengono elaborate le proprietà e le implicazioni del modello. In questa fase, ad esempio, vengono risolte le equazioni del moto così da determinare la traiettoria e la dipendenza dal tempo delle variabili.

- Validazione, in questo ultimo stadio viene valutato empiricamente il modello verificando se i risultati sono coerenti con le informazioni di partenza.

La modellizzazione è quindi un processo che inizia con lo scopo di descrivere un fenomeno del mondo reale e torna indietro alla realtà al momento della valutazione dei risultati.

Uno dei problemi in cui ci si imbatte nella didattica centrata sulla modellizzazione deriva dal fatto che si è spesso costretti ad affrontare una elevata complessità dal punto di vista matematico, ad esempio molti modelli fisici richiedono la risoluzione di equazioni differenziali che possono risultare difficili o addirittura insolubili e che, in ogni caso, non possono essere alla portata di studenti e studentesse delle scuole superiori. Una soluzione potrebbe essere l'introduzione di metodi di analisi numerica in modo da poter studiare sistemi fisici maggiormente aderenti alla realtà.

Una introduzione all'integrazione numerica può essere fornita, ad esempio, focalizzando gli obiettivi connessi alla comprensione concettuale della procedura matematica, in modo da far comprendere le operazioni effettuate dal computer senza entrare nei dettagli dei metodi di integrazione. Ciò può essere svolto attraverso l'utilizzo di software come Mathematica o Matlab. Un'alternativa, forse più semplice per chi affronta la scuola secondaria, è l'utilizzo di software appositi per la modellizzazione fisica o di strumenti di uso più comune come il foglio elettronico (Excel ad esempio).

2.9 Alcuni esempi di metodologie didattiche alternative

Abbiamo visto che fra i problemi principali dell'apprendimento della fisica ci sono le *misconceptions* e gli intoppi nella catena di schemi mentali i quali, non derivando dalla carenza nei concetti, non sono facilmente individuabili e non sono nemmeno uguali per tutte le persone. Probabilmente, per fortuna, queste *misconceptions* sono in numero finito e tendono a ripresentarsi per cui l'insegnante può individuarle.

Uno dei metodi più efficaci per individuare le *misconceptions* può essere l'intervista, in cui l'insegnante chiede spiegazione del processo mentale seguito per giungere alla risposta e classifica i tipi di errori.

2.9.1 I *concept test* e la *Peer Instruction*

Le interviste risultano tuttavia dispendiose sia dal punto di vista temporale che delle energie, richiedendo ore di dialogo in classe che sono spesso incompatibili con la densità dei "programmi" scolastici.

Un possibile metodo per investigare le *misconceptions* può allora essere offerto dai *concept test*, domande con risposte a scelta multiple modellate in base agli errori più diffusi in cui la domanda viene formulata in termini di fisica quotidiana e senza bisogno di calcoli quantitativi.

In una prima fase di sviluppo del test è possibile formulare domande aperte ed elaborare le risposte in cerca di pattern di errori comuni in modo da essere utilizzate per la costruzione del test.

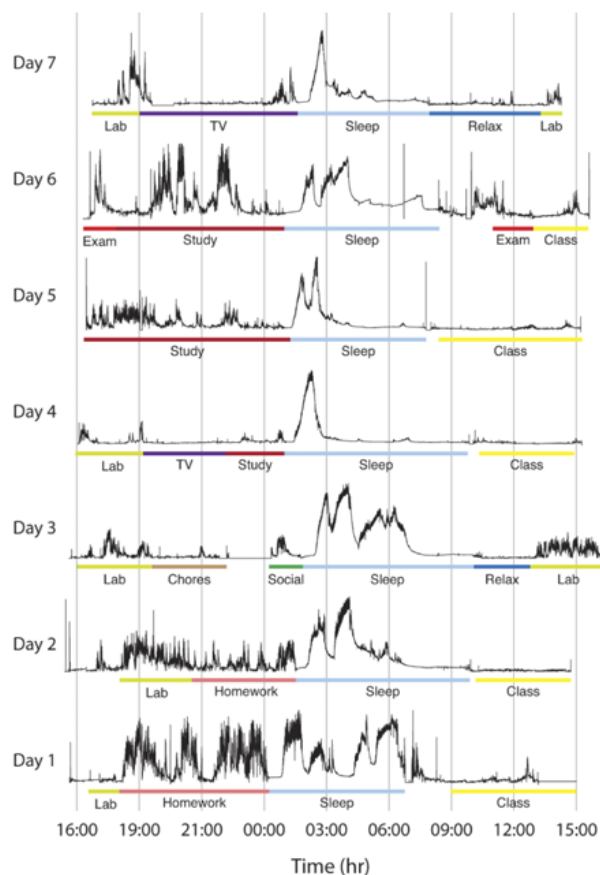


Figura 2.1. Monitoraggio del livello di attività cerebrale di uno studente durante una settimana.

Attraverso i *concept test* è possibile non tanto dare un giudizio sull'andamento degli alunni e delle alunne, ma per valutare l'efficacia dell'insegnamento ed individuare gli argomenti che hanno bisogno di essere approfonditi.

Il metodo didattico largamente più utilizzato è sicuramente quello della lezione frontale, in cui gli studenti e le studentesse ascoltano passivamente la lezione, copiano la lavagna e risolvono esercizi standard.

Nella ricerca effettuata da Poh, Swenson e Picard [76] veniva fatto indossare un apparecchio per rilevare l'attività cerebrale ad alcuni studenti e studentesse universitarie per una settimana. Il risultato, a dir poco sorprendente (vedi figura 2.1), mostra che sono attivi mentalmente quasi sempre, tranne quando guardano la TV e quando sono in classe. Quello che succede in questi casi è che non è possibile per loro controllare il flusso di informazioni, per cui sono in modalità "memorizzazione" e non possono passare a quella di riflessione senza perdere il "fio" della comunicazione. Anche per questo bisognerebbe prevedere delle pause frequenti (facendo domande e stimolando la riflessione) durante l'esposizione.

Risulta allora probabilmente necessario trovare altri metodi di insegnamento. Uno di questi può essere offerto dalla *Peer Instruction* [77], utilizzabile in combinazione con il *concept test* come spunto di riflessione in classe.

Inizialmente la domanda viene proposta alla classe. Studenti e studentesse, una volta che hanno risposto autonomamente, possono discutere apertamente riguardo al loro punto di vista. Infine è possibile chiedere nuovamente di rispondere alla domanda e, solo alla fine, l'insegnante interviene spiegando la risposta corretta.

A questo punto il docente o la docente può valutare l'andamento della classe nel secondo test e, in base al risultato, scegliere se soffermarsi su alcuni argomenti o procedere con il programma.

Il punto di forza della *Peer Instruction* è che stimola la partecipazione attiva, riuscendo ad aumentare così la motivazione e l'interesse per gli argomenti trattati, e mettendo lo studente o la studentessa al centro del processo di apprendimento. Il confronto fra pari rafforza inoltre le capacità argomentative e stimola il pensiero critico.

2.9.2 La *flipped classroom*

Nonostante la *Peer Instruction* abbia sicuramente una maggior efficacia rispetto a metodi didattici più tradizionali possiede il grosso svantaggio, come già accennato, di essere molto energivora in termini temporali.

Un'alternativa può essere fornita dalla *Flipped Classroom*, una metodologia in cui studenti e studentesse leggono e studiano alcuni argomenti in modalità asincrona rispetto alle lezioni in classe utilizzando libri, video o dispense preparate dall'insegnante.

Il vantaggio di questa metodologia è dovuto da una parte al fatto che non viene speso il tempo in classe, il quale verrà utilizzato per la restituzione e la discussione sia fra pari che con il docente o la docente, dall'altra permette a studenti e studentesse di sviluppare senso critico e lavorare in gruppo utilizzando forum online per discutere riguardo agli argomenti scelti.

Una interessante piattaforma che va in questa direzione è Perusall [78], piattaforma che permette al docente di dividere la classe in gruppi e assegnare testi da leggere o studiare prima della lezione in classe. Le annotazioni di ogni studente e studentessa risultano visibili ai membri del gruppo permettendo anche di segnalare passaggi poco chiari, fare domande e dare risposte, rendendo in questo modo il lavoro di lettura/studio un lavoro di gruppo con spiegazione fra pari.

2.9.3 *Learning by playing*

L'esperimento possiede molti aspetti in grado di renderlo un metodo di apprendimento didattico funzionale in quanto ha un approccio multisensoriale (visivo, tattile, verbale e grafico) che permette di essere un'ottima chiave di accesso alla classe, in generale molto eterogenea.

L'insegnante ha quindi il compito di permettere a studenti e studentesse di sperimentare, stimolare la curiosità e la formulazione di ipotesi anche attraverso buone domande più che risposte, nonché di favorire l'autonomia nell'apprendimento.

Purtroppo non tutte le scuole possiedono un buon laboratorio e, anche quando presente, la strumentazione potrebbe essere numericamente insufficiente per tutte le studentesse e gli studenti della classe o troppo pericolosa e/o costosa da far uti-

lizzare alla classe, problema che viene ovviato dall'insegnante come sperimentatore o sperimentatrice.

In questo modo studenti e studentesse non hanno però la possibilità di “giocare” con il materiale sperimentale, non potranno sbagliare e ritentare, non potranno fare variazioni all'esperimento ed esplorare così nuove soluzioni.

Una soluzione a questo problema può quindi essere offerta, ad esempio, dall'utilizzo di materiale reperibile facilmente a casa o in negozi per effettuare esperimenti fai-da-te. In questa maniera studentesse e studenti potranno ripetere l'esperimento più volte, cambiando possibilmente i parametri in gioco, creando con le loro mani l'attività e confrontarsi e confrontare i risultati con compagni e compagne.

Un'altra soluzione è quella che prevede l'utilizzo di software di simulazione, giochi e videogiochi, in modo da coinvolgere attivamente studentesse e studenti, ludicizzando così l'apprendimento e rompendo la routine della didattica “erogativa”. Questa soluzione è quella che abbiamo adoperato nella nostra investigazione.

2.9.4 Fisica, magia e narrazione

Una modalità di insegnamento in grado di suscitare curiosità è quella in cui i fenomeni fisici vengono presentati utilizzando la “magia” [79] in grado di stimolare studentesse e studenti nella ricerca del “trucco”, ovvero della spiegazione al fenomeno fisico.

Sebbene la magia possa essere pensata in prima battuta come l'insieme di quei fenomeni che violano le leggi fisiche, in realtà conviene concentrarsi sul fatto che un fenomeno magico è in grado di produrre un effetto importante con un piccolo sforzo, ad esempio con l'utilizzo di una formula magica.

Questo è anche l'approccio che spesso è condiviso da studenti e studentesse quando interpretano una formula in fisica come una formula magica, per cui non importa sforzarsi di capire il suo significato ma basta utilizzare la formula risolutiva in un esercizio guardando semplicemente ai termini (gli ingredienti della formula magica) che compaiono all'interno di essa.

Questo tipo di approccio, basato sulla fisica “magica” è stato sperimentato negli ultimi anni attraverso lezioni (disponibili alla fonte. [80]) in alcune scuole della Toscana, presentando di “fisica di tutti i giorni” utilizzando materiali facilmente acquistabili o addirittura riciclati. Parte di studenti e studentesse che hanno partecipato hanno dichiarato di aver ripetuto alcuni esperimenti a casa e mostrano di ricordarsi i concetti di fisica associati [81].

Utilizzando in parte questo materiale sperimentale, ma cambiando lo stile narrativo da “magia” a libro “giallo” lo stesso autore, ha scritto il libro “Il taccuino del Dr. Watson”, distribuito in varie scuole dalla Regione Toscana nell'ambito del programma Pianeta Galileo [82].

Il libro si è poi “evoluto” facendo nascere una sorta di *escape room* virtuale (o un libro game) dal nome “FisicaX, ovvero dove si nasconde la fisica di tutti i giorni” [83], un percorso multimediale composto da sfide con cui è possibile guadagnare punti.

Nella versione attuale il gioco possiede più di cento “pagine” ed è in programma sia il suo ampliamento che l'inserimento di tracciamento e registrazione dei risultati, così da renderlo più competitivo. Una sua variante consentirà poi al giocatore o alla giocatrice di inserire la risposta prima di far apparire quella corretta, dando

così la possibilità di autovalutarsi. Questa modalità sarà quindi in grado di raccogliere risposte in modo da far diventare il gioco uno strumento di monitoraggio dell'apprendimento della fisica.

2.10 Il problema della valutazione

La valutazione è parte della didattica da sempre nella storia, sia nel caso della scuola “colta”, la quale si occupava di insegnare a leggere e a scrivere, sia di quella “artigiana”, con lo scopo di insegnare un mestiere o un'arte. Il giudizio da parte del maestro o della maestra riguardo la qualità dell'apprendimento degli allievi e allieve, la verifica e la correzione del lavoro svolto hanno sempre giocato un ruolo fondamentale per l'insegnamento/apprendimento.

Risulta pertanto che la capacità di valutazione è parte delle abilità che deve possedere l'insegnante, sebbene le modalità, i tempi ed i problemi relativi al processo di valutazione siano cambiati nel corso del tempo.

Con l'aumentare della scolarità tuttavia il momento della valutazione si è sempre più separato da quello dell'insegnamento e la valutazione ha sempre più riguardato il processo di disanima e di assegnazione dei voti, diventando quindi una verifica della preparazione dei discenti e delle discenti per giudicare la loro corrispondenza a criteri fissati.

La valutazione diventa quindi collegata alla definizione di questi criteri e alla loro esplicitazione sia verso gli insegnanti e le insegnanti che devono applicarli, sia verso alunne e alunni che devono conformarsi. In questo modo la programmazione didattica diviene uno strumento di pianificazione educativa per la quale, una volta stabiliti con più accuratezza e precisione possibile le finalità dell'insegnamento e i criteri di valutazione, si possono definire le modalità e le sequenze con le quali raggiungere queste finalità.

Il rischio di questo procedimento è quello di illudersi di poter schematizzare e generalizzare i processi educativi, o di poter ridurre le differenze individuali in modo da prevedere risultati uguali e misurabili per tutti gli studenti e tutte le studentesse.

2.10.1 Le diverse facce della valutazione

Ciò che va sotto la parola “valutazione” si può in realtà differenziare utilizzando altri termini.

“Accertamento” è probabilmente la parola più vicina a quella inglese “*assessment*”, con la quale vengono indicate generalmente le operazioni di valutazione scolastica degli alunni e che corrisponde, in un'ottica meccanicistica, alla definizione degli obiettivi e delle relative procedure per raggiungerli per poi passare all'accertarsi, appunto, che gli studenti e le studentesse siano riusciti ad acquisire le caratteristiche di conoscenza o di abilità previste.

L'oggetto dell'accertamento è quindi lo studente o la studentessa, e per “essere certi” dei suoi risultati le procedure devono essere il più possibilmente rigorose e oggettive.

Veniamo ora ad un'altra parola, “verifica”, la quale viene spesso utilizzata in modo analogo, ovvero intendendo l'insieme di tecniche e prove possibilmente basate su elementi circoscritti e misurabili.

Questo termine può però nascondere altri significati, è possibile ad esempio verificare un'ipotesi, la quale può tuttavia essere anche falsificata. Ma è possibile anche verificare una nuova sequenza di contenuti, l'uso di una diversa metodologia, l'uso di un nuovo libro di testo, ecc.

La parola “verifica” ha quindi il potere di sconfinare nella parola “valutazione”, che si può leggere sia come “dare valore” sia come “stimare”, e che prevede sempre un intervento umano a cui si legano in modo determinante (ma difficile da determinare) valori sia sociali che culturali.

Non è quindi facile, secondo questa visione, la definizione di una rigida sequenza di operazioni che riguardino sia la raccolta dati che la loro interpretazione, senza coinvolgere la soggettività sia per quanto riguarda i criteri di raccolta dati, sia l'insieme di valori e credenze in grado di guidare, spesso silenziosamente e implicitamente, la loro interpretazione.

Anche la matematica, con le sue tecniche e procedure statistiche, benché utilissima e necessaria per analizzare i dati può contribuire a far passare l'idea che i dati siano oggettivi. È interessante a tal proposito riportare le parole di Gould [84]:

Possiamo sicuramente pesare un cervello o dare un punteggio ad un test di intelligenza senza registrare le nostre preferenze sociali. Se i vari livelli vengono indicati da freddi numeri, ottenuti da procedure rigorose e standardizzate, essi devono allora riflettere la realtà anche se confermano ciò che volevamo credere sin dal principio. [...] Se i dati quantitativi sono soggetti alla costrizione culturale come ogni altro aspetto della scienza, allora non devono avere nessuna speciale pretesa sulla verità finale.

La ricerca di oggettività nella valutazione, come l'oggettività scientifica, è un mito che pone le sue radici nel bisogno di uguaglianza di possibilità di tutti gli studenti e di tutte le studentesse e nel bisogno di giustizia e confrontabilità degli elementi di valutazione.

Grazie alla docimologia⁴ sappiamo poi che le modalità con le quali i voti vengono assegnati possiedono una variabilità talmente alta che i risultati dipendono più dall'esaminatore o dall'esaminatrice che dai criteri di giudizio. Questo risulta vero sia nel caso di prove scritte, ma ancora maggiormente per quelle orali.

Diventa pertanto necessario ridiscutere il ruolo ed il significato della valutazione in campo educativo, insieme ai possibili ruoli della scuola e delle istituzioni educative.

La valutazione intesa come feedback riguardo l'operato dell'allievo o dell'allieva permette il confronto fra ciò che si sta apprendendo e ciò che invece si dovrebbe apprendere, ed è comune ad ogni tipo di educazione, sia essa familiare, scolastica o professionale. La valutazione intesa come esame nasce invece come forma di valutazione pubblica con lo scopo di omologazione per una successiva cooptazione entro una classe o gruppo sociale, ma all'interno della scuola questo tipo di significato è quasi (o dovrebbe essere) scomparso.

⁴La docimologia è il ramo della didattica che si occupa dello studio dei metodi e dei sistemi di valutazione delle prove di verifica al fine di elaborare tecniche di esame e di valutazione

Ciò che invece ha acquisito importanza è invece l'idea del voto o della verifica come dimostrazione interna ed esterna di efficacia del sistema educativo. Infatti le prime ricerche docimologiche sono stati richiesti dall'autorità pubblica alle scuole per poter giustificare la propria esistenza ed efficacia oppure, al contrario, sono nati dal tentativo delle scuole di dimostrare la validità di alcune ipotesi educative.

Una ricerca interessante, di quasi un secolo fa, è quella che prese il nome di *Eight-year study* voluta dalla *Progressive Education Association*. La ricerca aveva come obiettivo da una parte l'opposizione ad una scuola orientata al superamento delle prove di ammissione universitarie, quindi orientata verso gli esami e con uno sguardo alle esigenze di cooptazione sociale, dall'altra la promozione di una scuola utile anche per tutte le persone che avrebbero abbandonato gli studi dopo la scuola secondaria.

Le trenta scuole che parteciparono all'esperimento avevano la possibilità di decidere liberamente i propri curricula, mantenendo tuttavia alcune finalità comuni come la partecipazione sia di studenti e studentesse che di insegnanti alla pianificazione/programmazione, maggior interdisciplinarietà delle materie, maggior partecipazione alla vita democratica della scuola e attenzione verso tutti gli aspetti dell'individuo, siano essi fisici, intellettivi, emotivi o spirituali.

Da questa ricerca traggono origine molte delle proposte successive riguardo curriculum e valutazione, nonché la formulazione di alcuni punti guida ancora oggi in uso. Uno di questi riguarda il curriculum scolastico, il quale deve essere espresso in termini di "finalità, contenuti o esperienze di apprendimento, loro organizzazione e strumenti di valutazione".

Un altro punto riguarda la formulazione operativa degli obiettivi. Se la valutazione risulta fondamentale non solo come strumento di omologazione ma anche come strumento di controllo sul processo educativo diventa importante che l'obiettivo da raggiungere, per essere valutato, venga espresso in modo chiaro sulla base del comportamento aspettato. In questo modo la valutazione diviene un semplice accertamento di quel dato comportamento nelle condizioni di apprendimento previste.

2.10.2 Un breve excursus sul modello per obiettivi e il modello per processi

Questo tipo di modelli di programmazione dell'istruzione, basati sugli obiettivi, hanno nel corso degli anni perso la loro carica innovativa e hanno raccolto critiche. Schubert e Schubert [85] hanno provato a riconoscere i paradigmi su cui si è basata la ricerca pedagogica, in particolare quella sui curriculum, identificando tre possibili categorie:

- Paradigma empirico-analitico. Questo paradigma trae origine da una visione positivista della scienza, in cui la conoscenza è oggettiva e senza valori, ed in cui si ricercano proposizioni testabili empiricamente e principi che portino al controllo delle situazioni;
- Paradigma ermeneutico. L'influenza principale è data in questo caso dal pragmatismo e dall'interazione con la società e lo scopo è dare strumenti concreti di aiuto alle decisioni. In questo caso la conoscenza è fornita da una costruzione

individuale di significati, la quale può essere comunicata in modo da portare ad una conoscenza intersoggettiva, la cui basi sono da trovare nel contesto storico e sociale;

- Paradigma della ricerca critica. Questo paradigma analizza in maniera critica sia la pratica che le assunzioni implicite che sottostanno alla pratica.

Uno dei libri più tradotti e più noti riguardo agli obiettivi educativi è quello di Mager [86], nel quale viene derivata la sua impostazione comportamentista grazie alla sua esperienza di addestramento per le industrie e per l'esercito. Mager rifiuta la specificazione di obiettivi utilizzando verbi come “conoscere”, “comprendere”, “apprezzare” in quanto ambigui perché non osservabili e quindi non misurabili.

Le idee di Mager sono una chiara estremizzazione della ricerca di oggettività presente nella programmazione didattica per obiettivi, con diffuse critiche anche per quanto riguarda la significatività degli obiettivi stessi. L'assunzione di fondo del modello è data dalla possibilità di dividere la complessità di un processo educativo in parti più semplici e indipendenti fra loro.

Se si accetta però che la conoscenza è una struttura personale capace di organizzare esperienze e informazioni in modo unico e individuale, si deve anche riconoscere che obiettivi e prove di verifica sono relativi soltanto a parti di questa conoscenza, le quali acquisiscono un significato solo in un dato contesto.

C'è da dire, tuttavia, che il modello per obiettivi ha dato modo a pianificatori e insegnanti di poter riflettere sulle loro finalità in modo da esplicitarle.

Per Stenhouse [87] questo modello non risulta efficace nel miglioramento della qualità dell'istruzione in quanto non basta sapere il livello da raggiungere, ma è importante anche riflettere sui processi e sulle procedure da utilizzare.

In un modello di programmazione curricolare che metta al centro i processi, infatti, anche i contenuti stessi possono riacquistare valore.

Mentre in un modello per obiettivi uno dei rischi è quello di far passare i contenuti come semplici strumenti per raggiungere gli obiettivi, risultando quindi subordinati rispetto agli obiettivi stessi, in un modello per processi vale l'esatto opposto: lo scopo dell'educazione è offrire esperienze e conoscenze significative sia per quanto riguarda la disciplina, sia per quanto riguarda lo studente o la studentessa.

Come dice Stenhouse stesso [87], i concetti devono essere scelti in modo da “esemplificare le procedure più importanti, i concetti chiave e le aree e le situazioni in cui i criteri si applicano”.

Nella programmazione curricolare per processi dovranno quindi essere definiti, in base ai contesti di insegnamento, sia i contenuti e le procedure associate, sia i processi che l'insegnante vuole utilizzare, considerando come criteri di scelta principi “etici” e pedagogici, non avendo come finalità soltanto i risultati, specialmente se a breve termine. Alcuni esempi tratti da Rathes [87], citato in Stenhouse, sono:

A parità di circostanze, una attività è da preferire ad altre se permette agli alunni di compiere scelte consapevoli nel portare avanti la loro attività e di riflettere sulle conseguenze delle loro scelte.

A parità di circostanze una attività è da preferire ad altre se mette gli alunni a contatto con la vita reale.

A parità di circostanze una attività è da preferire ad altre se può essere svolta con successo da alunni di diversi livelli di abilità.

Per i sostenitori del modello per processi l'attenzione è da porre non solo sul modo di operare, ma anche sulla validità di alcuni procedimenti operativi. Alcuni esempi sono forniti da Hanley et al.⁵:

- *aiutare i ragazzi a sviluppare l'abilità di usare diverse fonti di prima mano come basi su cui sviluppare ipotesi e tirare conclusioni;*
- *proporre discussioni in classe nelle quali gli studenti imparano ad ascoltare gli altri oltre che ad esprimere il proprio punto di vista;*
- *legittimare il processo di ricerca, cioè approvare ed appoggiare discussioni aperte in cui non si trovano risposte definitive a molte domande;*
- *incoraggiare i ragazzi a riflettere sulle proprie esperienze.*

Si può notare che l'idea è che l'educazione sia un processo complesso e a lungo termine e che i risultati semplici e a breve termine, per i quali è possibile utilizzare il modello per obiettivi, non siano i più interessanti e validi. Il modello per obiettivi, infatti, propone domande e esperienze per i quali esiste già una risposta. Nel modello per processi lo studente o la studentessa pur possedendo la libertà di utilizzare procedure e concetti che via via costruisce, delinea anche le esperienze educative importanti non solo per il singolo, ma anche per il gruppo.

Mayer costruisce una metafora molto interessante riguardo all'apprendimento, visto in un modello per obiettivi come una visita guidata, mentre in un modello per processi come una esplorazione. Riportiamo qui un estratto della fonte [12], pagina 343:

a) perché una visita guidata sia efficace ed efficiente si devono programmare in anticipo orari e fasi della visita, definire i punti salienti, preparare i materiali da distribuire, chiedere l'aiuto di esperti;

b) in una esplorazione di luoghi sconosciuti ci si informa sul contesto, sulle esperienze di altri che si sono avventurati nelle stesse direzioni, ma si sa che non si possono fare programmi definiti e che sarà la situazione reale che guiderà in una direzione o in un'altra; il materiale da portarsi dietro sarà di conseguenza più indifferenziato, più basilare di quello specializzato necessario per la visita guidata, e l'unico esperto è chi ha esperienza di altre "esplorazioni" e sa quindi come cavarsela in diverse occasioni;

c) la visita ha obiettivi definiti per le sue diverse fasi ma uguali per tutti i partecipanti; l'esplorazione ha delle finalità comuni a tutti, ma lascia autonomia e spirito d'iniziativa ai partecipanti e mette in moto un processo in cui ciascuno può individuare i propri obiettivi specifici.

Ridurre l'insegnamento ad una visita guidata, senza far provare nemmeno per brevi tratti l'emozione e il piacere di un'esplorazione, è quello

⁵L'elenco puntato riportato di seguito è stato preso dalla fonte. [87], pagina 342.

che viene rimproverato al modello per obiettivi. D'altra parte il modello per processi richiede all'insegnante una forte professionalità. Se infatti il modello per obiettivi può, almeno in teoria, fornire "ricette" all'insegnante e richiedere quindi un impegno limitato, [...] il modello per processi richiede un insegnante che sappia valutare non solo gli studenti ma il proprio operato, le procedure che mette in atto, i contesti che crea. In un caso il professore è il depositario delle conoscenze e delle risposte «giuste», nell'altro è una guida a disposizione dello studente.

La valutazione è ovviamente un momento indispensabile per tutti e due i modelli. Tuttavia, nel primo è concepita come una misurazione della vicinanza e della lontananza degli allievi da obiettivi e mete prefissate, mentre nel modello per processi la valutazioni si riferisce essenzialmente al progetto didattico e utilizza le informazioni raccolte dagli allievi per modificare, integrare, sviluppare il progetto e le finalità che ci si erano proposte inizialmente.

Nella pratica scolastica i due modelli possono contaminarsi e integrarsi: alcuni obiettivi, magari espressi in forma ampia, possono essere considerati irrinunciabili e si può cercare di verificare il loro raggiungimento con la maggiore accuratezza possibile, mentre per finalità a lungo termine o più legate al contesto didattico l'insegnante cercherà di raccogliere quelle "tracce", quegli indizi, che a suo giudizio indicano la direzione dei processi che ha messo in opera.

2.10.3 Ancora sulla valutazione

Uno dei punti di forza del modello per obiettivi risiede nelle ricerche su grandi campioni attraverso l'utilizzo di tecniche statistiche, le quali continuano comunque ad avere i loro limiti.

Queste ricerche, a livello sia nazionale che internazionale, non sono utili per fornire risultati di ogni singola scuola o classe ma per mettere a confronto i diversi sistemi educativi o i diversi stili di insegnamento. A questo scopo risulta più facile l'applicazione di un modello per obiettivi, cercando di interpretare i risultati con validità soltanto su base statistica.

È possibile così utilizzare il mondo come un enorme laboratorio per indagare i diversi metodi educativi e le diverse strutture scolastiche, permettendo così non tanto di stilare graduatorie probabilmente poco valide, ma di mettere in discussione i pregiudizi e gli stili di insegnamento. Bisogna inoltre tenere presente che il risultato non deve essere utilizzato per la valutazione degli studenti e delle studentesse, ma per dare indicazioni sulle politiche e sugli stili educativi dei diversi paesi.

Oltre alle forme di valutazione più classiche come i test a scelta multipla se ne possono utilizzare di più articolate. Quando infatti l'obiettivo è la valutazione della capacità di memorizzazione o di applicazione, risulta possibile costruire test a scelta multipla nel caso in cui i contenuti trattati e gli obiettivi siano definiti in modo chiaro. Ben più difficile risulta la loro costruzione se la valutazione concerne la capacità di stare in laboratorio, l'originalità di pensiero, la capacità di verificare le proprie ipotesi, l'interesse e l'atteggiamento verso la scienze, ecc.

L'oggettività dei test riguarda soltanto il giudizio individuale nell'attribuzione del punteggio ad una singola domanda, ma non sono chiaramente oggettivi nella valutazione della studentessa o dello studente. I metodi derivanti dalla statistica possono aiutare, quando il campione è ampio e differenziato, ad un miglioramento del test stesso, ad esempio eliminando domande mal formulate o alternative poco plausibili. La validità del test, tuttavia, deve essere stabilita considerando sia criteri statistici, ma soprattutto quelli condivisi all'interno dell'insegnamento della disciplina: quali contenuti sono più importanti, quali applicazioni sono più significative, quai argomenti sono stati trattati in classe, ecc.

La valutazione dei risultati può essere stabilita rispetto alla media, come nelle ricerche nazionali o internazionali, o ad un criterio. Nel primo caso lo scopo è quello di confrontare i rendimenti di vari gruppi o di uno studente o studentessa o di una classe rispetto alla media nazionale o internazionale.

Nella maggior parte dei casi la valutazione pone però un confronto rispetto ad un criterio in quanto ciò che interessa non è soltanto sapere la distribuzione dei punteggi all'interno del campione esaminato, ma il risultato di un singolo o della classe rispetto a criteri che siano almeno in parte pre-formulati.

Nel caso in cui l'obiettivo sia quello di valutare l'apprezzamento del valore di un concetto o di una teoria, oppure la capacità di selezionare i vari aspetti del sapere scientifico, è possibile utilizzare non solo domande a scelta multipla, ma anche domande con risposte più articolate o completamente aperte.

In alcuni test, ad esempio, risulta addirittura difficile definire quali siano le risposte corrette e diversi punti di vista, una volta resi espliciti e argomentati, possono essere accettabili. In alcuni di questi casi è evidente che il giudizio individuale torna ad avere un ruolo, ad esempio nel caso della valutazione di risposte aperte e della valutazione delle argomentazioni delle scelte fatte.

Gli strumenti descritti in questa sezione possono fornire indicazioni, sebbene affette da errori e talvolta ambiguità, riguardo alle posizioni, gli atteggiamenti, la capacità di riflettere sulla scienza e sui suoi processi. Queste indicazioni possono poi essere utilizzate per orientare scelte sia nazionali che internazionali.

Bisogna aggiungere che la valutazione non dovrebbe però riguardare soltanto le ricerche su grandi campioni, ma ogni proposta di innovazione o riforma dovrebbe essere sperimentata e valutata.

Un'altra forma di valutazione, utilizzata spesso in altri paesi, è quella "naturalistica" [88] in cui vengono utilizzate osservazioni, interviste e dibattiti al posto di questionari e test. In questo contesto l'obiettivo è quello di raccogliere punti di vista diversi e stabilire criteri di giudizio e l'idea alla base è che la soggettività non va negata ma confrontata in quanto l'unica oggettività possibile risiede nella consapevolezza della soggettività dei propri criteri e osservazioni.

Gli stessi principi si possono applicare alla valutazione del mestiere dell'insegnante e che è sia una valutazione sul comportamento che sul proprio operato.

Un primo obiettivo per l'insegnante è quello di essere consapevole dei propri criteri di valutazione, di quali informazioni considerare necessarie e da registrare e interpretare per la valutazione, nonché quali sono i criteri di giudizio sulle informazioni stesse.

Un merito del modello per obiettivi è quello di aver costretto gli insegnanti ed i pianificatori ad esplicitare i propri obiettivi, a renderli pubblici e quindi passibili di

revisione e dibattito. Specialmente nella scuola secondaria gli studenti e le studentesse possono essere rese partecipi al dibattito in modo da essere consapevoli di ciò che ci si aspetta da loro.

Ricordiamo poi che non solo test o prove “oggettive” possono essere utilizzati come strumenti per raccogliere informazioni, ma l’insegnante può utilizzare tutto ciò che fa parte dei suoi strumenti di comunicazione per raccogliere informazioni: dal lavoro in laboratorio, agli esercizi o le reazioni di fronte a sussidi audio-visivi, ecc.

Fra le prove di valutazione che si possono scegliere non ne esiste inoltre una migliore in assoluto, ma ognuna ha le sue caratteristiche, con i suoi limiti e le sue possibilità. Una breve lista è la seguente.

1. Domande sul senso comune. Esse sono capaci di evidenziare le conoscenze implicite degli studenti e delle studentesse, quindi di discuterle e orientare il lavoro scolastico verso un cambiamento concettuale;
2. Gruppi di laboratorio. Gli studenti e le studentesse, suddivisi in gruppi, hanno modo di socializzare e di relazionarsi fra loro in un clima di collaborazione. L’insegnante potrà valutare la capacità degli allievi e delle allieve nell’uso della strumentazione, la loro capacità di raccogliere dati, di interpretarli e di saper legare aspetti teorici a quelli più pratici. Inoltre potrà essere valutato il *problem solving*.
3. Esercizi e quesiti, sia quantitativi che qualitativi. Questo tipo di prove sono utili per valutare le capacità di rispondere a domande del tipo “come, cosa e perché”, di addestrare la critica verso affermazioni pseudoscientifiche, di formulare previsioni e interpretare dati, nonché applicare formule e concetti.
4. Domande a risposta chiusa. Essi hanno il vantaggio di indagare alcune delle stesse capacità del punto precedente, ma in maniera più schematizzabile e più celere.
5. Domande aperte. Queste domande hanno lo scopo di valutare le capacità di esposizione logica, di padronanza del linguaggio scientifico, di sintesi, di comunicazione scritta e orale.
6. Domande, sia in forma aperta che chiusa, sulle immagini della scienza. Esse permettono di riconoscere e discutere i cambiamenti di atteggiamento e di concezione.

Sarebbe inoltre buona norma, sia per prove scritte che orali, la preparazione e l’utilizzo di griglie di valutazione da presentare e da discutere con le studentesse e con gli studenti. Infatti pur non esistendo criteri universalmente giusti per definire il punteggio, la sua sola esplicitazione rende possibile una discussione e, sia che vengano utilizzate griglie dettagliate o utilizzati schemi più generali e complessivi, quanto maggiore è la chiarezza nella descrizione dei criteri di valutazione tanto migliore potrà essere l’esito ed il confronto.

Ricordiamo poi che tutto il processo didattico, lezione inclusa, può essere strumento (e oggetto, aggiungerei) di valutazione se sono limpidamente definiti i dati e le informazioni che si vogliono raccogliere, nonché l’interpretazione che si vuol dare.

Riuscire a distinguere i diversi tipi di dati, descriverli e considerarli in modo sistematico può ad esempio permettere di non farsi influenzare in maniera acritica.

La maggior oggettività di una prova è data dal fatto che il lavoro di interpretazione viene fatto in anticipo, stabilendo quali comportamenti rilevare e quale punteggio assegnare. Sottoporre prove siffatte ha il vantaggio di avere una idea complessiva del rendimento della classe in tempi brevi, sia in termini di somministrazione che di correzione.

Ci sono tuttavia dei grossi limiti, sia per quanto riguarda il fatto che vengono valutate soltanto alcune capacità di base sia perché la costruzione di prove “valide” poiché messe a punto tramite un’analisi statistica è spesso in contrasto con la loro validità nel senso di rispondenti al processo di insegnamento specifico portato avanti con quella data classe in quel dato anno.

Una valutazione risulterà quindi tanto attendibile quanto più numerosi e diversi saranno i dati raccolti e tanto più saranno chiari e organici i criteri per interpretarli.

Una valutazione formativa, ovvero utile nell’orientare e individualizzare l’insegnamento, all’interno del processo per obiettivi è, ad esempio, quella proposta per prima da Carrol e formalizzata da Block [89] e che prende il nome di *Mastery Learning*.

L’idea alla base di questa metodologia è che le differenze individuali sono in larga parte riconducibili a tempi diversi di apprendimento, se viene quindi permesso a ciascuno di seguire il proprio ritmo ognuno potrà raggiungere risultati più che buoni.

Il *Mastery Learning* cerca quindi di garantire a tutte e tutti una buona qualità di istruzione, cercando di raggiungere una omogeneità di preparazione, valorizzando poco le differenze. Probabilmente è invece più necessaria una strategia che, tramite un compromesso, sia capace di soddisfare entrambe le esigenze.

Postletwhite, un esperto della ricerca su grandi campioni, scrive riguardo ad una ricerca sulla capacità di comprensione nella lettura che la differenza fra scuole più o meno efficaci dipende, all’interno della variabilità nazionale, principalmente dall’insegnante, dalle procedure e dai processi che utilizza [90].

Le ricerche confermano questa visione ritenendo gli insegnanti, assieme agli studenti, i veri protagonisti del processo di apprendimento-insegnamento, avendo quindi la capacità di portare gli studenti al di sopra della media prevista dal contesto e dalle condizioni socio-culturali.

Riguardo alle capacità di un insegnante di migliorarsi nella propria professionalità, può avere senso citare la frase di Stenhouse [87] “*Non è sufficiente studiare come lavora l’insegnante: deve studiarlo da solo*”. Questo aforisma vuole semplicemente ribadire che l’insegnante può essere un vero professionista solo se ricerca in modo autonomo le metodologie e le proposte teoriche che meglio si adattano alla sua visione del mondo e al contesto in cui svolge il proprio lavoro.

Sempre citando Stenhouse [87] “*ogni classe è un laboratorio e ogni insegnante è membro della comunità scientifica*”.

Capitolo 3

Una introduzione al *gaming*

Dalla fine dello scorso secolo molti ricercatori si sono concentrati sulla definizione di competenza in relazione ad un rendimento superiore nell'esercizio di una professione. Questo interesse trae origine da una progressiva consapevolezza, all'interno delle organizzazioni, della compresenza di una componente sociale e di una tecnica e ha condotto al riconoscimento dell'individuo come risorsa strategica, sottolineando la necessità di rivedere i modelli di gestione e sviluppo dei sistemi organizzativi e privilegiando una formazione orientata allo sviluppo delle competenze [91, 92].

La recente letteratura è consapevole che la competenza non può corrispondere ad uno schema classificatorio poiché include variabili connesse al contesto e all'individuo in relazione alla propria esperienza [92] inoltre la competenza non va vista soltanto come una dimensione di conoscenza o l'accumulo di tecniche, necessita infatti anche delle caratteristiche personali nel suo manifestarsi [93].

Dal bisogno di approfondire la conoscenza sulle caratteristiche e disposizioni personali in grado di rendere una persona competente è nata negli anni una distinzione fra competenze *hard* e *soft*.

Le *hard skill* sono date dall'insieme delle competenze tecniche e professionali dello specifico settore e che sono sviluppate nel contesto formativo e accademico.

Le *soft skill* [32], chiamate anche competenze trasversali, riguardano invece qualità individuali, atteggiamento in ambito lavorativo e capacità di relazionarsi con altre persone. Queste sono sviluppate e apprese solitamente in contesti informali ed extra-lavorativi, ma sono discriminanti in ambito lavorativo.

Secondo l'Istituto per lo Sviluppo della FORMazione professionale dei Lavoratori (ISFOL) [94] (cfr. anche la fonte [95]) le *soft skill* sono qualità individuali, atteggiamenti e comportamenti che risultano decisivi perché abilitanti alla scoperta e all'analisi dei problemi, alla relazione collaborativa con le altre persone, all'innovazione, alla comprensione del contesto, alla consapevolezza degli effetti delle proprie azioni e dei propri comportamenti sugli altri. Le competenze trasversali sono quindi in grado di influenzare le performance lavorative e i modi di affrontare e gestire potenziali eventi critici.

Sebbene la formazione universitaria e post-universitaria tenda ad orientarsi su aspetti tecnico-organizzativi, le *soft skill* sono invece utili non soltanto per un migliore e più rapido accesso allo svolgimento di una professione, ma portano anche ad una

più lunga permanenza nel mondo del lavoro e ad un minor rischio di disoccupazione, soprattutto in situazioni di crisi economica [96].

C'è poi da aggiungere che le competenze trasversali sono facilmente trasferibili da un contesto ad un altro poiché non sono sviluppate in relazione ad una specifica mansione lavorativa.

Possiamo affermare che le *soft skill* sono elementi indispensabili per un inserimento efficace nel mondo del lavoro, e lo diventeranno sempre più. Risulta quindi fondamentale porre maggior attenzione sia a livello personale che professionale sul loro potenziamento.

In questo capitolo ci concentreremo sul ruolo del gioco e della *gamification*, sia come attività ludica che come strumento didattico. Per farlo abbiamo utilizzato come fonte principale il libro *Giocarsi. Gaming e gamification in contesti professionali* a cura di Federica Colli, Carlo Meneghetti, Fabio Viola [97].

Cosa è un gioco? Sia in ambito psicologico che nel contesto ordinario potremmo definirlo come un'attività ludica organizzata e definita da alcune regole, solitamente interattiva e facente uso di un artefatto sviluppato appositamente per tale attività. Una caratteristica del gioco è sicuramente quella del dover compiere scelte e l'esito del gioco, se sono presenti più giocatori o giocatrici, dipende dalle scelte fatte da ognuno di essi. Questo tipo di situazione configura ciò che viene chiamata interazione strategica.

La strategia è definita dall'insieme delle scelte da compiere sulla base della situazione del gioco, che può evolvere automaticamente (tipo rompicapo) o dipende dalle azioni degli altri giocatori o da elementi casuali (dadi, carte,...).

La teoria dei giochi fornisce strumenti in grado di fare previsioni riguardo a come gli individui si comportano in base ai vari tipi di interazione o di escludere alcuni tipi di comportamento. In questo ambito nasce quella che viene chiamata teoria dei giochi sperimentale, che è l'applicazione di metodi sperimentali a problemi decisionali interattivi.

I soggetti sperimentali vengono portati in laboratorio, solitamente un locale con postazioni isolate dotate di apparecchi di immissione dati (ad esempio un computer), e viene descritto loro un problema di scelta e quindi viene chiesto di prendere delle decisioni.

3.1 Una introduzione alla psicologia del gioco

Perché giocare? Perché risolvere problemi non necessari da cui non si trae (almeno apparentemente) benefici?

Una prima risposta potrebbe risiedere nella domanda stessa, infatti non è probabilmente vero che non se ne tragga nessun beneficio. La risposta potrebbe essere quindi il semplice fatto che giocando si diventa migliori solutori di problemi.

Questa risposta suppone l'esistenza di una necessità, quantomeno potenziale, di risolvere quel dato problema o problemi simili in futuro, bisogna inoltre supporre che si apprenda qualcosa dalla soluzione del problema e che esista la spinta ad investire in questo genere di apprendimento.

Da un punto di vista neuropsicologico le funzioni esecutive frontali sono necessarie per procedere verso soluzioni spesso fondamentali nella nostra vita, ad esempio

in cui vengono prese scelte più energivore sul breve termine che altrimenti non verrebbero effettuate.

Ci possiamo chiedere quali siano i fattori che influiscono sulla nostra spinta verso la soluzione di problemi. Il bisogno di cognizione, un tratto di personalità che determina quanto è grande la nostra tendenza individuale a comprendere le cose, può gettare luce su alcune differenze che esistono fra individui diversi. Una persona con un forte bisogno di cognizione cerca quindi di comprendere il mondo attraverso un alto grado di elaborazione mentale e di ragionamento in modo da poter mettere insieme le nuove e le vecchie conoscenze. Una persona con un tratto meno forte non rinuncia tuttavia a questo scopo, ma riesce a raggiungerlo con una minor profondità di elaborazione.

Ognuno, quando deve affrontare qualche fenomeno che non riesce a spiegare, prova a formulare qualche ipotesi. Alcuni testano le ipotesi, altri si accontentano della loro formulazione, in ogni caso è stata formulata un'idea sul funzionamento del fenomeno.

Potremmo quindi affermare che in ogni caso esiste un beneficio nella risoluzione di problemi poiché, avendo ciascuno di noi una spontanea tendenza a risolverli, tendiamo in questo modo a non lasciare “domande aperte”. Ci si potrebbe allora chiedere quali siano i costi (in termini di tempo, energie, fatica cognitiva, ecc.) in grado di superare i benefici del giocatore o della giocatrice e che fanno in modo che si eviti di impegnarsi in attività ludiche.

Possiamo allora vedere il gioco come una vera e propria domanda aperta, infatti rientra proprio in quella casistica di situazioni in cui non conosciamo il funzionamento e abbiamo lo scopo di comprenderlo e prevederne l'esito.

Comprendere il gioco non vuol dire soltanto comprendere l'interazione fra le regole e quindi i suoi ingranaggi, ma anche essere in grado di prevedere o agire nella direzione più favorevole a noi stessi e quindi di vincerlo. La comprensione dei meccanismi e la strategia da attuare per arrivare alla vittoria fa sì che il giocatore o la giocatrice sia stimolata non solo a capire come si muovono gli ingranaggi ma anche a muoverli attivamente a suo favore.

Notiamo che mentre la comprensione dei meccanismi del gioco è indipendente dai giocatori o giocatrici, i quali possono giocare assieme o contro, la ricerca di una strategia ottimale non può escludere la loro presenza. La presenza di altri giocatori o giocatrici corrisponde ad un ulteriore livello di difficoltà e di attrattività in quanto diventa essenziale la comprensione del comportamento altrui.

Come controesempio possiamo considerare quella classe di giochi, chiamati “risolti” (un esempio è il tris), in cui una volta compreso il loro funzionamento e quindi previsto con certezza l'esito del gioco, si abbassa l'attrattività del gioco stesso. Esistono di conseguenza tutta un'altra serie di giochi, detti “non risolti”, che hanno un esito incerto e che riescono quindi a mantenere un'attrattività alta.

Il gioco è allora assimilabile ad un problema da risolvere, ma è anche non necessario, poiché la tendenza alla sua soluzione nasce da un'esigenza che esiste solo dal momento che esiste il gioco.

All'interno della comunità di studiosi del gioco, i *game scientists*, c'è ampio accordo sul fatto che l'attività di giocare debba essere volontaria, quindi non forzata, imposta o comprata da terze parti.

È doveroso informare che una parte della comunità di studiosi sostengono il fatto che il gioco sia fine a sé stesso e che non abbia alcun impatto sul mondo esterno al gioco. C'è però da dire che da una parte non si disimpara qualcosa una volta smesso di giocare, dall'altra il solo impatto emotivo del gioco può durare a lungo anche dopo la fine della partita.

Da un punto di vista psicologico gli elementi che accomunano i giochi sono quattro: interattività, possibilità di compiere scelte e di adottare strategie, presenza di regole definite e l'assegnazione di un premio. Analizziamole singolarmente.

L'interattività richiede che ci sia iniziativa da parte del giocatore o della giocatrice e crea un legame di causa-effetto in cui la causa è l'iniziativa mentre l'effetto è il risultato del gioco. A livello psicologico si parla infatti di "senso di *agency*" quando una persona ha la sensazione di essere soggetto attivo di un'azione e quindi di non assistere semplicemente ad azioni che sono fuori dal proprio controllo.

In un gioco devono esistere più strategie. A questo livello il giocatore o la giocatrice è protagonista non soltanto dell'azione effettuata ma anche e soprattutto del percorso che porta da uno stadio del gioco al successivo fino al termine della partita. La possibilità di scegliere e la successiva sensazione di aver effettuato la scelta sono fondamentali.

Un gioco e l'interazione con esso deve ovviamente essere regolato attraverso una serie di norme che siano definite e pubbliche e che descrivano ciò che si può o non si può fare, il legame fra le azioni e gli effetti, l'attribuzione dello status di vincente o perdente e come vengono spartiti i premi.

Le regole devono essere chiare e non ambigue, quindi non soggette ad interpretazione, e ovviamente pubbliche poiché ogni partecipante al gioco deve conoscerle o almeno avere accesso alla loro conoscenza.

Un gioco include poi un premio, assegnato secondo regole definite e pubbliche. Non è importante l'entità del premio a motivare le persone, quanto la sua sola esistenza. Spesso la sola attribuzione di status di vincitore o vincitrice è il premio.

L'esistenza del premio può inoltre rendere il gioco più inclusivo: tutti i giocatori e le giocatrici punteranno a vincere il premio, utilizzando le stesse identiche regole, indipendentemente dallo status socio-economico di appartenenza.

3.1.1 Perché giochiamo?

Durante l'attività di gioco le persone possono arrivare a sperimentare uno stato di coscienza di completa immersione fino ad arrivare addirittura ad un distacco considerevole rispetto agli avvenimenti dell'ambiente circostante. Secondo lo studioso Csíkszentmihályi [98] questo stato definito da lui stesso "di flusso", analogo allo stato di trance agonistica nell'attività sportiva e con corrispettivi anche in arte o spiritualità, è accompagnato da una massima focalizzazione sull'obiettivo e dalla gratificazione nel suo raggiungimento o nel tentativo di farlo. Secondo Csíkszentmihályi esistono nove elementi che, se presenti, possono far sentire "nel flusso" una persona:

- obiettivi chiaramente definiti;
- possibilità di focalizzare tutta l'attenzione sul problema;

- feedback chiaro e immediato, in modo da poter comprendere intuitivamente l'esito delle azioni;
- senso di controllo e *agency* sulle azioni;
- alterata percezione dello scorrere del tempo;
- esperienza autotelica, ovvero intrinsecamente piacevole in sé stessa;
- esperienza percepita come impegnativa, entro i limiti delle capacità attuali;
- perdita del senso di sé a favore di un focus totale sugli obiettivi;
- azioni percepite come naturalmente collegate all'obiettivo, senza mediazione.

Notiamo che il gioco deve risultare impegnativo, è quindi necessario bilanciare il livello di difficoltà con le abilità e le competenze del giocatore o della giocatrice.

La chiarezza degli obiettivi e la capacità di agire verso il loro raggiungimento deve essere un ottimo spunto anche per ambiti come il *Game-Based Learning* in cui è possibile sfruttare la fase di *debriefing*, ovvero di ragionamento collettivo post-partita, in modo da consapevolizzare la difficoltà e definire gli obiettivi.

Un altro concetto fondamentale all'interno della teoria del flusso è quello di "motivazione intrinseca", ovvero ciò che permette al gioco di essere piacevole di per sé, senza motivazioni esterne. Dalla letteratura scientifica [99] sembra che le azioni motivate dal piacere intrinseco attivino la corteccia insulare, una regione legata all'elaborazione emotiva, mentre quelle motivate estrinsecamente abbiano una maggiore attivazione della corteccia della porzione posteriore del cingolo, un'area legata alla presa di decisione basata sul valore appreso o sociale di una ricompensa. Chi agisce motivato intrinsecamente sembra quindi considerare le proprie emozioni più di un possibile vantaggio a lungo termine.

Andando a considerare le particolarità soggettive di ciascun giocatore o giocatrice, si possono citare le ricerche di Bartle [100], il quale nel 1996 pubblicò una profilazione dei videogiocatori di ruolo online in base alle loro azioni preferite. Si possono quindi distinguere quattro quadranti.

- I *killer*, quelli che giocano per gareggiare e sconfiggere gli altri giocatori o giocatrici e che ricercano una forte esperienza agonistica in cui esiste un vincitore ed un perdente.
- Gli *achiever*, i quali giocano per superare le sfide proposte dal gioco stesso, che risulta in un certo senso il principale avversario. Gli *achiever* ricercano una esperienza focalizzata sulla propria performance rispetto ad una sfida lanciata dal game designer e non dagli altri o dalle altre partecipanti al gioco.
- I *socializer*, coloro che ricercano la cooperazione con le altre giocatrici o giocatori. I *socializer* ricercano un'esperienza basata sullo scambio, sull'aiuto e sul riconoscimento del proprio contributo, per loro è interessante la costruzione di gruppi, di *community*, gilde, ecc. È interessante notare che spesso anche persone che non si appassionano al gioco prendono comunque parte a giochi progettati per *socializer*.

- Gli *explorer*, i quali ricercano l'interazione con il mondo del gioco tramite la scoperta e l'esplorazione del mondo stesso. Gli *explorer* ricercano la novità, la sperimentazione e la possibilità.

La tassonomia di Bartle [100] è utile per definire i modi in cui i giocatori e le giocatrici sono gratificate dal gioco, se invece vogliamo concentrarci più sull'analisi della motivazione al gioco in base al divertimento/coinvolgimento è interessante dare uno sguardo alle analisi della studiosa Lazzaro [101]. La ricercatrice ha infatti individuato “aree emotive” da quattro differenti modalità di interazioni per catturare l'attenzione e motivare:

- coinvolgimento di tipo “*people fun*”, legato all'area dell'amicizia in cui si ottiene gratificazione dalla competizione e cooperazione;
- coinvolgimento di tipo “*easy fun*”, legato all'area della novità e curiosità in cui la gratificazione è fornita dall'esplorazione e dalla creatività;
- coinvolgimento di tipo “*hard fun*”, legato all'area della sfida in cui si ottiene gratificazione attraverso il raggiungimento di obiettivi difficili e dal superamento di ostacoli;
- coinvolgimento di tipo “*serious fun*”, legato all'area del significato profondo, in cui la gratificazione è data dal cambiamento sociale, dal contributo al mondo e dall'apprendimento che genera una differenza significativa. Questa motivazione denota l'uso del gioco i cui fini principali sono diversi dall'intrattenimento, benché non debba necessariamente essere rimossa una componente di divertimento.

Dal punto di vista della psicologia evolutiva, se il gioco non appaga alcun bisogno non ha senso che provochi piacere. Una delle teorie più conosciute che descrivono i bisogni dell'essere umano è quella della gerarchia dei bisogni di Maslow [102] la quale descrive una gerarchia in cui i bisogni più vicini alla fisiologia e alla biologia, ovvero quelli più necessari alla sopravvivenza e alla trasmissione del patrimonio genetico, sono quello più urgenti. Una volta soddisfatti questi si può quindi passare a soddisfare quelli meno necessari.

Volendo rappresentare graficamente questa gerarchia possiamo pensare ad una piramide in cui alla base sono presenti i bisogni più urgenti e via via che si arriva alla punta sono presenti bisogni meno urgenti. Una volta soddisfatti i bisogni che stanno alla base della piramide la soddisfazione dei bisogni che stanno più in alto diventa più urgente.

Alla base sono presenti i bisogni fisiologici (mangiare, bere, avere un riparo, dormire, riprodursi), poi quelli legati alla sicurezza (salute, risorse, lavoro), quelli legati all'affetto (amicizia, famiglia, amore, appartenenza), quelli legati alla stima (autostima, riconoscimento sociale, rispetto), ed infine l'autorealizzazione.

Il gioco agisce sicuramente sull'apice della piramide dei bisogni ed è infatti tanto più diffuso quanto è il benessere della popolazione: superare gli ostacoli non necessari, raggiungere gli obiettivi (autostima), cooperare con altre giocatrici e giocatori (appartenenza), ottenere il riconoscimento dei propri contributi (stima).

Un'altra teoria, più moderna, è la teoria dell'autodeterminazione [103]. Secondo questa teoria esistono tre bisogni universali in grado di motivare l'individuo essenziali per il benessere psicologico: competenza, autonomia e relazione.

Il bisogno di competenza riguarda la necessità dell'essere umano di sentirsi competente e di sapere di aver appreso dall'esperienza ed i giochi forniscono la possibilità di sentirsi competente una volta raggiunto il primo obiettivo.

Il bisogno di autonomia esprime la necessità di essere agente (attivo) delle proprie azioni e scelte ed i giochi, attraverso il senso di *agency* e di controllo, fanno sì che venga soddisfatto questo tipo di bisogno. C'è anche da aggiungere che la motivazione intrinseca crea più autonomia di quella estrinseca proprio perché non è presente una ricompensa esterna.

Il bisogno di relazione delinea la necessità del singolo di connessione gli altri e altre. I giochi permettono sia l'interazione con altre persone sia un confronto (di esperienze, di opinioni, di risultati, ecc) esterno al gioco.

3.1.2 La gestione delle risorse cognitive durante il gioco

Le decisioni che prendiamo nella fase di gioco sono basate, secondo la teoria del doppio processo, sia su pensieri lenti, i quali richiedono maggiori risorse cognitive, che su pensieri veloci, generati automaticamente e senza sforzo dalla nostra mente.

Secondo Kahneman [34] se non sono presenti stimoli ambientali che richiedano l'intervento di pensieri lenti, gli esseri umani tendono ad uno stato di fluidità in cui questi pensieri vengono utilizzati il meno possibile e vengono quindi privilegiati i pensieri veloci per la maggior parte delle decisioni.

Le decisioni prese tramite pensieri veloci spesso sono buone, ma possono indurre ad ottenere ricompense immediate e non efficienti sul lungo periodo, come mangiare dolci molto allettanti quando si è a dieta, ad esempio. Per fortuna solitamente abbiamo una quantità di risorse cognitive sufficienti ad inibire queste scelte.

Quando si verificano eventi che richiedono l'intervento di pensieri lenti viene interrotto lo stato di fluidità e si genera una condizione denominata "deplezione dell'io". In questa fase viene dedicata una grande quantità di risorse cognitive alla gestione dell'imprevisto. Nel caso del gioco potrebbe accadere quando un avversario fa una mossa che ci sorprende (rottura della fluidità) e dobbiamo pianificare delle contromosse efficaci (deplezione dell'io).

Quando si verifica la deplezione dell'io i pensieri lenti intervengono per gestire l'imprevisto, mentre le altre decisioni vengono scaricate sui pensieri veloci. In questa fase è allora più probabile che vengano commessi errori dovuti a ricompense immediate.

Per quanto riguarda il gioco questa dinamica fra pensieri lenti e veloci può essere sfruttata da uno dei giocatori per trarre vantaggi sfruttando una condizione di fluidità cognitiva o la deplezione dell'io¹.

¹Per degli esempi a riguardo si consulti la fonte [97] alle p31 e p 32.

3.2 Come condurre un gioco

Questa sezione è stata realizzata consultando principalmente il capitolo “Come condurre un gioco” del libro “Giocarsi”. Benché questo capitolo sia rivolto principalmente a formatori aziendali, parte delle argomentazioni crediamo possano essere valide per chi insegna nella scuola superiore.

3.2.1 Progettazione dell'intervento e scelta del gioco

Iniziamo prima di tutto con il chiarire quali siano le differenze fra *gaming* e *gamification*, entrambe legate all'esperienza del gioco ma con caratteristiche ben diverse.

La *gamification* è definita come l'uso di elementi di gioco e di tecniche di game design all'interno di contesti non di gioco [104] ne è un esempio la raccolta punti al supermercato in cui meccaniche di gioco sono inserite in un contesto che non le prevede.

Il *gaming*, invece, è l'utilizzo di giochi veri e propri in contesti che non sono soltanto di intrattenimento [105]. In questo caso si parla solitamente di *serious game*, ovvero giochi in cui l'obiettivo principale non è il semplice intrattenimento e divertimento, ma anche veicolare un messaggio e uno scopo. Nel nostro caso faremo quindi riferimento al *gaming*, ma sia *gaming* che *gamification* possiedono il vantaggio di far diventare l'apprendimento non solo informativo ma anche coinvolgente attraverso l'inserimento di elementi interattivi, creando così una sensazione di immersione e offrendo alle studentesse e studenti l'opportunità di sentirsi parte attiva del processo di apprendimento.

Prima di trovarsi in aula o in laboratorio il o la docente deve aver preparato ciò che verrà trattato, sia da un punto di vista teorico che da un punto di vista pratico. La progettazione si struttura quindi in due fasi: la macro-progettazione e la micro-progettazione.

Nella macro-progettazione vengono definiti gli obiettivi formativi, la composizione e le caratteristiche dei futuri partecipanti, gli aspetti logico-organizzativi, gli argomenti da trattare insieme alla loro sequenza logica e definizione dei tempi.

Nella micro-progettazione vengono definiti con maggior precisione i punti della macro-progettazione, soprattutto contenuti, tempi e modalità di apprendimento.

All'interno della micro-progettazione si possono anche andare ad individuare gli *start game*, gli *skill game* e gli *end game*.

Gli *start game* sono il “riscaldamento” e servono per rompere il ghiaccio introducendo gli argomenti e i temi trattati, ma soprattutto nel caso in cui possa accadere permettono al gruppo di conoscersi.

Gli *skill game* sono la parte centrale e costituiscono l'attività vera e propria.

Gli *end game* sono i giochi conclusivi e permettono di finire l'attività valutando i feedback e l'impatto avuto sui partecipanti.

3.2.2 Apertura e start game

L'apertura dell'attività è un momento fondamentale per qualsiasi tipo di attività, a maggior ragione per quelle basate sul *gaming* in l'obiettivo è la creazione di un clima favorevole alla partecipazione e al coinvolgimento attivo.

Inizialmente il o la docente può presentarsi dando maggior risalto alle caratteristiche personali congruenti al tema. Fra le cose più importanti c'è la costruzione della propria credibilità legata al proprio ruolo, la creazione di interesse e di un clima positivo e non giudicante.

Oltre all'utilizzo delle proprie abilità comunicative si possono utilizzare alcuni semplici accorgimenti in modo da raggiungere gli obiettivi: presentazioni e scambi di battute mentre i partecipanti stanno entrando in aula, memorizzazione dei nomi già nei primi minuti, procedere con domande in modo da far interagire immediatamente i partecipanti e far superare il frontismo *speaker*/uditorio.

Dopodiché si può quindi procedere con la spiegazione degli obiettivi dell'attività, facendo anche capire a chi partecipa l'importanza e le potenzialità di questo metodo formativo e didattico che è il *serious game*.

Prima di cominciare la fase di gioco vera e propria è necessario che chi partecipa conosca la logistica e le regole di ingaggio, ovvero che conosca orari, pause, attività extra, utilizzo di dispositivi elettronici, ecc. Ultimo ma non ultimo è importante chiarire se è presente o no una valutazione. L'assenza di valutazione infatti permette ai partecipanti di svolgere l'attività senza paura di giudizi.

Arrivati fin qui si potrà svolgere un giro di presentazioni, anche attraverso alcuni tipi di start game come quelli descritti nel capitolo 9 del libro giocare.

3.2.3 Lancio dell'attività e *skill game*

Il o la docente ha adesso il compito di presentare chiaramente il gioco, con le sue regole e obiettivo finale (quando possibile farlo), può anche risultare utile la lettura delle istruzioni.

Una volta partita l'attività bisogna quindi gestire il gruppo e, quando possibile, lasciare indizi e istruzioni, fare domande per stimolare, sbloccare situazioni di stallo o, al contrario, stare in silenzio.

Un aspetto fondamentale è il giusto equilibrio fra *serious* e *game*. Se non è stato esplicitato in modo chiaro l'uso di questa metodologia l'attività potrebbe infatti tendere da una delle due parti, solitamente il game. In questi casi bisogna intervenire per riportare equilibrio.

3.2.4 *Debriefing*

Nella fase di *debriefing* è possibile utilizzare il feedback come strumento per aiutare i partecipanti e le partecipanti, in particolare lasciando a chiunque la possibilità di esprimere le proprie osservazioni e facilitando lo scambio di opinioni.

L'insegnante deve saper osservare i comportamenti e saper comunicare efficacemente le proprie osservazioni in modo stimolante e positivo, rispettando tutti i partecipanti.

Una buona norma è quella di lasciar parlare i partecipanti in modo che ci sia una facile circolazione del feedback, per poi intervenire solo successivamente condividendo le proprie osservazioni. Nel farlo è bene tenere a mente alcune regole:

- cominciare osservando aspetti positivi e gratificanti in maniera onesta;
- essere specifici;

- concentrarsi sui fatti osservati e non sulle motivazioni per spiegare tali fatti;
- non valutare, ma offrire un comportamento alternativo positivo;
- chiedere la collaborazione dell'interlocutore;
- chiedere il feedback degli altri studenti e studentesse.

L'insegnante può cominciare con domande che stimolino la riflessione sui comportamenti e le strategie adottate e sulle dinamiche che sono emerse. Alcune domande possono semplicemente essere “come è andata la prova?” “quali difficoltà avete trovato?” “in cosa siete stati particolarmente efficaci e in cosa potevate esserlo di più?” “quali sono state le principali competenze che avete messo in atto?”

Dopo questa fase di apertura è possibile fare domande più specifiche in grado di indagare e approfondire le *soft skill*.

3.2.5 Valutazione dei risultati

Secondo la teoria della gerarchia di Kirkpatrick [106] i risultati della formazione si possono dividere in quattro livelli, sebbene solitamente si prevedano soltanto i primi due:

- le reazioni, in cui viene valutata la soddisfazione dei partecipanti relativamente all'esperienza;
- l'apprendimento, in cui vengono valutate le conoscenze e le capacità apprese;
- il comportamento, in cui si valutano le modifiche nel comportamento (se presenti);
- l'organizzazione, in cui vengono valutati benefici apportati all'organizzazione (se presenti).

Phillips [107] aggiunge un quinto livello, quello che valuta il ritorno dell'investimento sulla formazione.

Quest'ultima fase è gestibile anche attraverso gli end game (si veda il capitolo 11 del libro *Giocarsi* [97]), oppure attraverso la *gamification*, ad esempio utilizzando *Mentimeter* per chiedere di valutare il percorso secondo alcuni criteri come applicabilità, coinvolgimento percepito, interattività, ecc.

Capitolo 4

Modelli fisici e (video) giochi

In questo capitolo verranno sia analizzati i modelli fisici su cui si sono basati i giochi che abbiamo sviluppato, sia spiegati i giochi stessi, assieme al loro significato dal punto di vista didattico.

Prima di tutto verrà analizzata la teoria della percolazione, che applicheremo alla dinamica di propagazione degli incendi, su cui sono basati alcuni giochi che abbiamo sviluppato.

Passeremo poi alla trattazione di un modello fisico composto da un pendolo di materiale ferromagnetico e da tre magneti disposti su un piano a formare un triangolo equilatero. Questo sistema possiede un'alta sensibilità alle condizioni iniziali e proprio su questo aspetto si concentra il nostro *serious game*.

Tratteremo infine il modello di Kuramoto, un modello fisico in grado di spiegare fenomeni di sincronizzazione, applicandolo proprio ad un gioco che riguarda la sincronizzazione degli impulsi luminosi delle lucciole.

Tutti i giochi sono stati sviluppati grazie alla piattaforma NetLogo [108], e alcuni di essi si ispirano proprio ad alcuni già proposti sul sito.

NetLogo è interessante come strumento educativo perché non solo permette di sviluppare facilmente una interfaccia interattiva, ma fornisce anche il codice sorgente e la possibilità di modificarlo. Inoltre è possibile “esportare” la piattaforma in formato html + javascript, così che gli studenti possono utilizzare la piattaforma anche da cellulare o tablet, per quanto per il momento le capacità di questa versione siano ancora piuttosto limitate.

4.1 La teoria della percolazione applicata alla propagazione degli incendi nella foresta

Lo studio della propagazione di un incendio in una foresta o in un bosco può essere molto interessante sia dal punto di vista matematico che da un punto di vista più concreto, in quanto può aiutare a capire quali tecniche e strategie di riforestazione applicare in modo da prevenire un incendio che sovrasti la totalità della foresta. Per approfondimenti riguardo al tema consigliamo in particolare i lavori riportati nelle fonti [109–111].

Nel contesto della fisica e della matematica la propagazione degli incendi è descritta attraverso modelli di percolazione, una teoria che fa riferimento ai comporta-

menti di alcuni raggruppamenti (*clusters*) in un dato reticolo i cui siti sono occupati con una certa probabilità.

È interessante utilizzare modelli di percolazione poiché esistono soltanto tre possibili regimi di propagazione dell'incendio.

- Incendio diffuso. In questo caso il fuoco non si ferma e riesce a bruciare la quasi totalità della foresta.
- Nessuna diffusione. In questa situazione gli alberi sono così separati fra loro che l'incendio non riesce a bruciare che proporzioni esigue di foresta.
- Propagazione limitata dalla geometria. Questo terzo caso corrisponde ad un incendio controllato, in cui viene bruciata solo parte della foresta e in cui sono presenti anche grosse fluttuazioni della percentuale di foresta bruciata.

I modelli di percolazione sono importanti perché capaci di descrivere la transizione fra i primi due regimi e di identificare da quale fattore è maggiormente causato incendio (vento, terreno, ecc).

Essi sono solitamente definiti in base ad un'occupazione casuale di siti (*site percolation*) o di probabilità di interazione (*bond percolation*) o una versione mista dei due. Esiste tuttavia un'equivalenza fra questi due tipi di modelli che collega la *bond percolation* su un certo reticolo alla *site percolation* su un reticolo a lui collegato, che viene chiamato *covering lattice*. Per questo motivo possiamo assumere che tutti i problemi di percolazione abbiano un'unica classe di universalità.

Nel nostro lavoro abbiamo trattato in particolare sia un modello di *site percolation* che uno misto.

Nel nostro contesto, il terreno è diviso in celle, che possono stare in quattro stati: celle vuote, celle occupate da alberi sani, celle occupate da alberi che stanno bruciando e celle occupate da alberi già bruciati che, per quanto riguarda la propagazione, si comportano come le celle vuote.

La regola più semplice è che un albero che sta bruciando comunica con certezza la combustione a tutte le celle vicine occupate da un albero sano. L'incendio si collega a un problema di percolazione perché in questo modello l'incendio si può propagare a una frazione sostanziale della foresta solo se esiste un cluster di alberi sani che si estende su una frazione significativa del reticolo (la "componente gigante" della teoria della percolazione).

All'inizio, il regolo contiene solo celle vuote o occupate da un albero, ed una cella a caso viene incendiata.

Se la probabilità p_s che un sito sia occupato da un albero è abbastanza alta, esisterà un cluster "gigante" e il sito iniziale dell'incendio ne farà parte con grande probabilità, viceversa, se questa probabilità è bassa esisteranno solo piccoli cluster sconnessi.

Questo porta ad una conseguenza molto interessante: esiste una probabilità di occupazione critica, p_c che divide questi due casi estremi.

Un risultato meno banale è invece dato dal fatto che esiste una variabilità statistica di tutte le scale di lunghezza e autosimilarità. Queste caratteristiche evidenziano la relazione fra modelli di percolazione e modelli di transizioni di fase continui.

4.1.1 I nostri modelli

Il nostro lavoro prende in considerazione reticoli quadrati bidimensionali con una certa dimensione $L \times L$ i cui siti sono occupati da alberi con una certa probabilità p_s . Dato che i risultati nella teoria della percolazione dipendono sia dalla geometria del reticolo che dalla sua dimensione, le nostre conclusioni non avranno alcuna pretesa di generalità.

Nel nostro modello consideriamo soltanto interazioni fra i quattro primi vicini (Nord, Sud, Est e Ovest), non considerando quindi come vicini i siti sulla diagonale, inoltre non includeremo alcuni fenomeni come ad esempio la presenza di vento.

Gli stati possibili sono i seguenti.

- Albero sano (stato 0). Non sta bruciando ma può essere incendiato se il fuoco arriva vicino.
- Albero “malato” (stato 1). In questo stato l’albero sta bruciando ed è capace di propagare l’incendio agli alberi vicini. Quando non sono più presenti alberi in questo stato l’incendio non può più propagarsi.
- Albero bruciato (stato 2). Una volta che l’albero non è più nel precedente stato, passa automaticamente allo stato di albero bruciato, in cui non può bruciare nuovamente né propagare l’incendio.
- Assenza di alberi (stato 3).

Il reticolo che creiamo ha una probabilità p_s di avere alberi sani e $1 - p_s$ di avere spazi vuoti (stato 3). A questo punto uno degli alberi nello stato 0 viene scelto in maniera casuale e passa allo stato 1, dando così inizio all’incendio.

Una volta definiti gli stati e il reticolo iniziale è quindi possibile sviluppare il modello di incendio. Discuteremo brevemente il modello di *site percolation* per poi passare a quello di *mixed percolation*.

Site percolation

Secondo questo modello un albero che sta bruciando può incendiare i suoi primi vicini con probabilità certa. Come già accennato ciò che si osserva è l’esistenza di una probabilità critica p_c che divide due casi limiti: il caso in cui l’incendio non si propaga quasi per niente, e il caso in cui brucia praticamente tutta la foresta.

Il nostro lavoro conferma il risultato in letteratura [111] per quanto riguarda i reticoli bidimensionali quadrati, con un valore per la probabilità critica pari a $p_c = 0,59$.

Mixed percolation

Avendo creato il reticolo con una probabilità p_s di avere un albero in un certo sito (stato 0) e quindi probabilità $1 - p_s$ di assenza di alberi (stato 3) possiamo complicare il modello aggiungendo la probabilità che un albero che sta bruciando (stato 1) propaghi l’incendio ad uno dei suoi quattro possibili vicini.

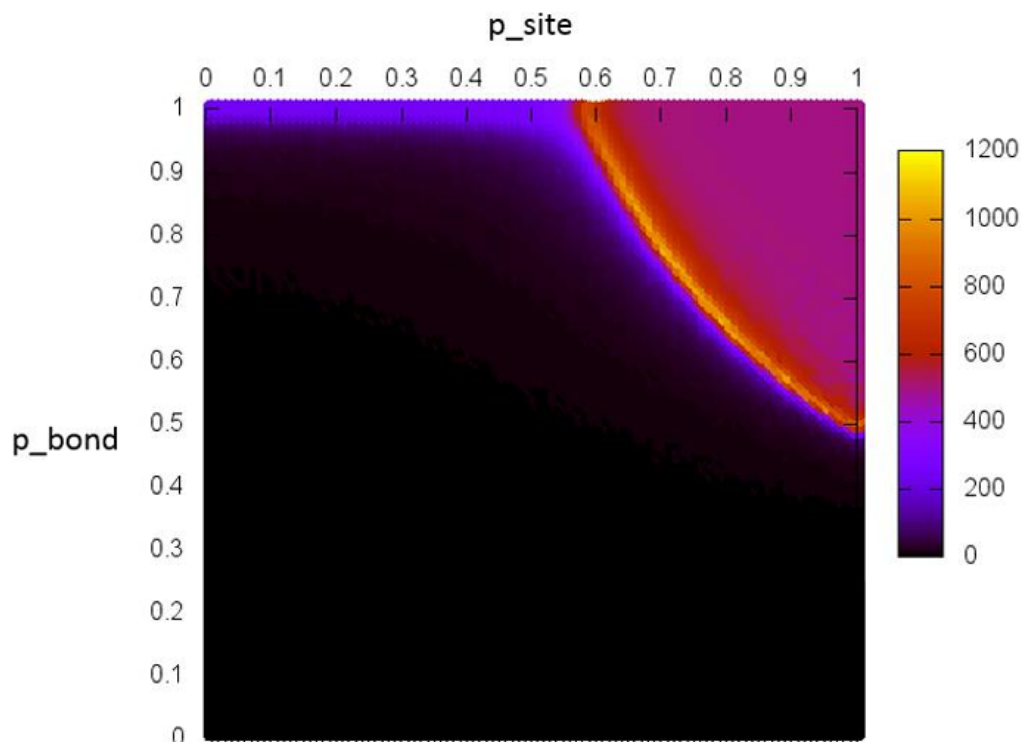


Figura 4.1. *Diagramma di fase in cui sono presenti rispettivamente sull'asse orizzontale la probabilità che un albero occupi la mappa, mentre sull'asse verticale la probabilità che un albero possa bruciare gli alberi vicini.*

Questo tipo di problema è sicuramente più difficile da trattare rispetto al precedente, poiché esistono due parametri: la probabilità di occupazione di un sito (p_s), e la probabilità di propagazione (p_b).

Se vogliamo avere un'idea immediata dei valori soglia possiamo costruire il diagramma di fase in cui sono presenti entrambi i parametri del sistema, riportato in fig. 4.1 [109].

Dal diagramma possiamo notare come esistano due zone separate da un confine. La zona nera si ha quando i due parametri si combinano in modo da estinguere l'incendio molto velocemente, viceversa la zona colorata restituisce i valori per cui quasi tutta la foresta finisce per bruciare.

Il confine rappresenta allora le possibili coppie di valori critici.

La conoscenza precisa di questo diagramma può avere importanti conseguenze. Se lo scopo che ci prefiggiamo è infatti dato dalla creazione e sviluppo di una foresta diventa essenziale capire i valori dei parametri critici in modo da renderla più sicura. In particolare risulta importante stimare o conoscere la probabilità di propagazione data dal parametro p_p , la quale è collegata a varie proprietà fisiche e chimiche, che, unita alla conoscenza del diagramma di fase, ci permette di capire quanti alberi piantare e con che probabilità di occupazione distribuirli.

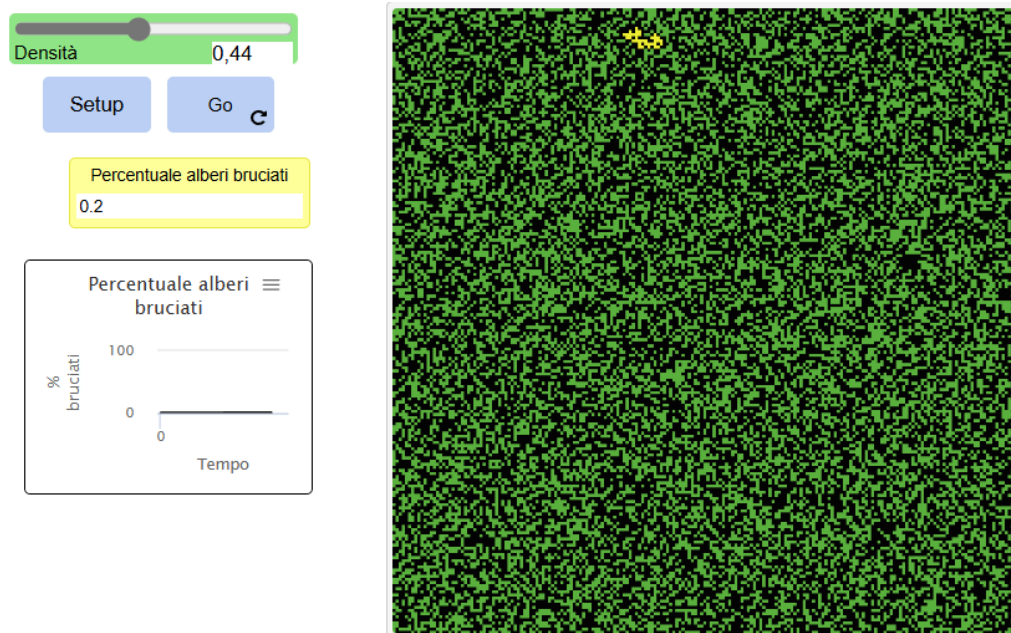


Figura 4.2. L'immagine rappresenta l'incendio ottenuto impostando una densità più piccola rispetto al valore critico. Si può notare che la percentuale di alberi bruciati, colorati in giallo nella mappa da gioco, è molto bassa.

4.1.2 Proposta didattica relativa alla *site percolation*

Lo scopo del gioco è quello di far comprendere il fenomeno delle transizioni di fase e la natura probabilistica di alcuni sistemi fisici. In particolare questo gioco simula la propagazione di un incendio in una foresta, assumendo che dipenda soltanto dalla densità numerica degli alberi, ovvero dal numero di alberi presenti sulla mappa.

L'idea dal quale abbiamo preso ispirazione è quella del gioco *Fire* sulla piattaforma NetLogo [112].

All'inizio del gioco viene creata una schermata contenente una mappa quadrata con alberi disposti casualmente e con una certa densità numerica controllabile dal giocatore o dalla giocatrice e che viene scelta prima dell'inizio del gioco.

Soltanto uno degli alberi sulla mappa è capace di far partire l'incendio e non c'è possibilità di scelta poiché avviene in modo casuale.

L'incendio sarà poi in grado di propagarsi soltanto agli alberi vicini e la percentuale di alberi bruciati dipenderà ovviamente dalla densità scelta. Questa assunzione si può tradurre fisicamente attraverso l'ipotesi di assenza di vento.

L'obiettivo è infatti proprio quello di capire la relazione che lega la densità degli alberi con la percentuale degli alberi bruciati.

Alla classe, in particolare, viene chiesto di scoprire quale sia la densità di alberi che permette l'incendio di (approssimativamente) metà foresta, più precisamente è stato detto che poteva essere accettabile un intervallo fra il 40% ed il 60%. Ciò può essere realizzato tramite varie simulazioni in cui di volta in volta è possibile modificare la densità degli alberi fino al raggiungimento dell'obiettivo.

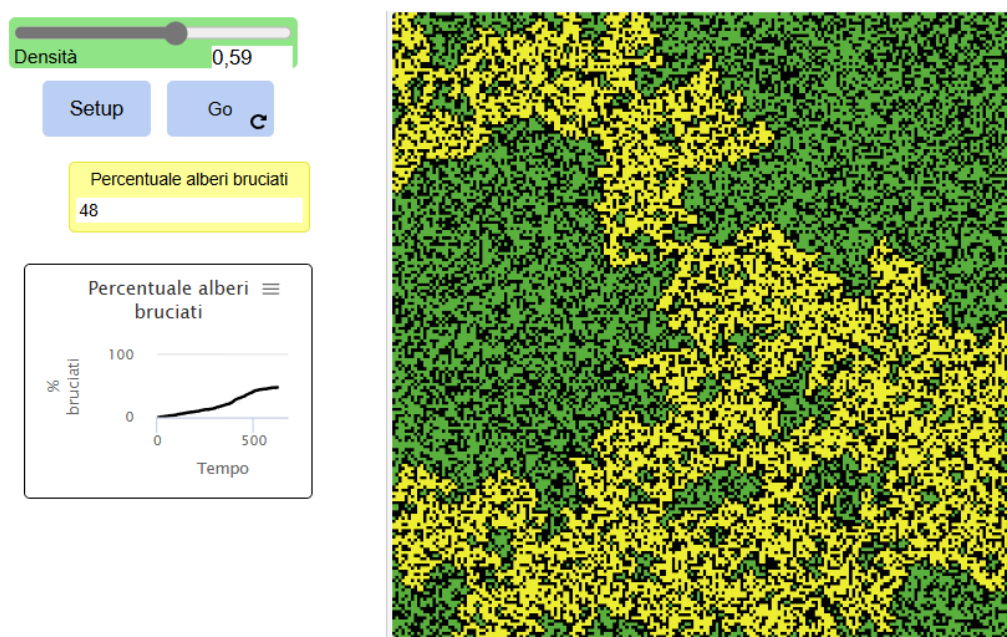


Figura 4.3. L'immagine rappresenta l'incendio impostando una densità prossima al valore critico.

Mentre la densità numerica degli alberi è variabile tramite un cursore, la lettura/visualizzazione della percentuale di alberi che vengono incendiati è effettuabile sia qualitativamente, tramite l'osservazione della mappa da gioco, sia quantitativamente, tramite una finestra che mostra questo dato e/o attraverso un grafico che illustra questa funzione mentre varia nel tempo.

L'unico parametro di questo gioco è la densità numerica degli alberi ed in base ad essa varia la percentuale di alberi bruciati.

L'andamento di questa percentuale non è tuttavia banale ed esibisce una transizione di fase: prima di un certo valore soglia di densità viene incendiata soltanto una piccola percentuale di alberi, mentre se la densità scelta è maggiore del valore critico vengono bruciati un grande numero di alberi sulla mappa.

Può essere interessante discutere con la classe proprio riguardo al grafico della percentuale di alberi bruciati in funzione del tempo, ed è possibile farlo su più livelli in base alla preparazione matematica della classe stessa passando da una spiegazione più qualitativa fino a svolgere uno studio di funzione o almeno uno studio di alcune caratteristiche della funzione stessa.

In particolare è possibile notare che per valori della densità più piccoli della densità critica (si veda la fig. 4.2) il grafico è appiattito vicino allo zero (praticamente non vengono bruciati alberi), mentre quando si arriva alla densità critica (fig. 4.3) o la si supera compare il tipico grafico ad "S" in cui si ha un brusco aumento e poi una saturazione, come presente in fig. 4.5.

Quando la densità è abbastanza grande, come è il caso della fig. 4.4, può invece essere interessante sottolineare la progressione dell'incendio sulla mappa: il fronte a forma di rombo è dovuto proprio al particolare modo di propagarsi dell'incendio

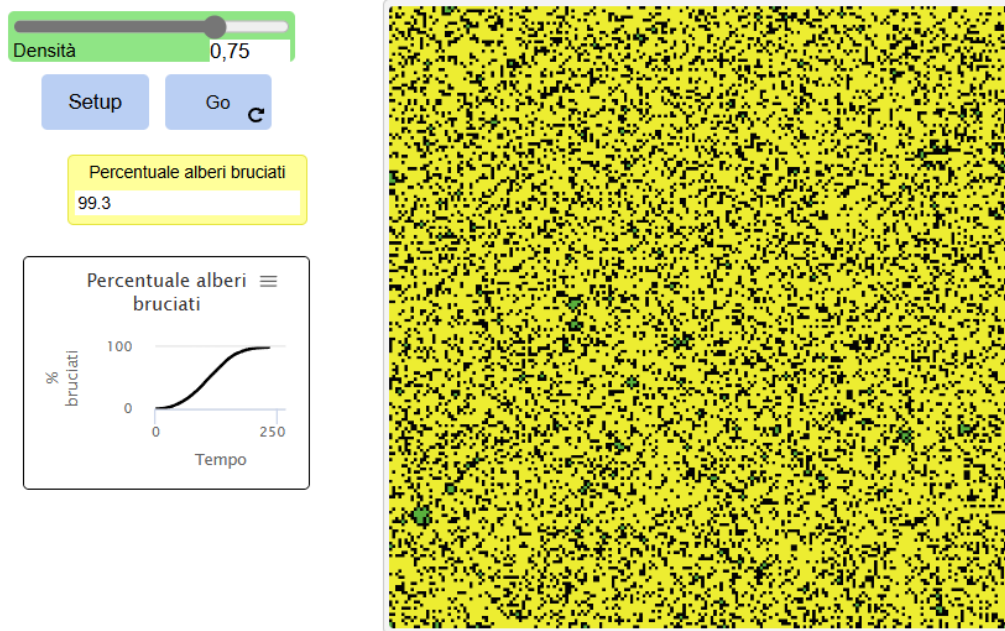


Figura 4.4. L'immagine rappresenta l'incendio impostando una densità più alta rispetto al valore critico. Si può notare che la percentuale di alberi bruciati è quasi 1.

ai primi vicini.

Questo aspetto non è l'unico interessante sia dal punto di vista fisico che dal punto di vista didattico, la quantità di alberi bruciati dipende infatti anche dalla posizione dell'albero che fa partire l'incendio, ad esempio se questo è vicino al bordo della mappa o è in una zona con molti "vuoti" attorno l'incendio non si propaga facilmente.

Studenti e studentesse risultano visibilmente sorpresi quando osservano questo tipo di dinamica, si aspettano infatti che il gioco (ma forse anche tutta la fisica e le leggi della natura) sia completamente deterministico e quando vedono che effettuando più simulazioni utilizzando la stessa densità si osservano percentuali di alberi bruciati diverse rimangono perplessi.

Un aspetto su cui si concentra questo *serious game* è infatti offerto anche dalla variabilità statistica che si ha come risultato effettuando più volte le simulazioni, anch'essa più marcata quando la densità è vicina a quella critica.

4.1.3 Proposta didattica relativa alla *mixed percolation*

Analogamente al gioco precedente, lo scopo di questa variante è quello di far comprendere il fenomeno delle transizioni di fase e la natura probabilistica di alcuni sistemi fisici, nonché fornire l'idea di un primo modello epidemiologico. In particolare questo gioco simula la propagazione di un incendio in una foresta, assumendo che dipenda da due parametri: la densità numerica degli alberi, ovvero il numero di alberi presenti sulla mappa, e la loro dimensione, sulla quale si riflette la probabilità di bruciare gli alberi vicini.

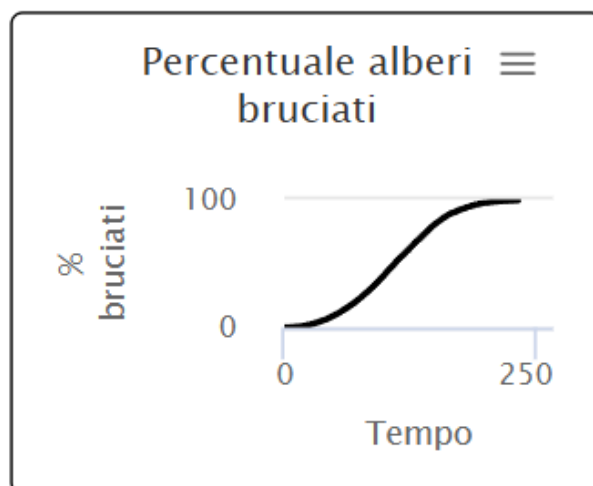


Figura 4.5. Percentuale di alberi bruciati in funzione del tempo, possiamo notare la caratteristica curva a S.

All'inizio del gioco viene creata una schermata contenente una mappa quadrata con alberi disposti casualmente e con una certa densità numerica e dimensione controllabile dal giocatore o dalla giocatrice e che devono essere scelte prima dell'inizio del gioco stesso.

Soltanto uno degli alberi sulla mappa è capace di far partire l'incendio e non c'è possibilità di scelta in quanto avviene in modo casuale.

L'incendio sarà poi in grado di propagarsi soltanto agli alberi vicini con una probabilità che dipende dalla dimensione dell'albero stesso: più è grande l'albero e più sarà alta la probabilità che l'incendio si espanda.

Lo scopo del gioco è quello di capire la relazione fra densità e dimensione degli alberi in modo che il fuoco affetti solo metà bosco: se la densità numerica degli alberi è alta, ad esempio, per ottenere circa il 50% di alberi bruciati dovrà essere scelta una dimensione degli alberi tendenzialmente bassa (ovvero meno probabilità di incendiare gli alberi vicini). Ciò può essere effettuato tramite varie simulazioni in cui i parametri fisici vengono cambiati fino al raggiungimento dell'obiettivo.

Alla classe, in particolare, viene chiesto di scoprire qualche combinazione di parametri (tipicamente quattro o cinque combinazioni) che permettono l'incendio di (approssimativamente) metà foresta, più precisamente è stato detto che poteva essere accettabile un intervallo fra il 40% ed il 60%, come nel precedente gioco.

Sia la densità numerica degli alberi che la loro dimensione sono variabili tramite l'uso di un cursore. La lettura/visualizzazione della percentuale di alberi che vengono incendiati è effettuabile sia qualitativamente, tramite l'osservazione della mappa da gioco (come in fig. 4.6), sia quantitativamente, tramite una finestra che mostra questo dato.

Rispetto al gioco precedente l'unica difficoltà in più è insita nella presenza di un parametro aggiuntivo di tipo probabilistico (la dimensione degli alberi). Didatticamente questo aspetto è interessante perché permette di insistere sulla non completa determinazione di alcuni fenomeni ed è molto utile il dialogo con la classe riguar-

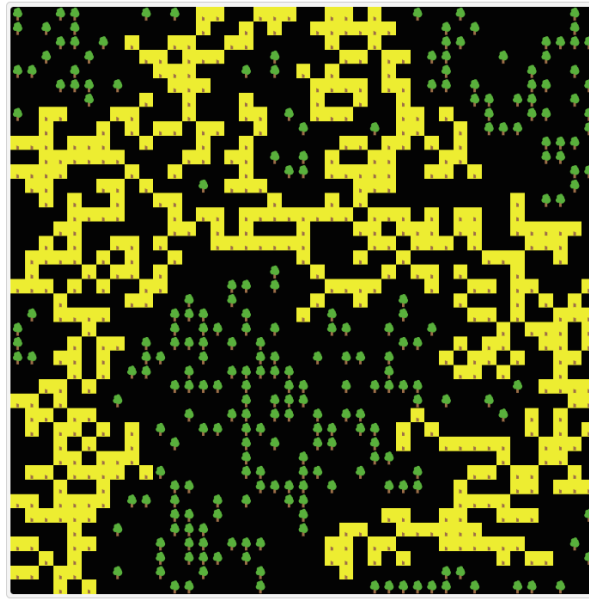


Figura 4.6. *L'immagine rappresenta l'incendio impostando una densità del 40% e una dimensione pari a 92.*

do ad altri possibili utilizzi di questo modello fisico, come per esempio in campo epidemiologico.

Da non trascurare è anche l'idea che alcuni sistemi anche molto complessi o complicati possono comunque essere descritti, entro una certa approssimazione, con modelli molto semplici e con pochi parametri, ma che raccolgono gli ingredienti essenziali utili a descrivere la "realtà".

Oltre a proporre un dibattito sulle similitudini con modelli epidemiologici, può essere intavolata anche una discussione su quali altri parametri possano influire sulla probabilità di incendio. Questo permette di mostrare come il problema possa essere via via reso più complesso.

Un test sull'incendio nella foresta

In conclusione a questa prima fase di giochi a tema boschivo è stato preparato un gioco come test in modo da verificare la comprensione, seppur parziale, dei primi due giochi.

La mappa di questo gioco, anch'essa quadrata, è composta da alberi con una doppia simmetria: Gli alberi diventano più piccoli nella dimensione orizzontale e più radi in quella verticale

Questo tipo di mappa fa sì che l'incendio proceda soltanto fino ad una certa distanza media dal centro e alla classe viene chiesto proprio di stimare il raggio di propagazione dell'incendio. Tramite lo spostamento di un cursore è infatti possibile aumentare e diminuire il raggio stimato, rappresentato graficamente sulla mappa attraverso un cerchio con origine sull'albero centrale, come in fig. 4.7.

Una volta scelto il raggio lo studente o la studentessa possono quindi far partire l'incendio e osservare se la loro intuizione è stata buona, si veda ad esempio la fig. 4.8.

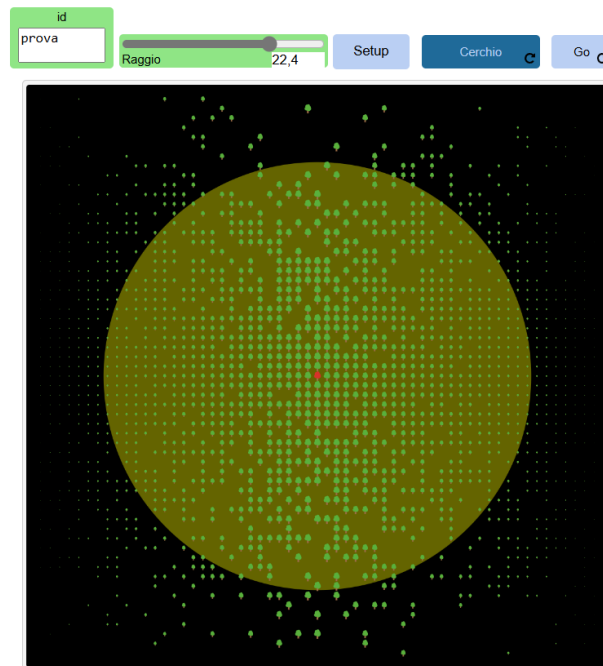


Figura 4.7. *L'immagine rappresenta la schermata di gioco del test sull'incendio nella foresta.*

Come output, inoltre, il gioco informa l'utente riguardo la distanza media rispetto al centro, permettendo quindi sia una autovalutazione di tipo grafico attraverso la mappa, sia una di tipo quantitativo.

4.2 Caos deterministico e pendoli magnetici

Analizziamo adesso un sistema composto da un pendolo di materiale ferromagnetico trattenuto da una corda ideale, che può oscillare sopra ad un piano su cui giacciono tre magneti identici disposti ai vertici di un triangolo equilatero, come in fig. 4.9 [113].

Il pendolo si muove sotto l'influenza della gravità, della tensione della fune, della resistenza dovuta all'attrito dell'aria e della forza attrattiva dovuta ai magneti.

Questo tipo di sistema è molto semplice dal punto di vista meccanico poiché possiede una bassa dimensionalità e prende in considerazione leggi fisiche piuttosto semplici, almeno con le approssimazioni che verranno effettuate.

Nonostante la sua semplicità, questo sistema possiede caratteristiche complesse perché è multistabile: gli attrattori sono solo i tre magneti, ma il loro bacino di attrazione è in genere frattale, e quindi è difficile stimare la sua forma.

Come già accennato per descrivere il sistema facciamo alcune approssimazioni: i magneti sono considerati puntiformi e assumiamo che la lunghezza del filo del pendolo sia molto maggiore della distanza fra i magneti, ciò permette di utilizzare l'approssimazione di angoli piccoli.

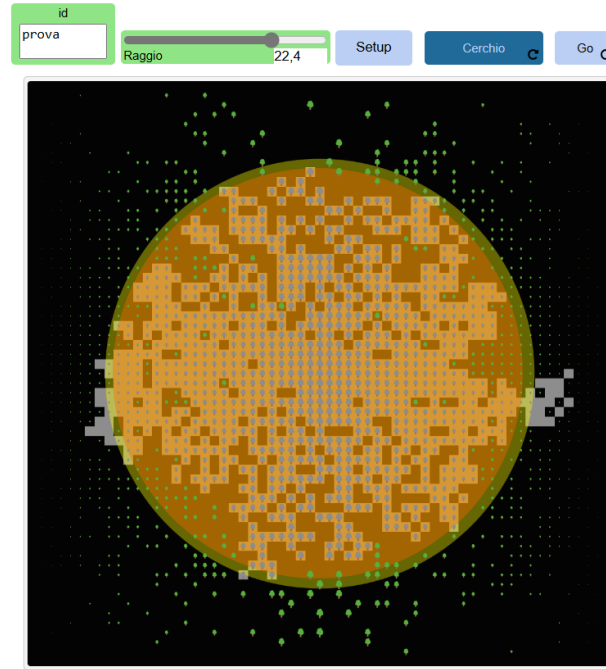


Figura 4.8. L'immagine rappresenta la schermata di gioco una volta che l'incendio si è estinto. Si può notare in grigio la parte di alberi bruciati.

Scomponendo le forze secondo il sistema di riferimento in figura è possibile dimostrare che la combinazione di forza peso e tensione danno luogo ad una forza complessiva sul piano xy data da

$$\begin{aligned} F_x &= -mg \sin \theta, \\ F_y &= -mg \sin \phi, \end{aligned}$$

dove m è la massa del pendolo, g è l'accelerazione di gravità, mentre θ e ϕ rappresentano gli angoli formati dal filo rispettivamente con gli assi x e y .

Se gli angoli sono piccoli possiamo approssimare $\sin \theta \simeq \theta = \frac{x}{l}$ e $\sin \phi \simeq \phi = \frac{y}{l}$ ed ottenere quindi una forza proporzionale alla posizione, analoga ad una forza elastica,

$$\begin{aligned} F_x &= -m \frac{g}{l} x, \\ F_y &= -m \frac{g}{l} y. \end{aligned}$$

Per quanto riguarda invece la resistenza dovuta all'attrito dell'aria, supponendo che il corpo si muova a basse velocità (numero di Reynolds minore di 1, ovvero regime di Stokes), possiamo affermare che la forza è proporzionale alla velocità e, nel caso di massa sferica, utilizzando la legge di Stokes,

$$\vec{F} = -6\pi\mu R\vec{v}.$$

Aggiungendo infine le forze fra magneti e pendolo, che assumiamo dipenda dall'inverso del quadrato della distanza, possiamo scrivere la seguenti equazioni del

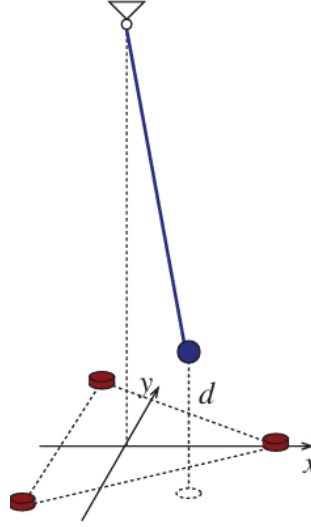


Figura 4.9. *L'immagine rappresenta il sistema fisico trattato.*

moto:

$$\ddot{x} = -\omega_0^2 x^2 - \alpha \dot{x} + K \sum_{i=1}^3 \frac{(\tilde{x}_i - x)}{D_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)^3},$$

$$\ddot{y} = -\omega_0^2 y^2 - \alpha \dot{y} + K \sum_{i=1}^3 \frac{(\tilde{y}_i - y)}{D_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)^3},$$

dove $\omega_0^2 = \frac{g}{l}$ è la frequenza naturale del pendolo, α è il coefficiente di smorzamento, mentre $D_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ è la distanza fra il pendolo e l' i -esimo magnete,

$$D_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i) = \sqrt{(\tilde{x}_i - x)^2 + (\tilde{y}_i - y)^2 + z^2},$$

in cui z è la distanza fra il pendolo e il piano dove giacciono i magneti.

Scegliamo il sistema di riferimento in modo che le coordinate dei magneti sul piano siano date da $(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1) = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, 0\right)$, $(\tilde{x}_2, \tilde{y}_2) = \left(-\frac{1}{2\sqrt{3}}, -\frac{1}{2}\right)$, $(\tilde{x}_3, \tilde{y}_3) = \left(-\frac{1}{2\sqrt{3}}, \frac{1}{2}\right)$.

Con questa scelta il sistema possiede quattro punti fissi, di cui uno instabile (l'origine del sistema di riferimento) e tre stabili, e quindi possiede tre attrattori. Dato che il sistema è dissipativo tutte le traiettorie convergono in un punto fisso (fatta eccezione per alcune condizioni iniziali con misura nulla).

Le figure 4.10 e 4.11 [113] mostrano i bacini di attrazione dei tre punti fissi considerando traiettorie con velocità iniziale nulla. I colori indicano condizioni iniziali associate ai tre diversi attrattori, il successivo ingrandimento rivela strutture che si mescolano a scale sempre più piccole, suggerendo una struttura frattale ed una forte sensibilità alle condizioni iniziali.

Per un maggior approfondimento riguardo alla dinamica di questo sistema consigliamo la lettura delle fonti [113, 114].

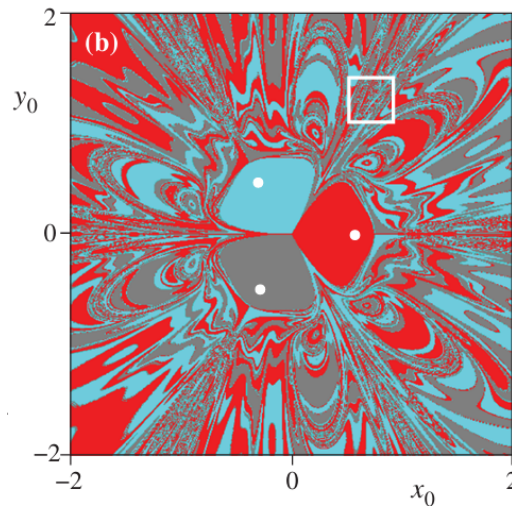


Figura 4.10. L'immagine rappresenta i bacini di attrazione del sistema.

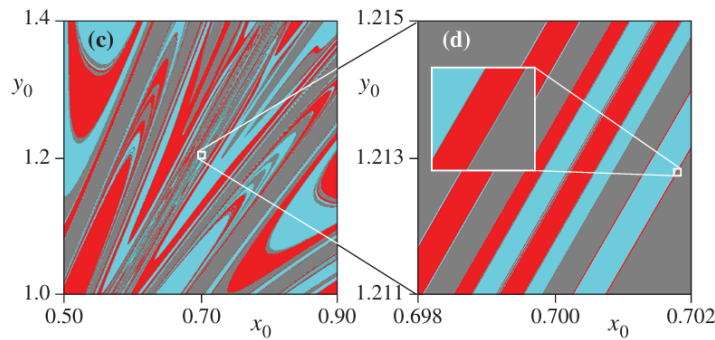


Figura 4.11. L'ingrandimento di una zona della precedente figura mostra una struttura frattale.

4.2.1 Proposta didattica relativa al pendolo magnetico

Lo scopo del gioco è quello di visualizzare la forte dipendenza dalle condizioni iniziali presente in alcuni sistemi fisici attraverso un sistema composto da un pendolo magnetico attratto da tre magneti posti sui vertici di un triangolo equilatero. Il pendolo è soggetto alla forza attrattiva dei magneti, alla forza di gravità e all'attrito viscoso dell'aria e l'insieme di queste forze fa sì che il pendolo, una volta, lasciato partire da una certa posizione iniziale, finisca la sua corsa in corrispondenza di uno dei tre magneti.

All'inizio del gioco viene creata una schermata contenente una mappa quadrata su cui sono disposti i tre magneti, caratterizzati da cerchi di colori diversi (rosso, blu e verde), mentre il pendolo è rappresentato invece da un cerchio bianco.

L'obiettivo è quello di capire cosa si intenda per caos deterministico e di comprendere che alcuni sistemi fisici hanno una forte dipendenza dalle condizioni iniziali.

Alla classe viene chiesto di giocare liberamente lasciando partire il pendolo da posizioni diverse. Quando il gioco finisce, ovvero quando il pendolo è arrivato ad uno dei tre magneti, un piccolo quadratino centrato sulla posizione iniziale del pendolo

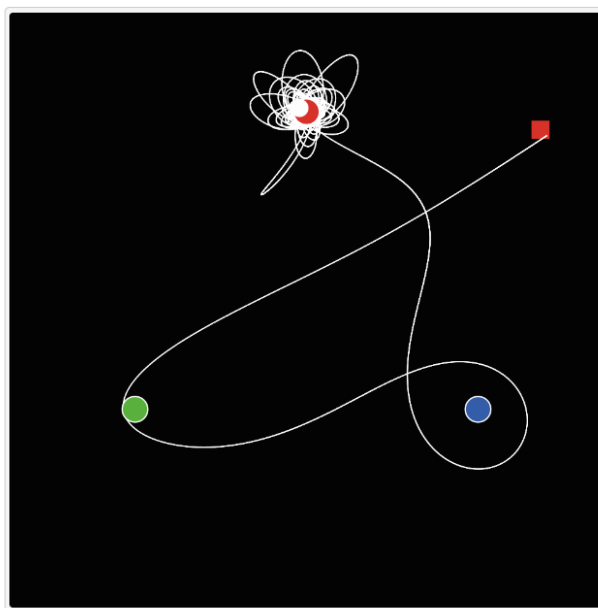


Figura 4.12. *L'immagine rappresenta la mappa da gioco in cui i cerchi colorati rappresentano i magneti, mentre il cerchio bianco rappresenta il pendolo. La linea continua è la traiettoria compiuta dal pendolo, il quadrato di colore rosso ci dà informazioni sulla zona di partenza del pendolo e su quella di arrivo.*

viene colorato con lo stesso colore del magnete di arrivo.

Dopo qualche minuto la classe si accorge dunque di alcune particolarità: esistono zone di partenza in cui il pendolo compie traiettorie molto simili fra loro e finisce sempre sullo stesso magnete, ed esistono zone di partenza in cui il pendolo compie curve molto insolite, come quella in fig. 4.12.

Come aiuto per capire meglio il gioco possono essere dati alcuni indizi sotto forma di domande come ad esempio “*cosa accade facendo partire il pendolo esattamente dalla stessa posizione?*”, “*cosa succede se parte invece da un punto molto vicino a quello da cui è partito in precedenza?*”

In questo modo studentesse e studenti possono riuscire a comprendere che nel primo caso, essendo le condizioni iniziali identiche, le traiettorie sono sempre le stesse (determinismo), mentre nel secondo caso le traiettorie possono cambiare anche molto per alcuni punti scelti (sensibilità alle condizioni iniziali), come si può notare in fig. 4.13.

Con la classe si può quindi riflettere su quanto questo tipo di dinamiche non siano quasi mai trattate nei corsi di studi ed è possibile discutere di altri esempi fisici, anche legati alla cultura pop, come il problema dei tre corpi.

Un test sul pendolo magnetico

Prima di concludere e passare ad un altro gioco abbiamo deciso di sottoporre la classe ad un test in modo da accertarsi della comprensione delle relative tematiche.

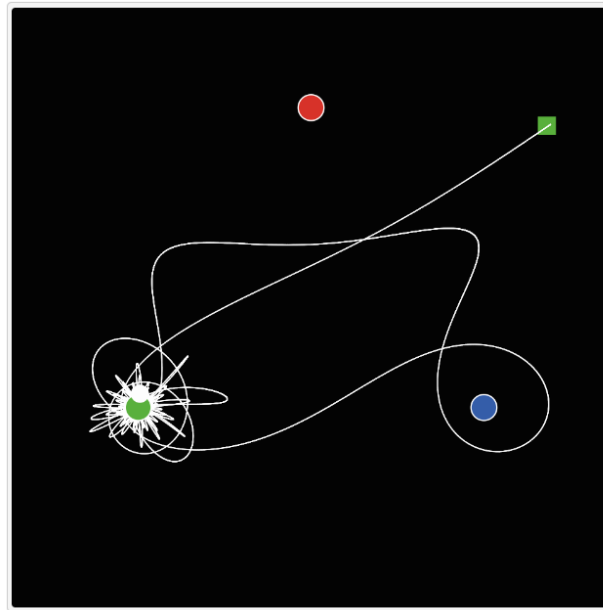


Figura 4.13. Si può notare che, nonostante la posizione iniziale sia cambiata di poco rispetto a prima, la traiettoria è completamente diversa rispetto alla precedente immagine.

Il tavolo da gioco è esattamente lo stesso sul quale la classe si è allenata, ma stavolta viene soltanto chiesto di scegliere un punto sulla mappa che risulti particolarmente sensibile alle condizioni iniziali, motivando anche la risposta.

4.3 Il modello di Kuramoto come spiegazione della sincronizzazione delle lucciole

Per quanto riguarda questa sezione faremo riferimento principalmente all'articolo di Strogatz "From Kuramoto to Crawford: exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators" [115] in cui viene svolta una ricostruzione storica e fisica riguardo la ricerca sul modello di Kuramoto.

Il modello di Kuramoto descrive una gran numero di oscillatori armonici accoppiati le cui frequenze naturali sono date da una certa distribuzione. La cosa interessante discende dal fatto che se il parametro di accoppiamento supera una certa soglia critica il sistema presenta una transizione di fase per cui gli oscillatori si sincronizzano ad una certa frequenza.

Gli esempi di utilizzo di questo modello sono molteplici e disparati, andando dalla biologia (la sincronizzazione del segnale luminoso delle lucciole che trattiamo nel gioco, ma anche il cinguettare all'unisono dei grilli), medicina (sincronizzazione delle cellule del cuore), fisica ed ingegneria (dai laser alle microonde fino alle giunzioni Josephson superconduttrici).

Il fenomeno della sincronizzazione collettiva è stato studiato per la prima volta da Wiener [116, 117], tuttavia un approccio migliore dal punto di vista matematico è stato dato da Winfree [118] il quale assunse che gli oscillatori fossero quasi identici

e che il loro accoppiamento fosse debole. Su piccole scale temporale gli oscillatori si rilassano fino ai loro cicli limite e possono essere descritti considerando soltanto le loro fasi, viceversa, su lunghe scale temporali queste fasi si evolvono a causa dell'interazione fra il debole accoppiamento e le differenze di frequenza fra gli oscillatori. Un'ulteriore semplificazione utilizzata è quella analoga ad un campo medio in fisica.

Secondo il suo modello risulta possibile scrivere

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \left(\sum_{j=1}^N X(\theta_j) \right) Z(\theta_i), \quad i = 1, \dots, N,$$

dove abbiamo indicato con θ_i la fase dell' i -esimo oscillatore, con ω_i la sua frequenza naturale, ed ogni oscillatore esercita un'influenza che dipende dalla fase data da $X(\theta_j)$ su tutti gli altri, ciascuno dei quali possiede una sensibilità che dipende dalla propria fase data dalla funzione $Z(\theta_i)$.

Attraverso simulazioni numeriche e alcune approssimazioni analitiche Winfree scoprì che il sistema poteva esibire una transizione di fase in cui, quando il primo termine è più grande del secondo, il sistema si comporta in modo incoerente ed ogni oscillatore procede con la sua frequenza naturale mentre, quando viene superata una certa soglia, un gruppo di oscillatori si sincronizza.

Questo fenomeno stupì Kuramoto inducendolo ad iniziare a lavorare su fenomeni di sincronizzazione collettiva con il suo primo articolo del 1975 [119]: stava nascendo il modello di Kuramoto.

Nel suo successivo articolo sull'argomento Kuramoto dimostra che per ogni sistema di oscillatori a ciclo limite debolmente accoppiati e quasi identici la dinamica per tempi lunghi è data da equazioni di fase del tipo

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \sum_{j=1}^N \Gamma_{ij}(\theta_j - \theta_i), \quad i = 1, \dots, N.$$

Stavolta la funzione di interazione Γ_{ij} è data e può essere calcolata come nella fonte [120].

Benché il modello sia drasticamente semplificato, rimane comunque abbastanza difficile da analizzare in generale. Come fece Winfree, anche Kuramoto riconobbe nell'approssimazione di campo medio una strada per arrivare un modello più trattabile ed il suo modello corrisponde proprio al caso più semplice possibile in cui l'accoppiamento è equipesato e puramente sinusoidale, ovvero

$$\Gamma_{ij}(\theta_j - \theta_i) = \frac{K}{N} \sin(\theta_j - \theta_i),$$

dove K rappresenta l'intensità dell'accoppiamento ed è ovviamente sempre positivo ($K \geq 0$), mentre il fattore N al denominatore assicura che il modello si comporti bene nel limite $N \rightarrow \infty$.

Supponiamo che le frequenze ω_i siano distribuite con densità di probabilità data da una certa funzione $g(\omega)$, che Kuramoto ipotizzò unimodale e simmetrica rispetto alla frequenza media Ω , ovvero $g(\Omega + \omega) = g(\Omega - \omega)$ per ogni ω .

Notiamo ora che il sistema possiede una simmetria rotazionale, per cui possiamo porre $\Omega = 0$ semplicemente ridefinendo $\theta_i \rightarrow \theta_i + \Omega t$, ovvero ruotando il sistema di un angolo Ω .

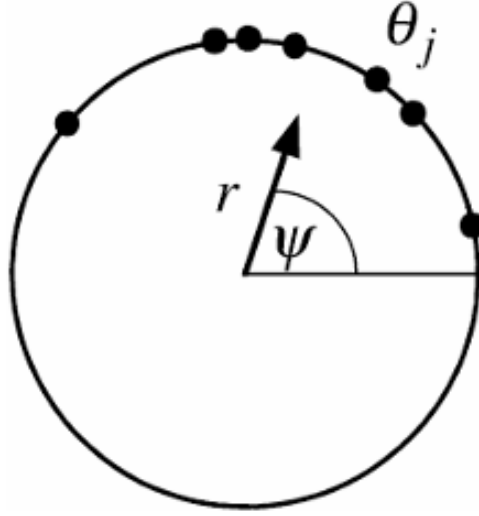


Figura 4.14. Rappresentazione geometrica del parametro d'ordine, in cui ogni punto possiede una certa fase θ_j , mentre il centroide è dato da $re^{i\psi}$.

Otteniamo allora la seguente equazione per le fasi degli oscillatori

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{K}{N} \sin(\theta_j - \theta_i), \quad i = 1, \dots, N.$$

Avendo posto $\Omega = 0$ risulta anche che $g(\omega) = g(-\omega) \forall \omega$, e dunque ω_i indica lo scarto rispetto alla frequenza media Ω .

Un'altra ipotesi che facciamo riguardo a $g(\omega)$ è che essa sia sempre decrescente nell'intervallo $[0, \infty)$ ($g(\omega) \geq g(v)$ con $v \geq \omega$), questo formalizza ciò che abbiamo definito con unimodale.

Per visualizzare meglio la dinamica delle fasi conviene considerare dei punti che si muovono su un cerchio nel piano complesso. Definiamo il parametro d'ordine r ,

$$re^{i\psi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j}. \quad (4.1)$$

Questa è una grandezza macroscopica interpretabile come il ritmo collettivo prodotto dall'intera popolazione e che corrisponde in un certo senso al centroide (o baricentro) delle fasi. Il raggio $r(t)$ misura la coerenza di fase, mentre $\psi(t)$ è la fase media, come mostrato in fig. 4.14 [115].

Il significato può essere il seguente: se tutti i punti sono molto vicini fra loro il valore del raggio è circa 1 e la popolazione si comporta come un grande oscillatore; se, al contrario, i punti sono distribuiti sulla circonferenza il raggio è quasi nullo e le singole oscillazioni si sommano in modo incoerente, senza riuscire a produrre un ritmo macroscopico.

Kuramoto [115] notò che l'equazione 4.1 può essere riscritta in modo che il significato del campo medio sia più evidente moltiplicando a sinistra e a destra per il fattore $e^{-i\theta_i}$,

$$re^{i(\psi-\theta_i)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i(\theta_j-\theta_i)}.$$

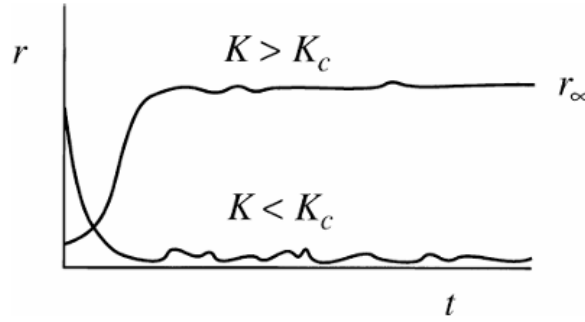


Figura 4.15. *L'immagine mostra r al variare del tempo sia nel caso in cui K sia sotto soglia che sopra soglia.*

Eguagliando adesso le parti immaginarie abbiamo che

$$r \sin(\psi - \theta_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i).$$

Sostituendo possiamo allora scrivere

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + Kr \sin(\psi - \theta_i), \quad i = 1, \dots, N.$$

In questa forma sembra che ogni oscillatore sia disaccoppiato dagli altri, sebbene in realtà stiano interagendo attraverso le grandezze r e ψ . Quando il termine di accoppiamento è grande si avrà quindi sincronizzazione, quando invece è piccolo potrà essere trascurato rispetto a ω_i ed ogni oscillatore procederà alla sua frequenza naturale.

Risulta interessante svolgere un'integrazione numerica del modello andando ad indagare l'andamento di r nel tempo. Scegliendo per semplicità la funzione $g(\omega)$ come una Gaussiana e variando il parametro di accoppiamento K si nota che quando questo è inferiore ad una certa soglia critica K_c gli oscillatori si comportano come se fossero disaccoppiati e le fasi si distribuiscono sulla circonferenza indipendentemente dalla condizione iniziale.

Quando invece il valore di K è sopra soglia $r(t)$ cresce esponenzialmente e si genera un'oscillazione collettiva. Ovviamente $r(t)$ non può crescere fino a valori infiniti e satura fino ad arrivare ad un certo valore $r_\infty < 1$, come mostrato in fig. 4.15 [115].

Kuramoto ha anche esplicitamente dimostrato che, nel caso in cui la distribuzione sia di tipo Lorentziano,

$$g(\omega) = \frac{\gamma}{\pi(\gamma^2 + \omega^2)}. \quad (4.2)$$

La relazione che lega r a K e che vale per ogni $K \geq K_c$ è data da

$$r = \sqrt{1 - \frac{K_c}{K}}. \quad (4.3)$$

Ciò che accade è in realtà una divisione della popolazione in due gruppi: gli oscillatori vicino al centro della distribuzione di frequenza si avvicinano alla frequenza

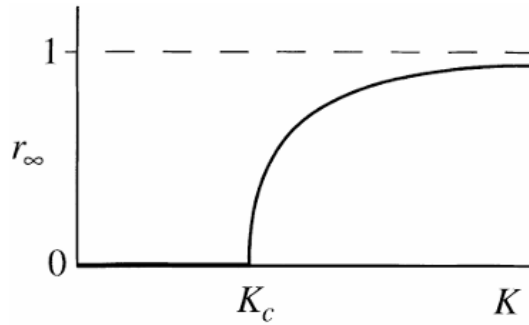


Figura 4.16. L'immagine mostra il valore asintotico di r al variare del parametro K , si può notare come sia presente una transizione proprio per il valore K_c .

media Ω e ruotano insieme con fase media data da $\psi(t)$, le frequenze che stanno sulla coda invece si spostano rispetto al cluster sincronizzato generando quindi quella che è definita come “sincronizzazione parziale”.

Aumentando il valore del parametro K sempre più oscillatori entrano nel cluster e anche il valore di r_∞ cresce come in fig. 4.16 [115] e sembra che dipenda soltanto da K e non dalle condizioni iniziali.

4.3.1 Proposta didattica sulla sincronizzazione delle lucciole

Lo scopo alla base del gioco è quello di far visualizzare il funzionamento delle transizioni di fase a studentesse e studenti utilizzando il modello di Kuramoto applicato ad un contesto il più possibilmente familiare, ovvero quello delle lucciole.

L'idea che è ci ha ispirati è il gioco *Fireflies*, disponibile sul sito della piattaforma Netlogo [121].

Il gioco simula il comportamento collettivo che hanno le lucciole, in particolare il loro modo di comunicare nell'accendersi o spegnersi.

All'inizio del gioco viene creata una mappa su cui sono disposte 100 lucciole su una griglia quadrata, ognuna delle quali si accende e spegne con una propria frequenza.

Ogni lucciola è capace di comunicare con le altre e l'efficacia nel farlo è misurata dall'unico parametro presente nel gioco, denotato dalla lettera K .

L'obiettivo della giocatrice o del giocatore è quello di comprendere la relazione fra la capacità di comunicazione (il parametro K) e la sincronizzazione delle lucciole, osservabile attraverso tre canali distinti:

- Grafico attraverso la mappa. È possibile osservare il loro luccichio e quindi capire in modo intuitivo quando le lucciole sono sincronizzate.
- Grafico cartesiano. Osservando il grafico in cui sono posti sull'asse verticale la funzione chiamata sincronizzazione (r nel modello di Kuramoto) in funzione del tempo sull'asse orizzontale, è possibile capire quando è raggiunta la sincronizzazione poiché la funzione tende ad un asintoto orizzontale se $K \geq K_c$, altrimenti quando il parametro $K < K_c$ si osserva un andamento oscillante.

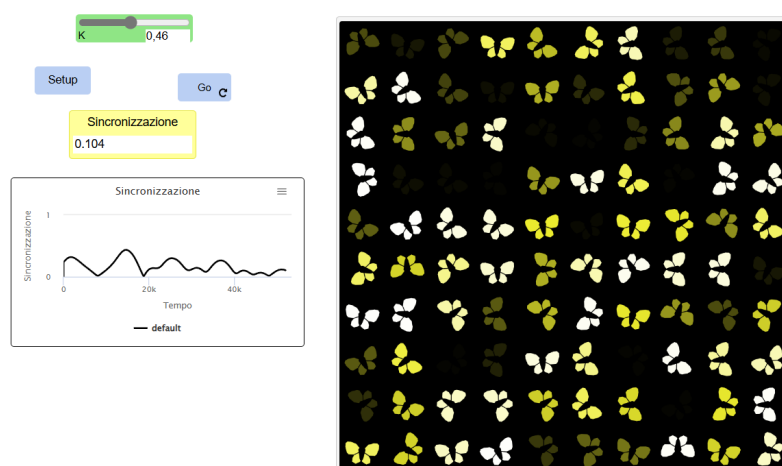


Figura 4.17. L'immagine rappresenta la mappa del gioco in cui si è scelto un valore di K più piccolo rispetto al valore critico. Si può notare sia dalla mappa che dal grafico che le lucciole non si stanno illuminando in sincronia.

- Valore numerico. Il valore della sincronizzazione è anche espresso numericamente e lo si può osservare attraverso un riquadro. Quando si ha sincronizzazione il questo valore rimane costante poiché le cifre significative con cui è espresso sono finite (abbiamo scelto tre cifre significative in particolare).

L'utilizzo di questi tre diversi canali permette un approccio più "olistico" al problema. Il primo canale, quello relativo all'osservazione sulla mappa, permette anche a chi non possiede una preparazione fisico-matematica sufficiente di intuire ciò che sta accadendo. Gli altri due permettono invece un approfondimento scientifico.

Il canale numerico permette, una volta scelto un valore per cui le lucciole sono sincronizzate, di far notare che il valore sta in realtà cambiando e che basta aumentare il numero di cifre lette per verificarlo, tuttavia una volta fissato il numero di cifre significative ad un certo punto verrà visualizzata una grandezza costante.

Infine il canale che fa riferimento al grafico cartesiano permette a studentesse e studenti di analizzare in modo più robusto, ma anche ludico, lo studio di funzione, in particolare il raggiungimento di un valore limite dato dall'asintoto.

In particolare l'obiettivo del gioco era espresso tramite la richiesta di trovare il valore soglia K_c per cui le lucciole risultano sincronizzate e riescono quindi ad accendersi e spegnersi simultaneamente. Per fare ciò è stato a volte offerto il consiglio di provare ad osservare cosa accade per piccoli e per grandi valori di K (come mostrano le fig. 4.17 e 4.18), facendoli così arrivare alla intuizione che se il sistema passa da essere non sincronizzato ad esserlo, probabilmente dovrà esistere un valore per cui avviene questa transizione.

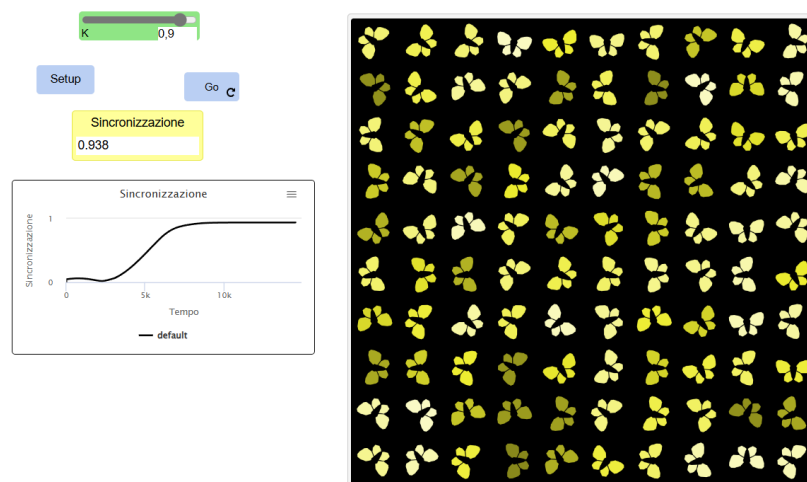


Figura 4.18. *L'immagine rappresenta la mappa del gioco in cui si è scelto un valore di K più grande rispetto al valore critico. Si può notare sia dalla mappa che dal grafico che le lucciole sono adesso sincronizzate.*

Capitolo 5

Procedura sperimentale e analisi qualitativa del lavoro

In questo capitolo andremo ad esporre la procedura che abbiamo effettuato nella nostra ricerca, che vuole essere un'investigazione sull'utilizzo di videogiochi intesi come *serious game* per l'insegnamento di tematiche non discusse generalmente nel contesto scolastico quali la fisica dei sistemi complessi.

In seconda battuta svolgeremo un'analisi qualitativa delle risposte ricevute da studentesse e studenti, risposte che sono state date attraverso due modalità (entrambe in forma anonima): la prima attraverso domande aperte in forma cartacea, effettuate direttamente durante la somministrazione dei giochi; la seconda attraverso un modulo Google da effettuare in completa libertà.

Risulta ovvio che la seconda modalità ci ha fornito un numero nettamente minore di risposte, ma con il vantaggio di un'analisi molto più celere delle risposte stesse.

Questa difficoltà è stata risolta parzialmente ponendo alcune domande attraverso entrambe le modalità in modo da avere una maggior sicurezza di poterle ricevere.

L'analisi che proporremo mette quindi insieme le due tipologie di risposte, qualche volta non pienamente concordanti fra loro, introducendo quindi un errore dovuto alla nostra interpretazione ma con il vantaggio di una risposta chiara.

5.1 La procedura sperimentale

La nostra indagine è stata svolta grazie alla disponibilità di una scuola fiorentina comprendente sia un liceo scientifico che un liceo delle scienze umane con opzione economico sociale.

In particolare siamo riusciti a proporre i giochi a tutte le classi, dalla prima alla quinta, di entrambi gli indirizzi scolastici ottenendo 113 risposte attraverso il modulo Google e 158 risposte dalla modalità cartacea.

La scuola si è resa disponibile per due ore scolastiche (ogni ora scolastica è di 55 minuti) per ogni classe ed i giochi sono stati effettuati presso l'aula di informatica della scuola stessa.

Una volta che la classe veniva trasferita in aula informatica, dove i computer erano solitamente già stati accesi, alla classe veniva data una breve spiegazione dell'at-

tività che sarebbe stata svolta, informandoli anche che avrebbero potuto rispondere ad alcune domande in forma anonima.

Per far sì che le risposte fossero fornite senza l'utilizzo di dati sensibili è stato fatto sorteggiare a mano ad ogni alunno e alunna un codice alfanumerico precedentemente preparato. Questo codice è stato poi utilizzato per identificarsi sia attraverso la modalità cartacea che per mezzo del modulo Google.

Una volta estratti i loro identificativi siamo potuti partire con l'attività. Prima di ogni gioco sono stati quindi lasciati i fogli a ciascun membro della classe, contenenti le domande relative ad ogni gioco.

Insieme ai fogli contenenti le domande è stato inoltre dato un foglio in cui poter scrivere alcune risposte a domande che sarebbero state effettuate anche tramite il modulo Google. Questa idea, purtroppo, ci è venuta in mente soltanto dopo la prima attività, dopo aver notato che studentesse e studenti non ricordavano bene le risposte scritte sul foglio.

In ordine cronologico sono stati svolti i seguenti giochi:

- gioco sulla *site percolation* dal titolo “*forest fire*”;
- gioco sulla *mixed percolation* dal titolo “*forest fire with probability*”;
- test sull'incendio della foresta dal titolo “*forest fire test*”;
- gioco sulla sensibilità alle condizioni iniziali dal titolo “*chaotic pendulum*”;
- test relativo al precedente gioco dal titolo “*chaotic pendulum test*”;
- gioco relativo al modello di Kuramoto e alla sincronizzazione delle lucciole dal titolo “*lucciole*”.

Prima dello svolgimento di ogni gioco sono state elencate le regole e le istruzioni del gioco stesso, lasciando spazio per le domande. Quando possibile abbiamo cercato anche di instaurare un dialogo con la classe ponendo domande o facendo notare alcuni aspetti, ad esempio possibili somiglianze fra modelli di percolazione e modelli epidemiologici oppure cercando insieme alcuni esempi di sistemi fisici caotici.

A fine attività veniva quindi inviato il modulo Google, chiedendo gentilmente di svolgerlo il prima possibile.

Alcune criticità

Una delle più grosse difficoltà incontrate nella realizzazione del progetto è sicuramente dovuta al fattore tempo: le due ore scolastiche, che corrispondono a un'ora e cinquanta minuti, diventano di fatto meno poiché del tempo veniva in qualche modo perso dalla classe per arrivare in aula informatica, sedersi, fare silenzio, nonché per prepararsi all'ora di lezione successiva.

Parte del tempo era dedicato alle domande, nel nostro caso in forma scritta in modo da poter essere raccolte. Tuttavia, all'interno di un progetto già avviato, le stesse domande possono essere poste oralmente con lo scopo di creare un clima di discussione attiva.

Che classe di scuola o anno di università frequenti?

113 risposte

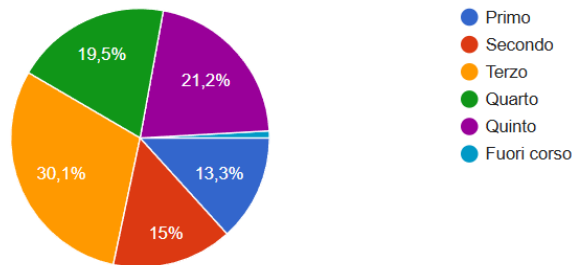


Figura 5.1. La suddivisione di genere in base agli anni scolastici, come si può notare, è abbastanza omogenea.

Probabilmente per realizzare un'attività di *gaming* di questo tipo potrebbero essere necessarie almeno il doppio delle ore, in modo da dare la possibilità a studenti e studentesse di prendere confidenza coi giochi, creare un legame più forte fra docente e classe e dare maggiore spazio alla discussione e alla *peer instruction*.

Un'altra criticità è stata creata dal fattore spazio, dato che l'aula di informatica era a malapena capace di contenere una classe e le postazioni dei computer erano molto vicine l'una all'altra.

Questo, in aggiunta al fatto che per loro fosse una delle rare esperienze di attività in aula informatica, ha portato spesso a perdite di concentrazione.

A posteriori, probabilmente, sarebbe stato più interessante condurre un'indagine considerando numeri più piccoli di giocatrici e giocatori, concedendo loro più tempo.

5.2 Analisi qualitativa sulle risposte ricevute attraverso il modulo Google

All'interno dell'insieme delle persone che hanno risposto al modulo Google, 60 si dichiarano di genere maschile, 48 di genere femminile, 3 di genere non binario, mentre 2 persone non vogliono dichiararlo, come mostrato in fig. 5.1.

La suddivisione per classe, indirizzo e genere è riportata in tabella in tabella 5.1.

5.2.1 Utilizzo di giochi e videogiochi

Fra le domande che abbiamo posto tramite il modulo online ve ne erano alcune specifiche sull'utilizzo dei videogiochi o dei giochi da tavolo/di ruolo.

Per entrambi i tipi di gioco si osserva una diminuzione dell'attività ludica con la crescita di studenti e studentesse. È interessante notare che l'utilizzo di videogiochi è comunque maggiore rispetto a quello di giochi da tavolo o di ruolo. Per avere un'idea più chiara si faccia riferimento alle figure 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

	1LS	1LES	2LS	2LES	3LS	3LES	4LS	4LES	5LS	5LES
M	6	1	4	3	13	6	9	4	10	4
F	2	6	1	7	5	9	3	4	8	2
Altro/non voglio dichiararlo	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
Non binario	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0

Tabella 5.1. La tabella presenta la suddivisione di genere in base agli anni scolastici e all'indirizzo. LS significa liceo scientifico, mentre LES significa liceo economico sociale.

Attualmente utilizzi videogiochi?

113 risposte

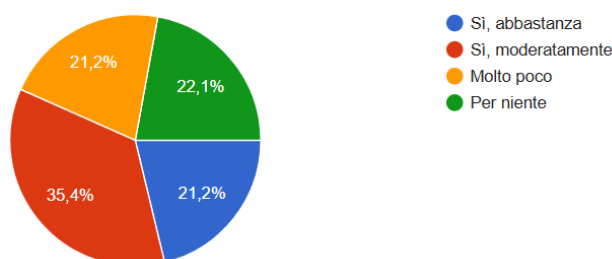


Figura 5.2. Circa metà dei partecipanti al sondaggio afferma di essere un giocatore o una giocatrice di videogiochi.

5.2.2 Gradimento dei giochi e difficoltà trovate

Una sezione del modulo Google è stata dedicata a sondare sia il gradimento dei giochi proposti che la difficoltà trovata.

Possiamo notare che “*forest fire*” è piaciuto abbastanza, molto o moltissimo a più dell’80% (si veda la fig. 5.6), nonostante metà dei giocatori o delle giocatrici lo abbia comunque trovato difficile, come mostrato in fig. 5.7.

Lo stesso vale per il gioco “*forest fire with probability*”, il quale ha un indice di gradimento simile, come mostrato in fig. 5.8 nonostante il 60% lo abbia giudicato difficile (si veda la fig. 5.9).

Concludiamo i giochi riguardanti l’incendio nella foresta con il gioco/test. Anche questo gioco rimane sulla stessa lunghezza d’onda dei due precedenti per quanto riguarda sia il gradimento che la difficoltà percepita, come possiamo notare nelle fig. 5.10 e 5.11.

Anche i giochi relativi alla sensibilità alle condizioni iniziali, ovvero i “*chaotic pendulum*” hanno avuto un riscontro positivo per più del 70% per quanto riguarda il gradimento come mostrato in fig. 5.12, con analoghe percentuali riguardanti la difficoltà percepita (si veda le fig. 5.13 e 5.15).

L’ultimo gioco proposto, quello sulla sincronizzazione delle lucciole, è piaciuto abbastanza, molto o moltissimo a quasi l’80% delle giocatrici o dei giocatori come mostra la fig. 5.15, risultando comunque anch’esso difficoltoso per più della metà

Hai utilizzato videogiochi in passato?

113 risposte

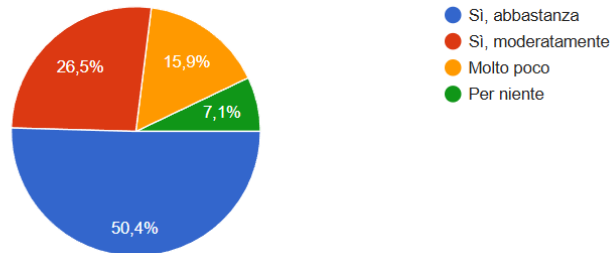


Figura 5.3. Più di 3/4 dei partecipanti al sondaggio afferma di essere stato un giocatore o una giocatrice di videogiochi in passato.

Attualmente utilizzi giochi da tavolo o di ruolo?

113 risposte

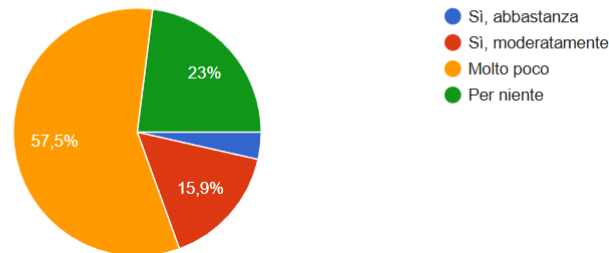


Figura 5.4. Soltanto una piccola parte dei partecipanti al sondaggio afferma di essere un giocatore o una giocatrice di giochi da tavolo o di ruolo.

dei partecipanti o delle partecipanti (si veda la fig. 5.16).

Analisi sui commenti e sulle critiche effettuate

Buona parte delle persone che hanno compilato il modulo Google hanno anche voluto esprimere alcuni commenti e critiche riguardo alla attività.

Molti di loro hanno espresso commenti positivi come “carina”, “molto interessante”, “divertente”, “piacevole”, “molto istruttiva”, “utile”, “formativa”, tuttavia una più piccola parte ha espresso disappunto ritenendo l’attività “pressoché noiosa”, “noiosa e difficile”, o semplicemente è “piaciuta poco”.

In questa sezione leggeremo e commenteremo alcune critiche sia positive che negative e che riteniamo meritevoli di attenzione:

- “è stato piacevole cambiare un po’ le abitudini e fare un lavoro sul computer”;
“bell’attività da fare più spesso”;
“mi è sembrata un’attività molto interessante e diversa dal solito. La riproporrei anche per altre discipline”.

Hai utilizzato giochi da tavolo o di ruolo in passato?

113 risposte

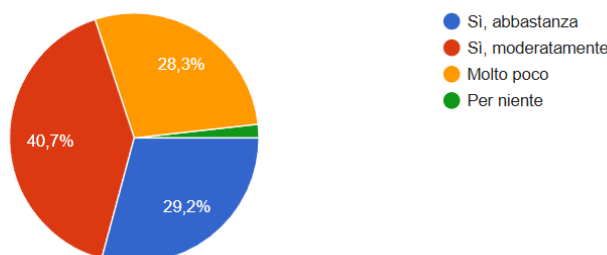


Figura 5.5. Buona parte dei partecipanti al sondaggio afferma di essere stato un giocatore o una giocatrice di giochi da tavolo o di ruolo in passato.

Quanto hai gradito il primo gioco riguardante l'incendio nella foresta?

113 risposte

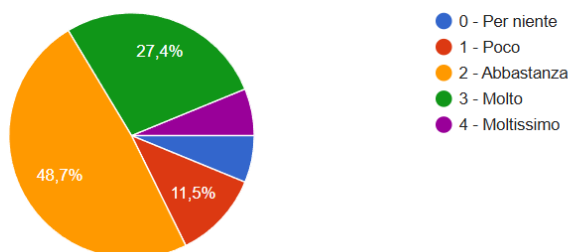


Figura 5.6. In questo grafico possiamo notare l'elevato tasso di gradimento di forest fire.

Possiamo notare da questi commenti come studentesse e studenti siano contenti di svolgere attività diverse dalla lezione frontale e che li spingano anche fuori dalla classe

- *“l'attività svolta è stata interessante per avere un approccio più vicino a questi studi”;*
“è stata un'attività ricreativa che ti permette di comprendere più facilmente la fisica”;
“è stata un'attività divertente che offre punti di vista più giocosi per osservare fenomeni fisici”.

I commenti risultano positivi anche per quanto riguarda l'attinenza con i fenomeni fisici. Come vedremo nel prossimo punto però, non tutti e tutte hanno trovato questa connessione così banale.

- *“questi giochi mi sono piaciuti molto, l'unica cosa che mi sarebbe piaciuta di più è avere delle istruzioni più precise”;*
“avrei voluto approfondire di più il gioco del pendolo, visto che è correlato al problema dei tre corpi che ho scoperto di recente e che mi aveva incuriosito. In generale, però, ciascuno dei giochi sembrava non avesse uno scopo preciso,

Quale grado di difficoltà daresti al primo gioco riguardante l'incendio nella foresta?

113 risposte

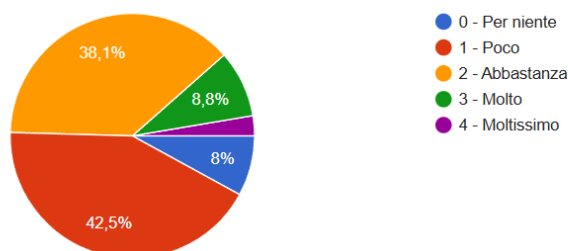


Figura 5.7. Circa metà dei partecipanti al sondaggio afferma di aver trovato difficoltà in forest fire.

Quanto hai gradito il secondo gioco riguardante l'incendio nella foresta?

113 risposte

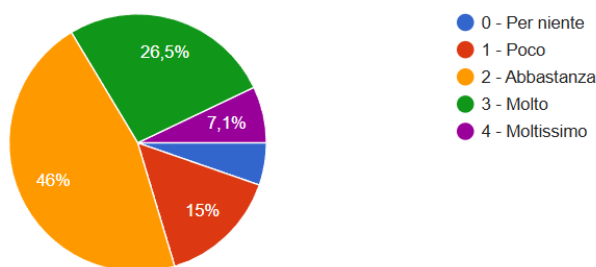


Figura 5.8. In questo grafico possiamo notare l'elevato tasso di gradimento di forest fire with probability.

soprattutto perché nessuno ha spiegato a cosa fossero correlati (fisica, matematica e altre materie scientifiche”;

“avrei forse aumentato la quantità di giochi e le spiegazioni scientifiche su di essi ma in generale è stata un'esperienza interessante e divertente”;

“sono un po' particolari perché non ho capito il funzionamento e lo scopo”;

“a cosa serve?”;

“non ho compreso il significato dell'attività”.

Possiamo notare come una parte degli studenti e delle studentesse non abbiano capito come i giochi avessero a che fare davvero con i fenomeni naturali o non trovassero uno scopo o un significato al gioco.

Probabilmente ciò è dovuto al fatto che le nostre prestazioni come insegnanti hanno una certa variabilità sia temporale (alcuni giorni si hanno prestazioni migliori di altri), sia nello spiegare concetti ad alunni e alunne, anche loro molto eterogenei.

Questo problema potrebbe essere quantomeno reso più lieve concedendo più tempo all'attività.

- “belli i giochi che abbiamo svolto anche perché erano giochi di logica”;

Quale grado di difficoltà daresti al secondo gioco riguardante l'incendio nella foresta?

113 risposte

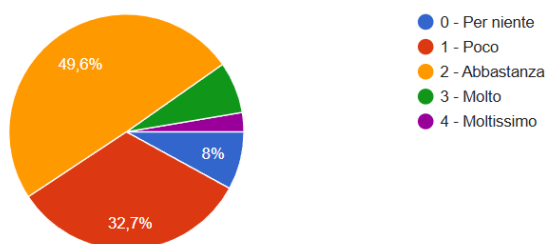


Figura 5.9. Più della metà dei partecipanti al sondaggio afferma di aver trovato difficoltà in forest fire with probability

Quanto hai gradito il gioco riguardante il test sull'incendio nella foresta?

113 risposte

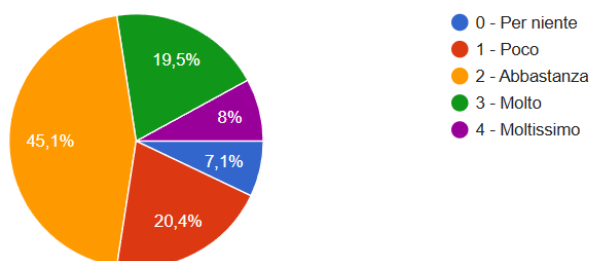


Figura 5.10. In questo grafico possiamo notare l'elevato tasso di gradimento di questo gioco/test.

“non ho nessuna critica sui giochi che mi hanno proposto perché comunque erano interessanti e interattivi”;

“divertente, semplice nel capire cosa fare e come ma non nella risoluzione, giustamente”;

“secondo me è stato interessante ma anche complicato e lungo”;

“bella attività, magari però un pochino più movimentata era meglio”.

Come possiamo notare alcuni giocatori e giocatrici hanno evidenziato il fatto che fossero forse più giochi risolvibili con la logica che con la matematica o la fisica, ciò avrebbe infatti portato a risultati fortemente dipendenti dal percorso scolastico svolto.

Il fatto che ci siano anche commenti positivi per quanto concerne l'interattività e la difficoltà, presente ma adeguata, ci fa pensare che i giochi fossero ben bilanciati.

Le critiche riguardano sia la lunghezza che la “complicatezza”, oltre alla richiesta di più “movimento”, forse interpretabile con più dialogo.

Concludiamo questa sezione con leggerezza grazie a commenti che, personalmente, ci hanno fatto sorridere

Quale grado di difficoltà daresti al gioco riguardante il test sull'incendio nella foresta?

113 risposte

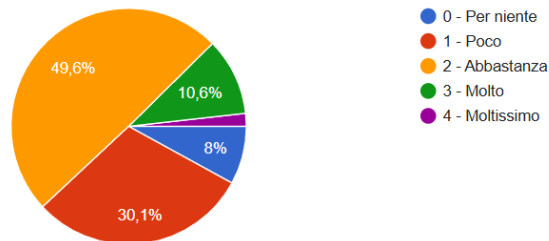


Figura 5.11. Più della metà dei partecipanti al sondaggio afferma di aver trovato difficoltà col test riguardante l'incendio nella foresta

Quanto hai gradito il gioco riguardante il pendolo magnetico?

113 risposte

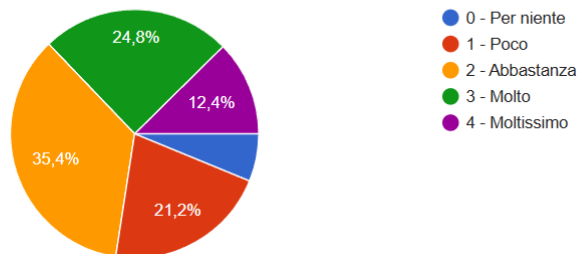


Figura 5.12. In questo grafico possiamo notare l'alto tasso di gradimento dei giochi chaotic pendulum.

- “non farò mai fisica e ho avuto di nuovo la conferma, grazie”;
“mi ha occupato le ore di ginnastica, però era molto interessante”

5.3 Analisi qualitativa delle risposte ottenute sui fogli cartacei

Analizzando le risposte che studentesse e studenti hanno fornito alle domande fatte possiamo affermare che per quanto riguarda i giochi relativi all'incendio nella foresta hanno quasi tutti compreso la relazione presente fra la percentuali di alberi bruciati e la densità (e anche dimensione) degli alberi.

Molti notano inoltre che può essere presente un'alta variabilità provando ad eseguire il gioco utilizzando gli stessi parametri, e che questa variabilità è dovuta sia alla disposizione degli alberi che all'albero che dà il via all'incendio.

Di seguito riportiamo alcune risposte ricevute da giocatori e giocatrici riguardo a quanto appena affermato:

- *In alcuni casi la percentuale di alberi bruciati rimane la stessa, in altri casi cambiando la disposizione il valore cambia. Più la densità è alta, più alberi*

Quale grado di difficoltà daresti al gioco riguardante il pendolo magnetico?

113 risposte

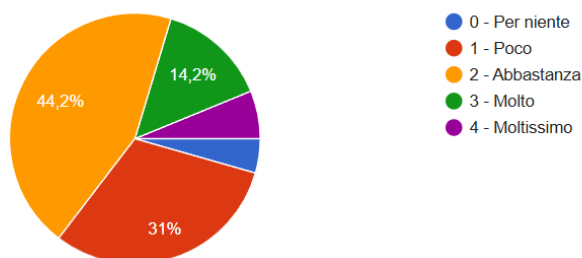


Figura 5.13. Più della metà dei partecipanti al sondaggio afferma di aver trovato difficoltà in chaotic pendulum.

Quale grado di difficoltà daresti al gioco riguardante il test sul pendolo magnetico?

113 risposte

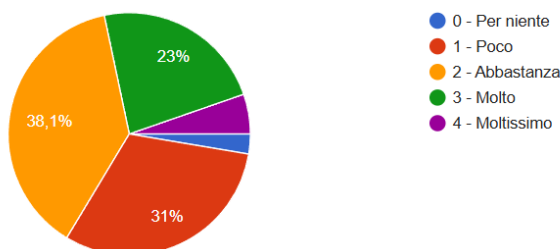


Figura 5.14. Più della metà dei partecipanti al sondaggio afferma di aver trovato difficoltà nel test su pendolo magnetico.

verranno bruciati e la percentuale è la stessa. Più la densità è bassa, meno alberi bruceranno e la percentuale non cambierà. Se rimaniamo su una densità media i valori cambieranno maggiormente.

- Si può notare che, nonostante lo stesso valore di densità degli alberi, in base al punto di nascita del fuoco si avrà una percentuale più o meno bassa di alberi bruciati.
- La densità non comporta un risultato sicuramente più alto, ma solo il potenziale danno. Lo stesso valore produce risultati diversi proprio a causa di una differente disposizione fra una prova e l'altra.

Da una piccola parte delle risposte emerge una difficoltà nel capire cosa sia una relazione fra grandezze, ad esempio alcuni studenti e studentesse affermano che la percentuale di alberi bruciati aumenta se aumenta la loro densità, rispondendo successivamente che non esiste alcuna relazione fra le due grandezze facendo così emergere una contraddizione.

Una spiegazione può essere data dal fatto che alcuni di loro conoscono probabilmente pochi tipi di relazioni matematiche, in particolare spesso si riferiscono solamente a relazioni di proporzionalità diretta o inversa.

Quanto hai gradito il gioco la sincronizzazione delle lucciole?

113 risposte

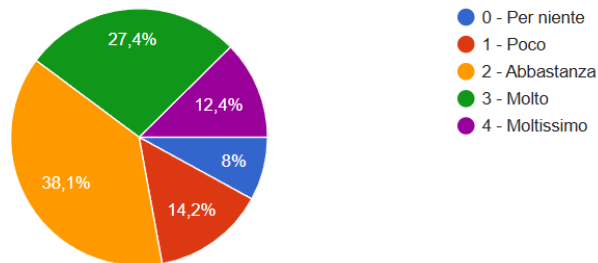


Figura 5.15. Possiamo notare l'elevato tasso di gradimento sul gioco sulla sincronizzazione delle lucciole.

Quale grado di difficoltà daresti al gioco riguardante la sincronizzazione delle lucciole?

113 risposte

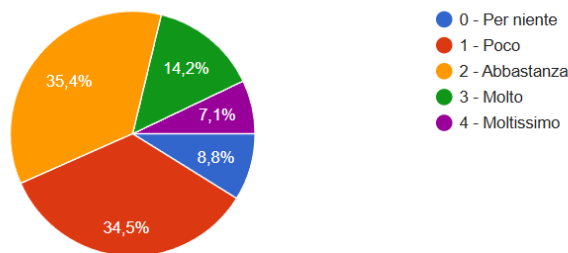


Figura 5.16. Più della metà dei partecipanti al sondaggio afferma di aver trovato difficoltà nel gioco sulla sincronizzazione delle lucciole

Nonostante durante l'esperienza non ci siamo soffermati sulla possibile relazione fra l'espansione dell'incendio ed il relativo tempo di propagazione, alcuni studenti e studentesse hanno posto l'accento proprio su questo legame. Di seguito alcune loro risposte a riguardo:

- *Questo gioco secondo me serve per capire in quanto tempo e quanti alberi si brucerebbero così da prevederlo nella vita reale.*
- *Possiamo capire che la disposizione degli alberi è essenziale per ridurre la percentuale di alberi bruciati e che agire nei primi minuti di un incendio può prevenire una catastrofe*
- *Serve a calcolare in quanto tempo il fuoco si espande in un bosco.*

Domandando quale fosse il funzionamento e il significato dei giochi riguardanti l'incendio nella foresta sono emerse alcune risposte interessanti e che abbiamo deciso di riportare:

- *Il suo funzionamento è dimostrare come una piccola variazione possa condurre a risultati diversi.*

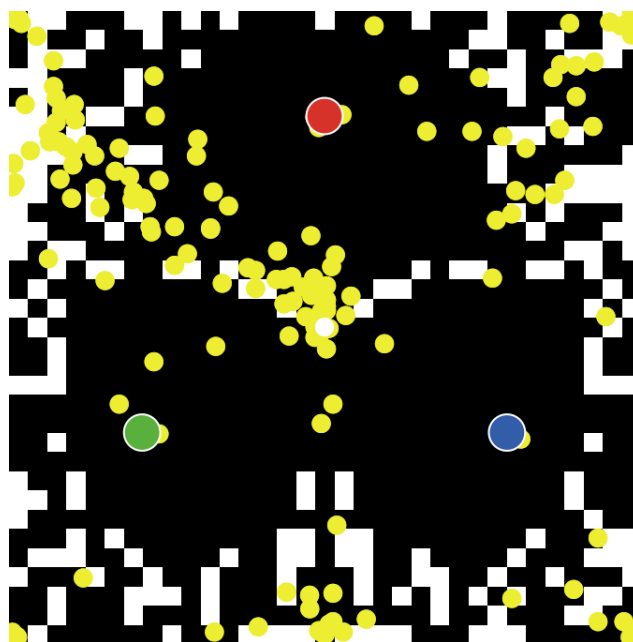


Figura 5.17. *I punti colorati di giallo rappresentano le scelte fatte da giocatrici e giocatori. Sullo sfondo sono presenti in bianco le zone considerate più sensibili alle condizioni iniziali, mentre in nero quelle meno sensibili.*

- *Questo gioco rispecchia un po' la civiltà di oggi in quanto con un numero smisurato di persone appena succede qualcosa si diffonde molto velocemente a partire dalla moda fino alle malattie.*
- *Una piantumazione o un disboscamento controllato può prevenire/controllare un incendio.*

Ci ha fatto inoltre piacere leggere il commento di una studentessa, la quale afferma che il significato del gioco è “*spiegare la fisica trovando un modo alternativo*” e “*per imparare meglio la fisica*”.

È interessante notare che nei giochi/test sull'incendio nella foresta e sul pendolo magnetico alcuni studenti e studentesse affermino di scegliere un valore del raggio “a caso”, ma sospettiamo che una risposta di questo tipo sia dovuta alla loro bassa capacità di esprimersi: non stanno effettivamente compiendo una scelta casuale ma, pur ragionando sulla loro decisione, non sanno come esternare il procedimento logico-deduttivo che li ha portati a tale scelta.

Fra chi motiva la propria scelta emergono risposte degne di nota come le seguenti:

- *Ho posto la circonferenza dove la densità stava diminuendo così era più difficile che l'incendio si propagasse ancora di più.*
- *Ho scelto come raggio 19,6 perché prendeva un'area dove gli alberi erano ancora vicini tra loro.*
- *Essendo l'albero bruciato al centro circondato da alberi grandi e vicini fra loro, sarebbero bruciati sicuramente, mentre quelli più lontani erano piccoli e lontani tra loro quindi non si sarebbe propagato tanto.*

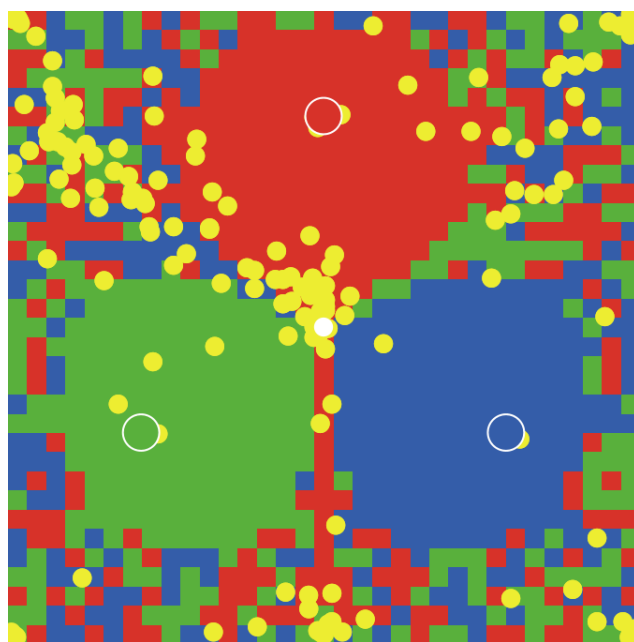


Figura 5.18. *I punti colorati di giallo rappresentano le scelte fatte da giocatrici e giocatori. Sullo sfondo sono presenti i bacini di attrazione con i colori relativi ai rispettivi magneti.*

Anche riguardo al gioco sul pendolo magnetico le risposte ci fanno pensare che sia stata compresa da quasi tutti e tutte la caratteristica fondamentale: la sensibilità alle condizioni iniziali di alcuni sistemi fisici. Ad esempio uno studente o una studentessa quando viene chiesto cosa nota facendo più simulazioni in cui il pendolo parte da diversi punti vicini fra loro risponde che *“in alcuni casi torna nello stesso magnete, ma a volte questo varia. Questa cosa non accade se il punto di partenza è troppo vicino ad un magnete”*.

Altri o altre affermano che il comportamento è dovuto al fatto che *“ci sono campi magnetici strani”* o che *“la fisica è imprevedibile”*.

È poi interessante analizzare le scelte fatte da studentesse e studenti nel test di questo gioco: molti hanno infatti risposto che le zone più sensibili alle condizioni iniziali sono date o dal centro della mappa, oppure da zone periferiche o nel segmento di retta che congiunge due magneti.

In fig. 5.17 e in fig. 5.18 è presente la distribuzione dei punti scelti da giocatori e giocatrici sulla mappa, con i relativi bacini di attrazione sullo sfondo.

Il gioco sulla sincronizzazione delle lucciole è stato sicuramente quello meno compreso. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che venisse proposto per ultimo, quando rimaneva poco tempo per poter giocare e con la classe stanca dall'attività già svolta.

Nonostante questo, una parte degli studenti e studentesse dimostra di aver capito il fenomeno di transizione che porta le lucciole a sincronizzarsi, ad esempio una studentessa risponde che *“a seconda del parametro K dato varia la sincronizzazione delle lucciole e sotto lo 0,64 nel parametro K la sincronizzazione non è stabile ma in decrescita e dunque le lucciole non sono sincronizzate mentre sopra*

lo 0,64 del parametro K noto che le lucciole più o meno gradualmente andranno a sincronizzarsi”.

Qualcuno nota anche che più è alto il valore del parametro K (ovviamente deve essere comunque più grande del valore critico) e più le lucciole sono sincronizzate.

Altre studentesse o studenti affermano poi che lo scopo del gioco è quello di *“osservare la stabilità su un grafico”* o che *“permette di ottenere, come un problema di ottimizzazione, il valore minimo per il quale ottenere la sincronizzazione degli elementi del sistema”*.

Capitolo 6

Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato quello di indagare una metodologia didattica diversa rispetto a quella frontale, in particolare applicando un approccio di tipo ludico attraverso l'utilizzo del videogioco.

A questo scopo abbiamo sviluppato alcuni videogiochi il cui argomento scientifico centrale non fosse compreso nel curriculum della scuola secondaria di secondo grado, come fenomeni non lineari, sensibilità alle condizioni iniziali e transizioni di fase.

Uno dei motivi per cui pensiamo che un approccio all'insegnamento di questo tipo possa risultare utile a studentesse e studenti è nell'incoraggiare il riconoscimento di strutture comuni in fenomeni legati a discipline reputate molto diverse fra loro, soprattutto in contesto scolastico.

Riteniamo inoltre che la mancata trattazione di fenomeni non lineari, spesso presenti nella vita quotidiana, possa generare l'impressione che la fisica insegnata e appresa a scuola sia completamente scollegata dalla realtà.

Abbiamo quindi scelto di suddividere il lavoro di tesi in quattro parti: le prime due per introdurre il lettore o la lettrice alla didattica della fisica e al gioco come attività ludica e didattica; nella terza parte ci siamo concentrati sui modelli fisici su cui si sono basati i videogiochi che abbiamo sviluppato, sulla loro descrizione e sulla proposta didattica realizzata; nell'ultima parte, infine, abbiamo descritto la procedura sperimentale che abbiamo scelto di adottare, assieme ad un'analisi dei risultati ottenuti.

Il nostro lavoro vuole essere un'indagine esplorativa, pertanto l'analisi svolta non è stata di tipo quantitativo ma solo qualitativo poiché ci siamo voluti concentrare maggiormente sulla fattibilità dell'indagine proposta, riservandoci di svolgere in futuro una trattazione diversa.

Dall'analisi sul gradimento e sulle difficoltà trovate durante l'attività siamo orgogliosi di poter affermare che tutti i giochi proposti sono piaciuti, nonostante gli ostacoli che studentesse e studenti affermano di aver trovato nel loro svolgimento.

Dalle critiche, sia positive che negative, emerge sia la volontà di svolgere attività scolastiche diverse dalla didattica frontale, sia il piacere nel divertirsi imparando. D'altra parte dobbiamo tuttavia ammettere che per alcune studentesse e studenti l'attività svolta non è stata molto chiara, e parte di loro avrebbe preferito ricevere più spiegazioni ed avere meno libertà d'azione.

Sia dalle risposte ricevute che dalle nostre impressioni emergono alcune perplessità e criticità riguardo al lavoro svolto.

Una delle più grandi difficoltà è stata quella di concentrare l'attività in meno di due ore e, probabilmente, un'attività strutturata di questo tipo potrebbe richiedere anche il doppio del tempo per essere svolta nel modo più ottimale possibile.

Una maggior disponibilità di ore potrebbe fornire la possibilità a studenti e studentesse di prendere maggior confidenza con le dinamiche di gioco, creando anche un legame più forte fra docente e classe.

In futuro pensiamo di continuare a proporre l'attività anche ad altre scuole, richiedendo finestre temporali maggiori o suddividendo l'attività in più sessioni di gioco, e concentrandoci maggiormente sugli aspetti didattici (ad esempio lasciando più spazio per la discussione e la *peer instruction*) e ludici, diminuendo le domande poste per via scritta.

Bibliografia

- [1] Franco Bagnoli, Giorgio Gronchi et al. «Perché la fisica è così difficile? Why is physics so difficult?» In: *PH* 2 (2019), pp. 23–41.
- [2] Susan J Hespos e Kristy VanMarle. «Physics for infants: Characterizing the origins of knowledge about objects, substances, and number». In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science* 3.1 (2012), pp. 19–27.
- [3] G Vallortigara. «The Origins of Physics, Number and Space Cognition: Insights from a Chick’s Brain.» In: *MAN EV* 28.1-2 (2013), p. 17.
- [4] Hui Zeng et al. «EVALUATION OF INTERACTIVE GAME-BASED LEARNING IN PHYSICS DOMAIN». In: *Journal of Baltic Science Education* 19.3 (giu. 2020), pp. 484–498. ISSN: 1648-3898. DOI: 10.33225/jbse/20.19.484. URL: <http://dx.doi.org/10.33225/jbse/20.19.484>.
- [5] Lorenzo Fantoni. *Vivere mille vite. Storia familiare dei videogiochi*. it. 2020.
- [6] *Wikipedia: Asteroids (video game)*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroids_\(video_game\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroids_(video_game)). Last accessed: 2024-08-25.
- [7] *Wikipedia: Physics engine*. https://en.wikipedia.org/wiki/Physics_engine. Last accessed: 2024-08-25.
- [8] *Centro di Ricerca Interdipartimentale Giochi per il Cambiamento Sociale (GiX)*. <https://www.gix.unifi.it/>. Last accessed: 2024-08-25.
- [9] Olivia Levrini et al. «La scienza dei sistemi complessi e le sue strutture temporali per un’educazione STEAM orientata al futuro». In: ().
- [10] Laurence Viennot. *Raisonner en physique: La part du sens commun*. fr. De Boeck Supérieur, giu. 1996.
- [11] Ugo Besson. *Didattica della fisica*. it. Roma: Carocci, 2015.
- [12] Michela Mayer e Matilde Vicentini, cur. *Didattica della fisica*. it. Biblioteca di Scienze dell’educazione. Venice: La Nuova Italia, 1996.
- [13] Arnold B Arons. *Guida all’insegnamento della fisica*. it. Bologna: Zanichelli, 1992.
- [14] Physical Science Study Committee. *Physics*. Physics v. 1-3. Massachusetts Institute of Technology, 1957. URL: <https://books.google.it/books?id=Dd1WAAAAMAAJ>.
- [15] Harvard Project Physics. *The project physics course: Reader*. en. 1970.

- [16] *Wikipedia: Woods Hole conference*. https://en.wikipedia.org/wiki/Woods_Hole_Conference. Last accessed: 2024-08-25.
- [17] Jerome S Bruner. *The process of education:[a searching discussion of school education opening new paths to learning and teaching]*. Vintage Books, 1960.
- [18] Bruner J.S. *Il Processo Educativo*. Roma: Armando, 2002.
- [19] Rosalind Driver. «Students' conceptions and the learning of science». In: *International Journal of Science Education* 11.5 (nov. 1989), pp. 481–490. ISSN: 1464-5289. DOI: 10.1080/0950069890110501. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/0950069890110501>.
- [20] Duit R. *Bibliography STCSE, Students' and Teachers' Conceptions and Science Education*. 2007. URL: <https://www.per-central.org/items/detail.cfm?ID=5699>.
- [21] Bärbel Inhelder e Jean Piaget. *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent*. Presses Universitaires de France, 1955.
- [22] Jean Piaget e Bärbel Inhelder. *Le développement des quantités physiques chez l'enfant: conservation et atomisme*. Paris-Neuchatel: Delachaux & Niestlé, 1962.
- [23] Jean Piaget, Rolando Garcia e Raffaele Simone. *Esperienza e teoria della causalità*. Rome: Laterza, 1973.
- [24] P. Violino e B. Di Giacomo. «Sul livello cognitivo degli alunni delle scuole secondarie superiori». In: *La fisica nella scuola XIV-3* (1981), pp. 129–36.
- [25] Gaston Bachelard. «La formazione dello spirito scientifico». it. In: Milano: Raffaello Cortina, 1995, p. 18.
- [26] Thomas S Kuhn. *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*. it. Torino: Einaudi, 2009.
- [27] George J. Posner et al. «Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change». In: *Science Education* 66.2 (apr. 1982), pp. 211–227. ISSN: 1098-237X. DOI: 10.1002/sce.3730660207. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/sce.3730660207>.
- [28] Lev Semenovich Vygotsky. *Pensiero e linguaggio : ricerche psicologiche*. it. 1990.
- [29] Thomas M Duffy e David H Jonassen, cur. *Constructivism and the technology of instruction*. New York, NY: Routledge Member of the Taylor e Francis Group, ott. 1992.
- [30] Lucia Bigozzi et al. «'Slow Science': Building scientific concepts in physics in high school». In: *International Journal of Science Education* 36.13 (2014), pp. 2221–2242.
- [31] Edward F Redish. «Implications of cognitive studies for teaching physics». In: *American Journal of Physics* 62.9 (1994), pp. 796–803.
- [32] Jami Dixon et al. «The importance of soft skills». In: *Corporate finance review* 14.6 (2010), p. 35.

- [33] David Hestenes. «Modeling games in the Newtonian world». en. In: *Am. J. Phys.* 60.8 (ago. 1992), pp. 732–748.
- [34] Daniel Kahneman. *Pensieri lenti e veloci*. Edizioni Mondadori, 2012.
- [35] Amos Tversky e Daniel Kahneman. «The framing of decisions and the psychology of choice». In: *science* 211.4481 (1981), pp. 453–458.
- [36] Amos Tversky e Daniel Kahneman. «Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty». In: *Journal of Risk and uncertainty* 5 (1992), pp. 297–323.
- [37] Margaret A Neale e Max H Bazerman. «The effects of framing and negotiator overconfidence on bargaining behaviors and outcomes». In: *Academy of Management Journal* 28.1 (1985), pp. 34–49.
- [38] Colin F Camerer et al. «Cognition and framing in sequential bargaining for gains and losses». In: *Frontiers of game theory* 104 (1993), pp. 27–47.
- [39] Colin F Camerer. «Progress in behavioral game theory». en. In: *J. Econ. Perspect.* 11.4 (nov. 1997), pp. 167–188.
- [40] Steven Sloman e Philip Fernbach. *The knowledge illusion: The myth of individual thought and the power of collective wisdom*. Pan Macmillan, 2017.
- [41] Rebecca Lawson. «The science of psychology: Failures to understand how everyday objects work». In: *Memory & cognition* 34.8 (2006), pp. 1667–1675.
- [42] Alan Baddeley. «Working memory». In: *Science* 255.5044 (1992), pp. 556–559.
- [43] Colette Hirn e Laurence Viennot. «Transformation of didactic intentions by teachers: the case of geometrical optics in grade 8». en. In: *Int. J. Sci. Educ.* 22.4 (apr. 2000), pp. 357–384.
- [44] Roser Pintó. «Introducing curriculum innovations in science: Identifying teachers' transformations and the design of related teacher education». en. In: *Sci. Educ.* 89.1 (gen. 2005), pp. 1–12.
- [45] Sandra K Abell, cur. *Science Teacher Education*. en. 2000^a ed. Contemporary Trends and Issues in Science Education. Dordrecht, Netherlands: Springer, lug. 2000.
- [46] Lidia Borghi, Anna De Ambrosis e Paolo Mascheretti. «Developing relevant teaching strategies during in-service training». In: *Phys. Educ.* 38.1 (gen. 2003), pp. 41–46.
- [47] R. Sperandeo-Mineo. *The pre-service physics teacher education model implemented by the FFC research project involving 8 Italian Universities: guidelines and preliminary results*. Gen. 2004. URL: <https://www.fisica.uniud.it/URDF/girepseminar2003/abstracts/pdf/gt7.pdf>.
- [48] Dimitris Psillos, Anna Spyrtou e Petros Kariotoglou. «Science teacher education: Issues and proposals». In: *Research and the Quality of Science Education*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005, pp. 119–128.

- [49] Russel Tytler. «School Innovation in Science: Change, Culture, Complexity». In: *Research and the Quality of Science Education*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005, pp. 89–105.
- [50] Gültekin Çakmakci e Mehmet Fatih Taşar, cur. *Contemporary science education research: Pre-service and in-service teacher education : [a collection of papers presented at ESERA 2009 conference, pp101-10]*. en. 2010.
- [51] Seth Chaiklin et al. «The zone of proximal development in Vygotsky's analysis of learning and instruction». In: *Vygotsky's educational theory in cultural context* 1.2 (2003), pp. 39–64.
- [52] C Bemardini, C Tarsitani e Matilde Vicentini. «Thinking Physics for Teaching». In: *Proceedings of a Conference, Plenum Press, New York and London*. 1995.
- [53] Rosalind Driver, Edith Guesne e Andrée Tiberghien, cur. *Children's Ideas in Science*. New York: McGraw-Hill Education, 1985. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:118875179>.
- [54] Michael Komorek e Reinders Duit. «The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non-linear systems». en. In: *Int. J. Sci. Educ.* 26.5 (apr. 2004), pp. 619–633.
- [55] Ference Marton. «Phenomenography ? Describing conceptions of the world around us». en. In: *Instr. Sci.* 10.2 (lug. 1981), pp. 177–200.
- [56] John Clement, David E Brown e Aletta Zietsman. «Not all preconceptions are misconceptions: finding 'anchoring conceptions' for grounding instruction on students' intuitions». en. In: *Int. J. Sci. Educ.* 11.5 (nov. 1989), pp. 554–565.
- [57] Stella Vosniadou. «Capturing and modeling the process of conceptual change». en. In: *Learn. Instr.* 4.1 (gen. 1994), pp. 45–69.
- [58] Stuart Rowlands et al. «Conceptual change through the lens of Newtonian mechanics». en. In: *Sci. & Educ.* 16.1 (gen. 2007), pp. 21–42.
- [59] Andrea DiSessa. «Phenomenology and the Evolution of Intuition». en. In: *Mental Models*. Psychology Press, gen. 2014, pp. 23–42. ISBN: 9781315802725. DOI: 10.4324/9781315802725-6. URL: <http://dx.doi.org/10.4324/9781315802725-6>.
- [60] Anna Sierpinska. «Obstacles épistémologiques relatifs à la notion de limite». In: *Recherches en didactique des mathématiques (Revue)* 6.1 (1985), pp. 5–67.
- [61] A. Leon Pines e Leo H. T. West. «Conceptual understanding and science learning: An interpretation of research within a sources-of-knowledge framework». In: *Science Education* 70 (1986), pp. 583–604. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:146297291>.
- [62] Paul Watzlawick, John H Weakland e Richard Fisch. *Change: la formazione e la soluzione dei problemi*. it. 1974.

- [63] David Hestenes. «Toward a modeling theory of physics instruction». en. In: *Am. J. Phys.* 55.5 (mag. 1987), pp. 440–454.
- [64] Kenneth A. Strike e George J. Posner. «A revisionist theory of conceptual change». In: 1992. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:141344936>.
- [65] Eduardo F Mortimer. «Conceptual change or Conceptual Profile change?» en. In: *Sci. & Educ.* 4.3 (lug. 1995), pp. 267–285.
- [66] Geoff Welford, cur. *Research in Science Education in Europe, pp 7-21*. London, England: Routledge, lug. 1996.
- [67] Richard T White e Richard F Gunstone. «Metalearning and conceptual change». en. In: *Int. J. Sci. Educ.* 11.5 (nov. 1989), pp. 577–586.
- [68] Stella Vosniadou et al. «Designing learning environments to promote conceptual change in science». In: *Learning and Instruction* 11 (2001), pp. 381–419. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13905524>.
- [69] Jacques Désautels et al. «La formation à l’enseignement des sciences : le virage épistémologique». fr. In: *Didaskalia* 1.1 (1993), pp. 49–67.
- [70] M. Mayer e S. Sgrignoli De Michele F. «Indagine sugli obiettivi, i contenuti e le metodologie nell’insegnamento della fisica nelle scuole superiori di II grado». In: *AIF-Rapporto di ricerca per il MPI* (1985).
- [71] *La realtà fisica*. Bologna: Il mulino, 1978.
- [72] David Boud, Jeffrey Dunn e Elizabeth Hegarty-Hazel. *Teaching in laboratories*. en. 1986.
- [73] Tony Scott, Michael Cole e Martin Engel. «Computers and Education: A Cultural Constructivist Perspective». In: *Rev. Res. Educ.* 18 (1992), p. 191.
- [74] A. Bork. «Computers in learning Physics: what should we doing?» en. In: *The conference on computers in Physics education*. Addison Wesley, 1990, pp. 32–39.
- [75] G Andaloro, V Donzelli e R M Sperandeo-Mineo. «Modelling in physics teaching: the role of computer simulation». en. In: *Int. J. Sci. Educ.* 13.3 (lug. 1991), pp. 243–254.
- [76] Ming-Zher Poh, Nicholas C Swenson e Rosalind W Picard. «A wearable sensor for unobtrusive, long-term assessment of electrodermal activity». In: *IEEE transactions on Biomedical engineering* 57.5 (2010), pp. 1243–1252.
- [77] Catherine H Crouch e Eric Mazur. «Peer instruction: Ten years of experience and results». In: *American journal of physics* 69.9 (2001), pp. 970–977.
- [78] Kelly Miller et al. «Use of a social annotation platform for pre-class reading assignments in a flipped introductory physics class». In: *Frontiers in education*. Vol. 3. Frontiers. 2018, p. 315665.
- [79] Franco Bagnoli, Alessio Guarino e Giovanna Pacini. «Teaching physics by magic». In: *Physics Education* 54.1 (2018), p. 015025.
- [80] *FisicaX*. <http://fisicax.complexworld.net>. Last accessed: 2024-08-25.

- [81] Franco Bagnoli et al. «20 Lezioni di fisica e magia». In: *GIORNALE DI FISICA DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA* 58 (2017), pp. 173–193.
- [82] Franco Bagnoli et al. *Il taccuino del Dr. Watson: ovvero: dove si nasconde la fisica nella vita di tutti i giorni?* Apice libri, 2018.
- [83] *FisicaX, ovvero dove si nasconde la fisica di tutti i giorni – libro game*. <https://complexworld-net.github.io/FisicaX/FisicaX.html>. Last accessed: 2024-08-25.
- [84] Stephen Jay Gould. *Intelligenza e pregiudizio, il Saggiatore*. 1985.
- [85] W H Schubert e A L Schubert. «Alternative paradigms in curriculum inquiry. The international encyclopaedia of educational evaluation». In: (1990), pp. 157–162.
- [86] RF Mager. «Gli obiettivi didattici, tr. it». In: *EIT, Torino* (1972).
- [87] Lawrence Stenhouse. *An introduction to curriculum research and development*. en. Oxford, England: Heinemann Educational, 1975.
- [88] Yvonna S Lincoln e Egon G Guba. *Naturalistic Inquiry*. en. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, giu. 1985.
- [89] H James Block. *Mastery learning. Procedimenti scientifici di educazione individualizzata*. it. 1972.
- [90] T Neville Postlethwaite e Kenneth Norman Ross. *Effective schools in reading: Implications for educational planners : An exploratory study*. en. 1992.
- [91] Lyle M Spencer e Signe M Spencer. *Competence at work*. en. Nashville, TN: John Wiley & Sons, mar. 1993.
- [92] C Odoari. *Formazione e sviluppo nelle organizzazioni. Innovare e integrare il sistema della formazione continua*. it. Apr. 2009.
- [93] Pier Bresciani. «Le competenze: approcci e modelli di intervento.“ Perché un dossier sulle competenze». In: *Professionalità* 38 (1997).
- [94] Rom Istituto Per lo Sviluppo della Formazione Professionale dei Lavoratori. *Rapporto Isfol 1994. Formazione. Orientamento. Occupazione. Nuove tecnologie. Professionalità*. it. 1994.
- [95] P Argentero-CG Cortese-C Piccardo, P Argentero e C Cortese. *Psicologia delle organizzazioni*. 2009.
- [96] MICHELE Pellerey. «Orientamento come potenziamento della persona umana in vista della sua occupabilità: il ruolo delle soft skills, o competenze professionali personali generali». In: *Rassegna Cnos* 32.1 (2016), pp. 41–50.
- [97] Hogrefe Publishing Group, cur. *Giocarsi. Gaming e gamification in contesti professionali*. it. Florence, 2021.
- [98] Mihaly Csikszentmihalyi. *Flow: The psychology of optimal experience*. New York: Harper & Row, 1990.
- [99] Woogul Lee et al. «Neural differences between intrinsic reasons for doing versus extrinsic reasons for doing: An fMRI study». In: *Neuroscience Research* 73.1 (2012), pp. 68–72.

- [100] Richard Bartle. «Hearts, clubs, diamonds, spades: Players who suit MUDs». In: *Journal of MUD research* 1.1 (1996), p. 19.
- [101] Nicole Lazzaro. «Why we play: affect and the fun of games». In: *Human-computer interaction: Designing for diverse users and domains* 155 (2009), pp. 679–700.
- [102] Abraham Harold Maslow. «A theory of human motivation.» In: *Psychological review* 50.4 (1943), p. 370.
- [103] Edward L Deci e Richard M Ryan. *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [104] Jane McGonigal. *Reality is broken: Why games make us better and how they can change the world*. Penguin, 2011.
- [105] Giovanni Bacaro et al. «Giornata di formazione “Gioco, Benessere, Educazione: Gamification, Gaming e Game-Based Learning in contesti socio-sanitari ed educativi (Trieste, 2 ottobre 2019)». In: *QuaderniCIRD. Rivista del Centro Interdipartimentale per la Ricerca Didattica dell’Università di Trieste/Journal of the Interdepartmental Center for Educational Research of the University of Trieste-ISSN: 2039-8646* (2019).
- [106] Donald L Kirkpatrick. «Techniques for evaluating training programs: Part 4-Results». In: *Journal of ASTD* 14.2 (1960), pp. 28–32.
- [107] Jack J Phillips, cur. *Measuring return on investment v. 2*. In Action. Alexandria, VA: ATD Press, set. 1997.
- [108] *NetLogo*. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo>. Last accessed: 2024-08-25.
- [109] Daniel Galeano Sancho. «Percolation theory and fire propagation in a forest». In: (2015).
- [110] G Albinet, G Searby e D Stauffer. «Fire propagation in a 2-D random medium». In: *Journal de Physique* 47.1 (1986), pp. 1–7.
- [111] Tom Beer e IG Enting. «Fire spread and percolation modelling». In: *Mathematical and Computer Modelling* 13.11 (1990), pp. 77–96.
- [112] *Fire – NetLogo*. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Fire>. Last accessed: 2024-08-25.
- [113] Adilson E Motter et al. «Doubly transient chaos: generic form of chaos in autonomous dissipative systems». en. In: *Phys. Rev. Lett.* 111.19 (nov. 2013), p. 194101.
- [114] Yuanzhao Zhang e Sean P Cornelius. «Catch-22s of reservoir computing». In: *Physical Review Research* 5.3 (2023), p. 033213.
- [115] Steven H. Strogatz. «From Kuramoto to Crawford: exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators». In: *Physica D: Non-linear Phenomena* 143.1–4 (set. 2000), pp. 1–20. ISSN: 0167-2789. DOI: 10.1016/S0167-2789(00)00094-4. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-2789\(00\)00094-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-2789(00)00094-4).
- [116] N Wiener. *Cybernetics, 2-nd edition*. 1961.

- [117] Norbert Wiener. *Nonlinear problems in random theory*. The MIT Press. London, England: MIT Press, ago. 1966.
- [118] Arthur T Winfree. «Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators». In: *Journal of theoretical biology* 16.1 (1967), pp. 15–42.
- [119] Yoshiki Kuramoto. «International symposium on mathematical problems in theoretical physics». In: *Lecture notes in Physics* 30 (1975), p. 420.
- [120] Y Kuramoto. «Chemical oscillations, waves, and turbulence». In: *(No Title)* 8 (1984), p. 156.
- [121] *Fireflies – NetLogo*. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Fireflies>. Last accessed: 2024-08-25.