Luigi Togliani[1,2]
[1] *Liceo Scientifico "Belfiore", Mantova*
[2] *Sezione AIF Mantova*
luigi.togliani@gmail.com

Strumenti per l'Insegnamento

Con Energia: *un percorso didattico sulle fonti rinnovabili*

Abstract
A school project about renewable sources of energy is proposed. The decarbonization and the transition toward sustainable energy is required to solve the global warming problem and to secure the future.

Premessa

Nella primavera del 2017, per iniziativa di AGIRE SRL (Agenzia per la Gestione Intelligente delle Risorse Energetiche), si è formato a Mantova un *team* di persone di diverse provenienze che hanno costruito un progetto formativo sulla sostenibilità energetica, prevalentemente indirizzato agli alunni di due scuole della città, il Liceo Scientifico "Belfiore" e l'Istituto Superiore "Fermi". Agli studenti coinvolti – le classi terze C, D e E del "Belfiore" e una ventina di studenti delle classi quarte del "Fermi" – il progetto è stato riconosciuto come attività di Alternanza Scuola Lavoro (ASL) nel corso dell'anno scolastico 2017-18. Lo scopo dell'iniziativa, sostenuta da Regione Lombardia, Provincia di Mantova e Comune di Mantova, era quello di sensibilizzare soprattutto i giovani sulla questione energetica e sulla sua importanza decisiva per il futuro del nostro ecosistema e quindi della vita degli esseri viventi.

Il progetto *Con Energia*

Il progetto si è articolato nelle seguenti fasi che hanno occupato quasi per intero l'anno scolastico.

- Eventi del Festivaletteratura di Mantova, dal 6 al 10 settembre 2017: "Per pochi gradi in più" con Grammenos Mastrojeni e Antonello Pasini; "Il Sole in fondo al tunnel della dipendenza fossile" con Gianluca Ruggieri e Arturo Lorenzoni; "La tecnologia non basta" con Massimiano Bucchi e Matteo Polettini; "Verso una prosperità sostenibile" con Tim Jackson.
- Corso di formazione *Con energia* per insegnanti di discipline scientifiche, articolato in 5 incontri svolti dal 24 ottobre 2017 al 8 gennaio 2018, organizzato dalla sezione AIF di Mantova. I seminari hanno riguardato: la termodinamica dei processi irreversibili e la termodinamica del XXI secolo (Matteo Polettini), la termodinamica trattata nei libri di testo (Laura Branchetti), il corpo nero (Laura Francesio e Francesca Zani), l'uso dell'energia (Luigi Togliani).
- Percorso formativo di ASL per gli studenti del Liceo "Belfiore" e dell'I.S. "Fermi" a cura dell'ing. Marco Faggioli (tutor dr. Francesco Dugoni, direttore di AGIRE), comprendente lezioni frontali e attività laboratoriali sulle fonti energetiche, da dicembre 2017 ad aprile 2018.
- Rassegna cinematografica di 3 film su temi inerenti l'energia e l'ambiente, con proiezioni mattutine indirizzate alle scuole mantovane e serali per la cittadinanza, presso il Cinema del Carbone di Mantova, dal 10 al 17 aprile; alla proiezione del film seguiva il dibattito.
- Presentazione pubblica, nel centro di Mantova, delle attività laboratoriali da parte degli studenti coinvolti nel progetto, con invito rivolto ai passanti

a compilare un breve questionario di rilevazione dell'impronta ecologica su abitazione e trasporti (14 aprile).
- Convegno "Dalla linea al cerchio: quale transizione energetica?", svolto presso il Teatro Bibiena di Mantova il 20 aprile, con numerosi e qualificati interventi di carattere scientifico da parte di Francesco Dugoni, Marco Polettini, Nicola Armaroli, Gianluca Ruggieri, Alicia Valero Delgado, Matteo Zuin, Fabio De Menna, Marco Grasso, Ledo Stefanini. Le relazioni hanno riguardato le fonti rinnovabili, la transizione energetica, l'economia circolare, l'energia e i sistemi agroalimentari, le politiche climatiche.
- Convegno "Racconti conEnergia: si può fare", svolto nella stessa sede il 21 aprile, con la presentazione di *best practices* in campo energetico tendenti verso l'economia circolare: lo sfruttamento dei rifiuti e delle biomasse (teleriscaldamento), la mobilità sostenibile, la produzione locale di materiali e di tecnologie innovative in ambito ambientale.

Nel corso dei due convegni due alunne della terza E del Liceo "Belfiore" hanno presentato al pubblico l'analisi dei questionari sull'impronta energetica.

All'attività di progetto è stato affiancato il lavoro in classe e in laboratorio. In particolare, con gli alunni della III E abbiamo sviluppato, nel corso di Fisica, le seguenti tematiche: lavoro ed energia meccanica, quantità di moto e momento angolare, gravitazione universale nel I quadrimestre; termologia, calorimetria e termodinamica nel II quadrimestre.

Fonti di energia

Parlando di fonti di energia si è sottolineata la differenza tra:

- fonti primarie e secondarie: le prime sono direttamente ricavabili dalla Natura, le seconde sono rese utilizzabili a seguito di una trasformazione di energia;
- fonti rinnovabili e non rinnovabili: le prime sono sfruttabili per tempi molto lunghi rispetto alla vita umana, le seconde sono destinate ad esaurirsi in tempi relativamente brevi.

Ad esempio: carbone, petrolio e gas naturale sono fonti primarie e non rinnovabili; la benzina e l'energia elettrica sono fonti secondarie; il solare fotovoltaico, l'eolico e l'idroelettrico sono fonti rinnovabili.

Per classificare una fonte energetica sono rilevanti i seguenti parametri:

- efficienza (rendimento);
- EROI (*Energy Return On Investment*);
- continuità della fornitura;
- facilità di trasporto e di stoccaggio;
- densità energetica (potere calorifico);
- impatto sociale e ambientale;
- reperibilità;
- questioni politiche e prezzi di mercato.

Senza entrare nei dettagli di ogni singolo elemento, può essere interessante la valutazione dell'EROI, cioè del "ritorno energetico sull'investimento": si tratta del rapporto tra l'energia utile ricavata da un dispositivo e la totalità dell'energia spesa per conseguire il risultato. Se l'EROI è superiore ad 1 la fonte energetica usata dal dispositivo è conveniente perché sviluppa più energia di quella che

spende, altrimenti è in perdita (vedi [1] p. 19-35). In figura 1 è rappresentato l'EROI per diverse fonti energetiche, seguendo quanto riportato in [2].

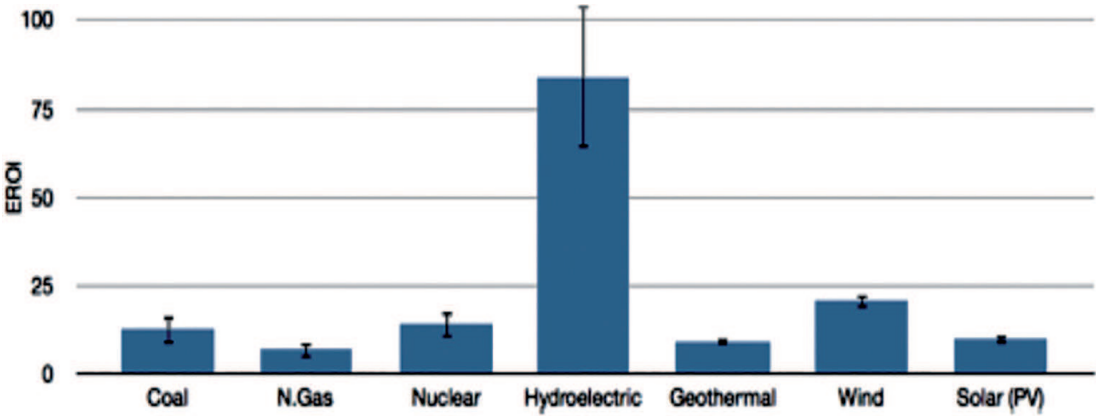

Figura 1. EROI per diverse fonti: carbone, gas, nucleare, idroelettrico, geotermico, eolico, fotovoltaico (C. Hall, J. Lambert, S. Balogh, EROI for different fuels and the implications for society, *Energy Policy*, 64, (2014).

Per il petrolio e per le altre fonti fossili si registra nel tempo una progressiva diminuzione dell'EROI a causa delle difficoltà crescenti nell'estrazione dei materiali che sono disponibili in giacimenti sempre meno accessibili. Al riguardo Nicola Armaroli (vedi [3] p. 91-100) parla di petrolio "difficile" (*unconventional oil*) che ormai raggiunge il 50% della produzione mondiale del prezioso fluido (fig. 2).

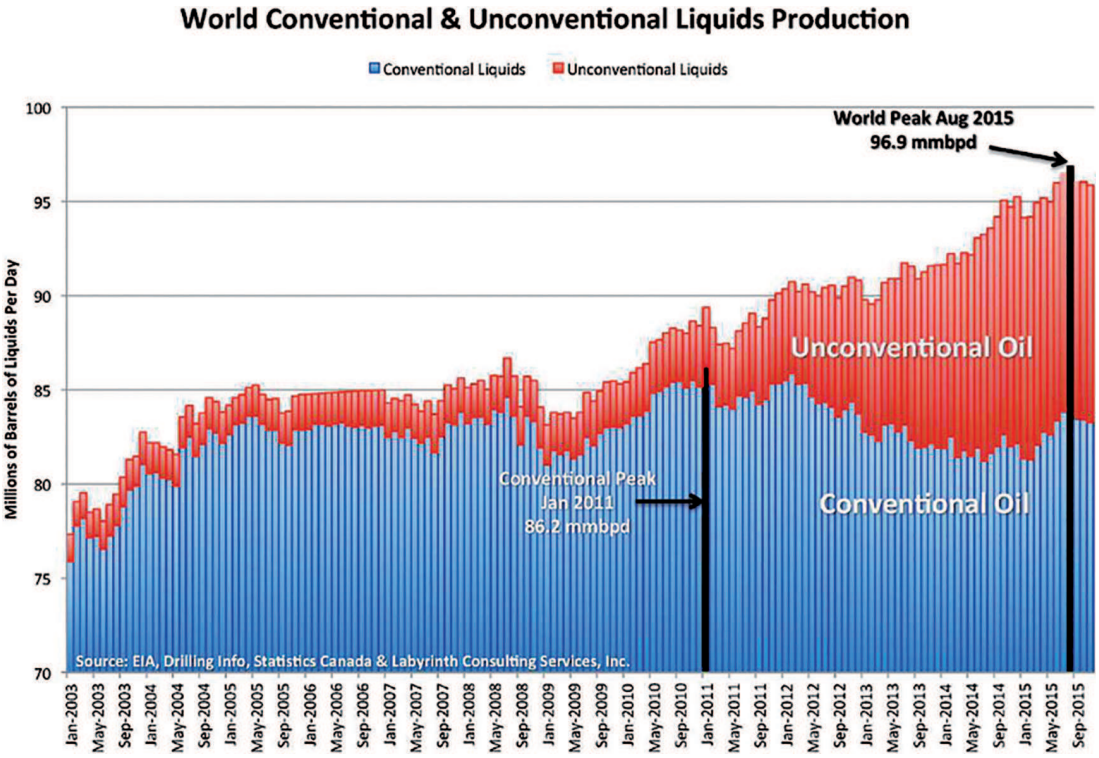

Figura 2. Consumi mondiali di petrolio dal 2003 al 2015 (EIA, *Drilling Info*, Statistics Canada & Labyrinth Consulting Services, Inc.).

Nel mondo attuale le fonti rinnovabili contribuiscono per il 20% circa al fabbisogno energetico. Questo significa che dipendiamo ampiamente dalle fonti fossili (vedi [4] e fig. 3). Quali sono le conseguenze di questa scelta in ambito

energetico? L'umanità può continuare su questa strada (*business as usual*) per molto tempo ancora?

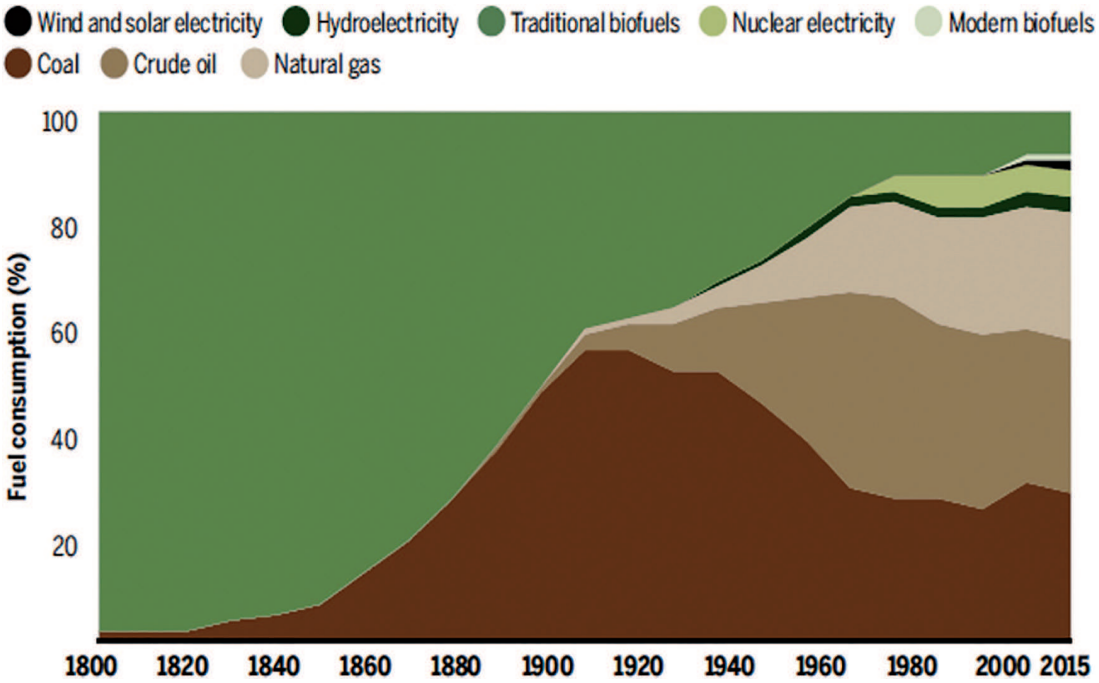

Figura 3. Lo sviluppo delle principali fonti energetiche nel mondo: eolico e fotovoltaico, idroelettrico, biomasse tradizionali, nucleare, biomasse moderne, carbone, petrolio, gas naturale (*Science*, 359, (2018), p. 1320).

Fonti non rinnovabili

Secondo David MacKay (vedi [5] p. 6-7) il dibattito sull'energia è dettato da tre buone ragioni:

- le fonti fossili sono una risorsa finita che tende ad esaurirsi in tempi più o meno brevi;
- gli approvviginamenti energetici devono essere messi maggiormente in sicurezza;
- l'uso dei combustibili fossili produce un'impatto rilevante sul clima.

Bharat Raj Singh e Onkar Singh (vedi [6]) elaborano dati di EIA (*U.S. Energy Information Administration*) e di BP (*British Petroleum*) che stimano che le riserve di fonti fossili basteranno, al ritmo attuale di consumo, per circa: 35 anni per il petrolio, 107 anni per il carbone e 37 anni per il gas naturale. Per l'uranio le stime fornite da NEA (*Nuclear Energy Agency*) e IAEA (*International Atomic Energy Agency*) prevedono riserve per circa 135 anni al ritmo attuale di richiesta (vedi [7]). Le stime sono senz'altro approssimative e possono essere fatte in modi diversi, ma comunque appare probabile che l'estinzione delle fonti fossili si realizzerà entro il secolo attuale.

Il tema della sicurezza nell'approvigionamento energetico balza alla ribalta della cronaca principalmente in occasione dei grandi disastri. Basti solo pensare alle tragedie di Chernobyl (1986) o di Fukushima (2011) per quanto riguarda il nucleare da fissione; ai disastri dovuti all'esplosione della piattaforma petrolifera Deepwater Horizon al largo della Lousiana (2010) o all'affondamento della nave iraniana Sanchi nel Mar Cinese orientale (2018) per quanto concerne il petrolio. L'elenco dei disastri ambientali si arricchisce non solo grazie agli incidenti ma anche, e soprattutto, a causa dell'alterazione continua e progressiva dell'ecosi-

stema prodotta dall'uso quotidiano delle fonti fossili: l'inquinamento del suolo, dell'acqua e dell'aria causato dall'immissione di sostanze dannose, i dissesti idrogeologici e ambientali dovuti all'impiego della tecnica del *fracking* (fratturazione idraulica) per l'estrazione di petrolio o gas (vedi [3] a p. 96-100), le contaminazioni dovute alla presenza delle scorie radioattive prodotte dalle centrali nucleari (vedi [3] a p. 144-146), ecc.

Infine le fonti fossili sono responsabili dell'introduzione nell'atmosfera di enormi quantità di sostanze climalteranti.

Cambiamenti climatici

I processi industriali e agricoli, il riscaldamento nelle abitazioni e i trasporti che caratterizzano la nostra società immettono in atmosfera ingenti quantità di gas che, come il diossido di carbonio, incrementano l'effetto serra e producono un aumento della temperatura media terrestre (vedi [8] p. 12-28). L'IPCC (*Intergovernamental Panel of Climate Change*) presenta i risultati delle misure dirette effettuate dall'800 ad oggi e delle misure indirette ottenute con i carotaggi in Antartide sull'aumento della concentrazione in atmosfera di CO_2: siamo passati nel giro di un secolo da 280 ppm a 400 ppm, con un'impennata brusca negli ultimi decenni; analoghi risultati per altri gas serra quali il metano e l'ossido di diazoto, come riportato in [9] a p. 2-6 (fig. 4).

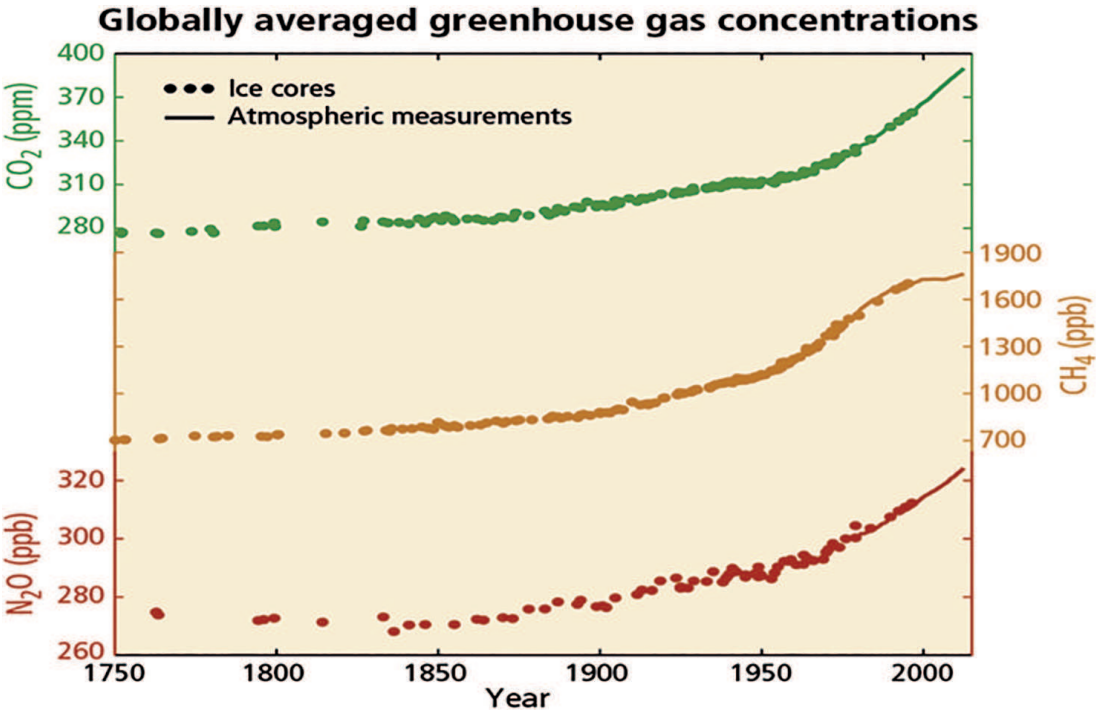

Figura 4. Aumento della concentrazione dei principali gas serra in atmosfera (IPCC, *Climate Change 2014 - Syntesis Report*).

Le principali conseguenze del riscaldamento globale (fig. 5) sono la fusione dei ghiacci, l'aumento del livello dei mari, l'intensificarsi di fenomeni meteorologici estremi (alluvioni, uragani, concentrazione delle precipitazioni, siccità), come rappresentato nelle figure 6 e 7. Questi mutamenti climatici hanno conseguenze pesanti e ancora non ben prevedibili sulla società e sull'ecosistema: regioni favorevoli all'insediamento umano diventano in poco tempo terre inospitali, con conseguenti migrazioni di massa ed estinzioni di molte specie (vedi [8] p. 33-39) e drastica riduzione della biodiversità.

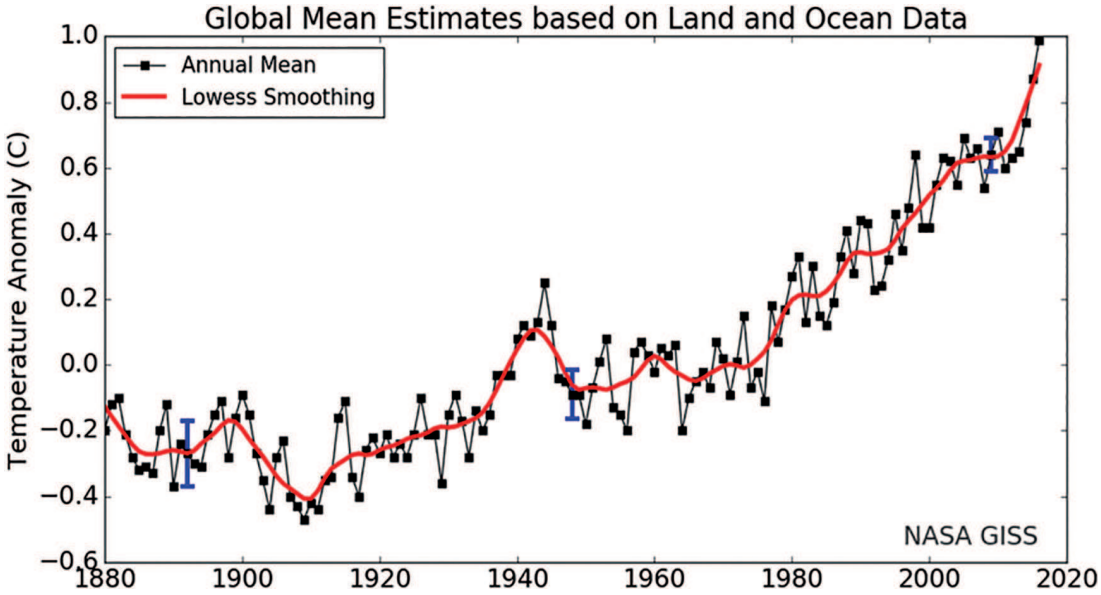

Figura 5. Aumento della temperatura media della terra e degli oceani (NASA-GISS).

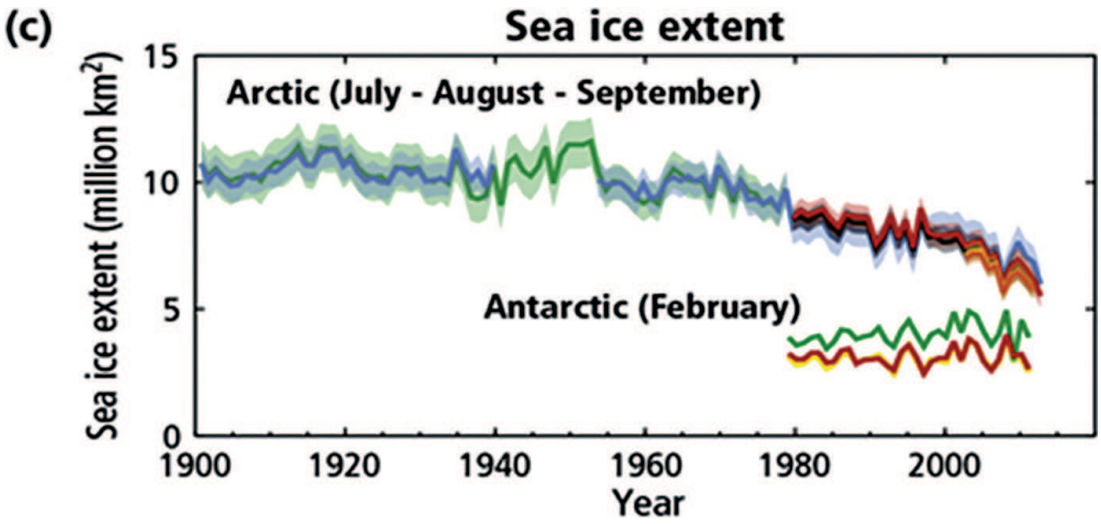

Figura 6. Riduzione dei ghiacci (IPCC, *Climate Change 2014 - Syntesis Report*).

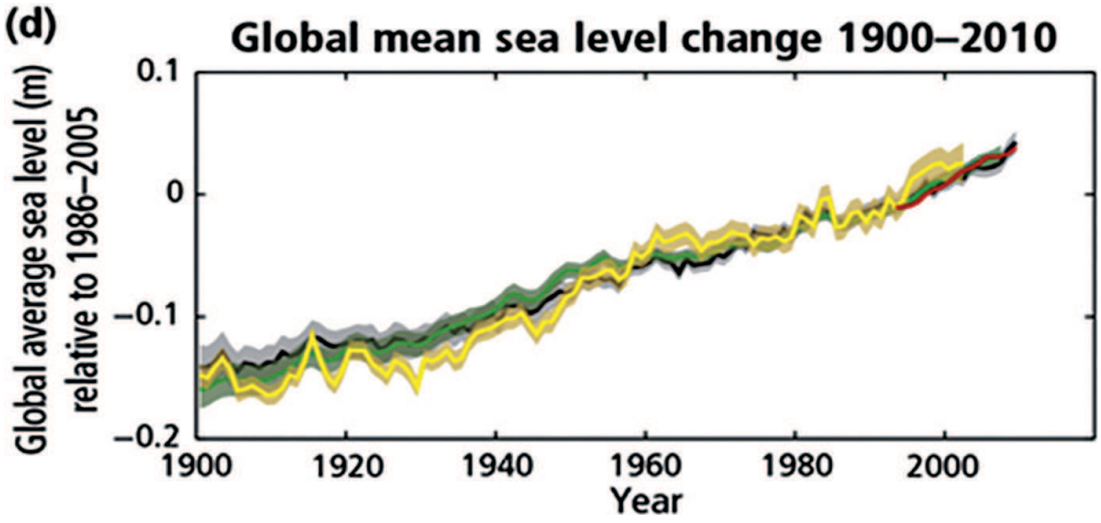

Figura 7. Innalzamento del livello marino (IPCC, *Climate Change 2014 - Syntesis Report*).

Fonti rinnovabili

Il solare termico e fotovoltaico, l'eolico, l'idroelettrico, le biomasse, la geotermia, l'energia dal mare sembrano rappresentare le migliori prospettive perché si realizzi la cosiddetta transizione energetica, un processo – già peraltro in atto – che dovrebbe portarci dall'uso prevalente delle fonti fossili a quello delle rinnovabili. Ci sono segnali incoraggianti: a livello mondiale il fotovoltaico è passato da una potenza di 6 GW nel 2006 ad una di 303 GW nel 2016 (vedi [3] p. 200-205), l'eolico si è incrementato da 24 GW nel 2001 a 540 GW nel 2017 (vedi [10] p. 4) e l'idroelettrico è cresciuto passando da circa 690 GW nel 2001 a circa 1100 GW nel 2015 (vedi [11] p. 6). La maggior diffusione delle rinnovabili ha determinato una sensibile riduzione del costo di un kWh prodotto da queste fonti, rendendole sempre più competitive rispetto alle fonti fossili. Pertanto investire nelle rinnovabili è diventato conveniente, come ben hanno compreso paesi come la Cina.

Impronta ecologica e biocapacità

L'impronta ecologica è un indicatore ambientale che fornisce la superficie in ha degli ecosistemi terrestri e acquatici necessari per far fronte al carico delle attività umane. La biocapacità è espressa dalla superficie in ha degli ecosistemi in grado di rigenerare le risorse naturali e di neutralizzare i rifiuti e gli inquinanti prodotti dalle attività umane. Negli ultimi 50 anni la biocapacità pro capite è andata riducendosi sensibilmente e ora è ben al di sotto dell'impronta ecologica pro capite (fig. 8 e vedi [12]).

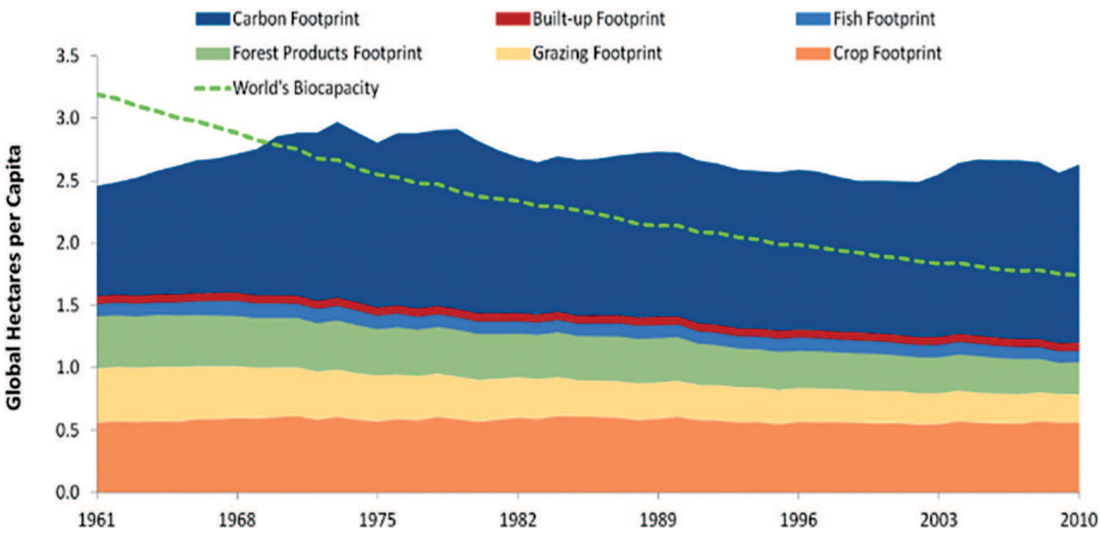

Figura 8. Impronta ecologica per settori (combustibili fossili, costruzioni, pesca, uso delle foreste, pascoli, raccolti agricoli) e biocapacità pro capite (*The Footprint and Biocapacity Accounting 2015*).

Si trovano in rete test o fogli elettronici utili per calcolare la propria impronta ecologica. Tra questi abbiamo utilizzato il foglio Excel, già messo a disposizione da Rete di Lilliput e scaricabile da www.associazioni.prato.it/ventiditerra/xls/foglimp.xls*, che calcola l'impronta ecologica pro capite su base mensile riguardo ad alimenti, abitazione e trasporti. All'interno del progetto *Con Energia* abbiamo proposto ai passanti la compilazione di questo foglio elettronico, solo riguardo ad abitazione e trasporti; i dati sono stati elaborati dagli studenti sotto la guida dell'ing. Faggioli. Dall'analisi risulta che l'impronta mensile media pro capite è di 0,82 ha con la seguente distribuzione di frequenza (fig. 9).

Nota

* NdR: portale istituzionale dismesso. Il file indicato è reperibile al *link* www.retelilliput.org/modules.php?op=modload&name=DownloadsPlus&file=index&req=getit&lid=4. Un calcolatore *online* di impronta ecologica può essere consultato nel sito www.wwf.ch/it/vivere-sostenibile/calcolatore-dell-impronta-ecologica.

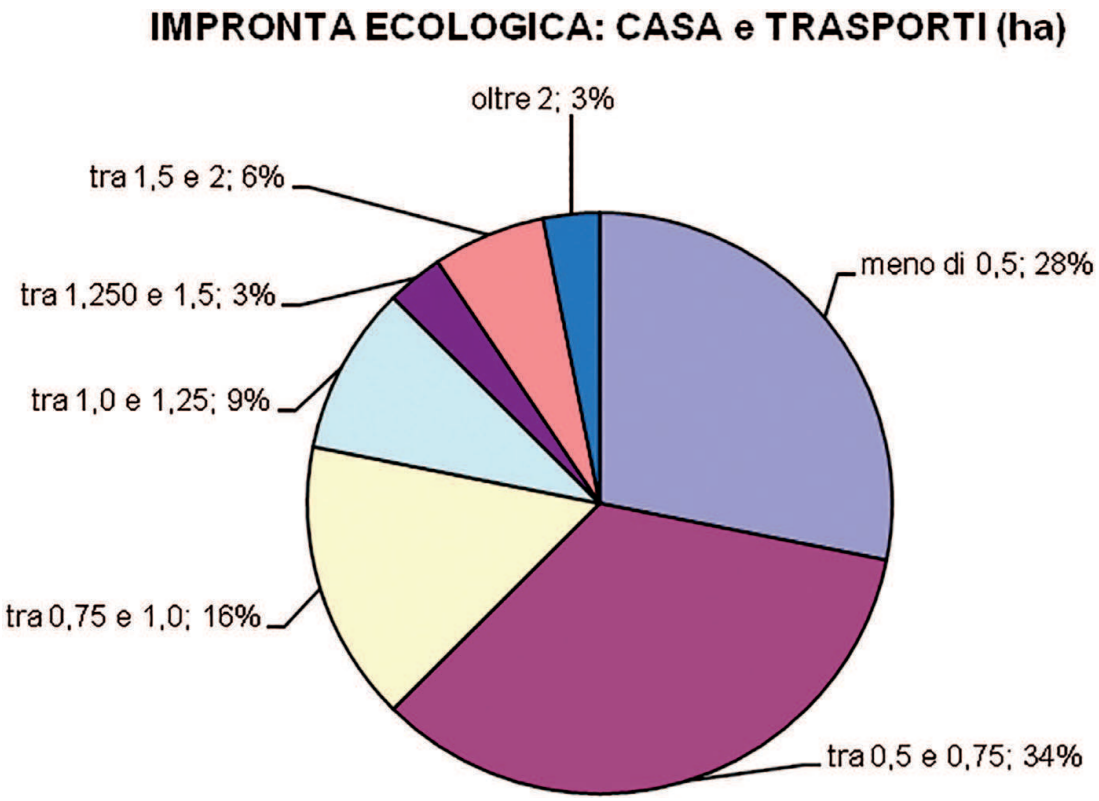

Figura 9. Impronta ecologica mensile pro capite per abitazione e trasporti.

Interessante è vedere come vengono utilizzati i mezzi di trasporto (fig. 10).

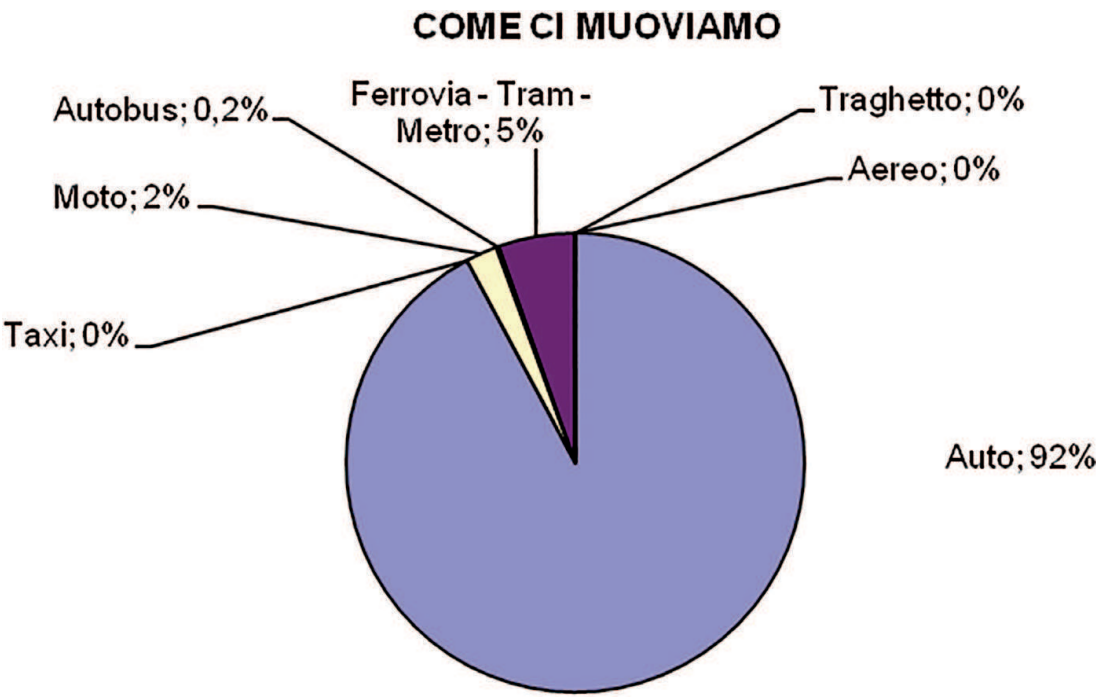

Figura 10. Distribuzione di frequenza dei mezzi di trasporto usati.

Attività laboratoriali

La nostra attenzione si è rivolta alle fonti rinnovabili perché rappresentano la prospettiva capace di futuro. L'attività di laboratorio si è incentrata sull'utilizzo del fotovoltaico, dell'eolico, dell'idroelettrico, dell'effetto Seebeck e dell'idrogeno.

Fotovoltaico Un piccolo modulo fotovoltaico, esposto al sole, converte l'energia solare in energia elettrica, con una tensione di alcuni volt (circa 2,5 V), sufficiente per alimentare un motorino elettrico in grado di far ruotare una piccola ventola (fig. 11).

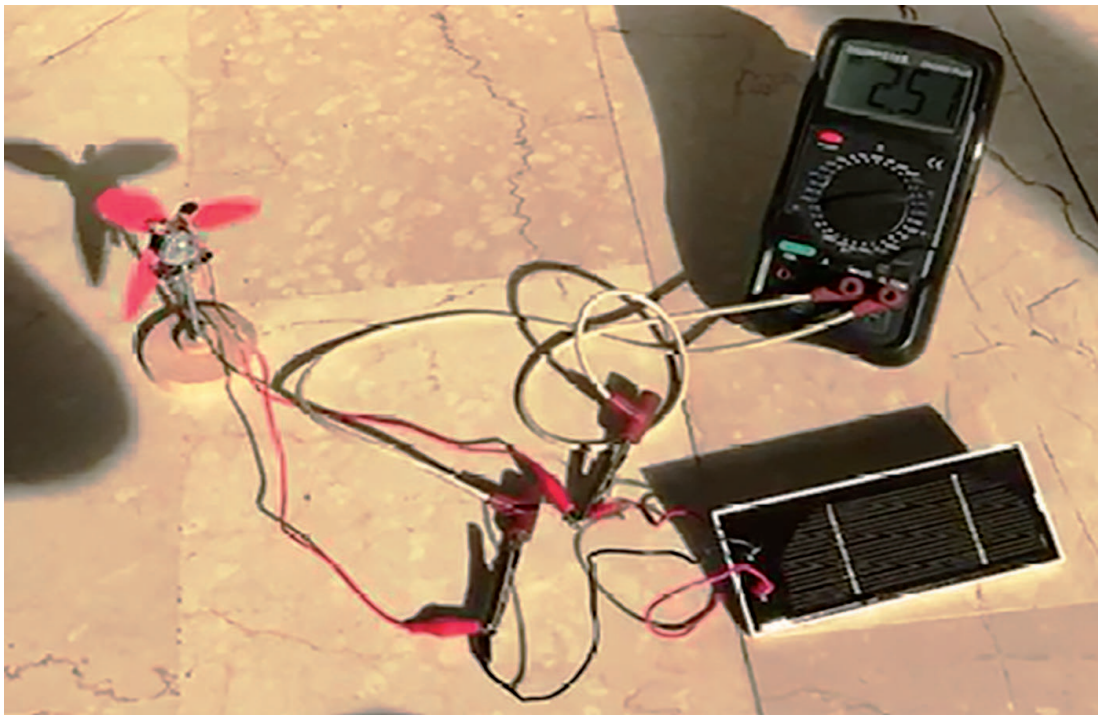

Figura 11. Impiego di una cella fotovoltaica.

Eolico La ventola del precedente esperimento viene fatta ruotare dall'aria messa in moto dal phon. Ai capi della dinamo si registra una piccola tensione di circa 0,3 V (fig. 12).

Figura 12. Modello di turbina eolica.

Idroelettrico Un modellino di centrale idroelettrica consente di ottenere energia elettrica con una tensione di poco superiore a 1 V grazie all'alternatore messo in moto da una piccola turbina fatta ruotare dall'acqua che scorre all'interno di un tubo di plastica (fig. 13); di conseguenza si accende il LED.

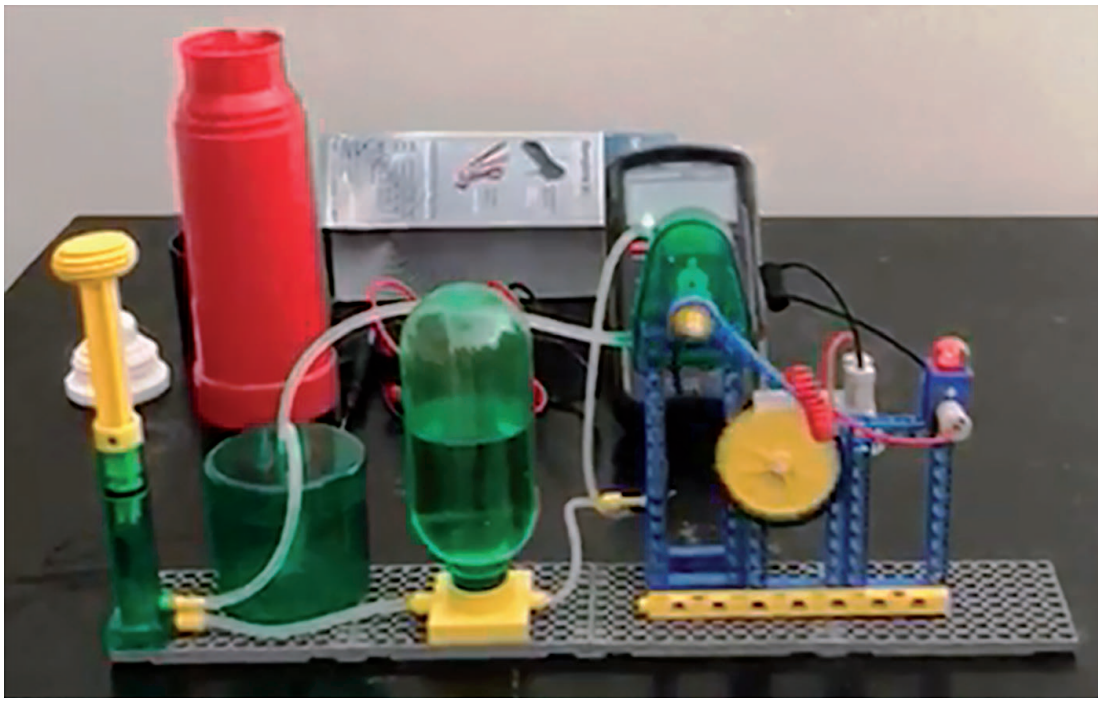

Figura 13. Modello di centrale idroelettrica.

Effetto Seebeck Si può ottenere energia elettrica per effetto Seebeck tramite una cella Peltier posta tra due barattoli chiusi contenenti l'uno ghiaccio fondente e l'altro acqua calda: la tensione prodotta – circa 0,4 V – alimenta il motorino elettrico che aziona la ventola. Allo stesso risultato si può giungere utilizzando il convertitore termoelettrico della Pasco che sfrutta due "gambe" di alluminio immerse l'una in un bicchiere di polistirolo contenente ghiaccio fondente a 0,3°C e l'altra in un uguale recipiente contenente acqua calda a 47,3°C: è un esempio di macchina termica (fig. 14).

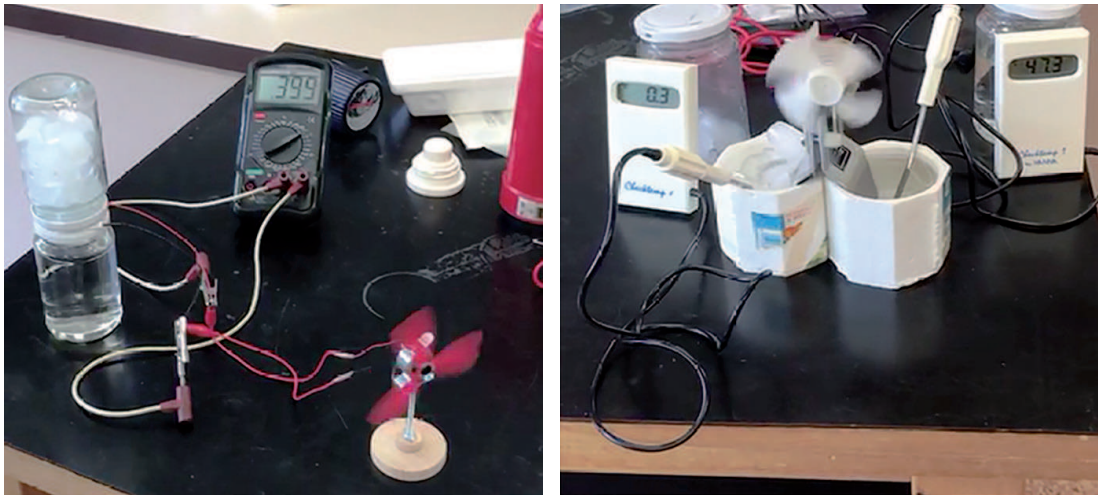

Figura 14. Energia elettrica sviluppata per effetto Seebeck.

Idrogeno

Abbiamo usato un modello di auto a idrogeno. Grazie all'energia elettrica prodotta dalla cella fotovoltaica, si è separato, per elettrolisi dell'acqua, l'idrogeno dall'ossigeno. Sfruttando una cella a combustibile (*fuel cell*) l'idrogeno, ionizzato, libera elettroni che danno origine ad una corrente elettrica e poi, combinandosi con l'ossigeno dell'aria, determina acqua come prodotto di scarto. La corrente elettrica attraversa il motorino che produce il movimento delle ruote del modello di auto (fig. 15). Si è sottolineato che l'idrogeno non è una fonte, ma solo un vettore energetico.

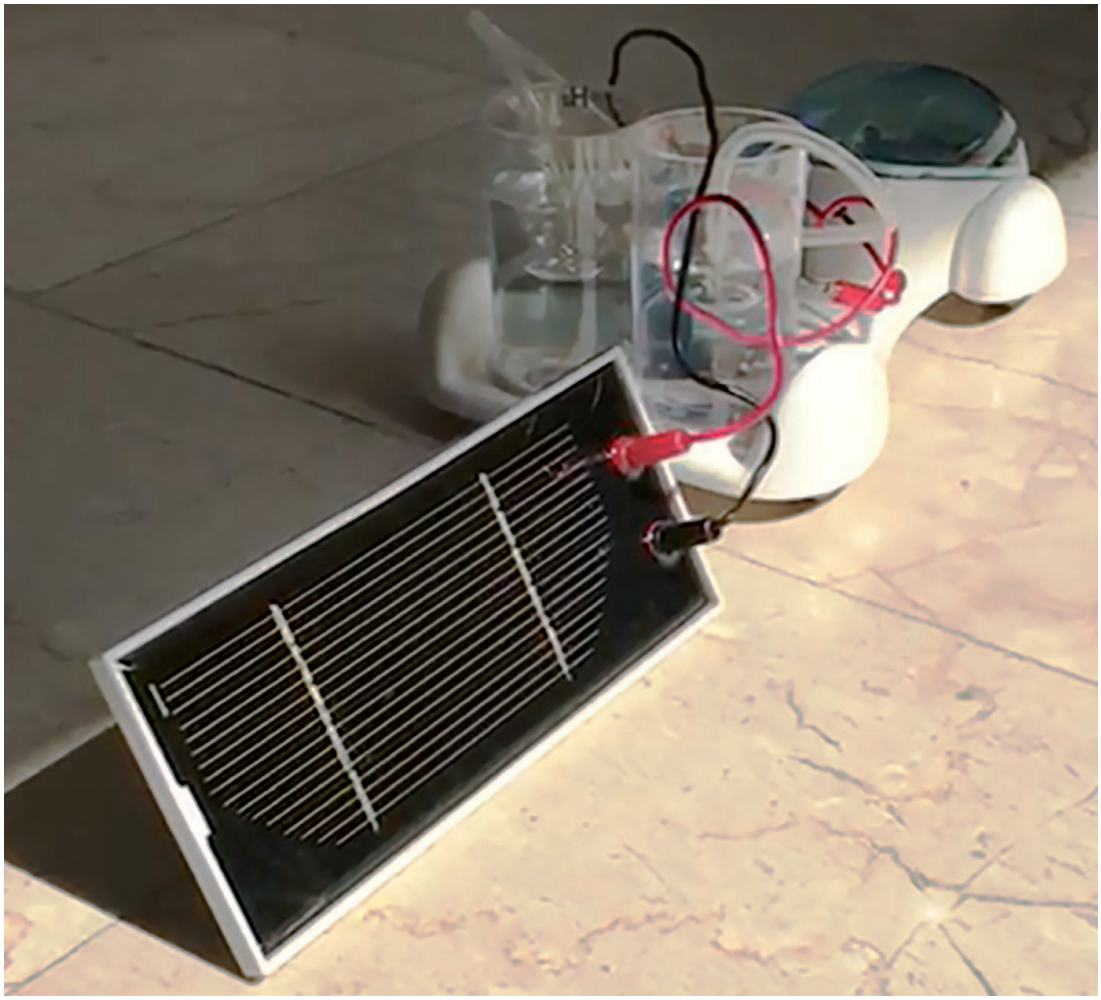

Figura 15. Elettrolisi per il modello di auto a idrogeno.

Test finale

Alla fine del percorso del progetto e dell'anno scolastico ho pensato di somministrare agli alunni della mia classe terza E un test conclusivo sull'uso dell'energia relativo alle competenze di base (vedi appendice). Gli studenti non erano stati avvisati sulla data della prova, anche se sapevano che non sarebbe stata valutata come prova di profitto. Questo perché volevo verificare quello che essi avevano acquisito senza bisogno di una preparazione specifica finalizzata a superare la prova.

Hanno risposto tutti e 21 gli studenti della classe; la distribuzione dei punteggi totali è riportata in figura 16. La moda e la mediana sono state entrambe di 37, punteggio che, convertito in voto, equivale a 7,4 decimi. Si tratta di un risultato complessivamente soddisfacente, in buona misura coerente con i risultati di profitto in Fisica.

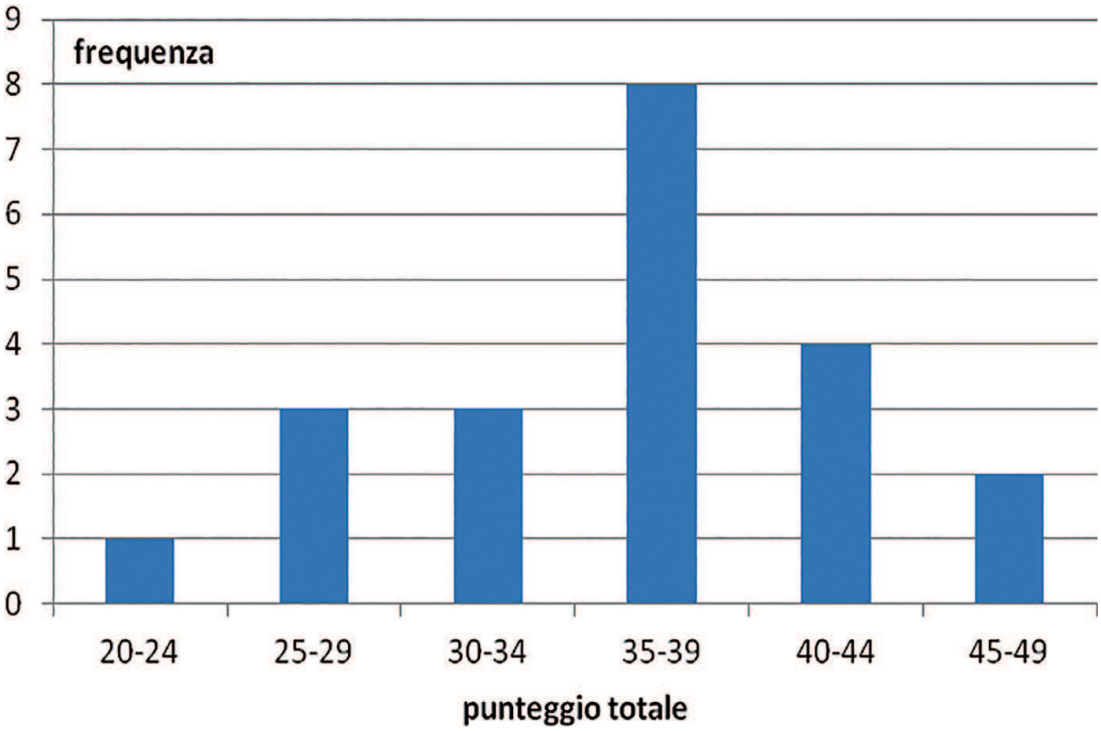

Figura 16. Risultati del test conclusivo.

Se consideriamo le risposte ai singoli quesiti, si ricava che, se è chiaro il concetto di fonte energetica, non altrettanto lo sono quelli di fonte primaria e di fonte rinnovabile (*item* 1,2,3). Inoltre, se è solo parzialmente accettabile il concetto di rendimento (*item* 4,5), risultano ben acquisiti i contenuti relativi al riscaldamento globale (*item* 6,7,8) e all'impronta ecologica (*item* 9,10). Infine sono stati acquisiti in modo accettabile i concetti di economia circolare e di transizione energetica (*item* 11,12).

Conclusioni e prospettive

L'impiego delle fonti rinnovabili appare come l'unica scelta energetica che può garantire un futuro agli esseri viventi sul nostro pianeta, dotato di risorse limitate e di fonti fossili in esaurimento. Le rinnovabili potranno esaudire le richieste energetiche mondiali solo se si svilupperanno piani globali seri e impegnativi capaci di accelerare la transizione energetica e di spingere l'umanità da un'economia lineare ad un'economia circolare, nella quale gli scarti e i rifiuti sono risorse riutilizzate all'interno del ciclo produttivo (vedi [3] p. 268-271). Gli accordi di Parigi del dicembre 2015, tesi a limitare il riscaldamento globale, sono una buona base di partenza (vedi [13] p. 114-116); ma bisogna andare avanti, rapidamente, nella stessa direzione. Occorre investire nella ricerca per migliorare l'efficienza (vedi [13] p. 118-140), ridurre drasticamente i consumi inutili e fare un uso intelligente e "sostenibile" dell'energia (vedi [14] p. 13-72). Nella consapevolezza che ogni scelta ha dei costi, non solo per l'energia necessaria, ma anche per i materiali richiesti che sono pure in quantità limitata e necessitano quindi una sensata gestione nel loro utilizzo e nel loro reimpiego (vedi [15] p. 3-25). La transizione energetica si affianca necessariamente a notevoli cambiamenti in campo economico e sociale, mettendo in crisi il dogma secondo il quale la prosperità sarebbe legata alla crescita del PIL. Tim Jackson propone un modello economico che possa assicurare benessere agli abitanti della Terra (non solo a quelli dei paesi ricchi) senza che sia necessaria la crescita (vedi [16] p. 173-191).

Appendice Test conclusivo del progetto CON-ENERGIA

1. Tra le seguenti parole sottolinea quelle che rappresentano fonti energetiche:
   ENERGIA POTENZIALE – PETROLIO – ENERGIA CINETICA – CALORE – ENERGIA ELETTRICA – BIOMASSE
2. Tra le seguenti parole sottolinea quelle che rappresentano fonti energetiche primarie:
   BENZINA – GASOLIO – NUCLEARE (FISSIONE) – IDROELETTRICO – CARBONE – GEOTERMIA
3. Tra le seguenti parole sottolinea quelle che rappresentano fonti energetiche rinnovabili:
   GAS METANO – SOLARE TERMICO – MAREE – SCISTI – EOLICO – IDROGENO
4. Definisci il rendimento (efficienza) di una centrale elettrica

   .....
5. Tra i seguenti dispositivi sottolinea quello che ha il migliore rendimento:
   LAMPADINA A INCANDESCENZA – MOTORE A BENZINA – MOTORE ELETTRICO –
   MOTORE DIESEL – LAMPADINA LED
6. Tra i seguenti gas sottolinea i gas serra:
   ELIO – METANO – OSSIGENO – IDROGENO – DIOSSIDO DI CARBONIO – AZOTO
7. Elenca le tre principali conseguenze del riscaldamento globale dell'ecosistema Terra:

   .....

   .....

   .....
8. Qual è la principale causa del riscaldamento globale dell'ecosistema Terra?

   .....
9. Sottolinea quale tra i seguenti alimenti produce una maggiore impronta ecologica:
   PANE – TROTA – CARNE DI BOVINO – LATTE – MOZZARELLA – PASTA – RISO – CARNE DI CONIGLIO
10. Traccia sullo stesso diagramma i grafici dell'impronta ecologica I e della biocapacità B in funzione del tempo misurato in anni, distinguendo il grafico di I da quello di B.
    I, B (ha)

11. Che cosa s'intende per "economia circolare"?

    .....
12. Che cosa s'intende per "transizione energetica"?

    .....

La misurazione di ogni singolo *item* è così ripartita, per un massimo di 50 punti.

item	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
punteggio	4	6	6	4	2	4	6	4	2	4	4	4

Per ogni *item* il massimo punteggio era attribuito alla risposta esatta e completa; per ogni errore veniva detratto 1 punto, per ogni risposta esatta mancante venivano detratti 2 punti; non erano considerati *item* con punteggi negativi.

Bibliografia

[1] G. De Leo, G. Fiorese, G. Guariso, *Energia e salute della Terra*, Fondazione Achille e Giulia Boroli, Milano, 2009.
[2] C. Hall, J. Lambert, S. Balogh, EROI for different fuels and the implications for society, *Energy Policy*, **64**, (2014), 141-152.
[3] N. Armaroli, V. Balzani, *Energia per l'astronave Terra*, Zanichelli, Bologna, 2017.
[4] P. Voosen, The Realist, *Science*, **359**, (2018), 1320-1324.
[5] D. MacKay, *Energia sostenibile - senza aria fritta*, UIT, Cambridge, 2014.
[6] B.R. Singh, O. Singh, Global Trends of Fossil Fuel Reserves and Climate Change in the 21st Century, in *Fossil Fuel and the Environment*, S. Khan (Ed.), (2012), 167-192.
[7] NEA-IAEA, *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*, OECD, 2016.
[8] G. Mastrojeni, A. Pasini, *Effetto serra effetto guerra*, Chiarelettere, Milano, 2017.
[9] IPCC, *Climate Change 2014 - Syntesis Report*.
[10] GWEG, *Global Wind Statistics 2017*.
[11] WEC, *World Energy Resources. Hydropower 2016*.
[12] GFN, *The Footprint and Biocapacity Accounting*, July 2015.
[13] G. Ruggieri, F. Monforti, *Civiltà solare*, Altraeconomia, Milano, 2016.
[14] A. Lorenzoni, *Il risparmio energetico*, il Mulino, Bologna, 2012.
[15] A. Valero Delgado, *Thanatia. The Destiny of the Earth's Mineral Resources*, World Scientific, Singapore, 2015.
[16] T. Jackson, *Prosperità senza crescita*, Edizioni Ambiente, Milano, 2017.