

DALLE MACCHINE TERMICHE AI PRINCIPI DELLA TERMODINAMICA

SILVIA PIROLLO, Liceo Artistico “L.B. Alberti”, Firenze
in collaborazione con Paola Falsini

DESCRIZIONE SINTETICA DELL'ATTIVITÀ

L'esperienza è stata svolta nell'a.s. 2007-2008 in una classe quinta di liceo artistico; il percorso didattico parte *dalla descrizione delle macchine termiche e della loro evoluzione, per poi analizzare i principi fisici che ne sono alla base, seguendo il percorso storico che ha visto nel XVIII secolo lo sviluppo della macchina a vapore e successivamente, nel 1824, la pubblicazione del lavoro “Riflessioni sulla potenza motrice del fuoco” di Sadi Carnot, che si propone appunto di studiarne i principi di funzionamento.*

Tale percorso rappresenta la prosecuzione di quello realizzato nella stessa classe (quarta) nell'anno scolastico precedente, in cui ci si è occupati del principio di conservazione dell'energia limitatamente ai fenomeni meccanici. Entrambi i percorsi sono stati concepiti nell'ambito dell'iniziativa di formazione dell'IRRE Toscana “*Educazione scientifica e innovazione didattica-curricolare nelle scuole secondarie*”, svoltasi per tre anni scolastici a partire dal 2004/05, in collaborazione con l'insegnante Paola Falsini, che ha realizzato gli stessi percorsi in un liceo scientifico (classi terza e quarta). Essi sono stati elaborati e articolati sulla base della convinzione che la storia dei concetti scientifici possa suggerire un'azione didattica più efficace in termini di reale comprensione da parte degli studenti di quanto si va loro proponendo. Un riferimento particolarmente importante per l'elaborazione dei percorsi è stata una lezione del prof. Fabio Bevilacqua, dell'Università di Pavia, rivolta agli insegnanti, tenuta nel marzo del 2006 presso un liceo fiorentino, sul tema della storia del Principio di Conservazione dell'Energia. Quella lezione, in cui il prof. Bevilacqua parlò anche dell'idea di coniugare storia della Fisica e didattica, ha suggerito il filo conduttore del percorso sperimentato; e al sito internet dell'Università di Pavia⁴ ci si è ampiamente riferiti per la presenza di testi sull'argomento.

L'arco di tempo dedicato al percorso che qui viene presentato è molto ampio; e si deve aggiungere che il tema dell'energia *non si conclude*: qualunque nuovo ambito sperimentale venga indagato (elettricità, magnetismo, ottica, ...) l'idea che esista una grandezza che si conserva, a cui si dà il nome di *energia*, sarà continuamente utilizzata e l'efficacia dell'analisi condotta con questa idea guida rappresenterà un'ulteriore conferma della validità del principio di conservazione in questione. Nella classe del liceo artistico, tuttavia, trattandosi di una quinta, lo studio della Fisica si è concluso con la Termodinamica.

CONOSCENZE, ABILITÀ NECESSARIE PER LA REALIZZAZIONE DELL'ATTIVITÀ PROPOSTA

Nella classe non era stato trattato in alcun modo il tema dei fenomeni termici, né il concetto di pressione e le leggi dei gas (si tenga presente che gli studenti avevano iniziato solo in terza lo studio della Fisica); gli elementi necessari sono stati affrontati man mano che se ne è presentata la necessità per lo svolgimento del percorso.

OBIETTIVI DELL'ATTIVITÀ CON PARTICOLARE RIFERIMENTO AGLI ELEMENTI DI TEORIZZAZIONE, QUANTIFICAZIONE, CONCETTUALIZZAZIONE

L'idea alla base di questo lavoro è quella di introdurre i concetti fondamentali della termodinamica all'interno del percorso storico attraverso il quale sono stati formulati, per risolvere problemi ed esigenze reali.

In questo tipo di lavoro la definizione rigorosa di nuove grandezze e leggi fisiche è un punto di arrivo.

In termini di contenuti disciplinari gli obiettivi sono:

- . Il funzionamento delle macchine termiche e la ricerca delle condizioni per il massimo rendimento (implicitamente il secondo principio della termodinamica)
- . Il superamento della teoria del calorico e l'equivalenza calore-lavoro
- . Il primo principio della termodinamica e il principio generale di conservazione dell'energia

INDIVIDUAZIONE DELL'EVENTUALE DIMENSIONE STORICA E/O EPISTEMOLOGICA DEI CONTENUTI DELL'ATTIVITÀ PROPOSTA

Questa dimensione attraversa tutto il percorso come già accennato e come verrà chiarito in seguito. Gli studenti hanno mostrato di aver percepito e apprezzato tale dimensione (anche per i percorsi svolti negli anni precedenti); ad esempio, hanno lamentato con l'insegnante l'assenza di questa attenzione agli aspetti storici e epistemologici nello studio della matematica.

EVENTUALE INTEGRAZIONE CON APPLICAZIONI TECNICHE E TECNOLOGICHE

Non si tratta di applicazioni: le macchine, al contrario sono il punto di partenza del percorso; certamente poi si è fatto riferimento, anche se non se ne è approfondito il funzionamento, ai motori a scoppio di auto e moto scooter.

QUANTO E COME VIENE SVILUPPATO L'ASPETTO LINGUISTICO

La metodologia utilizzata cerca di coinvolgere continuamente gli studenti invitandoli a esprimersi; inizialmente non si pretende che il linguaggio sia rigoroso.

E' importante che gli studenti facciano esperienza del fatto che di Fisica si può *parlare e scrivere*, che non tutto si riduce a formule matematiche.

Si introducono diversi nuovi termini o termini che acquistano un significato tecnico diverso da quello del senso comune.

DESCRIZIONE ANALITICA DELL'ATTIVITÀ: LE SUE FASI, L'INSERIMENTO IN UN PERCORSO, LE COMPETENZE ACQUISITE, SUE FASI, IL SUO "PRIMA" E IL SUO "DOPO"

Come introduzione allo studio delle macchine termiche si è scelto di svolgere alcune osservazioni qualitative che permettessero di riflettere sul funzionamento di una macchina a vapore casalinga cioè la caffettiera moka¹. Gli studenti hanno eseguito a casa alcune semplici prove di cui poi si è discusso in classe (far funzionare la macchinetta: 1. senza caffè, 2. senza imbutino, 3. con l'imbutino ostruito, 4. svitando la valvola di sicurezza); per ogni prova indicata si è richiesto agli studenti di scrivere le previsioni, le osservazioni svolte e le loro considerazioni. Tutti gli studenti hanno effettivamente svolto le prove 1. e 2., solo un piccolo gruppo la 3. e la 4. Le ipotesi fatte dalla maggior parte degli alunni non sono risultate confermate: molti infatti pensavano che l'acqua salisse dal serbatoio inferiore a quello superiore per dilatazione o per vaporizzazione e successiva condensazione. Al termine dell'attività tutti gli alunni hanno compreso che è la spinta del vapore sull'acqua a farla salire.

Come esempi di applicazione del vapore si sono presentati alcuni congegni costruiti da Erone di Alessandria per produrre movimenti, in particolare l'*eolipila* e un marchingegno per l'apertura delle porte del tempio; una simulazione del funzionamento dell'*eolipila* è disponibile sul sito dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze. Questi congegni avevano scopi ludici o spettacolari e non vennero impiegati per facilitare il lavoro dell'uomo.

Si è presentata agli studenti, anche attraverso la lettura di alcuni testi, una sintesi della storia che ha condotto dallo sfruttamento, ai fini di compiere lavoro, di forze muscolari e umane a quello delle

¹ Questa attività è suggerita nel testo di A. Baracca, U. Besson, *Introduzione storica al concetto di energia*, Le Monnier, 1990

forze provenienti dal vento, dall'acqua, dal calore; si sono delineati alcuni elementi della Rivoluzione Industriale, arrivando a presentare i primi esempi di impiego del vapore. Si è descritto, in particolare, il progetto di turbina a vapore di Giovanni Branca (1629): una ruota è azionata dal soffio di una figura umana posta come coperchio della caldaia.

Per capire il funzionamento delle macchine a vapore è stato necessario introdurre il concetto di pressione atmosferica e poi il concetto generale di pressione di un gas; lo si è fatto mostrando come, nel seicento, i contributi di Torricelli, Pascal, Boyle abbiano condotto ad abbandonare l'idea dell'orrore del vuoto reinterpretando i fenomeni connessi mediante il concetto di pressione dell'aria. Questa nuova idea condusse alla realizzazione della pompa pneumatica (Von Guericke, Boyle) il cui funzionamento è stato presentato agli studenti.

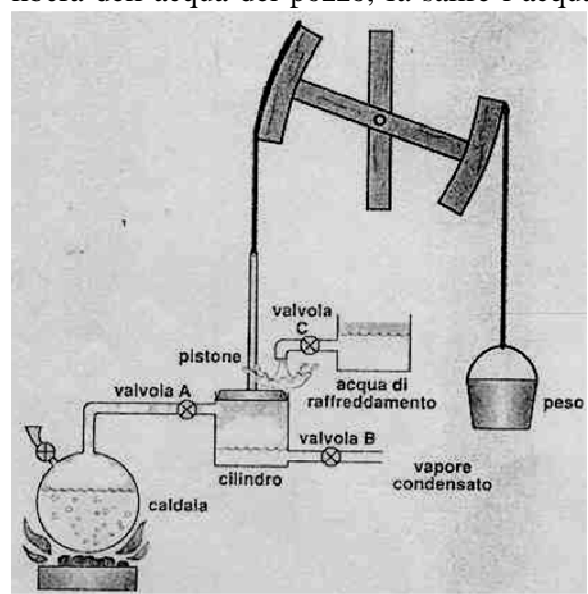
A questo punto si sono esaminate le macchine di Huygens (1673) e Papin (1690): nella prima Huygens propose di sfruttare la depressione conseguente all'esplosione di polvere da sparo, posta sul fondo di un cilindro, per ottenere l'abbassamento del pistone e il sollevamento di un peso ad esso collegato; nella seconda la depressione è conseguente alla condensazione del vapore. Papin è anche l'inventore della pentola a pressione di cui si è discusso il funzionamento; gli studenti si sono mostrati molto interessati, come pure a tutti i fenomeni connessi con la pressione atmosferica, proprio per il legame con l'esperienza quotidiana, e questa parte preliminare ha costituito una buona introduzione per la parte successiva.

Si è a questo punto affrontato **lo studio delle prime macchine termiche**, presentando quella di Savery, di Newcomen e di Watt.

Una necessità pratica, connessa con lo sfruttamento del carbone nell'Inghilterra del '600, era il prosciugamento delle miniere; queste, infatti, trovandosi a grandi profondità (quasi 200 m intorno al 1750), erano spesso allagate. Presentata questa necessità, si è discusso con gli studenti evidenziando l'impossibilità di sfruttare le pompe aspiranti, presentate in precedenza, a motivo del loro limite intrinseco legato al valore della pressione atmosferica. Lo sfruttamento dei cavalli per azionare le pompe è stato collegato alla definizione dell'unità di misura della potenza, ancora oggi utilizzata e dunque nota agli studenti, chiamata *cavallo vapore*; esso fu definito, da James Watt, come la potenza di un cavallo che mediamente, si sapeva, era in grado di sollevare in un minuto un peso di 150 libbre all'altezza di 220 piedi. Così è stato ricavato insieme agli studenti il fattore di conversione all'unità del Sistema Internazionale: $1 \text{ CV} = 745 \text{ Nm/s}$.

Si è dunque presentata la prima vera macchina basata sull'uso del vapore, la macchina di Savery (1698); nel brevetto ne era indicata l'applicazione "*per il prosciugamento delle miniere, per il rifornimento dell'acqua alle città e per il funzionamento di tutte le specie di mulini laddove non è possibile usufruire di acqua né di venti costanti*". Osservando un disegno della macchina se ne è ricostruito con gli studenti il funzionamento: l'acqua nel pozzo della miniera è collegata mediante un tubo ad un recipiente cilindrico; in quest'ultimo si convoglia il vapore formato nella caldaia che spinge l'acqua presente nel cilindro verso la superficie. Successivamente il vapore presente nel cilindro viene condensato attraverso un getto di acqua di raffreddamento, creando una depressione. Così la pressione atmosferica agente sulla superficie libera dell'acqua del pozzo, fa salire l'acqua dal pozzo fino al cilindro, da cui verrà espulsa nel modo descritto. Sono stati discussi i limiti di tale macchina: il fatto di operare con pressioni del vapore molto elevate (per far salire l'acqua da notevole profondità) e il fatto di dover porre la macchina a non più di 10 m dall'acqua del pozzo. In effetti essa fu utilizzata poco nelle miniere.

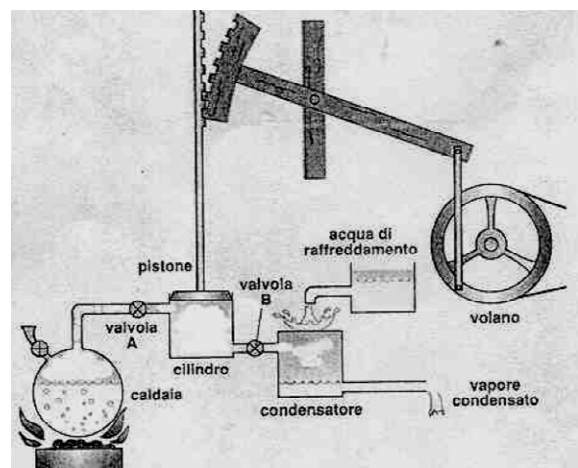
Nella classe del liceo scientifico "Agnoletti" di Sesto Fiorentino, in cui pure è stato svolto il percorso, è stato costruito in laboratorio un modello di macchina di Savery (secondo i suggerimenti



presenti nel testo di Baracca e Besson, già citato); esso è stato realizzato con vetreria presente in laboratorio, tubi in rame, alluminio e plastica e rubinetti resistenti ad alte temperature. La “macchina” funziona con pressioni del vapore di poco superiori alla pressione atmosferica; gli studenti stessi l’hanno messa in funzione, realizzando la sequenza di operazioni necessaria: accensione del fornello elettrico per il riscaldamento dell’acqua e la formazione del vapore, apertura e chiusura dei rubinetti, raffreddamento, Il fatto di utilizzare recipienti di vetro ha permesso di veder passare l’acqua dalla beuta/pozzo alla beuta/cilindro e poi da questa alla beuta/raccoglitore esterno. Ripetendo molte volte le azioni (fino al passaggio quasi completo dell’acqua dal primo recipiente all’ultimo) gli studenti hanno anche intuito che poteva essere immaginato un automatismo per le opportune aperture e chiusure dei rubinetti. Questa attività ha costituito anche un’occasione di consolidamento sui passaggi di stato e sul comportamento della materia allo stato aeriforme.

Dopo quella di Savery si è presa in esame la macchina di ideata da Thomas Newcomen, la prima macchina a vapore ad avere una grande diffusione; in effetti non si tratta più di una pompa ma di un vero motore. In essa erano presenti cilindro e stantuffo come nella macchina di Papin; il grande vantaggio rispetto a quella di Savery era di lavorare a pressione atmosferica. Anche in questo caso si sono individuate insieme agli studenti le varie fasi del funzionamento e si sono esaminati anche i dati relativi alle prestazioni: una stampa dell’epoca (1712) riferisce che una macchina di questo tipo sollevava 45 litri di acqua a 46 metri di altezza per ogni oscillazione del bilanciere, con una frequenza di 12 volte al minuto. Si è potuta dunque calcolare la potenza della macchina che è risultata 5,4 CV (cioè circa 4 KW). L’esame del funzionamento di queste prime macchine ha condotto anche a porsi il problema della loro *efficienza* (gli studenti che hanno osservato il modello di macchina di Savery in funzione, hanno constatato che si è tenuto acceso il fornello per mezz’ora circa per sollevare di qualche decina di centimetri circa un litro d’acqua...). Si è fatto presente che l’efficienza (*duty*) di una macchina veniva quantificata mediante l’altezza in piedi a cui era in grado di sollevare un milione di libbre bruciando un *bushel* (sacco) di carbone (36-38kg; la combustione del carbone fornisce 6500-7000 cal/g). Mediamente una macchina di Newcomen, con un bushel di carbone, sollevava di un piede circa 5,6 milioni di libbre.

Queste considerazioni sull’efficienza delle macchine, insieme ad alcune informazioni sull’enorme sviluppo dell’industria tessile in Inghilterra tra il 1750 e le prime decadi dell’800, hanno condotto a occuparsi dell’opera di James Watt che realizza macchine che consentono lo sfruttamento industriale concreto dell’energia prodotta. Watt era un fabbricante di strumenti di precisione per l’Università di Glasgow; nel 1763 gli era stato chiesto di occuparsi del cattivo funzionamento di un modello di macchina di Newcomen, utilizzato per le lezioni all’Università. In questa occasione egli si rese conto che la bassa efficienza di queste macchine era dovuta alla necessità di riscaldare a ogni ciclo le pareti del cilindro contenente il vapore, dopo il raffreddamento necessario per la condensazione del vapore stesso. Watt realizza dunque una macchina in cui tiene separati il recipiente in cui avviene l’espansione del vapore con sollevamento del pistone (cilindro), dal recipiente in cui avviene la condensazione, che Watt nel suo brevetto del 1769 (che si è letto con gli studenti nei passaggi fondamentali) chiama *condensatore*. Si sono presi in esame altri miglioramenti apportati da Watt, che hanno quadruplicato il rendimento della sua macchina rispetto a quella di Newcomen (il meccanismo *biella-manovella*, la macchina *a doppio effetto*, il regolatore centrifugo, i diagrammi indicatori). Di particolare interesse per il successivo studio della termodinamica la realizzazione di diagrammi indicatori: un piccolo pistone collegato ad un pennino riportava su un asse verticale le variazioni di pressione del vapore nel cilindro e contemporaneamente il foglio di carta veniva mosso in direzione orizzontale a destra o sinistra seguendo le variazioni di volume. I diagrammi pressione-volume introdotti da Clapeyron successivamente



(1834) riprendono l'idea del diagramma indicatore di Watt.

A questo punto del percorso è stato necessario affrontare alcuni elementi di calorimetria propedeutici alla parte successiva, dal momento che nella classe non erano ancora stati trattati, come pure riprendere in modo sistematico il tema dei passaggi di stato. Lo studio di questi argomenti ha trovato una motivazione e si è arricchito di senso per gli studenti per il fatto di essere stato introdotto all'interno del contesto concreto delle macchine termiche.

Dopo aver analizzato l'evoluzione delle macchine termiche, si è affrontata, attraverso l'opera di **Sadi Carnot, la questione dei principi che le governano e della possibilità di migliorarne il rendimento.** Si sono dapprima fornite alcune note biografiche su Sadi Carnot; egli era figlio di Lazare, matematico, studioso della meccanica delle macchine, in special modo quelle idrauliche, già incontrato nel percorso dell'anno precedente. Delle *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, pubblicato nel 1824 a Parigi, si è letta una selezione di brani, cominciando dalla premessa; in essa l'autore esprime una grande fiducia nel progresso e la convinzione della disponibilità di fonti di energia inesauribili, riconosce all'Inghilterra il primato dell'invenzione e dello sviluppo delle macchine termiche ma evidenzia la mancanza di una *teoria* su di esse che stabilisca le condizioni ideali di funzionamento. In particolare, Carnot osserva che i tentativi di migliorare le macchine termiche hanno avuto fino a quel momento direzione casuale; si propone di stabilire se la potenza motrice del calore è limitata o meno e se esistono agenti preferibili al vapore acqueo per ottenere tale potenza. L'autore chiarisce che per potenza motrice intende il sollevamento di un peso a una data altezza; gli studenti vi riconoscono il concetto di lavoro. Il linguaggio non tecnico, privo di formule, è stato scelto dall'autore per essere compreso non solo dagli scienziati, come testimonia il fratello Hyppolite raccontando che Sadi gli faceva leggere il manoscritto per assicurarsi che fosse comprensibile anche da persone dedite ad altri studi.

Dopo la premessa Carnot evidenzia una circostanza fondamentale nel funzionamento delle macchine a vapore, il ristabilimento di equilibrio nel calorico. Qui si è aperta la questione su cosa sia il calore, facendo presente che, almeno all'epoca delle *Réflexions*, Carnot aderisce alla teoria del calorico, che è stata dunque presentata nelle sue assunzioni fondamentali. In particolare si è mostrata la capacità della teoria di spiegare fatti sperimentali, in parte ben noti agli studenti, come la dilatazione termica, e la difficoltà che la teoria incontra per altri fatti, come la costanza della temperatura nei passaggi di stato (che portò a immaginare l'esistenza di un calorico effettivo e di uno latente).

L'adesione alla teoria del calorico suggerisce a Carnot un'analogia tra macchine termiche e macchine idrauliche: come le macchine idrauliche sfruttano la caduta dell'acqua, alla base del funzionamento della macchina a vapore sta il ristabilimento di equilibrio nel calorico, cioè il suo passaggio da un corpo a temperatura più o meno elevata a un altro a temperatura più bassa, senza che esso venga consumato. Nel testo i due corpi in questione sono individuati nell'*aria calda della fornace* e nell'*acqua di condensazione*. Questa circostanza conduce Carnot a evidenziare un aspetto fondamentale nel funzionamento della macchina: non è sufficiente produrre calore per generare potenza motrice è ancora necessario produrre del freddo, senza di esso il calore sarebbe inutile (questo è, tra l'altro, uno dei modi in cui viene enunciato il secondo principio della termodinamica); e d'altra parte dovunque sia presente una differenza di temperatura lì sarà possibile ottenere potenza motrice. Carnot passa poi a sottolineare come la produzione di tale potenza motrice sia legata ai *cambiamenti di volume* che si producono nella macchina: il calore può essere causa di movimento solo in virtù dei cambiamenti di volume e questi non sono causati da una temperatura costante, ma da alternanze di caldo e freddo.

A questo punto viene affrontata la questione di quale sia il mezzo migliore da utilizzare, se il vapore d'acqua o qualcos'altro: dati un corpo caldo A e uno freddo B quanta potenza motrice può essere ottenuta facendo passare una fissata quantità di calorico dall'uno all'altro? Per chiarire il ruolo dei corpi denominati A e B è stato introdotto agli studenti il concetto di *termostato* o *serbatoio di*

calore o sorgente di calore, invitandoli a trovare nella loro esperienza corpi che, come la caldaia e il refrigerante nelle macchine termiche, potessero approssimare la condizione ideale di non cambiare di temperatura pur acquistando o cedendo calore.

Nella ricerca della macchina ideale, Carnot fa notare che, se è vero che dove vi è una differenza di temperatura si può ottenere potenza motrice, è anche vero che spendendo potenza motrice si può realizzare una differenza di temperatura tra corpi che prima si trovavano all'equilibrio termico; aggiunge alcuni esempi e si è chiesto agli studenti di individuare altri fenomeni in cui si potesse ravvisare l'effetto qui indicato dall'autore. Un esempio fondamentale per Carnot è così descritto: *“E' un fatto sperimentale che la temperatura dei fluidi gassosi aumenta per compressione e diminuisce per rarefazione. Questo è un metodo sicuro per cambiare la temperatura dei corpi e per causare uno squilibrio nel calorico utilizzando potenza motrice.”* Nel testo vengono forniti alcuni esempi: si tratta di situazioni non del tutto conosciute agli studenti o su cui non avevano mai posto attenzione. Il caso più semplice di riscaldamento è quello che si incontra utilizzando una pompa di bicicletta; per il raffreddamento alcuni hanno richiamato la fuoriuscita di gas da un recipiente in cui si trova compresso. Per Carnot tali variazioni di temperatura causate da variazioni di volume sono tra *i fatti più importanti della fisica*, come si capirà bene nel seguito della trattazione.

Riprendendo la questione del massimo rendimento, viene ora immaginata una prima sequenza di tre trasformazioni cui sottoporre il vapore: un'espansione a contatto con il corpo A (la fornace), che fa sì che la temperatura si mantenga costante; un'espansione senza scambio di calore in cui si ha raffreddamento fino alla temperatura di B; una compressione a contatto con il refrigerante B, che sottraendo calore provoca la condensazione del vapore a temperatura costante. In questa occasione vengono introdotti gli aggettivi *isoterma* e *adiabatica*, e la rappresentazione delle trasformazioni in un diagramma cartesiano pressione/volume. La riflessione sulla sequenza proposta ha portato a riprendere e approfondire la questione della dipendenza dalla pressione della temperatura a cui avviene un passaggio di stato. Di fondamentale importanza è l'esperienza che la classe ha svolto al laboratorio dell'Open Lab dell'Università di Firenze: l'acqua può bollire anche a temperatura inferiore a 100°C (e senza che sia in contatto con una fiamma o un fornello elettrico...) se posta all'interno di una campana in cui si diminuisce la pressione rispetto a quella atmosferica. Il processo provoca il raffreddamento del liquido, tanto da causare a un certo punto il congelamento dello strato superficiale.

Carnot propone poi di poter *invertire* le tre trasformazioni, per ritornare alle condizioni iniziali: formazione di vapore in un'espansione isoterma alla temperatura di B, compressione adiabatica con aumento di temperatura fino a quella di A e compressione isoterma alla temperatura di A. Per capire come possa aver luogo la prima di queste trasformazioni è di fondamentale importanza aver osservato in laboratorio l'ebollizione dell'acqua, e quindi la formazione di vapore, a bassa temperatura (che potrebbe essere dunque quella del corpo B)².

A questo punto Carnot immagina di accoppiare due macchine che compiano le due sequenze di trasformazioni sopra descritte: la prima produce potenza motrice e trasferimento di calorico da A a B; nella seconda, sfruttando la potenza motrice prodotta dalla prima, si può far tornare il calorico da B ad A. E, sfruttando l'impossibilità del motore perpetuo, su cui gli studenti avevano riflettuto a lungo nell'anno scolastico precedente, arriva a concludere che la potenza motrice ottenuta con il vapore è la massima che può essere ottenuta, con qualsiasi mezzo, fissati A e B e la quantità di calorico trasferita tra essi. Dunque *Il massimo di potenza motrice risultante dall'impiego del vapore è anche il massimo di potenza motrice realizzabile con qualsiasi mezzo.*

La questione adesso è stabilire quale sia questo massimo. Si è letto dalle parole di Carnot un principio fondamentale che *non deve mai essere perso di vista nella costruzione delle macchine termiche*: dal momento che il ristabilimento dell'equilibrio del calorico può essere causa della

² Nella classe del liceo scientifico “Agnoletti” l'esperienza è stata svolta nel laboratorio didattico, proprio contestualmente alla lettura del testo

produzione di potenza motrice, ogni ristabilimento che avvenga senza produzione di potenza motrice è da considerare una perdita e quindi da evitare. La riflessione su queste parole di Carnot ha fatto capire che ciò che deve essere evitato è il contatto diretto tra corpi a temperatura diversa, il passaggio spontaneo di calore tra un corpo caldo e uno freddo. I cambiamenti di temperatura, aggiunge Carnot, devono essere causati solo da variazioni di volume. Carnot mostra come, nella sequenza di trasformazioni sopra presentata, queste condizioni siano soddisfatte; si introduce qui il concetto di trasformazioni *reversibile*: la trasmissione di calore, avvenendo tra corpi alla stessa temperatura, può anche cambiare verso. La reversibilità è dunque la condizione per il massimo rendimento.

E' a questo punto che Carnot introduce il ciclo di trasformazioni che porta il suo nome, il *ciclo di Carnot*; alla sequenza di trasformazioni sopra presentata se ne aggiunge una quarta per *ristabilire le cose nel loro stato primitivo*, una compressione adiabatica per riportare il fluido alla temperatura del corpo A. Carnot considera adesso un generico fluido elastico al posto del vapore, "*per esempio l'aria*". Ci soffermiamo con gli studenti sulla differenza tra vapore e aria, che spesso non è chiara, e sul concetto di fluido elastico. Ricordiamo anche la legge di Boyle e i diagrammi di pressione-volume. Il testo di Carnot contiene delle figure che servono a illustrare le trasformazioni che l'autore immagina di far compiere al gas; qui può essere utile introdurre altre visualizzazioni da altri testi e anche la rappresentazione del ciclo sul piano PV. Carnot conclude la descrizione del ciclo con queste considerazioni: *L'aria quindi ci è servita come macchina termica; anzi l'abbiamo impiegata nel modo più vantaggioso possibile, perché non è stato effettuato alcun ristabilimento di equilibrio nel calorico che fosse inutile [...] Tutte le suddette operazioni possono essere nel senso e nell'ordine inverso*.

Nel testo troviamo anche la spiegazione del perché in questa serie di trasformazioni viene prodotta potenza motrice: *La forza elastica (pressione) dell'aria varia al variare del volume e della temperatura; ma si deve notare che a parità di volume, cioè per posizioni uguali del pistone, la temperatura risulta più elevata nelle fasi di espansione che in quelle di compressione. Quindi, durante le prime, la forza elastica dell'aria è maggiore, e [...] si otterrà un eccesso di potenza motrice*. Gli studenti sono in grado di comprendere quanto affermato perché conoscono le leggi dei gas; di grande aiuto anche il diagramma PV. Si ricava a questo punto l'espressione del lavoro in funzione delle grandezze termodinamiche, $L=p\Delta V$.

Riflettendo sulla macchina concepita da Carnot, si sottolinea ancora come essa soddisfi alle condizioni ideali individuate: non c'è passaggio spontaneo di calore tra corpi a diversa temperatura, i cambiamenti di temperatura sono dovuti a variazioni di volume e il passaggio di calore avviene tra corpi alla stessa temperatura. Si è anche ricordata la soluzione empirica di Watt, la separazione tra cilindro e condensatore che evita proprio il contatto tra corpi a temperatura diversa.

Si riprende, a questo punto, sempre leggendo il testo, l'analogia tra macchine termiche e idrauliche; Carnot ricorda che, per funzionare, una macchina termica necessita della sorgente calda (da cui assorbe calore) e di quella fredda (a cui cede calore), quindi due sorgenti a temperature diverse: come per la caduta dell'acqua, è la "caduta" del calorico a produrre potenza motrice.

L'analogia in questione suggerisce che il rendimento sarà tanto maggiore, nelle macchine termiche, quanto più grande sarà la differenza di temperatura tra corpo caldo e corpo freddo; ma l'autore si domanda se vi sia una proporzionalità diretta tra queste grandezze (come avviene per il caso idraulico); e ancora, se il valore delle temperature influisca sul rendimento (nelle macchine idrauliche l'altezza in assoluto non conta). Carnot conclude che *la caduta di calorico produce più potenza motrice a temperature basse che a temperature alte*, ma ammette anche di non essere in grado di fornire la dimostrazione rigorosa di questa conclusione.

A questo punto si è conclusa la lettura del testo di Carnot (la trattazione completa del ciclo di Carnot è stata ripresa più avanti).

Abbiamo visto che Carnot, sebbene esprimendo alcuni dubbi, aderisce alla teoria del calorico; nell'ultima parte del percorso ci si è occupati dell'abbandono di tale teoria, ripercorrendo le tappe che hanno condotto a comprendere **la natura del calore**.

Si sono descritte le riflessioni e le indagini sperimentali condotte da Benjamin Thompson, conte di Rumford, sull'alesatura dei cannoni; egli riferisce, come si è letto direttamente da un suo scritto, di essere rimasto colpito dal “*grado davvero considerevole di calore che un cannone di ottone acquista in breve tempo durante l'alesatura e dal calore ancora più intenso dei frammenti metallici che l'alesatura ne stacca*”. Si è fatto presente che fenomeni come questo non erano certamente nuovi (gli studenti stessi possono riferirsi a esempi tratti dall'esperienza quotidiana) e che si era cercato di interpretarli coerentemente con la teoria del calorico; per questo si era ipotizzato che la capacità termica dei trucioli di metallo fosse diminuita. Thompson mise alla prova questa congettura immergendo un blocco metallico e della polvere metallica di uguale massa in acqua, dimostrando che era necessaria la stessa quantità di calore per innalzare di un grado la temperatura delle due quantità. Dalle parole stesse di Thompson si sono lette le sue conclusioni: *Non è il caso di insistere sul fatto che una cosa che un corpo isolato può continuare a fornire senza limitazione non può essere una sostanza materiale; e mi pare estremamente difficile, se non del tutto impossibile, formarmi un'idea distinta di una cosa che possa essere eccitata e comunicata nel modo in cui il calore fu eccitato e comunicato in questi esperimenti, a meno che non si tratti di un MOTO*”. È importante far notare che la comunicazione di Thompson alla Royal Society risale al 1798: la teoria del calorico continuò a essere ritenuta valida ancora per diversi decenni, convivendo con la teoria del calore come movimento.

Gli esperimenti di Rumford vennero ripresi circa 50 anni più tardi da J.P. Joule; anche in questo caso si leggono alcuni brani dalla descrizione di Joule del suo celebre esperimento del *mulinello*: “*L'apparato consisteva di una ruota a pale di ottone che lavorava orizzontalmente in un recipiente pieno d'acqua. A questa ruota si poteva comunicare del moto mediante pesi, carrucole ecc.... La ruota si muoveva con grande resistenza nel recipiente pieno d'acqua, di modo che i pesi scendevano con una velocità relativamente bassa [...]. Dopo aver ripetuto per sedici volte questa operazione l'aumento della temperatura dell'acqua veniva accertato mediante un termometro molto sensibile e accurato.*” L'acqua dunque si riscalda come sarebbe accaduto se le si fosse fornito calore.

Sono stati mostrati i disegni dell'apparato forniti dallo stesso Joule e si sono cercate immagini e ricostruzioni dell'esperimento in internet.

La descrizione di Joule è accurata e si capisce che l'esperimento non è di semplice esecuzione; sono molti i fattori di cui Joule ha cercato di tenere conto nel modo più preciso possibile. La conclusione è che “*Dopo aver ridotto il risultato alla capacità per il calore di una libbra d'acqua, apparve che, per ogni grado di calore sviluppato dall'attrito dell'acqua, si era spesa una potenza meccanica pari a quella che può sollevare all'altezza di un piede un peso di 890 libbre.*” (Più avanti indicherà 817 libbre). Come si capisce la lettura del testo di Joule richiede un po' di attenzione, anche per l'uso di diverse unità di misura; questo è un aspetto istruttivo perché fa capire che le unità di misura hanno una storia e perché aiuta a consolidare i significati delle grandezze in gioco. Da notare anche che Joule si esprime in un modo che oggi consideriamo scorretto: parla di *un grado di calore* laddove ci aspetteremmo un grado di temperatura; ma anche questo può essere occasione di riflessione: i termini hanno acquistato significati sempre più specifici e rigorosi ma questo ha richiesto tempo; se è stato vero per gli scienziati a maggior ragione sarà vero per i nostri studenti.

L'esperimento di Joule, in una forma un po' modificata (apparecchio di Callendar), è stato svolto dalla classe presso l'Open Lab dell'Università di Firenze; si è cercato di minimizzare le incertezze valutando anche la quantità di calore scambiata con l'esterno. Il risultato medio ottenuto è stato 3,7 J/cal, con un'incertezza del 10% a cui contribuisce soprattutto la misura dell'aumento di temperatura. Rileggendo il testo si è determinato il valore dell'equivalente meccanico della caloria stabilito da Joule stesso ottenendo, nelle nostre unità, 4,39J.

Joule era fermamente convinto della mutua convertibilità delle *forze* della natura. A conferma di questa idea realizza diverse esperienze per dimostrare, in modo sempre più accurato, che ogni volta che un “potere” naturale viene apparentemente distrutto o consumato se ne sviluppava un altro in misura equivalente. Tra queste si è ritenuto interessante presentare agli studenti quelle sull’espansione e la compressione adiabatiche: i risultati, infatti, erano nettamente in contrasto con la teoria del calorico. Joule aveva rilevato che in un’espansione adiabatica, per la quale la teoria del calorico prevedeva una diminuzione di temperatura dovuta alla diminuzione di densità del calorico, non si aveva alcun raffreddamento se l’espansione aveva luogo *liberamente*; e quindi poteva concludere che le variazioni di temperatura osservate nelle compressioni e espansioni adiabatiche erano invece dovute a conversione di potere meccanico in termico e viceversa. (A questo punto si può anche trattare la questione della differenza tra i calori specifici dei gas a volume costante e a pressione costante, dal cui confronto fu possibile, nuovamente, determinare l’equivalente meccanico della caloria; questa parte è stata svolta nella classe di liceo scientifico ma non in quella di liceo artistico).

A conclusione del percorso si è svolta una riflessione su **come si è giunti all’idea della conservazione dell’energia**. Si sono riprese alcune idee già introdotte l’anno precedente (*nulla si crea nulla si distrugge*); la traccia di riflessione è stata ricavata da due manuali scolastici (che presentano un approccio rispondente all’idea generale che ha guidato questo percorso) e dal capitolo del libro *La tensione essenziale* di Thomas Kuhn, dedicato alla scoperta del principio di conservazione dell’energia. Kuhn individua e descrive tre condizioni che hanno condotto all’enunciazione del principio: la disponibilità di processi di conversione grazie a nuovi ambiti sperimentali indagati in quei decenni (connessione tra elettricità, magnetismo, ottica, calore, ...); lo sviluppo delle macchine, veri e propri dispositivi di conversione; il diffondersi della nuova *filosofia della natura* nei primi decenni dell’800, che per Kuhn ha fornito lo sfondo filosofico adeguato per la scoperta della conservazione dell’energia, influenzando il pensiero di diversi scienziati, quali Joule, Faraday, Maxwell. Trattando questa parte in una classe quinta, si è avuto modo di richiamare e stimolare collegamenti con le discipline umanistiche e soprattutto con la filosofia.

Il principio di conservazione dell’energia viene enunciato in termini espliciti nel saggio del fisico tedesco Hermann von Helmholtz del 1847 “Sulla conservazione della forza”; egli afferma: “*Siamo arrivati alla conclusione che la Natura possiede nel suo complesso una certa quantità di forza che non può essere assolutamente aumentata o diminuita e che, quindi, è eterna e inalterabile come la quantità di materia. Questa legge generale, espressa in questa forma, la chiamo Il principio di conservazione della forza*”.

LABORATORI E RISORSE STRUMENTALI

Nell’Istituto non c’è il Laboratorio di Fisica. L’insegnante ha accompagnato la classe all’OpenLab presso il Polo Scientifico di Sesto Fiorentino; sono state presentati tre esperimenti: la verifica della legge di Boyle, l’ebollizione dell’acqua a bassa temperatura e la determinazione dell’equivalente meccanico della caloria (con apparecchio di Callendar). Inutile osservare che la possibilità di svolgere le esperienze quando i temi vengono effettivamente affrontati avrebbe tutta un’altra rilevanza didattica.

FREQUENZA E DURATA NEL TEMPO DELL’ATTIVITÀ

Le ore settimanali di Fisica sono due (della durata di 50 minuti); la parte di Termodinamica qui descritta ha occupato circa un quadrimestre.

SE L’ATTIVITÀ È STATA CONDOTTA DA INSEGNANTI DI PIÙ DISCIPLINE

No

SE L'ATTIVITÀ È STATA CHIARITA NEI SUOI SCOPI AGLI STUDENTI (CONTRATTO FORMATIVO)

Gli obiettivi del percorso e la scelta metodologica erano noti agli studenti. Nei due anni precedenti l'insegnante aveva già proposto percorsi simili come obiettivi e metodologia; gli studenti, ad esempio, avevano già l'abitudine a lavorare in modo svincolato dal manuale.

Gli studenti hanno apprezzato molto queste scelte, tanto che sono arrivati a "criticare" l'insegnante perché la matematica veniva presentata secondo metodi più tradizionali.

STRUMENTI E PROCEDURE PER LA VERIFICA E LA VALUTAZIONE

Le verifiche scritte sono state strutturate in funzione della terza prova dell'esame di stato, formulando quesiti a risposta aperta o trattazione sintetica di argomenti. La valutazione scaturisce anche dagli interventi brevi, dalla partecipazione e dall'interesse mostrati.

STRUMENTI E ATTIVITÀ UTILIZZATI PER IL CONSOLIDAMENTO

Non sono stati necessari strumenti o attività specifiche; il percorso, per le scelte metodologiche fatte, consente di riprendere e consolidare tutto quanto si svolge.

FATTORI STRUTTURALI ORGANIZZATIVI E MATERIALI NECESSARI (MODIFICAZIONE DEL CALENDARI, FLESSIBILITÀ ORARIA, CLASSI APERTE, COMPRESENZA, ...)

L'aspetto più rilevante è il fatto che non si utilizza il libro di testo; questa scelta comporta un aggravio di lavoro per l'insegnante per accertarsi gli studenti che abbiano tutto il materiale in ordine.

COME L'ESPERIENZA È LEGATA AD ATTIVITÀ ESTERNE ED ESPERIENZE DI VITA QUOTIDIANA

Le esperienze di vita quotidiana che sono state richiamate riguardano l'ebollizione e la condensazione; in modo più marginale la compressione e l'espansione adiabatiche.

PERCORSO FORMATIVO PREGRESSO DELL'INSEGNANTE (SE INFLUENTE RISPETTO ALL'ATTIVITÀ IN QUESTIONE)

L'insegnante è laureata in Fisica e tale formazione di base ha avuto certamente un peso nell'interesse generale verso l'elaborazione di percorsi didattici che abbiano come obiettivo un apprendimento significativo di questa disciplina. Tale interesse ha trovato una risposta nell'attività di formazione proposta dall'IRRE Toscana, per tre anni a partire dall'anno scolastico 2004/05, "*Educazione scientifica e innovazione didattica-curricolare nelle scuole secondarie*", già citata in precedenza. Tale esperienza formativa aveva portato all'elaborazione di altri percorsi da parte dell'insegnante, ispirati alle stesse scelte su metodi e contenuti.

I MOTIVI DELLA SCELTA DELL'ATTIVITÀ

Il tema della Termodinamica è fondamentale nello studio della Fisica e occupa, nel liceo artistico, un intero anno scolastico. La scelta fatta rappresenta un modo diverso di trattare questo importante tema, con l'obiettivo di ottenere una comprensione più profonda dei concetti fisici, che vada al di là del nudo formalismo matematico, presentandoli nel contesto in cui furono forgiati.

Sebbene le macchine siano state importanti secondo molti punti di vista, il loro studio e la comprensione del loro funzionamento è usualmente riservato alla tecnica. In un lavoro tradizionale sulla termodinamica le macchine termiche vengono infatti trattate solo al margine, per dare invece ampio spazio allo studio dei gas perfetti e delle loro trasformazioni. In questo percorso, invece, si parte dalle macchine e si vede come, in questo caso, il progresso tecnico abbia preceduto la conoscenza dei principi; così si è anche offerta un'occasione per riflettere sull'intreccio tra scienza e tecnica.

Le scelte metodologiche operate nello svolgimento di questo percorso, erano state messe in atto dalle insegnanti anche per altri temi (movimento, dinamica, energia meccanica, ...), sostenute dalla convinzione che i cambiamenti concettuali che devono prodursi nei soggetti che apprendono somiglino un po' a quelli che hanno avuto luogo nella storia della scienza. Con questa motivazione è nata l'idea di utilizzare una scelta di brani dal testo di Carnot; esso permette di capire alcuni principi base della termodinamica attraverso un linguaggio il più delle volte semplice e privo di formule matematiche, che spesso rappresentano un ostacolo, per gli studenti, alla comprensione dei concetti fisici che descrivono. In particolare, il testo ha permesso di comprendere l'origine del cosiddetto *ciclo di Carnot*: nei manuali si definisce, si disegna, si esplicitano le espressioni del lavoro in ogni trasformazione, si dimostra la formula del rendimento ... ma non si chiarisce il perché di un ciclo fatto proprio *così*. La scelta di un testo *senza formule* vuole anche andare oltre lo stereotipo che senza la matematica non si possa studiare la Fisica.

Ma anche pensando agli studenti più bravi in matematica, riteniamo che esprimere da subito tutto in formule possa sacrificare l'acquisizione dei significati e creare l'illusione di una competenza che non c'è: una sintassi corretta è lo strumento efficace per esprimere concetti e relazioni tra essi, ma non è garanzia che tali concetti e relazioni siano davvero acquisiti, che davvero ci sia stata un'acquisizione di significati.

INDIVIDUAZIONE DI EVENTUALI PUNTI DI “CRISI” IN ITINERE, SULLA BASE DELL'AUTOVALUTAZIONE DATA DALL'INSEGNANTE E MODIFICHE APPORTATE
Non ci sono state difficoltà significative.

EVENTUALI RAPPORTI CON GLI ENTI LOCALI, CON STRUTTURE DI RICERCA E LORO EVENTUALE SUPPORTO ALL'ATTIVITÀ DESCRITTA

Rapporto con l'IRRE Toscana e con l'OpnLab come già descritto.

Ci si è anche avvalsi dell'intervento degli operatori dell'Associazione LUDICA che hanno presentato alla classe la Macchina di Stirling.

DESCRIZIONE REDATTA DA PAOLA FALSINI, 4 novembre 2009

⁴ <http://ppp.unipv.it/Silsis/Pagine/Corso1/Cors1Frm.htm>