

professione (Institution of Electrical Engineers, IEE) [...].  
La nuova professione  
cresce due giovani destinati a  
diffondere la fisica: Albert  
Einstein e P.A.M. Dirac. [J.D.  
Gale, Storia della Scienza].

mate  
o ch'or son,  
e sicure al pari,  
tempo saran le vie men trite  
città sovrane, e talor forse  
dritte città le vie maggiori  
[G. Leopardi].

25. Osservando una figura di pagina 13-29, qual è la posizione di una spira rotante quando la corrente è massima? Quando è minima? Perché?

26. A cosa serve il collettore?

27. Da dove proviene l'energia fornita dal generatore?

28. Come si determina l'energia assorbita da un conduttore di resistenza  $R$ , percorso da una corrente alternata per un tempo  $t$ ? Si ottiene lo stesso risultato calcolando il valore medio della corrente e poi facendone il quadrato, oppure calcolando il quadrato della corrente in ogni istante e poi trovandone il valore medio?

29. Come si può ottenere un motore elettrico da un generatore?

30. Cosa impedisce che il motore elettrico avesse un successo commerciale immediato?

## 9. La lampada elettrica

Lo sviluppo dell'industria elettrica fu dovuto essenzialmente alla diffusa richiesta di apparecchiature elettriche. Tra queste la lampada elettrica fu una delle prime ad avere un grande successo commerciale: la sua storia è un esempio interessante di interdipendenza tra fisica, industria e società. Agli inizi del XIX secolo l'illuminazione degli edifici e delle case era ottenuta con candele e lampade a petrolio. L'illuminazione delle strade nelle città era praticamente inesistente, infatti solo in alcuni casi si appendevano delle lampade davanti alle case durante la notte. L'industria del gas naturale stava appena cominciando a cambiare questa situazione e il primo sistema di illuminazione stradale con lampade a gas fu installato sul *Westminster Bridge* di Londra nel 1813.

Nel 1801 il chimico inglese Humphry Davy notò che si poteva ottenere una scintilla luminosa, cioè un arco, interrompendo il contatto tra due elettrodi di carbone collegati ai morsetti di una batteria; questa scoperta portò allo sviluppo della «lampada ad arco»,



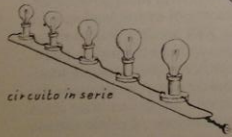
La lampada ad arco di Davy.



Alla fine del 1800 in alcune città europee venivano usati sistemi di lampade ad arco alimentati con dinamo.



circuiti in parallelo



circuiti in serie

ma non fu possibile generalizzarne l'uso finché i generatori elettrici rotanti, azionati dalle macchine a vapore, non sostituirono le costose batterie come sorgenti di energia elettrica. Negli anni tra il 1860 e il 1880 la lampada ad arco cominciò a essere usata per l'illuminazione stradale e per quella delle abitazioni, anche se era troppo abbagliante e costosa per l'uso domestico.

Humphry Davy e altri scienziati dimostrarono che è possibile produrre la luce semplicemente facendo passare la corrente in un filo conduttore (spesso chiamato filamento) in modo che si riscaldi e raggiunga una temperatura elevata; questo metodo è noto come illuminazione per incandescenza. Il maggior inconveniente tecnico consisteva nel fatto che il materiale del filamento gradualmente bruciava. La soluzione ovvia sarebbe stata quella di racchiudere il filamento in un contenitore dal quale fosse stata estratta l'aria, ma ciò era difficile da ottenere perché le pompe a vuoto, agli inizi del XIX secolo, non riuscivano a produrre pressioni sufficientemente basse. Solo nel 1865, dopo la realizzazione da parte di Herman Sprengel, in Germania, di una pompa a vuoto con prestazioni molto buone, la lampada elettrica poté assumere il suo aspetto attuale. (L'uso della pompa a vuoto di Sprengel fu essenziale anche per gli esperimenti di Crookes, e altri, che portarono ad alcune scoperte della fisica atomica di cui parleremo nel capitolo 16).

Il nome di Thomas Edison è legato all'invenzione della lampada elettrica a incandescenza, egli però non fu il primo a usare la pompa di Sprengel per migliorare il rendimento delle lampade e nemmeno scopri qualche nuovo importante principio scientifico. Il suo contributo consiste nell'aver costruito una lampada che poté essere usata nelle abitazioni e (cosa più importante) nell'aver sviluppato un sistema di distribuzione dell'elettricità, col quale non solo facilitò l'uso della lampada a incandescenza ma aprì anche la via per un consumo di massa dell'energia elettrica.

Edison partì dal presupposto che ogni utente doveva poter accendere o spegnere le proprie lampade senza con ciò interrompere l'alimentazione delle altre lampade collegate al circuito. Ciò significa che le lampade devono essere collegate «in parallelo», come i pioli di una scala, invece che in «serie»; i due tipi di collegamento sono rappresentati rispettivamente nelle figure a lato.

La scelta dei circuiti in parallelo invece di quelli in serie ebbe importanti conseguenze tecniche. In un circuito in serie tutta la corrente attraversa ogni lampada, mentre in uno in parallelo solo una parte della corrente totale erogata dalla sorgente passa attraverso la singola lampada. Per evitare che sia necessaria una corrente totale troppo elevata, si deve fare in modo che sia sufficiente una corrente bassa in ciascuna lampada.

Come è già stato detto nel capitolo 12, l'effetto termico di una corrente dipende sia dalla resistenza del conduttore, sia dall'intensità della corrente che lo attraversa. L'energia termica prodotta nell'unità di tempo è  $RI^2$ , cioè è direttamente proporzionale alla resistenza, ma aumenta con il quadrato della corrente. La maggior parte dei costruttori di lampade faceva uso di correnti elevate e di filamenti a bassa resistenza e di conseguenza sosteneva che i circuiti in parallelo non sarebbero stati utilizzabili da un punto di vista pratico. Edison invece si rese conto che anche una piccola corrente può produrre un effetto termico elevato, purché la resistenza del conduttore sia abbastanza grande.

Perciò Edison cominciò a cercare sostanze non metalliche di



Un modello della lampada di Edison. Osservate il caratteristico filamento e lo zoccolo per avvitare la lampada.



resistenza abbastanza elevata, per costruire i filamenti. Per far ciò, per prima cosa essiccava o «carbonizzava» un pezzetto di una sostanza, poi lo rinchiodava ermeticamente dentro un bulbo di vetro, nel quale precedentemente aveva fatto il vuoto, e collegava il filamento all'esterno con fili conduttori. Il suo assistente provò più di mille tipi di materiali: «carta e tessuto, spago, lenza, fibre, cellulose, legno di bosco, gusci di cocco, legno d'abeto rosso, legno di noce americano, fieno, trucioli d'acero, legno di rosa, muschio, sughero, lino, bambù e persino un pelo della barba di uno scozzese dai capelli rossi». Il primo successo nella ricerca della lampada a elevata resistenza lo raggiunse usando una fibra di cotone carbonizzata, racchiusa in un bulbo in cui aveva fatto un vuoto spinto. Il filamento bruciò continuamente per due giorni prima di esaurirsi. Ciò accadde nell'ottobre del 1879. Nell'anno successivo Edison costruì delle lampade con filamenti fatti di cartoncino di Bristol, bambù e carta. La *Edison Electric Light Company* cominciò a installare sistemi di illuminazione nel 1882 e dopo soli tre anni aveva già venduto duecentomila lampade. Inoltre, questa industria aveva praticamente il monopolio in quel settore e pagava sostanziosi dividendi agli azionisti.

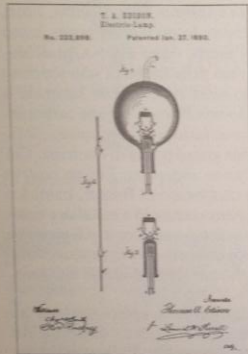
Dai tempi dell'invenzione di Edison la lampada elettrica ha subito qualche modifica. Per esempio, il filamento carbonizzato delle vecchie lampade è stato sostituito da un filo di tungsteno, che ha i vantaggi di un maggior rendimento e di una maggiore durata.

Anche in Italia, subito dopo la Mostra internazionale di Parigi del 1881, la lampada elettrica ebbe una diffusione molto rapida. Il *Corriere della Sera* del 19-20 novembre 1882, così commenta le prove preliminari eseguite a Milano nella Galleria, per iniziativa di un comitato appositamente costituito per la diffusione dell'elettricità in Italia (vedi pagina 13-42):

«La luce che producono tali fiammelle è viva, chiara e limpidissima e non offende gli occhi né punto né poco. Il confronto con tutto il resto del portico illuminato a gas è la più bella dimostrazione a favore della luce elettrica: voltandosi indietro verso piazza Mercanti, pare di vedere il sotterraneo del quarto atto dell'*Aida*, tanto i pilastri s'innalzano di tinte nere e si tingono di lividi riflessi».

Il rapido diffondersi dell'uso delle lampade confermò le previsioni fatte da Edison sulla possibilità di un largo impiego di prodotti elettrici e favorì un grande sviluppo dei sistemi di produzione e di distribuzione dell'energia. La necessità di una maggior potenza per l'illuminazione stimolò il perfezionamento dei generatori e portò a una utilizzazione più efficiente dell'energia idrica e all'invenzione della turbina a vapore. I successi ottenuti nella produzione di grandi quantità di energia a basso costo resero possibili in seguito altre utilizzazioni dell'elettricità. Quando ogni casa fu collegata alla rete di distribuzione elettrica per l'illuminazione, la corrente fu usata anche per alimentare le macchine da cucire, gli aspirapolvere, le lavatrici e, in un secondo tempo, una gamma sempre più vasta di elettrodomestici e di apparecchi radiotelevisivi.

Noi siamo ormai talmente abituati alle più complicate e spettacolari applicazioni dell'elettricità, che ci è difficile capire quale importanza abbia avuto un'invenzione così semplice come la lampada elettrica. Ma la maggior parte della gente che è vissuta durante il periodo dell'elettrificazione (avvenuta appena negli anni '30 e '40 in molte delle aree rurali degli Stati Uniti e non ancora completata in molte delle zone montane nelle regioni meridionali in Italia) è d'ac-



Il disegno che accompagnava il brevetto di Edison per la lampada elettrica. Le parti indicate con delle lettere sono: (a) il filamento di carbone; (c) le estremità più spesse del filamento; (d) i fili di platino; (h) morsetto serrafili; (k) fili di piombo; (e) fili di rame; (m) tubo che va alla pompa a vuoto.

cordo nel dire che l'unica applicazione dell'elettricità che abbia cambiato radicalmente la loro vita quotidiana è stata la lampada elettrica.

31. Perché le lampade ad arco non erano usate per l'illuminazione delle abitazioni?
32. Quale fu l'innovazione tecnologica essenziale per lo sviluppo delle lampade a incandescenza?
33. Perché Edison riteneva necessaria una sostanza con resistenza elevata per i filamenti delle lampade elettriche?
34. Spiegate cosa si intende per collegamento in serie e collegamento in parallelo.
35. Una pila fornisce la corrente che passa in una lampadina. Volendo misurare la differenza di potenziale ai capi della lampadina per mezzo di un voltmetro, esso andrà collegato in serie alla lampadina o in parallelo ad essa?

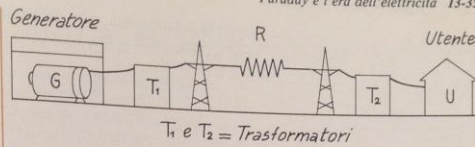
## 10. Il problema della scelta tra corrente continua e alternata

Nel paragrafo 8 abbiamo detto che, normalmente, un generatore produce corrente alternata che può essere trasformata in corrente continua servendosi di un collettore. A quel tempo, e per la maggior parte del XIX secolo, gli ingegneri e i tecnici erano generalmente convinti della necessità di convertire la corrente alternata in corrente continua, perché ritenevano che solo quest'ultima fosse adatta alle applicazioni pratiche.

Tuttavia, non appena crebbe la richiesta di energia elettrica, divennero evidenti alcuni svantaggi della corrente continua: per esempio, il collettore rendeva più complicato il progetto della parte meccanica del generatore, specialmente se l'anello doveva ruotare ad alta velocità e questa difficoltà divenne ancora più seria dopo l'introduzione delle turbine a vapore negli anni intorno al 1890, poiché le turbine hanno un rendimento maggiore se l'albero motore ruota ad alta velocità. Un altro svantaggio era il fatto che non si conosceva un modo conveniente per variare la tensione della corrente continua.

Uno dei motivi per cui è desiderabile cambiare la tensione di alimentazione di un sistema di trasmissione riguarda la quantità di energia che si trasforma in calore nei fili conduttori. La potenza erogata da un generatore dipende, come abbiamo dimostrato nel paragrafo 12-11, dalla tensione in uscita dal generatore e dalla corrente:

$$P_{\text{tot}} = VI$$



La stessa potenza totale può essere trasmessa anche con una intensità di corrente  $I$  minore, se si aumenta la tensione  $V$ . Quando una corrente di intensità  $I$  passa in un conduttore di resistenza  $R$ , la potenza trasformata in calore è proporzionale alla resistenza  $R$  e al quadrato della corrente  $I$ :

$$P_{\text{cal}} = RI^2$$

Quindi la potenza totale di cui può disporre l'utente è  $P_{\text{tot}} - P_{\text{cal}}$ . Ciò significa che, per una linea di trasmissione di resistenza  $R$ , bisogna fare in modo che la corrente  $I$  sia quanto più piccola possibile, al fine di rendere minima la potenza dissipata nella trasmissione. Pertanto, l'energia elettrica deve essere trasmessa a bassa intensità di corrente e alta tensione. Nella maggior parte delle applicazioni dell'elettricità, soprattutto nelle case, è pericoloso e poco conveniente usare alte tensioni; inoltre parecchi generatori non possono produrre elettricità a tensioni molto alte (ciò infatti richiederebbe velocità di rotazione troppo elevate per le parti rotanti). Per queste due ragioni si rende necessario un dispositivo che consenta di «elevare» la tensione dell'elettricità per la trasmissione, e permetta poi di «abbassarla» nuovamente all'altro estremo della linea, per l'utilizzazione: in breve, è necessario un *trasformatore*.

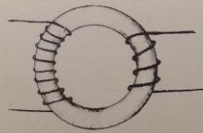
Si può costruire un trasformatore con una semplice modifica della bobina usata da Faraday per l'induzione elettromagnetica (par. 7). Faraday riuscì a produrre una corrente indotta in una bobina (che chiameremo circuito *secondario*) avvolgendola su un nucleo di ferro e variando poi la corrente in un'altra bobina (circuito *primario*) avvolta sull'altro lato dello stesso nucleo. Variando la corrente nel primario se ne induce un'altra nel secondario; inoltre, se la corrente primaria varia con continuità nel tempo, anche nel secondario si avrà continuamente una corrente indotta variabile nel tempo. In particolare, una corrente alternata nel primario, per esempio quella fornita da un generatore senza collettore, indurrà una corrente alternata anche nel secondario.

Se il secondario ha più spire del primario, la tensione alternata indotta ai capi del secondario sarà *più grande* di quella esistente ai capi del primario; se il secondario ha meno spire del primario, la tensione alternata ai suoi capi sarà *più piccola* di quella esistente ai capi del primario. Ciò fu scoperto da Joseph Henry, che costruì il primo trasformatore nel 1838.

In prima approssimazione si può dire che il rapporto tra le tensioni è uguale al rapporto tra il numero delle spire, rispettivamente nel primario e nel secondario:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Inoltre, per la legge di conservazione dell'energia, la potenza in uscita da un trasformatore non può essere superiore a quella in entrata. Perciò, se la tensione di uscita è maggiore di quella in ingresso



Una corrente continua nel circuito primario non induce alcuna corrente nel secondario: infatti il trasformatore funziona in corrente alternata.



Un trasformatore di una centrale elettrica.

(perché il numero di spire del secondario è maggiore del numero di spire del primario) la corrente in uscita deve diminuire in maniera proporzionale.

Uno dei primi impianti in corrente alternata fu presentato nel 1883 all'Esposizione di Elettricità di Londra e serviva ad alimentare un carico formato da alcune lampade a incandescenza e da un motore. Un altro impianto fu eseguito in Italia nel 1884, utilizzando lo stesso sistema, per una linea sperimentale a 2000 V che permetteva di attivare, con le macchine a corrente alternata installate all'Esposizione di Elettricità di Torino, un gruppo di lampade elettriche di differenti modelli, collocate nella stazione ferroviaria di Lanzo, alla distanza di 34 km.

L'esperimento di Torino colpì l'ingegnere americano George Westinghouse, fondatore della Westinghouse Electric Company, che l'anno dopo introdusse negli Stati Uniti il sistema a corrente alternata. Il dibattito sulla scelta tra corrente alternata e corrente continua fu molto aspro, anche per i notevoli interessi economici in gioco. Quando Westinghouse introdusse negli Stati Uniti il sistema a ca, la *Edison Electric Light Company* aveva il monopolio quasi completo delle lampade a incandescenza e aveva investito grandi capitali per la costruzione di impianti di produzione e distribuzione a cc per la maggior parte della città. Naturalmente, Edison si allarmò della concorrenza che poteva nascere dal nuovo modo di produrre l'energia elettrica. Ne seguì un dibattito pubblico molto accanito, durante il quale Edison cercò di dimostrare che la corrente alternata era pericolosa, a causa dell'alta tensione usata per la trasmissione. Nel bel mezzo della disputa, i legislatori dello stato di New York approvarono una legge per la pena capitale mediante elettrocuzione

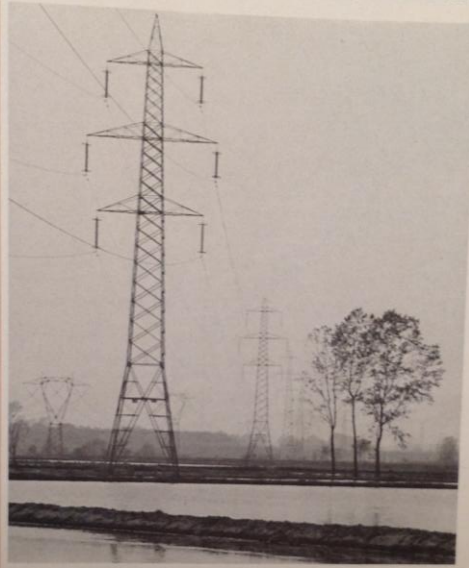
La centrale idroelettrica delle cascate del Niagara.



Schema del principio di funzionamento di una centrale idroelettrica. L'acqua proveniente dall'alto mette in rotazione le pale della turbina, montate direttamente sull'albero del generatore.



Linea  
dell'energia  
tensione  
risate a

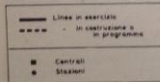
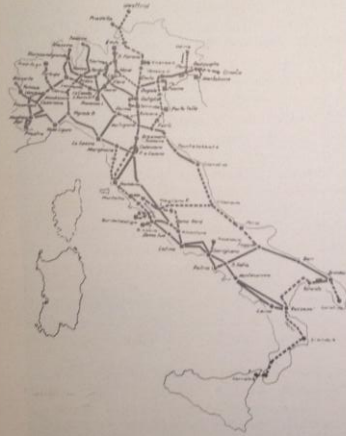


Linea per la trasmissione dell'energia elettrica ad alta tensione, tracciata attraverso le risse del Vercesele.

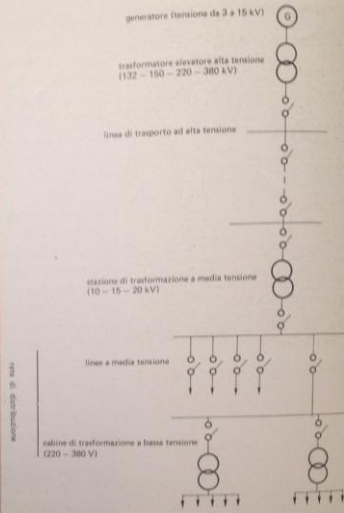
(cioè con la sedia elettrica) per eseguire la quale furono scelti, su indicazione di un ingegnere associato a Edison, gli alternatori Westinghouse, contribuendo probabilmente ad accrescere il timore della gente nei confronti della corrente alternata.

Ciò nonostante, il sistema Westinghouse continuò a svilupparsi e poiché non si verificarono incidenti particolarmente gravi, l'opinione pubblica lo accettò come sufficientemente sicuro. La sua affermazione fu assicurata in modo definitivo nel 1893, quando fu deciso l'uso della corrente alternata per la nuova centrale idroelettrica delle cascate del Niagara. Nel 1887 alcuni uomini d'affari di Buffalo stanziarono 1 000 000 di dollari da offrire come premio "al più grande inventore del mondo" per il progetto di un sistema che utilizzasse la potenza del Niagara River "a Buffalo o nelle vicinanze, in modo da poter sfruttare quest'enorme energia per le varie necessità". La proposta attirò l'attenzione di tutto il mondo, non solo per l'alto premio, ma anche perché non erano mai state trasmesse quantità così grandi di energia su una distanza come quella che separa le cascate del Niagara da Buffalo, circa 35 chilometri. Il successo o l'insuccesso di questo progetto avrebbe influenzato lo sviluppo futuro dei sistemi di distribuzione dell'elettricità per altre grandi città.

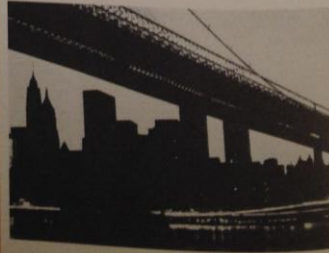
La scelta tra il sistema a ca e quello a ce per l'impianto delle cascate del Niagara fu una decisione difficile. L'elettricità nel 1890 era richiesta soprattutto per l'illuminazione, e di conseguenza si aveva una maggior richiesta di energia verso sera: il sistema avrebbe do-



Rete ENEL a 380 kV.



**Distribuzione dell'energia elettrica.** La distribuzione dell'energia elettrica a corrente alternata richiede delle apparecchiature notevolmente complesse. I generatori producono delle tensioni di circa  $10^4$  volt, che vengono elevate a circa  $10^5$  volt per la trasmissione, nuovamente abbassate a circa  $10^4$  volt per la distribuzione locale ed ulteriormente abbassate a circa  $10^2$  volt dai trasformatori situati in prossimità del luogo di utilizzazione. Nelle abitazioni può succedere che si abbassi ancora il voltaggio (ad esempio a 6 volt per i campanelli o per i trenini elettrici) oppure che lo si elevi con i trasformatori installati negli apparecchi televisivi per alimentare i tubi ad alta tensione.



New York City. A sinistra, prima del blackout del 1977; a destra, durante il blackout.





Manifesto pubblicitario italiano del 1922.

vuto lavorare al di sotto della piena capacità durante il giorno o nella tarda notte. Alcuni ingegneri sostennero che anche se la ca può essere generata e trasmessa con un rendimento maggiore, un sistema a cc sarebbe stato più adatto a funzionare in presenza di forti variazioni della domanda di energia, perché le batterie avrebbero potuto aiutare i generatori nei periodi di maggior richiesta. Fu consultato anche Edison che senza esitazione raccomandò il sistema a cc; tuttavia la *Cataract Construction Company*, che era stata istituita per amministrare il progetto, rimandò la decisione.

La scelta era ancora incerta nel 1891, quando alla Mostra Internazionale dell'Elettricità di Francoforte, in Germania, fu presentata una linea a ca trifase che trasportava grandi quantità di energia da Francoforte a Lauffen, su una distanza di 178 chilometri. Le prove effettuate sulla linea mostrarono un rendimento del 77%, cioè su 100 watt immessi a un capo della linea solo 23 andavano perduti per dispersione termica lungo la linea e gli altri 77 arrivavano come potenza utilizzabile. Il successo di questa dimostrazione favorì un graduale cambiamento di opinione degli esperti a favore della ca rispetto alla cc e, infine, la *Cataract Company* decise di costruire un sistema a ca.

Dopo l'affermazione del sistema a ca, risultò che i critici si erano sbagliati nelle loro previsioni di calo della domanda durante il giorno: l'elettricità poteva avere molti altri usi oltre all'illuminazione. Negli anni intorno al 1890 i motori elettrici erano già in grado di funzionare per le tranvie, le macchine da cucire e gli ascensori e di conseguenza la richiesta di elettricità si distribuì in modo più uniforme nell'arco delle ventiquattro ore. Nel caso particolare delle centrali idroelettriche, il tipo di energia primaria posseduta dall'acqua permette una produzione continua di energia senza un aumento eccessivo di costi, anche durante la notte. Invece la caldaia di una turbina a vapore richiede di essere continuamente rifornita di combustibile, anche durante la notte. Ciò favorì ulteriori utilizzazioni dell'energia elettrica, in particolare per un tipo di industrie, come quelle elettrochimiche, che prima utilizzavano direttamente la corrente continua, a prezzi più elevati.

Come ultimo atto della lotta tra la corrente alternata e la corrente continua aggiungiamo che adesso, in conseguenza dello sviluppo di dispositivi elettronici che consentono la trasformazione della corrente continua in corrente alternata, la corrente continua si sta rivelando più vantaggiosa per la trasmissione di potenza elettrica a grande distanza a tensioni elevate.

36. Per quale ragione è più conveniente trasmettere l'energia elettrica ad alta tensione e bassa corrente piuttosto che a bassa tensione e alta corrente?
37. Perché un trasformatore non potrebbe funzionare se fosse alimentato in corrente continua?
38. Perché aumentando il numero di spire della bobina del secondario di un trasformatore la tensione ai suoi capi aumenta? Per rispondere utilizzate la legge di Faraday-Neumann.

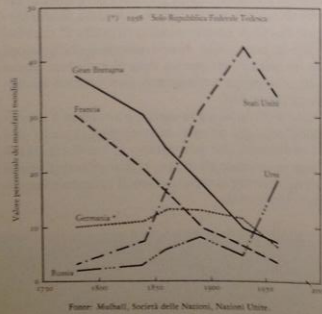
# 11. Energia elettrica e seconda rivoluzione industriale

Abbiamo visto che la Rivoluzione industriale inglese, avvenuta nella seconda metà del '700, ebbe uno dei suoi momenti fondamentali nell'invenzione della macchina a vapore e nel suo perfezionamento da parte di Watt. La macchina a vapore permise di sostituire l'energia del carbon fossile all'energia umana e animale, che insieme al vento e all'acqua erano le uniche energie disponibili su scala abbastanza vasta.

L'invenzione del generatore e del motore elettrico permise di usare l'energia disponibile in maniera completamente nuova, trasportandola e distribuendola a grandi distanze.

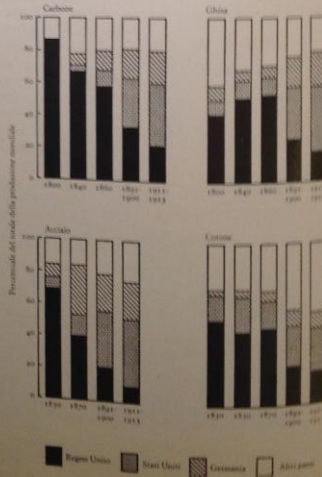
Le centrali elettriche vennero costruite in montagna per sfruttare l'energia dei torrenti e dei bacini artificiali, vicino ai porti per utilizzare il carbone proveniente dai paesi più lontani senza dover ricorrere a costosi trasporti, oppure vicino alle miniere di carbone nei paesi che ne disponevano. L'energia elettrica prodotta veniva poi trasportata a distanza nei luoghi di utilizzazione; scomparve così la necessità di avere le fabbriche e le case vicino alle miniere di carbone e ai luoghi dove esso veniva bruciato, appesando l'aria e riempiendo di fuliggine case e polmoni.

L'avvento dell'elettricità permise una distribuzione capillare dell'energia alle singole case, e quindi il suo uso nella vita quotidiana.

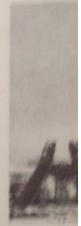


Produzione industriale dei principali paesi: 1780-1958. (Da E. Hobsbawm, La rivoluzione industriale e l'impero, Einaudi).

L'industria nel mondo nel XIX secolo.



8 ott. 1887



10 mag. 18



26 dic. 188

La Tour El

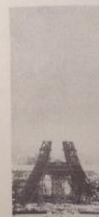
Pur meglio le condiz opera rim tutto l'800 Inghilterra lavorativa superava a mezza, ma ferro e del turni, la s continuò a alla prima



8 ott. 1887



10 apr. 1888



10 mag. 1888



14 ago. 1888



26 dic. 1888



12 mar. 1889

La Tour Eiffel.

Pur migliorando gradualmente, le condizioni di lavoro degli operai rimasero molto dure per tutto l'800. Nel 1884 in Inghilterra la settimana lavorativa nelle fabbriche non superava le cinquantasei ore e mezza, ma nell'industria del ferro e dell'acciaio, a causa dei turni, la settimana di 84 ore continuò a essere normale fino alla prima guerra mondiale.

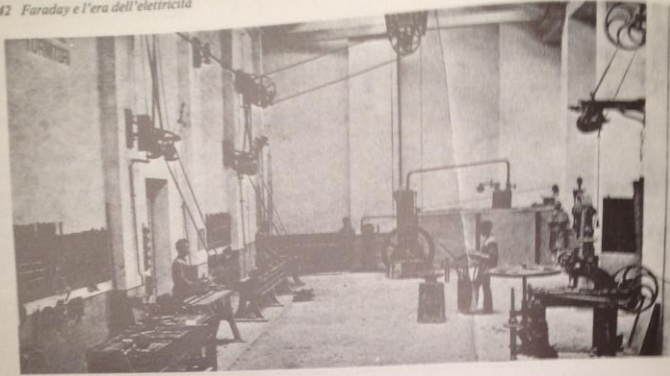
na, per l'illuminazione e, più tardi, per gli elettrodomestici. L'insieme di cambiamenti fu talmente grande che alcuni parlano di una *seconda rivoluzione industriale*: come la prima era legata alla possibilità di utilizzare una nuova fonte di energia motrice, il carbone, così la seconda era legata a un nuovo modo di distribuire l'energia, l'elettricità.

Il cambiamento della produzione industriale che ebbe luogo nella seconda metà dell'800 non fu però dovuto solo alle scoperte nel campo dell'elettricità, ma fu caratterizzato da una parte dal sorgere di nuove industrie, dall'altra dall'avvento dell'industrializzazione in paesi diversi dall'Inghilterra. La tabella qui sotto vi dà un'idea di quali furono le nuove invenzioni, caratteristiche di quest'epoca e di quali fossero le nuove industrie che trainarono lo sviluppo. La prima a svilupparsi fu l'industria chimica: mentre in precedenza le sostanze utili all'industria venivano fabbricate con procedimenti semiartigianali, a partire dalla metà dell'800 la scienza chimica fornì indicazioni per produrre sostanze già note con metodi molto più efficienti: è il caso del metodo Solvay che permette di produrre la soda (molto importante come detergente nell'industria tessile e come sostanza di base per ottenere altri prodotti chimici) dall'ammoniaca e dal sale comune. Le richieste di ammoniaca, di fertilizzanti e di esplosivi portarono allo sviluppo della chimica dei composti dell'azoto, che culminò alla fine dell'800 con la realizzazione della sintesi diretta dell'ammoniaca a partire dall'azoto atmosferico. Contemporaneamente, le conoscenze delle proprietà chimiche dei composti del carbonio permisero la realizzazione dei coloranti e poi delle fibre artificiali; altre scoperte chimiche permisero di trattare i minerali di ferro contenenti fosforo, caratteristici dei bacini minerari della Lorena e della Ruhr, e di produrre acciai con qualità meccaniche elevate e predeterminate.

1885	Convertitore Bessemer	Industria dell'acciaio
1864	Forno Martin-Siemens	
1859	Primi pozzi petroliferi in Pennsylvania	
1855	Prima automobile a benzina	Industria dell'automobile
1886	Motore a scoppio	
1888	Dunlop inventa il pneumatico	
1832-44	Telegrafo	Industria delle telecomunicazioni
1876	Telefono	
1896	Lavori di Marconi sulla telegrafia senza fili	
1834	Produzione della tintura di anilina dal carbone fossile	
1847	Nitroglicerina	
1856	Ammoniaca	Industria chimica
1857	Cellulosa ottenuta dal legno	
1863	Procedimento Solvay per la fabbricazione della soda	
1883	Produzione elettrolitica dell'alluminio	
1878	Lampada elettrica di Edison	Industria elettrica
1879	Primo treno elettrico	
1881-82	Prime centrali elettriche	

[Adattato da *La rivoluzione industriale*, Rioux, Garzanti 1976].

Questo concatenamento di sviluppi e l'apertura di nuovi settori produttivi non riguardò tanto l'Inghilterra - che rimaneva ancorata alle tecniche elaborate dalla generazione precedente - ma i paesi del continente europeo, prima fra tutti la Germania, e in un secondo tempo gli Stati Uniti d'America. Nasceva così un nuovo modello di svilup-



Diffusione dell'istruzione tecnica in Italia: il reparto tornitori dell'Istituto Tecnico Aldini Valeriani di Bologna, nel 1881 (da Macchine, scuola e industria, Comune di Bologna, 1979).

L'opportunità che la produzione di energia elettrica fosse in mano ai privati è stata oggetto di un intenso dibattito politico, che ha portato alla nazionalizzazione, nel 1963, delle industrie elettriche, tra cui la storica «Edison». La società utilizzò i capitali provenienti dall'indennizzo per entrare nell'industria chimica, formando l'attuale «Montedison».

po industriale, in cui l'acciaio, l'elettricità e il petrolio sostituirono il ferro e il carbone; esso era basato su una tecnologia che a sua volta derivava dall'utilizzazione deliberata delle nuove conoscenze scientifiche e non solo dalla razionalizzazione delle competenze artigianali.

Con le nuove industrie si sviluppò anche un nuovo modello di organizzazione del lavoro: da una parte l'integrazione tra ricerca scientifica e produzione fece sorgere una vasta categoria di tecnici di vario livello, dall'altra il lavoro operaio venne sempre più programmato e parcellizzato «scientificamente», portando all'avvento della catena di montaggio e della specificazione dettagliatissima delle mansioni. Infine, l'enorme massa di merci che veniva prodotta portò ad espandere il mercato verso l'esterno, su scala mondiale, e verso l'interno, costruendo quella che si usa chiamare la «civiltà dei consumi» e di cui forse l'automobile e il televisore sono i simboli più appariscenti.

Nella seconda metà dell'800 avvenne anche il decollo industriale dell'Italia che fino ad allora (per ragioni politiche non meno che economiche) era rimasta indietro rispetto agli altri paesi europei. Lo sfruttamento dell'energia elettrica, fornita dall'energia meccanica delle acque delle Alpi, ebbe una parte importante in questo sviluppo. Ciò era stato intuito da coloro che si impegnarono nella unificazione politica dello Stato italiano, come Cavour che dichiarava:

«Potete trasformare dell'acqua che cade in forza portatile e questo farebbe del nostro paese quello che hanno fatto le macchine a vapore per l'Inghilterra. Noi abbiamo in cadute d'acqua più forza motrice, che non abbia l'Inghilterra con tutte le macchine a vapore che ha in attività».

L'industria elettrica italiana ha una data di nascita: il 24 luglio 1882 si riuniva a Milano il «Comitato per le applicazioni dell'elettricità sistema Edison», sotto la presidenza del senatore G. Colombo e con la partecipazione di esponenti del mondo finanziario e imprenditoriale. Conseguenza immediata di questa iniziativa fu l'acquisto del vecchio teatro di Santa Radegonda, nel quale fu installata una delle prime centrali elettriche europee che entrò in funzione già nel 1883. La centrale utilizzava alcune dinamo azionate da macchine motrici a

Interno della centrale Radegonda, in Milano. Disponibile di sei die «Jumbo», progettata allora considerate «battute in tal modo, aiutanti di Edison, dalla loro mole, che appunto, quella deg. Ciascuna macchina, potenza di circa 100 di tensione ed era in alimentare da 1000 lampade.



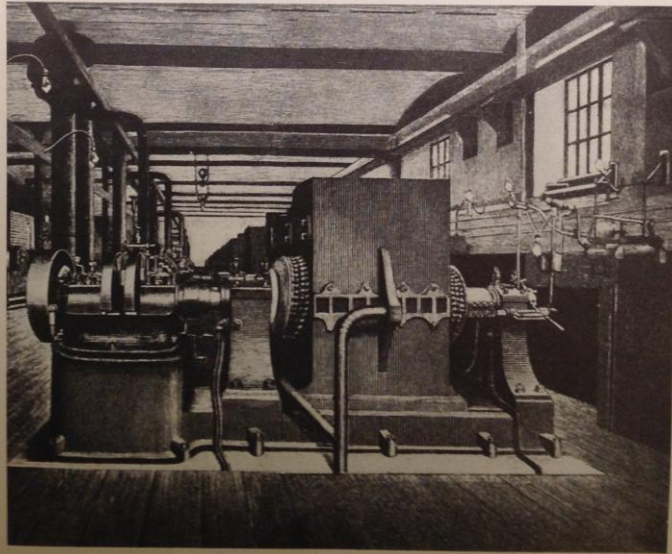
vapore e serviva all'illuminazione di alcuni negozi, nei pressi della Scala, oltre al Teatro Manzoni, alla Galleria Vittorio Emanuele e alla piazza del Duomo. Negli anni successivi, la centrale si sviluppò rapidamente e, visti i risultati soddisfacenti, il comitato promotore si sciolse per dar vita, agli inizi del 1884, alla Società Generale d'Elettricità Sistema Edison. Nello stesso periodo di tempo si moltiplicarono le iniziative per sostituire l'illuminazione elettrica a quella del gas in diversi centri dell'Italia: nel 1886 furono illuminate alcune strade di Roma, Palermo e Messina, negli anni immediatamente seguenti furono illuminate Livorno e Genova.

Nel 1893 la società Edison affiancava all'attività di produzione e distribuzione dell'energia elettrica anche l'esercizio di una linea tranviaria sperimentale a trazione elettrica, lunga 3 km, da piazza del Duomo a corso Sempione, a Milano.

Entravano in funzione nuove centrali: nel 1887 quella di Termini, che sfruttava la caduta d'acqua della cascata delle Marmore, producendo una potenza di 185 kW e nel 1892 quella di Tivoli, che convogliava l'energia a Roma, a una distanza di 26 km, con una linea a corrente alternata a 5000 V.

La vicinanza dell'arco alpino e quindi la disponibilità dell'energia idroelettrica, unite al tradizionale interesse per l'industria, e alla presenza di miniere di ferro, favorirono lo sviluppo del setto-

*Interno della centrale termica di S. Radegonda, in Milano, nel 1883. Disponeva di sei dinamo di tipo «Jumbo», progettate da Edison, allora considerate veri colossi e battezzate in tal modo dagli aiutanti di Edison, impressionati dalla loro mole, che ricordava, appunto, quella degli elefanti. Ciascuna macchina aveva una potenza di circa 100 kW a 125 volt di tensione ed era in grado di alimentare da 1000 a 1200 lampade.*



uirono il  
sua volta  
e scienti-  
fegianali.  
odello di  
a ricerca  
tecniche di  
rogram-  
nto della  
ma delle  
prodotta  
ndiale, e  
iviltà dei  
nboli più

llo indu-  
on meno  
esi euro-  
rgia mec-  
in questo  
ono nella  
dichiaro

o farebbe  
e non  
à".

glio 1882  
elettricità  
nbo e con  
prendito-  
quisto del  
una delle  
nel 1883.  
motrici a

re metalmeccanico in Piemonte. Nel 1899 Giovanni Agnelli fondò la FIAT; pochi anni dopo, nel 1907, a Torino si contavano ben 70 costruttori di automobili.

39. Quali vantaggi si ottengono bruciando combustibili per ottenere energia elettrica invece di utilizzarli direttamente per produrre energia meccanica, per esempio attraverso turbine a vapore?
40. Perché la produzione di energia elettrica interessava particolarmente un paese come l'Italia?

## 12. Fonti alternative di energia

La maggior parte dell'energia elettrica prodotta e distribuita nel mondo proviene dalla trasformazione dell'energia meccanica dell'acqua (energia idroelettrica) o dall'energia interna dei combustibili fossili, carbone e idrocarburi. Esistono però altre fonti possibili: per esempio, l'energia meccanica delle maree o del vento, il calore prodotto nelle profondità della Terra (energia geotermica), l'energia delle reazioni nucleari e quella che ci giunge direttamente dal Sole. Quest'ultima, l'energia solare, è oggetto di intense ricerche perché è potenzialmente disponibile in quantità molto grandi.

La radiazione solare fornisce 1360 W di potenza per metro quadro di superficie, all'esterno dell'atmosfera terrestre: questo valore prende il nome di *costante solare*. Molta di tale potenza viene perduta, per assorbimento da parte dell'atmosfera e delle nuvole, prima di raggiungere la superficie terrestre; inoltre, a causa della rotazione terrestre, la luce diretta del Sole colpisce un determinato punto della superficie terrestre solo per un limitato numero di ore al giorno. La potenza per metro quadro disponibile al suolo varia perciò, a seconda della posizione che si considera, tra i 150 e i 450

La centrale solare di Adrano. Entrata recentemente in funzione, questa centrale della potenza di 1 MW è stata realizzata da un consorzio di tre paesi (Italia, Francia e RFT) nell'ambito di un programma della CEE.



Energia dal Sole. Collettore focalizzatore.

Energia dal Sole. L'intero sud di questo paese per il Milano è stata rivestita di pannelli solari.

W/m<sup>2</sup> come media giornaliera. Essa può essere adoperata, concentrandola opportunamente, per far bollire l'acqua di alimentazione di una turbina che produca energia elettrica, oppure può essere adoperata direttamente per scaldare l'acqua per usi domestici.

L'energia solare può anche essere convertita direttamente in energia elettrica per mezzo di celle «solari» o, più precisamente, celle fotovoltaiche: il loro funzionamento è spiegato nel Primo piano di pagina 13-46. Esse convertono in energia elettrica solo una parte di quella incidente: il resto viene riflesso o trasmesso, oppure si trasforma in energia termica all'interno del dispositivo. L'efficienza, cioè il rapporto tra l'energia elettrica prodotta e quella solare incidente, è quindi del 23% (al momento in cui viene scritto questo testo) per celle utilizzate a scopo di ricerca e intorno al 12% per quelle normalmente poste in commercio. Il costo di impianto è inoltre molto elevato, intorno alle 10.000 lire per ogni watt prodotto, cioè parecchie volte superiore a quello di un impianto convenzionale o nucleare.

L'energia solare potrebbe risolvere molti dei problemi che derivano dalla scarsità di combustibili e evitare l'inquinamento ambientale dovuto alle altre fonti; tuttavia, la possibilità di utilizzarla in quantità rilevanti dipende dalla produzione di collettori molto meno costosi degli attuali e di sistemi di accumulo che forniscano l'energia nel momento in cui essa è richiesta, per esempio di notte o nei giorni nuvolosi. Probabilmente, per i prossimi decenni, l'uso più conveniente dell'energia solare sarà quello di contribuire al riscaldamento degli edifici, oltre alla produzione di acqua calda per uso domestico.



*Energia dal Sole. Collettori a focalizzazione.*

*Energia dal Sole. L'intera parete sud di questa torre per abitazioni a Milano è stata rivestita con pannelli solari.*

**41.** *In quali modi è possibile produrre energia elettrica dall'energia solare?*



## 13. Il rendimento di una centrale elettrica

Una centrale elettrica è essenzialmente un dispositivo che produce energia elettrica a spese di altre forme di energia: il suo rendimento è dato dal rapporto tra l'energia elettrica prodotta e quella iniziale fornita alla centrale. Ai fini del rendimento occorre distinguere due tipi di conversioni: quelle in cui l'energia elettrica è prodotta da un impianto termico (in genere una turbina, che utilizza il calore prodotto da una fonte di energia) e quelle in cui la generazione dell'energia elettrica avviene direttamente, senza passare attraverso l'utilizzazione del calore). Sono del primo tipo le centrali che utilizzano combustibili come il carbone o gli idrocarburi, le centrali nucleari, quelle geotermiche, ecc.; sono del secondo tipo ad esempio quelle che utilizzano energia meccanica, come quelle idroelettriche o quelle azionate dal vento o dalle maree.

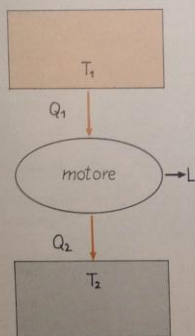
Abbiamo visto in termodinamica che qualsiasi dispositivo che assorbe energia sotto forma di calore e fornisce lavoro meccanico deve, per il secondo principio, restituire una parte del calore a un corpo a temperatura più bassa, che in genere è l'ambiente. Nella figura qui accanto,  $Q_2$  è il calore assorbito dalla macchina alla temperatura più elevata  $T_1$ ,  $Q_1$  il calore ceduto alla temperatura  $T_2$ ,  $L$  il lavoro prodotto. Il rendimento,  $\eta = L/Q_2$ , per la seconda legge della termodinamica deve essere inferiore al valore:

$$\eta_{\max} = 1 - T_2/T_1$$

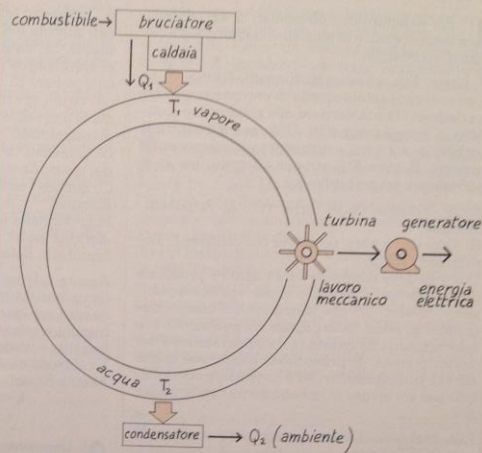
Nel caso di una centrale termica,  $T_1$  è la temperatura del vapore riscaldato, ad alta pressione, prodotto nella caldaia; esso viene inviato sulle pale della turbina, dove compie lavoro meccanico e esce a temperatura e pressione molto inferiori. Dalla turbina passa al condensatore, dove cede il calore  $Q_1$  all'acqua di raffreddamento a temperatura  $T_2$ . La turbina aziona il generatore, che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica; il rendimento di questa trasformazione non è soggetto a limitazioni termodinamiche. L'intero processo è rappresentato nello schema della pagina seguente.

Per avere il massimo rendimento occorre che  $T_1$  e  $T_2$  siano rispettivamente la più alta e la più bassa possibili.  $T_2$  è però fissata dalle condizioni ambientali, dato che per il raffreddamento occorre usare l'aria o l'acqua disponibili, generalmente intorno a 20-25 °C (circa 300 K).  $T_1$  è limitato da fattori tecnologici e chimici, dato che la resistenza dei materiali diminuisce se essi diventano troppo caldi. In un impianto a combustibile si può arrivare fino a 500 °C (773 K) mentre in un impianto nucleare il rischio di danneggiare le barre di combustibile suggerisce, nelle centrali più comunemente adoperate, un limite di 400 °C (673 K). Il rendimento massimo risulta quindi  $\eta_{\max} = 60\%$  per le centrali a combustibile,  $\eta_{\max} = 50\%$  per quelle nucleari. Perciò, anche se non vi fosse nessuna perdita di energia, di nessun genere, l'impianto trasformerebbe in energia elettrica solo metà del calore assorbito: per ottenere un joule di energia elettrica occorre fornirne almeno due al vapore. Il joule in più viene ceduto all'ambiente, dando luogo all'*inquinamento termico*, cioè riscaldando l'acqua o l'aria.

Fin qui abbiamo parlato solo del rendimento massimo di una macchina ideale di Carnot: gli impianti a combustibile più moderni







raggiungono in pratica solo il 38% o 40%, mentre quelli nucleari arrivano solo al 30%.

Le centrali a combustibile più vecchie raggiungono anch'esse il 30%. Il maggior spreco è dovuto agli attriti e alla non completa utilizzazione del calore, che viene disperso in parte senza compiere lavoro. Occorre infine tener conto delle perdite nei generatori, nei trasformatori e nelle linee di trasmissione, per cui l'energia effettivamente utilizzata scende intorno al 33%.

In definitiva, ogni volta che usiamo 1 J di energia elettrica, esso ha richiesto circa 3 J di energia fornita alla centrale e ha provocato la dispersione di circa 2 J, soprattutto nelle vicinanze della centrale stessa. Questo è il prezzo che occorre pagare per i vantaggi offerti dall'energia elettrica.

42. Perché le grandi centrali elettriche si costruiscono lungo le rive dei fiumi o le coste del mare?
43. La produzione di energia idroelettrica è soggetta alle stesse limitazioni di quella termoelettrica?