

TECNOLOGIA E AMBIENTE

Angelo Bonomi
Il Cobianchi, Verbania 2021, pp. 7-17

Il tema della relazione tra ambiente e tecnologia è già stato toccato in miei precedenti articoli su “Il Cobianchi” come quello intitolato “Tecnologia e Ambientalismo” del 2010 e “Controversie scientifiche e nuove superstizioni” del 2019. Ho voluto riprendere questo argomento per il recente aumento dell’interesse, cresciuto in particolare a livello italiano ed europeo, sulla cosiddetta transizione ecologica con una critica alle politiche adottate esaminandole dal punto di vista dei miei studi sulla dinamica della tecnologia. Vi sono tre aspetti importanti della relazione tra tecnologia e ambiente e che toccano i gravi problemi ambientali riguardanti l’inquinamento, l’esaurimento delle risorse e il riscaldamento globale. I primi due possono essere discussi considerando le soluzioni proposte dai modelli industriali ambientali come quelli dell’economia circolare e del capitalismo naturale, il terzo discutendo i limiti del protocollo di Kyoto, e delle politiche ambientali che lo hanno seguito, in particolare riguardo i possibili obiettivi tecnologici di queste politiche, i tempi di realizzazione e i limiti fisici esistenti per le tecnologie.

Il primo problema ambientale riguarda l’inquinamento di origine industriale e dei trasporti che è stato messo in evidenza e stimolato fin dal 1962 con la pubblicazione del libro di Rachel Carson “Silent Spring” in cui presentava la futura primavera silenziosa dovuta alla scomparsa degli uccelli per effetto della diffusione dell’uso indiscriminato di pesticidi accusando l’industria chimica di diffondere disinformazione sui loro pericoli. Il problema dell’esaurimento delle materie prime fu portato all’attenzione internazionale da un rapporto del Club di Roma nel 1972 con il libro “I Limiti dello Sviluppo” con uno scenario derivato da un modello globale sulle conseguenze dell’esaurimento delle risorse sulla crescita. La questione del riscaldamento globale venne portata all’attenzione mondiale da un summit sulla terra organizzato dall’ONU a Rio de Janeiro nel 1992 che portò alla creazione di un’agenzia internazionale sui cambiamenti climatici, e quindi al ben noto protocollo di Kyoto del 1997 in cui 36 paesi si accordarono su politiche destinate a limitare l’emissione di gas serra nell’atmosfera, e che fu seguito da un’ulteriore serie di accordi ottenuti durante vari summit internazionali sul clima.

Per trovare soluzioni, in particolare ai problemi dell’inquinamento e dell’esaurimento delle risorse, sono stati proposti due modelli industriali ambientali che affrontano questi problemi. Il primo, nato negli Stati Uniti, è stato proposto da Paul Hawken e collaboratori in un libro del 1999, tradotto in italiano con il titolo “Capitalismo Naturale”. Il secondo modello, detto dell’economia circolare, è nato in Europa da studi fatti per l’UE da Walter Stahel e collaboratori nel 1982, e aggiornati da Stahel recentemente in un suo libro “The Circular Economy” pubblicato nel 2019. Quest’ultimo modello ha trovato recentemente interesse nelle politiche ambientali europee.

Il capitalismo naturale

Il modello del capitalismo naturale si basa sull’idea che possono esistere soluzioni tecnologiche valide, alcune già esistenti, che possono difendere l’ambiente con un aumento delle risorse naturali e non con la loro distruzione. L’obiettivo del capitalismo naturale riguarda trasformazioni dell’attuale sistema socio-economico in un sistema compatibile con l’ambiente. Nel capitalismo naturale si considera un pregiudizio che l’ambiente, l’economia e il sociale siano in competizione, e che si debba trovare un compromesso tra di loro alla ricerca di un improbabile equilibrio, ma piuttosto che si debbano trovare soluzioni integrate che uniscano questi fattori a tutti i livelli. Il capitalismo naturale considera che non esistono solo capitali finanziari, infrastrutturali e umani ma

anche capitali naturali costituiti da materie prime e sistemi viventi, capitali che risultano da un'attività complessa costituita da ecosistemi che interagiscono con i fenomeni naturali. Il capitale naturale può essere sostituito da altri tipi di capitale attraverso le tecnologie, ma con dei limiti dovuti ai fattori che autoregolano le condizioni dell'atmosfera, gli oceani, i cicli del carbonio con la fotosintesi e dell'acqua, la generazione di rifiuti antropici, la protezione dai raggi cosmici ovvero tutto ciò che rende possibile la vita sulla terra. Il sistema industriale ed economico attuale tende prevalentemente a trasformare il capitale naturale in beni economici e sociali. Esso considera l'ambiente ma con limiti dovuti alla necessità di avere una crescita economica e il mantenimento di un elevato standard di vita. Tuttavia storicamente si è avuto un passato in cui vi era abbondanza di materie prime e scarsità di manodopera, e ora un presente in cui vi è abbondanza di manodopera e scarsità di materie prime. Si rende quindi necessario un aumento dell'efficienza con cui si usa il capitale naturale. Infatti l'ambiente rappresenta un involucro che contiene e sostiene l'intero sistema economico e industriale, e le tecnologie di produzione ne devono tener conto. Ci sono quattro strategie che sono suggerite dal capitalismo naturale e che sono:

- Un aumento radicale della produttività delle risorse
- Processi di produzione che imitano i processi biologici
- Un'economia basata su flussi di riciclo e servizi invece che beni e vendita
- Investimenti in capitale naturale che favoriscono le risorse e i servizi

L'aumento della produttività delle risorse significa l'ottenimento di prodotti con meno materiali ed energia, aumentando indirettamente la qualità di vita e dimostrando che l'economia non è in conflitto ma al contrario compatibile con un sistema ambientalmente più efficiente. L'imitazione dei processi biologici di produzione permette di sostituire pesanti strutture industriali con temperature e pressioni operative più basse, effettuare combustioni con minimi consumi, mentre il riciclo, e la sostituzione di offerta di servizi alternativi all'acquisto dei prodotti, riduce il consumo di risorse con obiettivi analoghi a quelli dell'economia circolare, cioè l'altro sistema ambientale industriale citato. Nella Fig. 1 è riportata schematicamente la trasformazione di un processo convenzionale di produzione in un processo ambientale che segue le strategie proposte. Si può osservare come il processo ambientale presenta vantaggi economici dovuti a un minore consumo di energia e materiali, minore quantità di scarti, eliminazione o minore inquinamento degli effluenti con la possibile eliminazione di impianti di trattamento e strumentazioni di controllo.

L'economia circolare

L'economia circolare rappresenta un modello ambientale industriale dedicato soprattutto a eliminare l'esaurimento delle materie prime con vantaggi indiretti che riguardano particolarmente la riduzione dell'inquinamento. Occorre notare che l'economia circolare tratta nei suoi documenti soprattutto le politiche ambientali che dovrebbero essere applicate per la sua realizzazione, citando, in maniera generale, i necessari bisogni tecnologici senza però entrare in merito sulle loro possibilità di realizzazione. Secondo l'economia circolare il sistema economico attuale si compone di un sistema industriale economico lineare, composto da industrie che estraggono materie prime e le trasformano in prodotti. Questo sistema, attraverso il punto di vendita, si collega a un sistema economico industriale circolare, che riusa, ripara e ricicla i prodotti. L'obiettivo dell'economia circolare riguarda lo sviluppo di condizioni in cui l'economia industriale lineare possa essere pienamente integrata nell'economia industriale circolare, praticamente eliminando il consumo di risorse attraverso un pieno riciclo dei prodotti in fine d'uso, in quella che viene chiamata un'economia industriale circolare matura. La trasformazione dell'economia industriale lineare, combinata con quella circolare, in un'economia industriale circolare matura è indicata schematicamente nella Fig. 2. L'economia circolare industriale differisce dall'economia industriale lineare perché il suo obiettivo è di mantenere il valore dei prodotti e non di aggiungerne. L'economia circolare impiega quindi impianti in piccola scala o centri do-it-yourself destinati alla

riparazione in modo da estendere la vita dei prodotti, e anche promuove la creazione di centri regionali di rigenerazione dei prodotti non più riparabili e utilizzabili. Aumentando la durata in servizio dei prodotti, l'economia circolare impiega attività intensive di lavoro, rimpiazzando la fabbricazione di nuovi beni e sostituendo consumi energetici con la manodopera. Nell'evoluzione dall'economia lineare e circolare attuale a quella lineare matura si distinguono due attività chiamate ere, la prima era R è di riuso ed estensione della durata dei beni, e una seconda era D è di recupero dei rifiuti trasformandoli in materiali puri riutilizzabili che possono rimpiazzare le materie prime. L'era R è controllata dai proprietari-utilizzatori di beni e appare disomogenea per la dispersione geografica delle attività di prolungamento della durata dei beni che è esercitata localmente. L'era D è invece controllata da attori economici che trattano beni non più utilizzabili con tecnologie in grado di trasformare i rifiuti in materiali di base riutilizzabili. In un'economia circolare matura le attività dell'era R sono preferibili a quelle dell'era D e tendono a mantenere infrastrutture, edifici, installazioni, veicoli, senza scartare ciò che è rotto o rifabbricare ciò che può essere riparato. Nell'era D è invece necessario avere disponibili tecnologie in grado di ricavare da scarti e rifiuti materiali puri riutilizzabili, e quindi poter avere processi ad esempio per ricavare metalli puri dalle leghe, o depolimerizzare le materie plastiche, tecnologie in molti casi non ancora disponibili e che richiedono sforzi di R&S. L'era D rappresenta quindi quella in cui vi è il più grande sforzo e potenziale tecnico innovativo affinché l'economia industriale lineare possa essere integrata pienamente nel ciclo dell'economia circolare matura.

Per una critica su questi due sistemi industriali ambientali è necessario considerare non solo gli aspetti tecnologici della realizzazione delle innovazioni richieste per raggiungere i loro obiettivi, ma anche i limiti fisici, in particolare quelli termodinamici, che fissano i consumi energetici minimi che non si possono ulteriormente ridurre, indipendentemente dagli sviluppi tecnologici che si possono effettuare per il raggiungimento degli obiettivi. Se si confrontano gli obiettivi di questi due sistemi industriali ambientali con i tre grandi problemi globali ambientali, l'economia circolare appare quella con gli obiettivi più limitati, orientati soprattutto verso il problema dell'esaurimento delle risorse, piuttosto che alla trasformazione delle produzioni con processi convenzionali in produzioni ambientali come previsto nel capitalismo naturale. D'altra parte l'economia circolare è contraria allo sviluppo di processi biologici di produzione, promossi invece nel capitalismo naturale, poiché non sono integrabili in un'economia circolare matura. Tutti e due i modelli industriali sono sottoposti a limiti fisici di origine termodinamica. Il capitalismo naturale non può spingere le riduzioni energetiche dei processi al di là dei minimi energetici richiesti dalle leggi della termodinamica. L'economia circolare è ancora più limitata dal punto di vista fisico poiché l'ottenimento di materiali puri richiede termodinamicamente consumi energetici elevati, che aumentano grandemente con la dispersione fisica dei rifiuti, la diluizione degli elementi valorizzabili e l'eliminazione di impurezze che rendono inutilizzabili i materiali separati. Questo porta a un incremento notevole dei bisogni energetici di un'economia circolare matura e quindi la disponibilità di tecnologie di produzione dell'energia ambientali poco costose che ancora non abbiamo. Inoltre non sappiamo se certe tecnologie di riciclo richieste dall'economia circolare matura siano ragionevolmente realizzabili, come la separazione di ferro, nichel e cromo dall'acciaio inossidabile o del rame e dello zinco dall'ottone, o ancora la depolimerizzazione delle materie plastiche. Tutto questo rende la realizzazione di un'economia circolare matura molto difficile se non impossibile. Vi sono poi altre critiche sull'economia circolare. La prima riguarda il fatto che essa non offre vere soluzioni nel caso di arrivo di innovazioni radicali che rendono obsoleti gli impianti di produzione, riparazione e riciclo di prodotti che inoltre non sono più utilizzabili. La conseguenza potrebbe essere un'opposizione all'innovazione per conservare la circolarità dell'economia perdendo i benefici che l'innovazione può dare. La seconda critica riguarda il fatto che l'attenzione dell'economia circolare è tutta rivolta verso la durata di vita e il riciclo dei prodotti, piuttosto che alla riduzione dell'inquinamento nelle produzioni, senza quindi offrire vere soluzioni a questo problema globale. In definitiva il miglior sistema industriale ambientale potrebbe essere una

miscela dei due rinunciando a un'economia circolare matura, probabilmente irrealizzabile, e ponendo attenzione anche alla trasformazione dei processi produttivi convenzionali in processi produttivi ambientali.

Il riscaldamento globale

Il problema del riscaldamento globale, che non è stato affrontato direttamente dai due sistemi industriali ambientali discussi precedentemente, è invece oggetto di accordi internazionali riguardanti la riduzione delle emissioni di gas serra, in particolare la CO₂, a partire dal protocollo di Kyoto stilato nel 1997 da 36 paesi. Questo protocollo, come gli ulteriori accordi che lo hanno seguito, presenta implicazioni tecnologiche importanti e, quando viene esaminato dal punto di vista della dinamica della tecnologia, si presta a numerose critiche sulla possibilità di raggiungere i suoi obiettivi. Queste critiche riguardano in particolare: la mancanza di una strategia tecnologica globale efficiente, il problema dei bisogni energetici dei paesi in via di sviluppo, e le possibilità di avere tecnologie ambientali di produzione dell'energia in grado di veramente poter sostituire le tecnologie convenzionali e arrestare completamente l'emissione di CO₂, che tuttora cresce, e quindi fermare veramente il riscaldamento globale prima che esso manifesti tutti gli effetti nefasti previsti, e di cui abbiamo già i primi segni.

Il protocollo di Kyoto e le tecnologie

La critica principale che può essere sollevata per il protocollo di Kyoto e quelli che lo hanno seguito, è che riguardano essenzialmente soluzioni politiche a un problema essenzialmente tecnologico di sostituzione globale di tutte le tecnologie energetiche che emettono gas serra. Implicita in questo protocollo è l'idea che tecnologie energetiche ambientali siano già disponibili e che basta promuovere la loro diffusione attraverso opportune politiche comuni. La possibilità di avere tecnologie energetiche ambientali più efficienti è considerata, ma lasciata all'industria e alla promozione della R&S nei vari paesi. Il risultato è che dopo quasi 25 anni dalla firma del protocollo non abbiamo tuttora nuove tecnologie energetiche ambientali in grado di affrontare efficientemente la sostituzione globale, e non solo parziale, delle tecnologie convenzionali. Una sostituzione necessaria per l'arresto delle emissioni di CO₂ e quindi del riscaldamento globale. In realtà una strategia tecnologica valida sarebbe stata la realizzazione di un grande progetto internazionale per lo sviluppo di queste tecnologie ambientali, simile all'attuale progetto ITER per l'energia nucleare di fusione, ma con una dimensione e complessità più elevata, simile al progetto Manhattan per la bomba atomica, ma questa volta per salvare e non mettere in pericolo l'umanità. Ora, dopo quasi 25 anni di intensa e coordinata attività di R&S, e non di sole soluzioni politiche proposte, avremmo probabilmente trovato opportune soluzioni tecnologiche al problema del riscaldamento globale. In realtà, lasciando libera l'industria nel campo tecnologico, questa si è subito orientata a sviluppare tecnologie già ben conosciute, come l'eolico e il fotovoltaico, con basso rischio di fallimento, ma con problemi riguardo al loro potenziale di diffusione globale, invece che affrontare tecnologie più radicali come la produzione diretta di combustibili o idrogeno dall'energia solare per via termica, o attraverso lo sviluppo di tecnologie basate su una fotosintesi artificiale più rapida di quella naturale. Queste nuove tecnologie per la loro radicalità hanno probabilità di fallimento più elevate, tuttavia la dinamica tecnologica dimostra che è possibile realizzarle se si conduce un numero abbastanza elevato di tentativi in un tempo disponibile sufficientemente lungo.

Il problema energetico dei paesi in via di sviluppo

Il problema energetico dei paesi in via di sviluppo consiste nell'avere condizioni per cui questi paesi possano utilizzare tecnologie energetiche ambientali per soddisfare i bisogni energetici per il loro sviluppo. Questo problema non è stato considerato sufficientemente e, ad esempio, già con il protocollo di Kyoto, la Cina e l'India non erano tra i paesi in cui dovevano essere applicate politiche di riduzione delle emissioni per poi negli anni seguenti accorgersi, per la loro dimensione e sviluppo, che erano tra i paesi con le maggiori emissioni di CO₂. Questo problema è tuttora

trascurato e le politiche ambientali dei paesi industrializzati sembrano basarsi sul fatto che l'arresto delle emissioni dipenda semplicemente dalla riduzione delle loro emissioni. In realtà esistono studi che dimostrano che in mancanza dell'accettabilità di tecnologie energetiche ambientali da parte di questi paesi, per la loro inefficienza per soddisfare i loro bisogni, verranno usate le tecnologie convenzionali. In questo caso studi dimostrano che la diffusione dell'uso di tecnologie convenzionali in paesi in sviluppo potrebbe superare le riduzioni di emissioni previste nei paesi industriali secondo gli accordi del protocollo di Kyoto e dei seguenti.

Le tecnologie energetiche ambientali

Dopo aver discusso le implicazioni tecnologiche del protocollo di Kyoto, e dei problemi energetici dei paesi in via di sviluppo, occorre discutere delle tecnologie ambientali disponibili e di quelle in sviluppo, per valutare le loro reali possibilità di eliminare globalmente le emissioni di gas serra, fatto indispensabile se vogliamo un arresto definitivo del riscaldamento globale. Le tecnologie energetiche ambientali disponibili, trascurando quelle minori come quelle geotermiche o che sfruttano le maree, sono: le tecnologie che sfruttano la fotosintesi naturale per produrre ad esempio legname, quelle idroelettriche, quelle nucleari di fissione, le tecnologie solari termiche, quelle eoliche e quelle fotovoltaiche. Le tecnologie in sviluppo sono quelle nucleari di fusione e quelle per la produzione diretta di combustibili dall'energia solare per via termica o con fotosintesi artificiale, distinguendo i combustibili che entrano nel ciclo del carbonio utilizzando la CO₂ dell'atmosfera, dall'idrogeno che, come combustibile, invece entra solo nel ciclo atmosferico dell'acqua. La prima tecnologia disponibile considerata riguarda lo sfruttamento della fotosintesi naturale per la produzione di combustibile attraverso coltivazioni specifiche. Questa tecnologia è già utilizzata per la produzione di carburanti come l'etanolo per veicoli a motore attraverso la fermentazione. Il problema dell'uso di questa tecnologia riguarda la bassa velocità della fotosintesi naturale, ad esempio per la produzione di legname, che non potrebbe seguire i bisogni globali di consumo dei combustibili e quindi limitarsi a un supporto di produzione. La produzione di energia idroelettrica è tecnologicamente semplice e già diffusa da molto tempo ma la sua utilizzazione è limitata geograficamente dalla possibilità di avere bacini idroelettrici, e quindi può diventare importante, dal punto di vista delle tecnologie ambientali, solo in certi paesi, e non presenta possibilità di una grande diffusione globale sostitutiva. La produzione di energia da fissione nucleare è abbastanza diffusa, esiste da più di cinquant'anni, e ha grandi capacità di produzione e diffusione. I due gravi incidenti nucleari di Chernobyl e di Fukushima, il primo per un errore umano e il secondo per la mancata resistenza della tecnologia a un evento come uno tsunami di grande potenza, ha però sollevato una forte opposizione al suo uso e diffusione. L'esperienza di questi due incidenti può migliorare la sicurezza e stimolare la concezione di reattori nucleari ancora più sicuri, ma non avere la certezza che non possa mai avvenire un incidente grave in un lasso di tempo molto lungo. Inoltre questa tecnologia presenta possibilità di incidenti minori, ma più numerosi, durante la manipolazione, il trattamento e lo stoccaggio degli elementi combustibili. Il problema è che la radioattività coinvolta è come un fuoco che non si può spegnere ma solo contenere. L'utilizzazione dell'energia solare per via termica con generazione di calore utile per la produzione di vapore per la produzione di energia elettrica è già utilizzata in alcuni grandi impianti. Tuttavia il bisogno di grandi superfici, il numero di posizioni geografiche con forti esposizioni solari utilizzabili, non la rendono utile per una diffusione sostitutiva globale delle tecnologie energetiche convenzionali. La produzione di energia elettrica per via eolica è limitata dalla dimensione delle pale utilizzabili per ragioni meccaniche, e dalla variabilità meteorologica del vento. Per questo le installazioni eoliche richiedono l'uso di grandi aree di produzione con numerosi impianti generatori che qualche volta sollevano l'opposizione di ambientalisti per il loro impatto sul paesaggio e il rumore. Per queste ragioni la produzione eolica pur diffondendosi non è considerata avere un potenziale sostitutivo come ad esempio quello dell'energia fotovoltaica. La produzione di energia elettrica direttamente da energia solare è possibile usando pannelli con uno strato di silicio in grado di generare energia elettrica per via fotovoltaica dall'esposizione solare. Questa tecnologia è usata vantaggiosamente

per produzioni di energia elettrica per coprire i bisogni energetici di edifici e per altri tipi di usi che non necessitano grandi potenze. L'utilizzazione dell'energia fotovoltaica per grandi produzioni e con forte potenziale sostitutivo delle tecnologie energetiche convenzionali è tuttora presa in considerazione ma vi sono condizioni che possono sollevare dubbi sulla sua fattibilità. I dubbi si basano principalmente sulla necessità di grandi superfici con pannelli solari per avere potenze importanti, e il problema dello stoccaggio di grandi quantità di energia elettrica per seguire i picchi di consumo che avvengono in tempi differenti dei picchi di produzione. Riguardo ai dati disponibili per questa tecnologia, la società Energia Futura, che si occupa della transizione energetica in Italia, prevede l'uso di pannelli con una potenza media di 70 W/m^2 , che tiene conto della variabilità della disponibilità di energia solare, e impianti di produzione per il momento attorno ai 20 MW. Il bisogno di superficie per i pannelli di un impianto di questa potenza è quindi di $0,3 \text{ km}^2$. Se però si considerano le potenze medie delle attuali centrali termiche, esse sono circa 10 volte più grandi, mentre le grandi centrali hanno potenze circa 50 volte più grandi, e la loro sostituzione avrebbe un bisogno rispettivo di 3 km^2 e 15 km^2 di pannelli. Le superfici reali necessarie sono poi circa doppie per tener conto della distanziamento tra i pannelli e altre installazioni. Rimane quindi la questione sulle possibilità di gestione ed efficienza di così grandi superfici. Inoltre la necessità di grandi superfici, che non possono trovarsi nel posto in cui vi sono le attuali centrali termiche, e il possibile bisogno di aumentare il numero di centrali per la loro bassa potenza, necessita, se si vuole sostituire in gran parte le attuali tecnologie energetiche, anche una ristrutturazione della rete distributiva con i suoi costi e tempi di realizzazione. L'altra importante limitazione di questa tecnologia per una sua diffusione globale riguarda lo stoccaggio dell'energia elettrica che ha picchi di produzione differenti dai picchi di consumo. Un sistema di stoccaggio è quello idroelettrico che è molto efficiente ma richiede la presenza di un bacino idroelettrico in altezza e un lago come riserva in basso. L'acqua è pompata nel bacino durante i picchi di produzione e produce energia dallo scarico del bacino durante i picchi di consumo. Purtroppo questo sistema è utilizzabile solo in certe situazioni geografiche non può essere generalizzato. L'alternativa è lo stoccaggio con batterie che però è ancora in sviluppo e deve affrontare problemi di efficienza e del numero molto grande di batterie necessario. Questa tecnologia in definitiva presenta dubbi sulla sua utilizzabilità come alternativa globale alle tecnologie energetiche tradizionali, ma soprattutto sui tempi di realizzazione incerti che rendono dubbioso il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni, stabiliti dall'UE per il 2030, basati sull'uso di questa tecnologia.

Le nuove tecnologie energetiche in sviluppo, ad eccezione della produzione con energia nucleare di fusione, sono orientate alla produzione di combustibili o idrogeno direttamente dall'energia solare con il vantaggio di avere condizioni di stoccaggio dell'energia più facili ed efficienti. La produzione di energia per fusione nucleare necessita di temperature molto alte, milioni di gradi, per avere la fusione nucleare di isotopi dell'idrogeno, ottenibili dall'acqua, con liberazione di grandi quantità di energia. Il processo più studiato consiste nel formare un anello di plasma, un gas completamente ionizzato, mantenuto sospeso in un sistema toroidale di magneti che lo riscaldano ad altissima temperatura e che, una volta raggiunte le temperature di fusione, libera energia. Il problema da superare è quello di raggiungere condizioni in cui l'energia liberata è superiore all'energia fornita al plasma per arrivare e restare a queste altissime temperature. Questo obiettivo non è mai stato raggiunto ed è previsto raggiungibile con un'installazione più grande di quelle precedenti, attualmente in costruzione nel quadro del progetto ITER basato su una collaborazione internazionale. La produzione di energia di fusione e quindi pensata possibile solo per grandi dimensioni e si stima che una potenza produttiva di un GW necessiti nella centrale la gestione di una potenza energetica dieci volte superiore. Una diminuzione delle potenze energetiche necessarie potrebbe essere possibile con magneti più efficienti che sono allo studio. Esiste però anche un'altra tecnologia di fusione allo studio che non necessita di grandi dimensioni, e che è basata su un potente laser che investe piccole quantità di materia per la fusione nucleare raggiungendo le temperature di fusione. Recentemente con questa tecnologia si è raggiunto l'interessante risultato di

produrre 80% dell'energia necessaria al laser per raggiungere le condizioni di fusione. In definitiva la tecnologia di fusione nucleare avrebbe le migliori condizioni di sostituzione delle tecnologie tradizionali con grandi capacità di produzione energetica, utilizzo semplicemente dell'acqua per trarne il combustibile, problemi di radioattività molto contenuti, nessuna limitazione geografica di diffusione, e produzione continua senza bisogno di stoccaggio. Tuttavia si tratta una tecnologia complessa da sviluppare e occorreranno decenni perché la sua utilizzazione possa diventare importante. L'ottenimento di combustibili direttamente da energia solare è studiato per via termica o attraverso una fotosintesi artificiale possibilmente più rapida di quella naturale. Il combustibile si può formare per la reazione tra acqua e la CO₂ presente nell'atmosfera e il suo uso entra nel ciclo naturale del carbonio. Con lo stesso tipo di tecnologie termiche o fotosintetiche è possibile ottenere anche solo idrogeno che come combustibile coinvolgendo solo il ciclo dell'acqua. Per l'idrogeno esiste anche un possibile processo che accoppia la produzione di energia elettrica fotovoltaica con elettrolizzatori che producono idrogeno per elettrolisi dell'acqua. Si tratta però di un processo di dubbia efficienza poiché oltre alle inevitabili perdite energetiche dovute all'elettrolisi si devono aggiungere anche perdite dovute a un funzionamento intermittente degli elettrolizzatori. In definitiva tutte queste tecnologie in sviluppo sono attualmente allo stadio di laboratorio o impianto pilota e, come la produzione di energia nucleare da fusione, hanno bisogno di decenni per diventare tecnologie in grado di effettuare una sostituzione di quelle tradizionali.

In conclusione la discussione sulle tecnologie energetiche ambientali attualmente utilizzabili o in sviluppo mostra che l'unica tecnologia sufficientemente sviluppata, senza limitazioni geografiche per la sua diffusione, e in grado di fornire grandi potenze è l'energia nucleare di fissione con tutti i suoi rischi e opposizioni al suo uso. Bisogna considerare che le grandi potenze di produzione sono necessarie per le produzioni industriali ma anche per i maggiori consumi di energia elettrica per una sostituzione dei sistemi di trasporto con motori termici, grandi emettitori di CO₂, con veicoli elettrici. Le altre tecnologie utilizzabili, come quella eolica o fotovoltaica, possono dare un contributo ma non hanno ancora il potenziale sostitutivo dell'energia nucleare di fissione. Il dubbio non è solo sulla possibilità di raggiungere questo potenziale, ma piuttosto sul tempo necessario che potrebbe essere troppo lungo per fermare gli effetti maggiori del riscaldamento globale. D'altra parte non abbiamo ancora tecnologie in grado di poter ridurre la CO₂ presente nell'atmosfera. Attualmente sono in sviluppo tecnologie che permettono di assorbire la CO₂ su materiali particolari, che poi per riscaldamento la liberano in modo da poter essere pompata in cavità del suolo per lo stoccaggio, oppure utilizzata chimicamente. Questa tecnologia potrebbe essere interessante per trattare la CO₂ emessa da impianti industriali per evitare che si diffonda nell'atmosfera. Le sue possibilità d'uso per ridurre la CO₂ dell'atmosfera sono molto dubbie per due ragioni, prima di tutto il recupero della CO₂ dell'atmosfera, presente a bassissima concentrazione, seguita dal suo stoccaggio concentrato nel suolo, è un processo che richiede termodinamicamente molta energia indipendentemente dalla tecnologia usata, inoltre bisogna considerare l'eliminazione dall'atmosfera di miliardi di tonnellate di CO₂ per avere qualche effetto sul riscaldamento globale. In definitiva il dilemma che si pone è se usare o non usare la produzione di energia da fissione per contrastare il riscaldamento globale accettando i rischi maggiori pur remoti. Alcuni paesi come la Cina prevedono di usarla, con un contributo anche di energia idroelettrica, fotovoltaica ed eolica, in sostituzione del carbone che costituisce attualmente per questo paese un'importante sorgente energetica. D'altra parte una produzione energetica puramente di origine solare ha anch'essa rischi non più remoti di quelli dell'energia nucleare, dovuti a rari ma possibili forti attività vulcaniche che potrebbero invadere con polveri l'atmosfera riducendo fortemente l'irraggiamento per uno o più anni con una disastrosa riduzione della produzione di energia. Questo potrebbe sconsigliare di avere una produzione energetica globale che dipenda solo dal sole. In definitiva, di fronte a questi dilemmi e incertezze sulla possibilità di fermare in tempo il riscaldamento globale, ci si può chiedere se non si debba iniziare seriamente a considerare anche importanti tecnologie e interventi che possono mitigare gli effetti di un riscaldamento globale che non potremmo arrestare in tempo. Un'ultima

considerazione generale che può essere fatta sulla relazione tra tecnologia e ambiente descritta in questo articolo, è che essa mostra come la tecnologia possa essere utile o dannosa a seconda di come viene usata, ma che non è necessariamente un problema ma essere piuttosto una soluzione. La dinamica della tecnologia mostra che le idee innovanti che si possono trasformare in nuove tecnologie, sono il risultato di combinazioni di tecnologie preesistenti che in molti casi sfruttano nuovi fenomeni scoperti dalla scienza. Il fatto che conosciamo un enorme numero di tecnologie in crescita, e che la scienza progredisce continuamente, fa sì che il numero di possibili future tecnologie per soddisfare i bisogni umani sia molto grande, e che attraverso un giusto uso delle tecnologie si possa avere uno sviluppo tecnologico sostenibile.

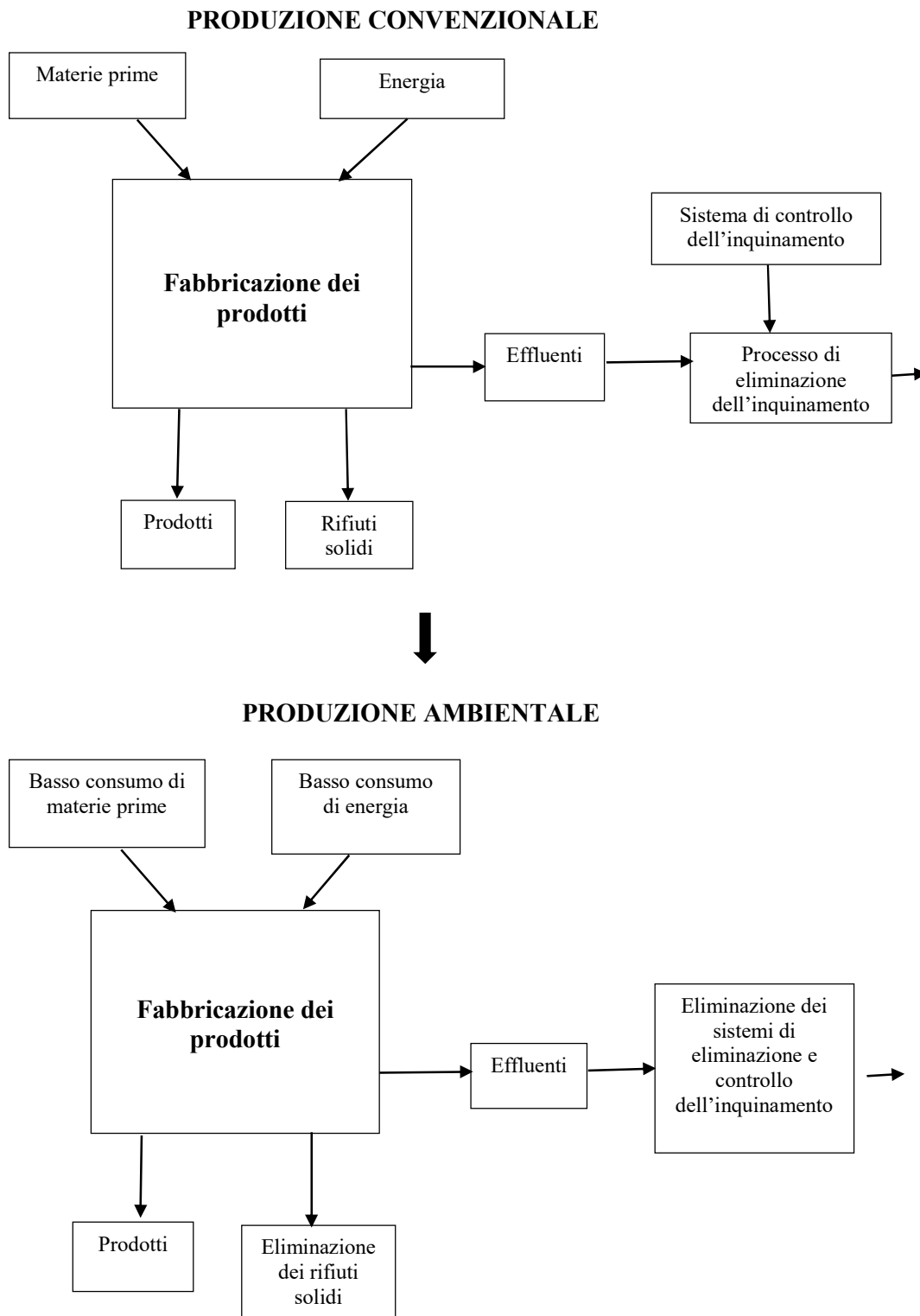
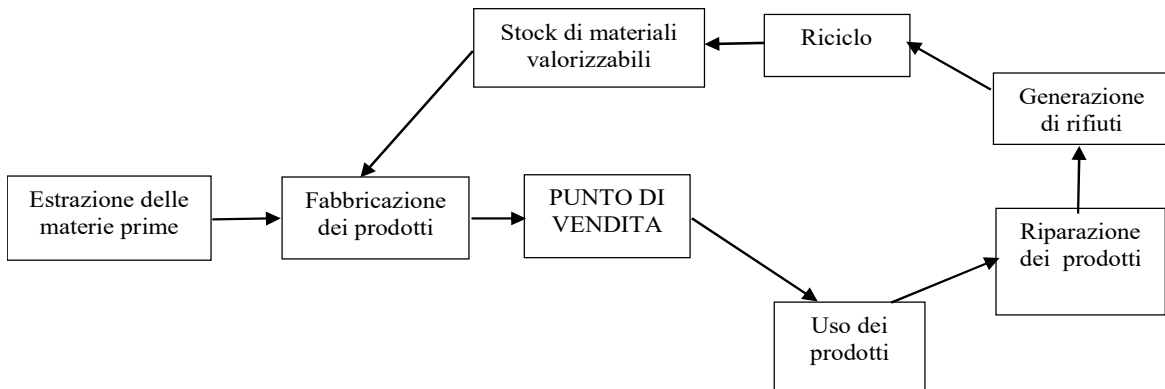


Fig. 1. Processi di produzione convenzionali e di produzione ambientale

Economia industriale lineare

Economia industriale circolare



Economia circolare matura

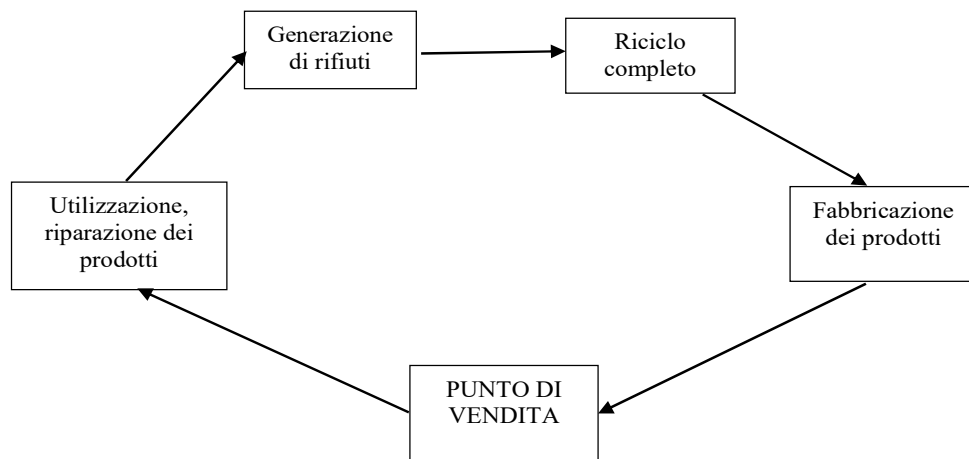


Fig. 2. Economia lineare e suo inglobamento in un'economia circolare matura