

W. Brian Arthur

# La natura della tecnologia

Che cos'è e come evolve

Traduzione di Davide Fassio





Un progetto fortemente voluto dalla Fondazione CRT con il coordinamento scientifico della Fondazione ISI, per raccogliere l'ambiziosa sfida della complessità. Un sostegno attivo alla ricerca sullo studio, la gestione e l'organizzazione dei sistemi complessi per cercare di diffondere una nuova cultura dell'innovazione.

W. Brian Arthur

*La natura della tecnologia  
Che cos'è e come evolve*

Progetto grafico: studiofluo srl  
Impaginazione: Maria Beatrice Zampieri  
Redazione: Manuela Pietrini  
Coordinamento produttivo: Enrico Casadei

W. Brian Arthur

*The Nature of Technology  
What It Is and How It Evolves*

Copyright © 2009 by W. Brian Arthur  
All rights reserved

© 2011 Codice edizioni, Torino  
Tutti i diritti sono riservati

ISBN 978-88-7578-182-8

# Indice

vii	Prefazione all'edizione italiana <i>di Cristiano Antonelli</i>
xvii	Riferimenti bibliografici
xix	Introduzione
	<i>Capitolo 1</i>
3	Interrogativi
	<i>Capitolo 2</i>
19	Combinazione e struttura
	<i>Capitolo 3</i>
37	Fenomeni
	<i>Capitolo 4</i>
57	Domini, ovvero mondi in cui si entra per le possibilità che offrono
	<i>Capitolo 5</i>
73	L'ingegneria e le sue soluzioni
	<i>Capitolo 6</i>
91	L'origine delle tecnologie
	<i>Capitolo 7</i>
115	Crescita strutturale
	<i>Capitolo 8</i>
127	Rivoluzioni e ricollocazioni

*Capitolo 9*

147 I meccanismi dell'evoluzione

*Capitolo 10*

169 L'economia evolve con l'evolversi  
delle proprie tecnologie

*Capitolo 11*

181 Come ci poniamo nei confronti  
di questa nostra creazione?

195 Ringraziamenti

197 Bibliografia

203 Indice analitico

## La complessità economica di tecnologia e innovazione

La tecnologia è sempre stata un'area di investigazione problematica e intrigante per gli economisti. L'analisi economica della tecnologia ha assunto un ruolo centrale nella teoria economica con la scoperta del residuo di Solow<sup>1</sup> e degli evidenti limiti della teoria economica ortodossa nello spiegare la crescita economica, soprattutto quando essa si manifesta attraverso un aumento dell'output che non può essere spiegato attraverso un aumento degli input, coerente con le assunzioni di equilibrio. Il cambiamento tecnologico doveva essere considerato l'unica causa plausibile della crescita dell'output e dell'efficienza. Le economie di scala e i rendimenti crescenti in generale non potevano infatti essere accettati, come spiegazione, per via delle conseguenze devastanti sulla stretta relazione fra la teoria della produzione e la teoria della distribuzione del reddito, che sta al nocciolo del modello di equilibrio. L'ipotesi di equilibrio, infatti, regge solo se e quando i rendimenti di scala sono costanti o decrescenti, ovvero quando l'incremento dell'output è proporzionato o inferiore all'incremento dell'input. Per questo gli economisti hanno esaminato la tecnologia come un fattore che, grazie alle sue peculiari caratteristiche, poteva spiegare la crescita combinando l'azione individuale basata su rendimenti marginali decrescenti con un aumento più che proporzionale dell'output che non poteva essere giustificato altrimenti senza intaccare i fondamenti della teoria economica ortodossa (Solow, 1957; Rosenberg, 1994).

L'attribuzione di caratteristiche peculiari alla tecnologia ha consentito di elaborare uno stratagemma teorico destinato a funzionare per parecchio tempo sino a diventare la base della moderna teoria della crescita endogena. Kenneth Arrow ne fu l'artefice, attribuendo

<sup>1</sup> Il residuo di Solow è un incremento della produzione non spiegabile esclusivamente attraverso le variabili di capitale e lavoro. Robert Solow, l'economista statunitense che lo ha definito, attribuiva questa eccedenza all'innovazione tecnologica. [N.d.R.]

alla tecnologia tre caratteristiche basilari: inesauribilità, cumulatività e non appropriabilità. Tali caratteristiche permisero l'elaborazione di un'argomentazione, astuta e alquanto sofisticata.

La tecnologia è inesauribile nel senso che nega i normali attributi di deterioramento e obsolescenza associati all'uso dei beni economici. Ogni generazione di agenti può sfruttare sequenzialmente le conoscenze tecnologiche messe a punto negli anni precedenti. Gli effetti cumulativi dello stock di conoscenza tecnologica spiegano in modo eccelso il residuo di Solow e quindi la crescita della produttività totale dei fattori. In ogni dato momento, infatti, il processo produttivo può sfruttare uno stock di tecnologie sempre più ampio, reso disponibile dagli sforzi compiuti dalle generazioni precedenti. La tecnologia possiede dunque alcune caratteristiche intrinseche che la distinguono nettamente dalla nozione di capitale: la cumulatività contrasta, anzi supera, i rendimenti marginali che si applicano ad altre forme di capitale. La crescita della produttività totale dei fattori non è il risultato di un flusso di tecnologie generato in ogni dato momento, ma il risultato della tecnologia accumulata in diversi anni di azione economica (Arrow, 1962a; 1962b; 1969).

Se lo stock di conoscenze fosse perfettamente appropriabile, tuttavia, il sistema economico sarebbe inesorabilmente costituito da monopoli tutt'altro che temporanei, basati sull'uso esclusivo della conoscenza prodotta nel passato. Perché il modello funzioni e sia compatibile con le tradizionali ipotesi di concorrenza perfetta, è necessario introdurre l'ipotesi di non-appropriabilità. Le conoscenze tecnologiche, una volta generate, diventano, assai rapidamente, anche se non istantaneamente, un bene pubblico, poiché tutti possono imitarle e usarle a loro volta. Di qui la seconda argomentazione: gli agenti sono incentivati a investire risorse per generare nuove tecnologie perché possono appropriarsi solo in parte dei benefici derivanti dalla creazione di nuove conoscenze. In altre parole, lo stock di conoscenze è un bene di pubblico dominio che entra nella funzione produttiva a valle di nuovi flussi di conoscenza, innescando flussi di esternalità. Gli agenti possono trarre beneficio dagli sforzi di generazione di nuove conoscenze solo per un breve arco di tempo, al termine del quale la conoscenza diventa pubblica. Il breve monopolio temporaneo è all'origine degli incentivi a produrre conoscenza; la non-appropriabilità garantisce che tutti possono usare lo stock di conoscenza e quindi la concorrenza perfetta. L'esistenza di uno stock inesauribile di conoscenza spiega perché i rendimenti siano crescenti

nel tempo, ma non in ogni dato momento. La combinazione tra cumulabilità e non-appropriabilità consente al tempo stesso di spiegare la crescita della produttività e di salvaguardare i fondamenti della concorrenza (Romer, 1994).

Questa intelaiatura teorica va lodata per la sua straordinaria ingegnosità. Prendendo a prestito il linguaggio della teoria della complessità, possiamo dire che in effetti essa combina una spiegazione della tecnologia come artefatto (ovvero una rappresentazione analitica delle caratteristiche intrinseche della natura della tecnologia) con un'analisi della tecnologia come azione (Lane *et al.*, 2009). Gli agenti investono tempo e risorse nella generazione di tecnologia per via della speciale caratteristica della tecnologia come artefatto. Gli incentivi e le decisioni a livello individuale circa gli investimenti di risorse per generare nuovi flussi tecnologici, i meccanismi di mercato, la distribuzione del reddito secondo regole marginalistiche e il risultato in termini di un output, che aumenta a un tasso più che proporzionale, diventano pienamente coerenti grazie all'astuta combinazione dell'analisi della tecnologia come artefatto e quella della tecnologia come azione.

Il problema del modello arrowiano e soprattutto della teoria endogena della crescita che su di essa si basa è il forte carattere strumentale delle ipotesi di base: esse non derivano da un'effettiva indagine empirica delle proprietà e delle caratteristiche della tecnologia, ma paiono essere più un costrutto confezionato *ad hoc* per rispondere alle limitazioni intrinseche della teoria economica quando affronta la crescita economica e, nello specifico, il ruolo del cambiamento tecnologico all'interno del cambiamento economico. Tali incerte fondamenta generano quella che è la maggiore debolezza del modello, ovvero le sue implicazioni in termini di miglioramenti omogenei e costanti della tecnologia su tutto lo spettro degli agenti coinvolti, attraverso differenti regioni, nazioni ed epoche storiche. Pare che l'accumulo di tecnologia, e quindi dei suoi benefici, proceda a ritmo costante, e il modello non fornisce indicazioni in merito alle cause di possibili variazioni. Al contrario i dati empirici dimostrano che i tassi di crescita della produttività totale dei fattori sono assai lontani dalla stabilità, e che nella realtà intervengono numerosi micro e macro livelli elevatissimi di varianza, nel tempo, nello spazio e tra gli agenti (Kuznets, 1930).

Questo libro di Brian Arthur rappresenta un contributo essenziale per fondare analiticamente ed empiricamente lo studio eco-

nomico della tecnologia come artefatto, ed è il risultato di una delle più sistematiche esplorazioni della reale natura della tecnologia condotte nella storia del pensiero economico. Il punto di partenza è lo studio degli assunti basilari di Arrow di cui si fornisce un'analisi chiara e articolata. Su questa base Arthur innesta poi lo studio delle caratteristiche dinamiche e irregolari della tecnologia vista come un fenomeno intrinsecamente complesso, in cui cioè la dinamica del sistema dipende dalla struttura dei rapporti tra i singoli fenomeni dinamici. Arthur compie uno sforzo davvero notevole per creare un'intelaiatura teorica globale, organica e coerente che permetta di comprendere la natura della tecnologia, cos'è e come evolve, basata sulla complessità delle relazioni tra le singole componenti.

L'organizzazione sistematica del libro è coerente con l'analisi e la metodologia sistemica impiegate: l'argomentazione si sviluppa partendo da zero, con un approccio cumulativo che fornisce una spiegazione sistemica della tecnologia e del cambiamento tecnologico. L'evoluzione combinatoria è il primo elemento dell'edificio teorico: le nuove tecnologie sorgono dalla combinazione di altre tecnologie preesistenti. Ma è un'evoluzione complessa, al contrario di quella basata sull'evoluzionismo *à la* Darwin: «I meccanismi darwiniani non funzionano» (p. 11). È sbagliato applicare tali meccanismi per esplorare la natura della tecnologia e studiarne l'evoluzione. Questi sono sì in grado di spiegare la selezione di nuove tecnologie, ma non l'origine delle novità tecnologiche.

L'origine delle innovazioni può essere compresa solo quando si apprezza appieno la complessità della tecnologia. La tecnologia è complessa in due modi. Primo, è il risultato di ricombinazioni di tecnologie esistenti ed è quindi un sistema, costituito da una varietà di parti e componenti, essi stessi a loro volta tecnologie. Secondo, è articolata in domini o famiglie di tecnologie affini. Ogni tecnologia non può essere compresa se isolata dal resto: appartiene a uno specifico dominio ed è il risultato di una ricombinazione sistemica. Le nuove tecnologie sorgono dall'azione di tre diversi meccanismi. Il cambiamento tecnologico avviene quando la scienza riesce a identificare nuovi fenomeni naturali, ovvero nuove proprietà di eventi naturali, da esplorare e imbrigliare. Le svolte in campo scientifico creano nicchie di opportunità per la tecnologia. Lo sfruttamento di nuovi fenomeni naturali, tuttavia, avviene solo quando il sistema socioeconomico esprime alcuni bisogni specifici, oppure quando interviene un secondo meccanismo. Il cambiamento tecnologico,



infatti, riesce anche grazie all'intervento di agenti intenzionali che tentano di superare colli di bottiglia e limiti posti dalla tecnologia stessa. Questi sono messi in evidenza dal lavoro dei ricercatori che cercano di estendere la funzionalità di ciascuna tecnologia manipolando componenti e sottosistemi. Essi identificano un componente debole in una data tecnologia e concentrano gli sforzi per sostituirlo. Viene così a crearsi un fenomeno di crescita strutturale, e la progettazione di nuovi sottosistemi che formano ogni tecnologia e ogni dominio si fa via via più complessa con l'incremento dell'interdipendenza reciproca delle diverse parti. Questo secondo meccanismo può rafforzare il primo o svilupparsi in maniera indipendente. Infine la fecondazione incrociata fra varie tecnologie, sia all'interno del medesimo dominio sia fra domini differenti, fornisce uno stimolo costante all'intero processo. I cambiamenti tecnologici che hanno luogo in un dominio possono alimentare ulteriori cambiamenti tecnologici in generale, tramite possibili ricombinazioni con altri domini apparentemente slegati da quello di provenienza. L'accesso e l'impiego di conoscenza esterna a una singola tecnologia e a un singolo dominio è una fonte primaria di cambiamento tecnologico.

Questi meccanismi operano di continuo e si alimentano a vicenda. Il cambiamento tecnologico, infatti, offre alla scienza nuovi strumenti che le permettono di scoprire nuovi fenomeni naturali. Questi a loro volta stimolano la generazione di nuova conoscenza tecnologica entro specifici domini. Tale conoscenza permette di modificare le tecnologie e i sottosistemi tecnologici esistenti, che a loro volta richiedono sforzi ulteriori per produrre una crescita strutturale che superi problemi specifici e inefficienze emergenti, o "sacche di resistenza" tecnologiche. Il processo è caratterizzato da una forte ricorsività ed è normalmente «dipendente dalla storia». In ogni dato momento la mappa dei sistemi tecnologici (articolati in sistemi, sottosistemi e domini, ciascuno con proprie caratteristiche) è plasmata dai processi che l'hanno generata. Al contempo la mappa plasma le dinamiche del processo. Mappe diverse sarebbero potute emergere da sequenze di sviluppo diverse, o con tempi di creazione diversi ad ogni livello. Non vi è motivo per credere che viviamo nel migliore dei mondi possibili: in ogni dato momento la selezione di nuove tecnologie infatti è stata ed è pesantemente influenzata dal caso, inclusi i tempi della scoperta sequenziale di nuovi fenomeni naturali e l'introduzione di nuovi domini e sottosistemi. Questo

processo in continua evoluzione origina nel sistema economico e influisce su di esso.

Come ci ricorda Arthur, l'economia non adotta una nuova tecnologia; la incontra. La dinamica del cambiamento tecnologico è plasmata dall'interazione di due livelli: l'interdipendenza fra le tecnologie e la ricombinazione che ne genera di nuove. Così facendo Arthur produce una spiegazione nuova e originale delle caratteristiche della tecnologia come manufatto e contribuisce all'analisi delle dinamiche di sistema del cambiamento tecnologico, sottolineando il ruolo della complessità, ovvero dell'interdipendenza dinamica fra le parti che costituiscono il sistema.

L'analisi della cumulatività è ora arricchita da una comprensione molto più sofisticata delle diverse connessioni diacroniche e sincroniche che intervengono nell'emergenza di una nuova tecnologia. L'analisi sistemica di Arthur e l'applicazione delle teorie economiche basilari della complessità sono il fondamento per la comprensione delle caratteristiche statiche e dinamiche della nozione fondamentale di *panorama tecnologico*. La tecnologia può ora essere vista come un paesaggio irregolare, dinamico e complesso, in cui colli, monti, valli e scarpate contrastano con le belle pianure implicitamente presunte nell'approccio arrowiano. Ciò rappresenta un progresso nell'implementazione del tentativo di trapiantare l'analisi di Kauffman dei paesaggi genetici in paesaggi tecnologici (Kauffman, 1993).

Il libro esplora con competenza e lucidità le caratteristiche intrinseche della tecnologia come artefatto: in questo risiede la sua forza. Esso non sviluppa però l'analisi della tecnologia come un tipo particolare di azione economica: questo ne limita la portata. La confusione fra i due livelli è uno dei maggiori punti deboli di questo lavoro (Dosi e Grazzi, 2010). L'integrazione dell'analisi della tecnologia, come artefatto, condotta in modo originale, innovativo ed empiricamente fondato in questo libro, può e deve essere arricchita con l'analisi dell'innovazione, ovvero della tecnologia come azione, che trae alimento dalla tradizione schumpeteriana imperniata sullo studio dei fattori che sono all'origine dell'innovazione, ovvero delle azioni economiche che portano al cambiamento tecnologico, di recente arricchita da altri contributi elaborati nella medesima atmosfera culturale di Santa Fé (Schumpeter, 1947; Lane *et al.*, 2009).

La nozione dell'innovazione quale forma di reazione, introdotta da Schumpeter (1947), porta ad articolare l'ipotesi che agenti miopi siano indotti a tentare di cambiare la propria tecnologia da condi-

zioni specifiche, che influenzano la loro situazione di equilibrio e li spingono a reagire introducendo innovazioni. La reazione può essere adattativa o creativa, secondo le condizioni del contesto in cui avviene. Se il contesto fornisce l'opportunità di ricombinare favorevolmente unità di conoscenza complementari, la reazione avrà successo e sarà davvero creativa; altrimenti avverrà un adattamento passivo ai nuovi mercati dei prodotti e dei fattori. La ricerca di nuove tecnologie è locale, non globale, e avviene nelle vicinanze delle pratiche esistenti. La complessità della tecnologia impedisce una visione globale e dimostra il carattere locale della ricerca. La ricerca locale ha luogo quando le aziende coinvolte si trovano in una condizione di disequilibrio e, fintanto che porta all'introduzione di nuove tecnologie, è in sé causa di ulteriori disequilibri. L'introduzione di ciascuna nuova tecnologia, infatti, influenza le condizioni in cui opera ciascun agente, perturba i mercati dei prodotti e dei fattori, altera il panorama tecnologico, sfida ogni miope aspettativa di equilibrio e a sua volta stimola ulteriore cambiamento tecnologico (Antonelli, 2008).

L'analisi della natura della tecnologia come artefatto complesso aggiunge alcuni elementi chiave alla comprensione del fatto che l'innovazione tecnologica è il risultato di un processo collettivo che va oltre l'intenzionalità dei singoli agenti. In effetti, se si comprende la complessità della tecnologia, si può afferrare il ruolo fondamentale dell'interazione e della complementarità emergente fra i diversi agenti, definite dal carattere localizzato e quindi idiosincratico della specifica tecnologia sotto il loro dominio. Il cambiamento tecnologico e l'introduzione di innovazioni sono allora il risultato di una ricombinazione della tecnologia localizzata, portata in essere da ogni agente localizzato. La ricombinazione funziona perché la conoscenza tecnologica è dispersa e frammentata e ogni agente ha il controllo di una quantità limitata di tecnologia. La complementarità e la compatibilità fra ogni elemento individuale sono possibili, ma non scontate. La ricombinazione si attiva quando gli agenti economici, mossi da improvvise e inattese condizioni di squilibrio economico, cercano di generare nuova tecnologia a livello locale. Così facendo interagiscono con altri agenti co-localizzati, tanto livello geografico quanto a livello tecnologico. La progressiva ricombinazione delle loro parti di tecnologia, tramite interazioni localizzate, alimenta l'emergenza progressiva, seppur accidentale, di nodi di complementarità di agenti localizzati (Weitzman, 1996; Patrucco, 2009).

L'emergenza di nuove tecnologie è il risultato di un processo collettivo di aggregazione e integrazione di diverse parti di tecnologia. La ricombinazione contrasta con la frammentazione e ha luogo secondo la distribuzione degli agenti nello spazio geografico e tecnologico. Essa gioca un ruolo chiave nel processo, così come le organizzazioni del sistema in cui avvengono le interazioni fra gli agenti. La nozione di complessità organizzata e definita dalla struttura e dalla qualità delle interazioni è cruciale per valutare le possibilità reali che una nuova tecnologia emerga dal processo confuso e distribuito della ricerca locale, al quale partecipa una varietà di agenti, tutti con un differente corredo di competenze e conoscenze localizzate, solo potenzialmente compatibili e complementari. Questo approccio permette di sfruttare e apprezzare la lunga tradizione di analisi dell'economia regionale per quel che riguarda il ruolo fondamentale delle interazioni localizzate nel determinare le effettive possibilità di introdurre innovazioni (Antonelli, 2010).

L'integrazione delle nozioni di ricerca localizzata mossa da condizioni di disequilibrio e complementarietà potenziale, implementata dalla complessità organizzata di reti di interazioni, è cruciale per comprendere il carattere collettivo e sistemico dell'emergenza che nutre la ricombinazione, e prima o poi rende possibile la generazione di nuova conoscenza tecnologica. L'azione intenzionale degli agenti nell'organizzare la complessità dei loro ambienti gioca un ruolo fondamentale nell'emergenza delle innovazioni come risultato collettivo di comunità di innovatori. Gli agenti hanno la capacità di innovare e di muoversi entro i loro spazi geografici, tecnologici e organizzativi, tramite la creazione di strutture, come reti e coalizioni, che sostengono e qualificano le loro interazioni e incrementano le possibilità di eseguire efficaci ricombinazioni (Lane *et al.*, 2009).

L'analisi della tecnologia come artefatto sviluppata da Arthur permette di arricchire sostanzialmente l'intuizione arrowiana e fornisce un contesto entro il quale l'analisi dell'innovazione tecnologica come forma specifica di azione economica può progredire significativamente. La sua integrazione con l'analisi dei fattori che determinano l'innovazione tecnologica a livello degli agenti rende possibile un grande progresso della comprensione dei meccanismi economici che sono all'origine del cambiamento tecnologico e dell'economia in generale. Inoltre, la comprensione dell'innovazione tecnologica come atto permette di afferrare appieno il motore basilare dell'interazione dinamica e autosostenuta fra tecnologia e innovazione. In

ogni dato momento, l'innovazione cambia il panorama tecnologico, ma tali mutamenti cambiano le condizioni in cui operano gli agenti e quindi generano nuove ondate di innovazioni in una catena circolare di relazioni causali.

L'integrazione dell'analisi della tecnologia come artefatto e dell'analisi dell'innovazione tecnologica, infatti, permette di comprendere l'emergenza di nuove tecnologie come risultato di dinamiche di sistema, dove le caratteristiche del contesto sistemico e le regole dinamiche del processo sono al tempo stesso fattori determinanti e conseguenze dell'azione innovativa di agenti miopi, seppur creativi, i quali cercano di reagire ai mutamenti inattesi nei mercati dei prodotti e dei fattori sforzandosi di cambiare la propria tecnologia. Tale approccio permette di comprendere i limiti di molti, tipici assunti delle scienze sociali nell'affrontare i problemi analitici posti dal cambiamento tecnologico. Il determinismo tecnologico non riesce a comprendere il ruolo delle azioni intenzionali degli agenti che partecipano al processo e il conseguente, continuo mutamento di direzione, di intensità e di effetti del cambiamento tecnologico. L'assunto tradizionale di una tecnologia dal carattere esogeno, dal quale si sviluppano alcune teorie economiche, è chiaramente erroneo, in quanto la tecnologia è il prodotto dell'azione economica. Per lo stesso motivo l'economia evoluzionistica non riesce a comprendere l'introduzione di innovazioni come risultato di un processo intenzionale, e rischia di lasciare spazio eccessivo alle "variazioni darwiniane", che somigliano troppo alla manna neoclassica.

Questo libro di Brian Artur è sicuramente interessante, e si spera influenzerà il dibattito introducendo una significativa discontinuità.

*Cristiano Antonelli*  
*Dipartimento di economia Salvatore Cognetti de Martiis,*  
*Università degli Studi di Torino;*  
*Bureau of Research in Complexity, Knowledge and Innovation*  
*[BRICK], Collegio Carlo Alberto, Moncalieri.*