

CONOSCENZA, PREVISIONE, AZIONE

di Roberto Vacca per αtov (Edizioni Pendragon) 12/4/1996

Incontro sul tema "Ingegneria e quante culture?" - Rassegna "Ingegneri altrove"
Facoltà di Ingegneria - Università di Salerno, 6 Giugno 2006

www.aldius.unisa.it

1 Quando avevo 7 anni chiesi a mio padre: "Quanti abitanti ha la terra?" Rispose subito: "Circa due miliardi - e 400 milioni sono cinesi." Poi aggiunse: "All' inizio del secolo scorso si stima fossero un miliardo, dunque in un secolo e mezzo siamo cresciuti di un miliardo. La crescita sta accelerando. Nel 2000 saremo forse 3 miliardi. Tu avrai 73 anni e ci sarai: potrai controllare."

La risposta era ingenua e ingenuamente mi feci l' idea che ogni crescita fosse lineare. Qualche mese dopo l' Italia invase l' Etiopia e mi chiesi quanto sarebbe durata quella guerra. Misurai rozzamente sull' atlante l' area dei territori conquistati dall' Italia con la I Guerra Mondiale (durata 3 anni e mezzo) e giudicai che l' Etiopia aveva una superficie circa 100 volte maggiore. Conclusi che la guerra avrebbe dovuto durare 350 anni, ma, poiche' l' Etiopia era paese piu' primitivo e debole dell' Impero Austro-Ungarico, era probabile che durasse solo 35 anni. Duro', invece, solo 7 mesi e cominciai a capire che molte dipendenze fra grandezze non sono affatto lineari.

(Recentemente ho calcolato usando le equazioni logistiche di Volterra (v. punto **5**) che la popolazione mondiale arrivera' a 10,7 miliardi intorno al 2150. La conclusione e' credibile perche' l' errore standard che misura lo scostamento dell' equazione dai 42 valori osservati che ho usato e' solo del 2,4 per mille e anche altri parametri sofisticati hanno valori accettabili).

2 Crescendo, sentivo sempre piu' l' esigenza personale di capire il mondo fisico. Mi sembrava - e mi sembra ancora - che ci fosse da vergognarsi a non sapere come si muovono i pianeti, che cosa sono i fulmini, come funzionano le macchine. Poi vedevo che da' indubbi vantaggi saper influire sul mondo in generale. Una soluzione ovvia, che scelsi, era studiare ingegneria per imparare la resistenza dei materiali (necessaria a progettare strutture fisiche: case, ponti, tralicci), la fisica, l' elettricita' e l' elettronica (per capire dove passano le correnti nei conduttori, nei condensatori, nello spazio).

A quel tempo avevo letto qualche cosa su relativita' e fisica quantistica, ma ci avevo capito poco. Ero convinto a priori (atteggiamento pericoloso) che tutti i fenomeni fisici fossero deterministici e che potessero essere analizzati con tutta la precisione desiderabile mediante formule matematiche - sempre disponibili e sempre adeguate allo scopo. Notoriamente, invece, non e' cosi'. Tutti i fenomeni influenzati globalmente da moltissimi fattori in modi non analizzabili, sono soggetti al calcolo delle probabilita' e, in singoli casi concreti, possiamo solo fare congetture su quello che accadrà'. L' incertezza

e' molto piu' fondamentale nel caso di processi che riguardano particelle elementari - ma questa incertezza riguarda i fisici e certi elettronici, non le persone normali.

3 Ricordo di essere rimasto scandalizzato da un'affermazione dell' Ing. Arrigo Care' (che mi insegna' a calcolare il cemento armato - e tante altre cose): "I calcoli li sanno fare tutti. Il bravo ingegnere e' quello che guarda la situazione e conclude: "Be'! ora si fa cosi'." - e decide giusto." Non e' proprio cosi': i calcoli non li sanno fare tutti e per dire Be'! e indovinarci ci vuole tanta esperienza di lavori eseguiti confrontati con i calcoli fatti.

Ma come si prendono le decisioni quando i processi non sono nemmeno rappresentabili in modo formale oppure possono essere controllati in tanti modi diversi cosi' numerosi da non essere nemmeno elencabili? Spesso incontriamo situazioni di questo tipo proprio quando ci occupiamo di questioni essenziali: ad esempio nel progetto di sistemi tecnologici influenzati dal comportamento di grandi masse di esseri umani.

In altri casi semplicemente non sono disponibili formule matematiche che ci permettono di arrivare a determinare gli interventi necessari o a dimensionare strutture o componenti di una macchina. Allora certe decisioni di progetto vanno prese a sentimento. Anche questa espressione, usata nella tecnica, mi faceva uno strano effetto le prime volte che la sentivo. Ma non e' sbagliata. Le esperienze precedenti di progettisti, decisori e pianificatori dovrebbero ben servire a dotarli di un certo intuito (questo intendeva Care').

4 Come diminuire l' incertezza nelle progettazioni o nella previsione di eventi futuri? Cominciai a rendermi conto che il ricorso a metodi matematici sempre piu' sofisticati puo' risolvere certi problemi, purché siano posti con notevole precisione e purché siano disponibili dati accurati sulle caratteristiche degli elementi che influenzano il processo considerato e sul loro comportamento passato.

Nel corso di fisica per ingegneri mi avevano insegnato a valutare l' errore probabile di ogni misura e ad analizzare la propagazione degli errori nei calcoli basati su quelle misure. Cercavo sempre, allora, di farmi un' idea di quanto previsioni o descrizioni effettuate mediante teorie matematiche potessero discostarsi dalla realta'. In certi casi sembra proprio che le teorie siano state concepite o cucinate senza alcun aggancio a osservazioni o misure. Purtroppo conclusi che era questo il caso anche di rappresentazioni analitiche di fenomeni sociali ed economici, tracciate a grandi linee in modo del tutto plausibile da autori come Vilfredo Pareto. La sua Sociologia Generale mi parve un tentativo utile e interessante di applicare strumenti logico-sperimentali alle scienze umane. Però mi sembrava azzardato o inutile arguire che certi fenomeni potessero essere descritti per mezzo di equazioni differenziali, di cui non si tentava nemmeno di definire la forma esatta, i valori dei coefficienti, le soluzioni. Quindi sembravano inutili e banali le famiglie di curve (magari caratterizzate da andamenti ondegianti attorno a una curva di tendenza che fosse in accordo con quanto intuito a sentimento) rappresentate in diagrammi in cui mancavano le unita' di

misura. Mi capito' allora di leggere la frase di Galileo: "Cio' che l' esperienza e i sensi ne dimostrano devesi anteporre a ogni discorso ancorche' ne paresse assai fondato." Mi sembra basilare e la ripeto spesso.

5 Mio padre aveva lavorato con il fisico Vito Volterra all' Ufficio Invenzioni che durante la I Guerra Mondiale esaminava idee e ritrovati nuovi per giudicarne l'eventuale utilita' a scopi bellici. L' Ufficio Invenzioni poi costitui' il primo nucleo da cui si formo' il Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Quando ero ragazzo mio padre mi aveva spiegato le teorie di Volterra sugli sviluppi di: epidemie, popolazioni biologiche (batteri, pesci, mammiferi, esseri umani). Le curve logistiche rappresentano soluzioni dell' equazione differenziale che si giustifica subito nel caso di epidemie e dice che il numero di nuovi malati che si infettano in una unita' di tempo e' proporzionale sia al numero x di persone gia' malate (che infettano gli altri), sia al numero di persone sane ancora da contagiare, cioe'

$$dx/dt = k N (N-x)$$

dove N e' il numero totale iniziale di contagiabili (chi e' immune non entra nel calcolo). La soluzione di questa equazione definisce il numero totale di unita' x che appartengono alla popolazione che si sviluppa (o declina) in funzione del tempo t :

$$x = N/(1 + e^{(A+B \cdot t)})$$

ove e e' la base dei logaritmi naturali, A e B sono costanti.

La situazione in cui una popolazione di carnivori (predatori) si ciba di prede erbivore e' descritta da altre equazioni differenziali di Volterra. Se i predatori appaiono in un habitat occupato solo da erbivori, inizialmente la popolazione dei carnivori cresce - e quella delle prede cala (si ha una logistica di crescita e una in diminuzione). Quando le prede sono troppo scarse, i predatori cominciano a decrescere fino a quando son tanto pochi che la popolazione delle prede cresce di nuovo. In certe condizioni il processo diventa ciclico. Mi sarei ricordato questi input infantili molto piu' tardi come vedremo.

Mio padre mi aveva anche insegnato l' aritmetica in base 2 (aveva previsto in un suo articolo del 1905 che le future macchine per calcolare avrebbero funzionato in base 2) e l' algebra di Boole che mi sarebbe poi servita per lavorare con i computer.

6 Nel 1950 facevo l' ultimo anno di ingegneria e nel corso di Impianti Elettrici, ci insegnavano che i consumi di energia elettrica raddoppiano ogni 10 anni. Questo equivale a dire che l' aumento sarebbe di circa il 7,17% all' anno. Gia' allora meditavo che questa legge di crescita non poteva essere vera perche' altrimenti i consumi di energia elettrica sarebbero destinati a crescere oltre ogni limite - 1024 volte dopo un secolo, 1.048.576 volte dopo due secoli - il che e' assurdo. Pero' non avrei saputo dire come si sarebbe dovuta calcolare quella crescita - indubbiamente in corso.

7 Nel 1951 appena laureato andai a lavorare alla TERNI (Societa' per l' Industria e l' Elettricita') e imparai molte cose sulle reti elettriche che mi

sarebbero servite piu' tardi quando mi sarei occupato di ingegneria dei sistemi

In quell' occasione mi feci anche alcune idee sbagliate sul management industriale. Infatti il Direttore Centrale da cui dipendevo era il Prof. Ing. Arnaldo M. Angelini, che mi aveva insegnato macchine elettriche all' Universita', deteneva un centinaio di brevetti a suo nome, stava completando la ricostruzione, l' ampliamento e la modernizzazione degli impianti idroelettrici dell' Italia centrale e, intanto, studiava ingegneria nucleare. Mi feci l' idea che tutti i grandi manager industriali fossero persone di infinita cultura, abilita' e sagacia - ma con gli anni mi dovetti accorgere che le cose non stavano cosi'. I grandi manager del livello di Angelini sono molto rari. Avrei dovuto capire che la distribuzione e' gaussiana. E' normale che ce ne siano pochi ottimi, pochi pessimi e la maggioranza capaci di prestazioni medie.

8 Nel 1955 cominciai a lavorare nel campo dei computer. Mi guadagnavo il pane riparando il primo computer scientifico usato in Italia al CNR presso l'Istituto per le Applicazioni del Calcolo. Era una macchina britannica (Ferranti Mark1*) progettata a Manchester dal gruppo cui aveva appartenuto anche Alan Turing. Il contatto con i progettisti di quella macchina stimolo' il mio interesse per l' intelligenza artificiale, per la elaborazione dati, per l' uso di strumenti avanzati allo scopo di risolvere problemi difficili.

9 - Poi lasciai il CNR e per 13 anni dirigevo un' azienda che progettava, costruiva, installava e manteneva sistemi elettronici per il controllo del traffico veicolare nelle citta' e sulle autostrade. Cominciai come direttore tecnico e poco dopo diventai anche direttore generale.

I problemi da risolvere non erano solo quelli relativi al funzionamento di circuiti elettronici e computer sensibili alle caratteristiche dei flussi di traffico - ma anche quelli relativi alle discipline del traffico, all' urbanistica, alla pianificazione.

Economia, industria, attivita' sociali, costruzioni, uso del territorio, comunicazioni, trasporti sono sistemi che interagiscono. Il loro funzionamento non si puo' analizzare senza l' ingegneria dei sistemi - disciplina sorta durante e dopo la II guerra mondiale.

Cosi' studiai l' ingegneria dei sistemi sui libri e, intanto, la mettevo in pratica nella progettazione di sistemi per il controllo in tempo reale di traffico veicolare pubblico e privato. Ci occupammo anche di controllo del traffico degli aerei a terra negli aeroporti. Piu' tardi tenni seminari di questa disciplina al Politecnico di Milano.

L' ingegneria dei sistemi e' fatta di statistica, ricerca operativa, calcolo delle probabilita', teoria delle comunicazioni, teoria delle decisioni, teoria delle code, elaborazione dati, informatica, ingegneria umana, previsione tecnologica, pianificazione finanziaria, teoria dell' organizzazione, gestione totale della qualita'. Richiede anche competenze nella definizione delle specifiche e nella progettazione di hardware speciale. Mira a risolvere i grandi problemi e non puo' (non dovrebbe) essere ignorata da chi si vuole

occupare di pianificazione e anche di politica, ma purtroppo, invece, i piu' ne ignorano anche l'esistenza.

Per fare il direttore generale di un' azienda e' necessario stilare piani aziendali e budget e prevedere non solo l' andamento del mercato relativo ai propri prodotti e servizi ma anche: andamento dell' economia, tasso delle invenzioni e dell' innovazione tecnologica (che faranno i concorrenti e quando?). Io non sapevo le risposte ai problemi di questo tipo, ma cominciai a chiedermi come potessero essere affrontati - in parte perche' era il mio dovere e in parte perche' l' argomento e' molto interessante

10 Nel 1967 si tenne a Pisa il XXI Congresso Nazionale di Filosofia il cui tema era "L'Uomo e la Macchina". In quel periodo si cominciava a parlare spesso di modelli matematici. Aveva fatto notizia l' impiego di moderni elaboratori elettronici numerici per realizzare modelli, e quindi progettare, grandi aerei a reazione prima militari e poi civili. Taluno proponeva di realizzare su computer modelli matematici del cervello umano o, piu' modestamente, delle nevrosi e della loro cura mediante metodi di psicologia dinamica. Mi sembravano improvvisati e privi di significato parecchi tentativi di applicare procedure proprie delle scienze fisiche e dei loro impieghi nella progettazione tecnica.

Così presentai a quel congresso una memoria in cui proponevo 5 regole, basate sul buon senso, da applicare ai trasferimenti interdisciplinari. Mi pare che siano ancora attuali e le riporto qui di seguito.

I - Astenersi dallo scegliere una disciplina origine troppo controversa o limitarne le zone interessate al trasferimento ai soli metodi rilevatisi di utile applicazione nell' ambito della disciplina origine e ai risultati riconosciuti validi da una vasta generalita' dei cultori della stessa.

II - Specificare con precisione quale sia la tecnica o il risultato della disciplina origine che si intende trasferire e non prefiggersi di trasferire tutto il contenuto della disciplina origine alla disciplina terminale.

III - Una volta individuato il componente della disciplina origine da trasferire, ripeterne per esteso la definizione specificando le fonti, quando il componente e' stato trattato in modo difforme da vari autori.

IV - Definire i termini usati, specificando se il senso nel quale vengono impiegati e' quello accettato nell' ambito della disciplina origine o della terminale.

V - Astenersi dal profetizzare i risultati di trasferimenti interdisciplinari ancora non eseguiti.

Pareto avrebbe, forse, classificato fra i residui il mio atteggiamento severo verso i ragionamenti vaghi, le confusioni fra approcci teorici difformi, i discorsi divorziati dalla realta'. Ma forse no: Pareto non amava le discussioni nominalistiche.

Le realta' che studiamo stanno diventando sempre piu' complesse. Diventano piu' complessi i grandi sistemi tecnologici (comunicazioni, trasporti, energia, elaborazione dati) e, intanto, molti studiosi affrontano realta' (biologiche, chimiche, fisiche, organizzative) piu' complesse di quelle analizzate in passato. Per tentare di capirle abbiamo bisogno di tutta la nostra razionalita' - non di applicare a caso strumenti mal noti.

11 Nel 1957 avevo cominciato a scrivere racconti di fantascienza (forse per invidia verso mia madre, arabista, che a quasi 70 anni aveva cominciato a scrivere anche romanzi gialli). La fantascienza è un genere ormai morto. La realtà ha superato la finzione e non sono più tanto interessanti i tentativi di immaginare imprese spaziali o avventure informatiche e logiche più paradossali dei progressi già conseguiti davvero o di quelli già immaginati da altri.

Pero' 40 anni fa mi sembrava ragionevole provare a inventare risposte divertenti a problemi classici di cui non si conoscevano le soluzioni. (Fra questi: l'analisi informatica del cervello e l'uso del cervello come un computer; le conseguenze di progressi della meteorologia tali da permettere la previsione esatta con un anno di anticipo del tempo che avrebbe fatto in ogni punto del globo). Poteva essere un esercizio stimolante - e non compromettente perché, dopo tutto, si trattava di narrativa.

Pero' nel 1970 cominciai a perdere interesse a questo genere in declino. Così scrivevo articoli di divulgazione per vari giornali. Un oscuro settimanale di sinistra (che ebbe vita breve e poco gloriosa) mi propose di collaborare. Mi chiesero che cosa avrei potuto scrivere, che temi avrei potuto trattare. Dissi subito che ritenevo opportuno scrivere sull'ingegneria dei sistemi di cui la maggioranza delle persone nemmeno sospettava l'esistenza. Cercai di spiegare di che si trattava e perché l'argomento sia tanto importante. Dissi: "Viviamo in un periodo in cui tutte le misure di ogni processo o attività che ci interessa stanno crescendo rapidamente. Cresce velocemente il numero di telefoni installati e il numero di comunicazioni che trasmettono, il numero di auto e il numero di chilometri che percorrono, la produzione di acciaio, cemento, radio, televisori, computer, il numero di lettere che si mandano, il prodotto nazionale lordo di tutti i paesi avanzati. Questo processo ovviamente non può continuare all'infinito."

Feci l'esempio dei consumi di energia elettrica che non possono continuare indefinitamente a raddoppiare ogni 10 anni: dunque smetteranno di crescere e si dovrà arrivare a regime, alla costanza. Mi venne in mente in quel momento che alla costanza si può arrivare gradualmente (come nella carica di un condensatore in un circuito RC) o con oscillazioni anche selvagge (come accade in certi circuiti RLC con resistenza, capacità e induttanza). Quindi se i numeri crescenti che misurano le caratteristiche della nostra società crescono oltre ogni limite di stabilità, poi si produrranno grandi oscillazioni. La prima diminuzione brusca che seguirà il massimo raggiunto dall'attuale crescita rapida potrà essere tragica con diminuzione della popolazione, dell'energia disponibile, della produzione industriale, di ogni parametro significativo della società'.

E perché dovrebbe avvenire questo crollo? La risposta che sorge spontanea è: "Perché la complessità del mondo creato dall'uomo sta crescendo più velocemente della capacità degli esseri umani di gestirla. Cresce, quindi, la probabilità che grandi sistemi tecnologici vengano progettati in modi inadeguati ad assicurarne la stabilità'."

Pochi anni prima (nel Novembre 1965) si era verificato nella costa atlantica degli USA un black-out gigantesco che aveva lasciato senza elettricità 40 milioni di americani per molte ore.

Mi chiesi: "Se quel black-out si fosse verificato d' inverno durante una tempesta di neve, le conseguenze avrebbero potuto essere molto peggiori - anche tragiche.

Da qui venne l' idea del mio libro del 1971 IL MEDIOEVO PROSSIMO VENTURO in cui descrivevo (qualitativamente) modi di possibile degrado di grandi sistemi interagenti fra loro: energia, comunicazioni, elaborazione dati, trasporti, rifiuti. Alcuni hanno letto questo libro come un testo di ecologia: lo era in senso lato. Mirava a impedire che certe attività umane su grande scala producano guai sia all' ambiente naturale, sia a quello artificiale creato all' uomo.

12 Contemporaneamente al mio "Medioevo" il Club di Roma pubblicò lo studio sui Limiti dello Sviluppo di Dennis Meadows basato sulla dinamica dei sistemi del Prof. Jay Forrester. Era un tentativo di calcolare mediante un modello su computer l' avvenire della situazione socio-economica del mondo descritta mediante poche variabili: popolazione, terreni coltivabili, risorse naturali, produzione industriale, produzione agricola, qualità della vita. Il modello conteneva variabili assimilate a livelli (ad es. i capitali investiti nell' industria) e altre costituite da flussi (ad es. la produzione industriale). Ogni flusso è influenzato da vari livelli e ogni livello da vari flussi. Le equazioni che governano le variabili non sono note. Si arguiscono le loro variazioni in un intervallo di tempo come funzione (lineare o quadratica o esponenziale o semplicemente tabulare) di altre variabili: i coefficienti nelle equazioni alle differenze finite che ne risultano si determinano in modo empirico. Lo studio concludeva che entro un secolo si sarebbe verificata una grave crisi dovuta all' esaurimento delle risorse naturali oppure alla mancanza di alimenti in conseguenza dell' esplosione della popolazione oppure all' accorciamento della vita umana causato dall' inquinamento crescente. In particolare si lanciava un allarme sull' imminente esaurimento delle risorse petrolifere.

I fatti non hanno confermato quelle previsioni. La determinazione empirica dei coefficienti delle equazioni, infatti, può condurre a previsioni ampiamente divergenti - anche se le diverse equazioni si adattano tutte fedelmente ai dati storici registrati. Taluno lesse una conferma a quelle previsioni nella crisi petrolifera del 1973. In effetti proprio da quella data cominciò a declinare in termini percentuali il consumo mondiale di petrolio (sostituito largamente dal gas naturale). I moniti del Club di Roma a favore del risparmio, del riciclaggio, dell' aumento dei rendimenti erano ragionevoli. Il modello si rivelò nettamente inadeguato a formulare previsioni credibili.

Negli anni seguenti discutevo con Aurelio Peccei (fondatore e presidente del Club di Roma) sulle vere soluzioni ai problemi planetari. Io suggerivo (come continuo a fare) che occorre una grande impresa per innalzare i livelli medi di conoscenza e cultura di grandi masse di popolazione. Peccei riteneva più importante studiare soluzioni e principi semplici e

propagandarli nella speranza che fossero seguiti anche da chi non ne capiva la giustificazione, ne' i meccanismi.

Il modello di Forrester e Meadows conteneva 150 equazioni. Mihajlo Mesarovic ed Eduard Pestel pochi anni dopo costruirono un modello socio-economico del mondo disaggregandolo in 10 regioni e 7 settori di attivita'. Le equazioni usate erano ora molte migliaia. Il modello era molto piu' complesso, tanto che ebbe echi (e critiche) molto piu' scarsi. Di nuovo i coefficienti delle equazioni erano trovati empiricamente. Affidabilita' ed efficacia delle previsioni erano scarse.

13 Nel 1976 lasciai l' industria e cominciai a lavorare come consulente trattando problemi di management, di organizzazione industriale, di progettazione sistemistica (energia, trasporti, comunicazioni). Un argomento di ovvia importanza nella pianificazione industriale e' la previsione dell' andamento di interi settori industriali e anche di singoli prodotti. Tentai di occuparmene con un certo successo impiegando procedure empiriche e immaginando plausibili scenari futuri : socio-politici, economici, tecnologici.

Nei primi anni Ottanta lessi un lavoro in cui il fisico Cesare Marchetti utilizzava le equazioni di Volterra per analizzare crescita e declino delle popolazioni costituite da prodotti costruiti dall' uomo (automobili, strade, aerei, reattori nucleari, etc.). Le equazioni trovate da Marchetti descrivevano quei processi tanto fedelmente - da sembrare inventate. Così costruii una serie di programmi di computer per adattare equazioni di Volterra a dati storici, cercando di dimostrare che Marchetti barava. Mi accorsi che non barava affatto. In molti casi quei processi di crescita e declino erano descritti in modo quasi perfetto. Dunque: era questo uno strumento sicuro per formulare previsioni affidabili?

Uso queste procedure da oltre 10 anni e ho analizzato centinaia di casi. Posso rispondere alla domanda che in certi casi le previsioni sono davvero affidabili, purché:

- i dati storici siano sicuri e non siano affetti da forte rumore
- si effettuino controlli matematici piuttosto sofisticati
- non insorgano fattori nuovi che alterino del tutto la situazione.

Ad esempio ho analizzato le morti per cancro in Italia dal 1944 al 1991: l' equazione si adatta ai 48 dati annuali con un errore standard del 2,7 per mille; gli altri controlli sono positivi; se ne deduce che le morti per cancro continueranno ad aumentare (dal numero attuale di 160.000) fino a raggiungere un asintoto di 225.000 verso il 2050 (se, però, tutti smettono di fumare, saranno di meno). Ho analizzato i consumi di energia elettrica nella città di Roma dal 1900 al 1993. L' equazione si adatta ai 94 dati annuali con un errore standard dell' 8 per mille; gli altri controlli sono positivi e se ne deduce che i consumi di elettricità a Roma continueranno ad aumentare (dal valore attuale di 8 GWh) fino a raggiungere un asintoto di 11,4 GWh verso il 2050.

D' altra parte le analisi fatte da Marchetti sulle fonti energetiche concludevano che i consumi mondiali di gas naturale avrebbero superato quelli di carbone intorno al 1975. Invece negli anni Settanta il carbone ha

smesso di declinare e il gas ha smesso di crescere, così che quel sorpasso non è avvenuto. Si è verificato, invece in Italia nel 1970.

In conclusione questi modelli logistici possono servire molto bene a descrivere e prevedere la sostituzione di una risorsa o di una tecnologia a un'altra (ad es.: motori a reazione a motori a elica negli aerei). È arduo, però, dimostrare che una certa equazione sia l'unica capace di descrivere i fatti verificatisi finora. Anche quando ci riusciamo dobbiamo ricordare che perfino i migliori modelli e le più accreditate teorie fisiche possono solo rappresentare approssimazioni della realtà - più o meno rozze. Qui dobbiamo ricordare che molte misure di grandezze fisiche raggiungono precisioni notevoli (10^{-9}). Non così quelle socio-economiche che hanno fonti disparate e sono affette da rumore ed errori spesso notevoli.

Queste considerazioni corroborano il punto di vista secondo cui sono poco affidabili le previsioni basate su modelli incrementali che usano equazioni con coefficienti empirici. Le equazioni di Forrester-Meadows (v. punto **12**), poi, sono almeno basate su lunghe serie storiche. Le cose vanno molto peggio quando si tenta di calibrare i coefficienti delle equazioni su dati scarsi (magari riferiti a una sola ascissa temporale) - come purtroppo tentano di fare studiosi con buone referenze accademiche.

Mi riferisco talora giocosamente a tali infelici tentativi dicendo che sembrano mettere in pratica l'ultimo (fantomatico) teorema di Euclide secondo il quale: "Dati tre punti arbitrariamente scelti in un piano, per essi passa sempre una retta -- purché sia abbastanza larga".

14 In molti casi di sistemi socio-economici o tecnologici complessi le variabili sono in numero enorme e non sono disponibili loro misure affidabili e frequenti. Allora non esiste alcuna procedura razionale per analizzare quantitativamente cosa potrebbe accadere in una situazione critica fra i miliardi di quelle possibili che non sapremmo nemmeno elencare e che non potevano essere previste dai progettisti del sistema - suppostane nota l'identità. Infatti è ben noto che i grandi sistemi tendono a proliferare in modo quasi casuale, quando decisori e progettisti separati nel tempo e nello spazio ideano e realizzano indipendentemente porzioni del sistema, aggiunte, innovazioni, retrofitting. In questa situazione costruire modelli è praticamente impossibile. L'unica alternativa è quella di costruire scenari.

Basandomi sul buon senso sono riuscito in vari casi a formulare scenari le cui previsioni si sono avverate. Nell'estate del 1980 notai che il dissenso polacco non veniva soffocato nel sangue da quel regime. Ragionando (come Galileo) che un corpo in moto che non venga frenato continua nel suo moto, prevedi che il dissenso avrebbe continuato a diffondersi investendo tutto l'Est europeo, il regime sovietico si sarebbe dissolto e le repubbliche sovietiche sarebbero diventate indipendenti (v. articolo sul Giornale d'Italia del 29/8/1980).

Dunque è ragionevole anticipare scenari e lo faccio spesso. Ho individuato alcune regole da seguire in questa attività'.

- I. Negli scenari analizzati vanno esplicitate le ipotesi sull'avvenire che li rendono riconoscibili e interessanti. Si tratta, in genere, di funzioni a

gradino - fenomeni improvvisi che avranno conseguenze rimarchevoli che procedono a cascata da un certo settore ad altri settori.

- II. Lo scenario nuovo deve essere scelto fra i tanti che e' ragionevole attendere che si verificano. Non devono essere gratuiti, ne' prescindere dalla esistenza di invarianti ben note (ad esempio: i tempi abbastanza lunghi necessari in certi settori perche' un'innovazione tecnologica si diffonda largamente).
- III. Gli scenari piu' interessanti sono quelli che ammettono interventi correttivi positivi. Ad esempio uno scenario di guerra civile futura puo' essere reso meno probabile mediante interventi di giustizia sociale, di promozione culturale, di investimenti in scuole o in campagne di sensibilizzazione. Di scarso interesse sarebbe uno scenario di invasione di extraterrestri perfidi e invincibili.
- IV. Uno scenario e' utile, se spiega razionalmente la sequenza di eventi immaginata e include specifiche esplicite delle ipotesi fatte sui rapporti causa-effetto e sulle conseguenze principali degli eventi iniziali.
- V. E' ragionevole attendersi che i processi di variazione futuri siano simili a quelli del passato. Non cercheremo corsi e ricorsi, ma proveremo a utilizzare paradigmi esplicativi che hanno avuto successo in passato. A parte gli scostamenti citati al punto 13, un buon esempio e' quello dei modelli di sostituzione tra fonti energetiche. Negli ultimi due secoli questi processi si sono ripetuti con una periodicit  di circa 50 anni. Sembra ragionevole pensare che intorno al 2020 il gas naturale raggiunga il suo massimo e cominci a declinare lasciando gradatamente il posto a una nuova fonte energetica ancora non individuata.
E' difficile ragionare su scenari terrificanti - come quello di una guerra nucleare totale che potrebbe distruggere interamente la vita sul nostro pianeta. Pure bisogna provarci - per evitarli.

15 PENSARE L' IMPENSABILE era il libro in cui, nel 1962, Herman Kahn proponeva di considerare obiettivamente i vantaggi della deterrenza nucleare, anche se una opzione di questa strategia era una guerra nucleare totale. Sono passati 34 anni da allora e per fortuna la guerra nucleare non c'e' stata. La deterrenza ha funzionato (finora). Kahn aveva sbagliato nel prevedere che nel 2000 una cinquantina di nazioni avrebbero avuto bombe atomiche (sono una decina). Invece aveva previsto bene l' aumento di minacce da terroristi e da stati impazziti. Poi aveva sostenuto che gli Stati Uniti e i paesi occidentali dovevano garantire la sicurezza del mondo (non solo la propria), favorire il progresso economico, politico e legislativo e difendere le Quattro Libert . Queste le aveva proposte F.D. Roosevelt nel 1941: libert  di parola, di religione, dalla paura e dal bisogno. Secondo Kahn per raggiungere quegli scopi, i democratici dovevano essere aggressivi (ma solo nel diffondere democrazia).

Anche oggi abbiamo davanti prospettive agghiaccianti e non riguardano solo gli altri. Dobbiamo pensare l' impensabile - perche' non diventi realt . Un esempio tragico e' quello degli Jugoslavi che si stanno distruggendo per essersi abbandonati a conflitti di religione, beghe e interessi locali,

esasperazione di diversita' inessenziali, contrapponendo popolazioni che parlano la stessa lingua e la scrivono solo con alfabeti diversi.

Da noi potrebbero accadere cose simili?. Non dimentichiamo che nel 1938 in Italia furono promulgate leggi razziali nefande. Per non scivolare in assurde guerre civili, non dobbiamo perdere occasione di tacitare chi ripete valutazioni negative - banali e false - dei difetti tipici di alcune regioni italiane. Dobbiamo combattere e irridere i campanilismi e le scervellate pretese di primati, spesso basate su imprese sportive o sulla gastronomia. Solo una societa' che offre scelte moderne di vita, di lavoro, di apprendimento a tutti i cittadini, puo' essere prospera, stabile e interessante. Per questo dobbiamo pensare ai modi in cui migliorare leggi e strutture inadeguate a generare situazioni piu' giuste e rendimenti piu' elevati.

Altre rischiose eventualita' non dipendono dalle nostre azioni, ne' dai nostri atteggiamenti. Se in tutti i paesi del Nord Africa si instaurassero regimi fondamentalisti che annullano le liberta' civili, molti sarebbero forzati a emigrare e alcuni milioni di loro verrebbero per mare verso le coste di Spagna, Francia e Italia. Non sapremmo fermarli e sarebbe disumano provarci. Avremmo davanti un dilemma piu' immediato e tragico che non quello di inviare o no aiuti a paesi lontani. Dovremmo evitare che i meccanismi del nostro paese, lontani dalla perfezione, subissero un collasso totale. Insieme dovremmo tentare di salvare tanti innocenti dalla persecuzione e dalla morte. Sarebbe un grave conflitto fra i doveri.

E che cosa possiamo fare per averte questa tragedia? Gli interventi militari contro il Maghreb sarebbero poco efficaci e poco civili. La soluzione giusta richiede di pensare all' impensabile in modi calmi e costruttivi. Anche nelle nostre piazze pochi secoli fa si bruciavano gli eretici e molto piu' recentemente si giustiziavano i presunti criminali. Poi modesti principi di civiltà e tolleranza si sono fatti strada. Occorre diffonderli in Italia all' estero - e non basta ancora. Occorre diffondere cultura e conoscenza del mondo e, per farlo, bisogna averla. Dunque la guerra civile e le marea di immigrati perseguitati si evitano con la stessa ricetta: scuole, insegnamento di qualita', liberta', uguaglianza, fratellanza. Ci si prova da oltre due secoli. Va bene, ma ci vuole piu' impegno.

16 Nel 1995 con un gruppo di amici e collaboratori dell' Istituto di Studi per l' Informatica e i Sistemi abbiamo partecipato a un concorso indetto dalla Commissione Europea per realizzare modelli matematici di citta'. Nella nostra proposta chiarivamo che i modelli disponibili non si possono considerare come strumenti "Se ..., allora ..." - tali, cioe', da dedurre logicamente le conseguenze ultime della eventuale adozione di politiche o strategie ben definite o della realizzazione di interventi infrastrutturali, fiscali, finanziari. Per questa ragione proponevamo di realizzare 4 modelli da applicare a Roma in modo piu' approfondito, con alcuni test condotti a Parigi e ad Amburgo. I 4 modelli sono basati: il primo sulla dinamica dei sistemi di Forrester, il secondo sulle equazioni logistiche di sostituzione, il terzo sulle matrici Input/Output di Leontief, mentre il quarto e' un modello pragmatico che suddivide la citta' in celle uniformi e ne analizza storia e tendenze. La Commissione Europea ci assegnava il contratto. Lo scopo e'

quello di comporre le indicazioni dei 4 modelli citati, per trarne indicazioni miranti a ottimizzare piani e strategie di intervento.

Le variabili analizzate sono : 1 Popolazione; 2 Tassi di mortalita' e natalita'; 3 Distribuzione per eta'; 4 Densita' di popolazione; 5 Abitazioni disaggregate in base alla qualita'; 7 Consumi energetici annui totali e pro capite; 8 Consumi d' acqua; 9 Passeggeri.km/anno disaggregati nei vari modi; 10 Tempi di viaggio; 11 Forza lavoro impiegata in agricoltura, industria, terziario, disoccupata; 12 Industrie e aziende; 13 Indicatori sanitari; 14 Indicatori sociali; 15 Prodotto lordo totale e pro capite; 16 Comunicazioni: dimensioni delle reti e traffico; 17 Qualita' dell' aria, fattori ambientali; 18 Indicatori culturali.

Il confronto fra le previsioni prodotte dai vari modelli anche con le strategie dei piani dell' amministrazione comunale di Roma hanno dato interessanti risultati. In parallelo a questi studi abbiamo formulato parecchi scenari simili a quelli illustrati al punto **15** precedente ed altri anche positivi (ad es.: introduzione massiccia di automobili elettriche, energiche politiche di rinnovamento culturale e civile, etc.).

17 Prevedere con una adeguata accuratezza tendenze ed eventi futuri che definiscano variabili socio-economiche essenziali e divisare interventi atti a migliorare (se non ottimizzare) le situazioni future, non basta.

Occorre esplicitare i programmi di massima e formulare progetti esecutivi in tutti i campi: cultura e insegnamento, ricerca di base e sviluppo tecnologico, industria, energia, uso del territorio, comunicazione, informazione, giustizia, finanza e fisco. Sarebbe, poi, necessario integrare gli interventi in questi campi diversi cercando di ottimizzare l' impiego delle risorse disponibili che sono sempre notoriamente limitate.

L' ingegneria dei sistemi puo' essere uno strumento molto utile a questi scopi. Pero' occorre anche controllare e migliorare la qualita' di ogni singolo processo. La qualita' dei prodotti si controlla da oltre un secolo nelle officine meccaniche e negli stabilimenti industriali. Me ne ero occupato nello svolgimento delle mie mansioni tecniche gia' tanti anni fa. Poi seguii la storia di come le procedure statistiche elaborate negli Stati Uniti furono trasferite all' industria giapponese dopo la Seconda Guerra Mondiale. Le procedure sofisticate (e semplificate per renderle applicabili dal personale a tutti i livelli) sviluppate da Juran, Gryna e Baldrige non si limitavano ad analizzare la qualita' del progetto, di materiali e componenti, dei metodi di produzione e della manutenzione. Estendevano i controlli anche a: scelta del settore, pianificazione aziendale, comunicazione, gestione finanziaria, amministrazione, gestione del magazzino, fattori umani, comunicazione interna ed esterna, imballaggio e spedizione, riciclaggio dei prodotti, qualita' dei servizi prestati, impatti ambientali, etc. Questa e' una lista aperta - che non finisce mai. Gran parte delle procedure intese ad assicurare una qualita' globale alta di prodotti e servizi, rappresenta solo la codificazione di principi ispirati a un buon senso informato. E' proprio l' applicazione di questi principi che in pratica e' troppo spesso carente. Invece una aderenza rigorosa ad essi e' uno dei pochi rimedi esistenti alle difficoltà connesse con l' incertezza che avvolge la massima parte degli eventi futuri.

Ho insegnato questi principi e queste procedure i corsi post-laurea e concludo: Lo scopo finale della gestione totale della qualità è, dunque: utilizzare ogni ragionevole procedura - scientifica o empirica - allo scopo di far succedere le cose giuste in ogni branca di attività migliorando continuamente i risultati ottenuti con vantaggio degli utenti finali e anche di tutti coloro che lavorano direttamente o indirettamente per fornire prodotti o servizi.

18 Le ultime considerazioni fatte hanno implicazioni profonde per questioni importanti che esorbitano dalle sfere della tecnologia, dell'economia e della pianificazione della vita associata. Sono rilevanti per le grandi decisioni (sempre prese in condizioni di incertezza) rilevanti per la collettività. Si possono far succedere le cose giuste solo se sappiamo quali sono, se abbiamo serie intenzioni di realizzarle e se abbiamo competenza adeguata. L'arte di prevedere l'avvenire - con strumenti matematici, con scenari, con la ricerca del consenso degli esperti e degli interessati - ci interessa principalmente per raggiungere certi fini desiderabili.

Il discorso si focalizza, quindi, sulla morale e sulla politica.

Riflettendo su questi argomenti raggiungi la conclusione che i fini più desiderabili possono essere definiti solo da gruppi umani (anche molto grandi) che abbiano raggiunto un livello adeguato di conoscenza del mondo naturale e del mondo artificiale creato dall'uomo.

Ho cercato di trasmettere questo messaggio con qualche centinaio di articoli di giornale, con discorsi trasmessi alla radio e alla televisione e con parecchi libri. Dopo *IL MEDIOEVO PROSSIMO VENTURO*, nel 1974 scrissi *MANUALE PER UNA IMPROBABILE SALVEZZA*, in cui proponevo modi di produrre l'innalzamento generale del livello medio di cultura di intere popolazioni. Non trovai molto ascolto nel Club di Roma, né altrove.

Nel 1986 pubblicai *RINASCIMENTO PROSSIMO VENTURO* in cui configuravo una visione ottimistica di uso illuminato della scienza, della teoria della comunicazione, dell'informatica, dei notevoli progressi dell'ingegneria dei sistemi e degli strumenti di previsione. Questi fattori ci possono consentire di raggiungere prosperità e stabilità basate sui contributi di larghe masse di cittadini cui siano state date solide conoscenze delle opzioni loro disponibili e ampie scelte. (L'essenza della democrazia dovrebbe essere questa).

Di nuovo pochi mi hanno ascoltato. Più recentemente ho concluso che la mancanza fondamentale è quella di una morale adeguata alla complessità e alle sfide del mondo attuale

La morale antica basata sulle buone intenzioni o sull'imperativo categorico di creare modelli di buone azioni poteva funzionare bene per un mondo più semplice. Una morale adeguata al mondo complesso di oggi deve imporre, invece, di raggiungere buoni risultati e, se non sappiamo quali siano, né come raggiungerli occorre che studiamo di più. L'idea è la stessa dei miei primi libri: la motivazione è più completa. Per capire il mondo complesso di oggi e di domani suggerisco che ci si ispiri alle procedure di progettazione di squadra tipiche dell'ingegneria dei sistemi. E mi sono

accorto che questo approccio era già stato proposto e applicato dagli autori del Talmud all' inizio della nostra era.

A questi principi propongo che si aggiunga, oltre alla ispirazione alla gestione totale della qualità, anche la teoria matematica della cooperazione. Questa serve a dimostrare che per procurarci una qualità decente della vita, l' unica strada è quella di occuparci prima del benessere degli altri e poi del nostro. Una società basata su questo principio sarebbe ovviamente più gradevole per tutti. Che l' uomo sia lupo all' uomo alla lunga non conviene a nessuno.

Ho esposto queste idee in un libro del 1993 LA VIA DELLA RAGIONE. Più recentemente sono stato spinto dalle note vicissitudini della storia italiana contemporanea a estendere alla politica questo tipo di considerazioni.

Ne è risultato un libretto LA POLITICA È UN' ALTRA COSA: QUESTA, in cui ho cercato di elencare le questioni e i problemi più importanti dell' Italia di oggi e di descrivere che tipo di decisioni siano necessarie. Elenco solo gli argomenti:

- migliorare le scuole di ogni ordine e grado (controllando la qualità dell' insegnamento oltre che dell' apprendimento)
- istituire numerose scuole superiori e università di alto livello soprattutto per materie scientifiche, tecniche, informatiche
- controllare la qualità della ricerca scientifica pubblica e privata e, quindi, triplicare gli investimenti relativi
- formulare e mettere in pratica una politica industriale e una politica energetica moderne ed efficaci
- migliorare la bilancia tecnologica dei pagamenti (i punti precedenti sono prerequisiti per ottenere questo risultato)
- migliorare l' efficacia del fisco (non con mezzucci induttivi e ricavometri che prescindono dalla statistica, ma mediante controlli come quelli fatti dall' Internal Revenue Service in USA)
- razionalizzare la sanità con valutazioni della competenza di sanitari e funzionari, eliminando le figure dei medici fiscali che scrivono ricette dettate da altri
- razionalizzare le leggi con il contributo di logici, comunicatori informatici
- progettare grandi imprese internazionali (ad es.: rimodernare e rendere sicure le 100 centrali nucleari dell' Europa orientale o realizzare alcuni fra gli enormi impianti idroelettrici fattibili nel mondo)
- migliorare l' amministrazione e i servizi pubblici sfruttando informatica e reti telematiche e tagliare le spese non abolendo certi servizi, ma aumentandone efficienza e razionalità
- dividere politiche ambientali informate e supportate dal miglioramento della ricerca, invece di inseguire una gestione per catastrofi di situazioni gravi o non gravi che comunque non si capiscono bene.

Questo libretto non ha destato alcuna eco. Sulla scena politica italiana - e in gran parte della cultura italiana - si continua a parlare per astratti. Gli argomenti concreti e vitali che ho elencato sopra non vengono nemmeno menzionati e dunque non vengono affrontati. Questo immobilismo è una grave piaga del Paese: ogni previsione ragionevole porta a concludere che l'

Italia probabilmente eviterà disastri gravissimi, ma rinuncerà a quel rinascimento che si potrebbe realizzare studiando e affrontando con energia imprese concrete e vantaggiose per tutti. Intanto chi sta provando da decenni a studiare strumenti perché le previsioni diventino sempre più ragionevoli e utili, potrà solo continuare su questa strada. Solo così potrà - forse - contribuire a far circolare nozioni, procedure, idee e principi che in qualche tempo futuro potranno essere accettati da alcuni producendo sperabili benefici.