

## Capitolo K14 necessità degli algoritmi

### Contenuti delle sezioni

- a. colpevolizzazione degli algoritmi p. 2
- b. avviciniamoci agli algoritmi p. 7
- c. algoritmi e conflitti p. 11
- d. breve storia degli algoritmi p. 13
- e. definizione di algoritmo di Markov e Kleene p. 17
- f. formalizzazioni della nozione di algoritmo p. 19
- h. carrellata sui tipi degli algoritmi in uso p. 23
- i. algoritmi e politica p. 27
- j. algoritmi, leggi e giustizia p. 30

30 pagine

## K14 a. colpevolizzazione degli algoritmi

**K14 a.01** Di questi tempi si incontra spesso il termine “algoritmo”, sui giornali, nella televisione, nella radio e anche in molte conversazioni tra persone comuni che non si dedicano a rivolgersi sistematicamente a un pubblico.

Quasi tutti i discorsi che li riguardano appartengono a due generi contrapposti.

Si sentono discorsi favorevoli che illustrano alcune loro recenti vantaggiose prestazioni specifiche e ne auspicano altre di realizzazione più o meno prossima e più o meno sicura.

All’opposto, forse nella maggior parte dei casi, si esprimono giudizi sugli algoritmi con toni preoccupati, spesso drammatici, in qualche caso decisamente apocalittici, in genere con finalità polemiche o di denuncia.

Spesso questi giudizi sono formulati all’interno di dibattiti accesi o di dichiarazioni prevalentemente perentorie quando si parla di situazioni che destano preoccupazioni o paure.

Qui ci occupiamo solo dei giudizi sfavorevoli.

In molte di queste occasioni gli algoritmi vengono accusati di essere la causa di situazioni peggiorate rispetto ad analoghe del passato, oppure vengono additati come minacce per interi gruppi socio-culturali. Spesso questi peggioramenti e queste minacce assumono ampia portata, si ritiene possano coinvolgere larghi strati della popolazione; si arriva anche a denunciarli come minacce per l’intera umanità.

Bisogna aggiungere che spesso viene accusato un unico algoritmo personificato; l’**algoritmo** che viene presentato come il protagonista, poco apparente, ma convintamente imputato di danni chiaramente constatati o di situazioni disastrose previste con toni piuttosto convinti.

Questo temuto algoritmo ottiene il centro delle attenzioni nelle situazioni nelle quali emergono difficoltà che, a quanto molti sostengono, nel passato venivano affrontate con un certo successo da persone o da organizzazioni che si servivano di strumenti e tecniche che tutti potevano capire.

**K14 a.02** In genere con il passare del tempo le situazioni difficili sono cresciute in estensione, in varietà e, necessariamente, in complessità.

Questo e la crescita degli strumenti con contenuti tecnologici sofisticati e innovativi, soprattutto di natura digitale, hanno portato a introdurre procedimenti eseguiti prevalentemente da automatismi, con intervento umano ridotto, limitato a poche fasi, o addirittura assente.

Si tratta spesso di strumenti o procedimenti il cui governo è stato demandato a dispositivi automatici dotati di sensori, attuatori e autoregolatori che vengono controllati da persone solo saltuariamente.

All’interno di questi strumenti e di questi procedimenti, ovviamente, vengono prese delle decisioni da algoritmi con poteri rilevanti.

In genere le prestazioni di questi dispositivi offrono dei vantaggi che si manifestano subito con una certa evidenza e questo induce a insistere in questa direzione degli automatismi.

Questa automatizzazione si è sviluppata ampiamente negli ambienti produttivi industriali, che la chiamano automazione, e in genere si sono preoccupati di monitorare e regolare attentamente le loro conseguenze, almeno le dirette.

Si può parlare di automatizzazione anche per strumenti e procedimenti che riguardano problemi che toccano più o meno direttamente le persone e che hanno conseguenze di rilievo sul piano sociale.

Gli esempi, come vedremo, sono tanti.

I dispositivi automatizzati più evidenti coinvolgono direttamente le persone e passano soprattutto attraverso i social media e il telefono cellulare.

Gran parte di questi riguardano offerte di servizi e beni di consumo e sono collegati a interessi economici rilevanti; molti riprendono attività diffuse da tempo, ma la possibilità di servirsi di tecnologie recenti consente azioni molto più vaste e incisive rese possibili da algoritmi che non possono che essere notevolmente complessi.

Altri procedimenti pesantemente automatizzati che toccano un pubblico si svolgono in infrastrutture distribuite non direttamente percepibili dalle persone, ma che hanno forti conseguenze che in genere risultano evidenti solo quando sono stati attivi per mesi o anni.

Tipici sono i procedimenti che si basano sulla conoscenza dei desideri delle persone per influenzare loro scelte successive riguardanti acquisti, comportamenti sociali e anche formazioni di opinioni di lunga durata.

In questi scenari possono emergere molti tipi di effetti indesiderati che si rivelano portatori di danni per molte persone comuni; questi danni in parte si manifestano rapidamente, ma in una parte più preoccupante hanno effetti di medio-lungo termine e sono più difficili da individuare e da valutare.

Sono tipicamente questi i casi nei quali viene messo sotto accusa quello che viene chiamato “l’algoritmo”.

**K14 a.03** Chi che ha avuto a che fare con algoritmi da tempo (a me è capitato dai tempi dei primi successi dei Beatles) davanti a molte di queste accuse storca il naso e sente il bisogno di opporsi.

La cosa non è facile.

Si tratta in parte di sostenere le recenti tecnologie e questo è reso difficile dal fatto che molte recenti iniziative basate su tecnologie innovative hanno risvolti fallimentari.

Sarebbe necessario trovare l’appoggio delle persone comuni risulta, cosa decisamente difficile, stante la loro poca propensione a interessarsi a meccanismi interni delle attività scientifico-tecnologiche (propensione particolarmente flebile tra gli italiani).

In particolare si osserva la impopolarità verso iniziative con risultati non immediati e non immediatamente percepibili (anche in quelle rivolte alla sanità), viste in quanto richiedono investimenti che vengono tolti a produzioni con risultati ampiamente piacevoli, facilmente immaginabili e attesi in tempi brevi.

**K14 a.04** Come fare?

Una prima strada che si può tentare è quella del contrasto polemico.

Si dovrebbe insistere nell’evidenziare che non esiste un unico algoritmo che si può additare per fare da capro espiatorio.

La varietà degli algoritmi che ci aiutano o condizionano è vastissima; dovrebbe essere messa in buona evidenza e sarebbe opportuno aggiornarla accuratamente.

Si va dagli algoritmi che si possono riconoscere negli strumenti e nelle pratiche più usuali: nelle lavatrici, nei telefonini, nei pagamenti in linea, nelle automobili (ma soprattutto nelle più costose), che fanno da nostri avversari nei videogiochi, ... .

Altri algoritmi si possono riconoscere nelle attività della produzione e della distribuzione: fabbriche robotizzate, percorsi scelti da procedure che tengono conto di tutte le strade percorribili e delle valutazioni del loro intasamento del momento, prodotti ordinati e consegnati da fattorini seguendo le decisioni di automatismi, ... .

Algoritmi con raggi di azione più remoti, ma in grado di influire sulla vita di molti: sistemi di attacco e difesa di elevata efficacia (essenzialmente distruttiva), sistemi per la chirurgia a distanza, robot spaziali che costituiscono la maggioranza degli odierni esploratori, ... .

Oltre a mettere in evidenza la varietà degli algoritmi e quindi la totale impossibilità di abolirli, va segnalato che si stanno espandendo per due principali motivi.

Molto spesso hanno una indubbia efficacia locale: consentono di affrontare con successo problemi circoscritti che portano vantaggi ben delimitati (per ora non ci occupiamo dei possibili danni collaterali). Sono spinti da una forza che finora risulta inarrestabile: il desiderio di molti umani di ricercare e sperimentare nuove strade, nuove soluzioni di problemi vecchi e nuovi, superare limiti. Anche senza preoccuparsi troppo, o in misura sufficiente, dei possibili svantaggi secondari, dei guai nei quali ci possono portare o dei pericoli che si possono generare.

**K14 a.05** si prevede la crescente ubiquità degli algoritmi.

Quindi sarebbe rischioso non occuparsene.

E occorre farlo seriamente.

Conviene investire nella consapevolezza intorno agli algoritmi e a dove ci possono portare.

Conviene anche non nascondere la testa sotto la sabbia di fronte a previsioni tetre e può risultare utile presentare pubblicamente minacce del peggio.

Noi praticanti degli algoritmi siamo convinti che siano importanti, molto importanti, e da molti punti di vista; che siano in grado di influire su tante attività, su tanti atteggiamenti, perfino sulla storia (ma su questo non conviene anticipare conclusioni).

**K14 a.06** Sicuramente non può stupire che si nominino tanto gli algoritmi.

Occorre osservare che le tante citazioni degli algoritmi sono tutt'altro che omogenee: molte sono in disaccordo tra di loro, anche in palese conflitto.

Sarebbe preferibile esaminare i giudizi che coinvolgono il termine "algoritmi", cominciando con l'osservare che a questo sostantivo plurale vengono attribuiti significati alquanto diversi.

Inoltre molti di questi giudizi appaiono in contrasto con vari fatti, con gli studi che li riguardano e, viste alcune delle conclusioni di molte accuse agli algoritmi, mi sembrano in conflitto anche con il comune buon senso.

**K14 a.07** Giudizi criticabili sugli algoritmi si continuano ad incontrare sui media più frequentati; forse, vista la crescita di strumenti e di interi sistemi di portata vastissima dei quali la "gente" sa ben poco, è quasi inevitabile che si manifestino reazioni molto preoccupate ma anche poco informate, cosa comprensibile per l'affollarsi delle novità che le riguardano e che li accompagnano.

Sicuramente si dovrebbe correggere una stortura. Si dovrebbe rendere ben chiara la distinzione tra le possibilità offerte dagli algoritmi per affrontare problemi la cui soluzione sarebbe vantaggiosa per tutti (cercando di non esagerare si dovrebbe parlare di soluzione evidentemente vantaggiosa per ampie fasce della popolazione) e l'impiego di algoritmi per ottenere grossi vantaggi per i non molti che riescono a cavalcarli, spesso a spese dei tanti che ne vengono svantaggiati, in genere poco attenti all'evoluzione delle tecnologie distratti e in gran parte socialmente deboli.

**K14 a.08** Cercare l'appoggio delle persone comuni risulta decisamente difficile, stante la loro poca propensione a interessarsi a meccanismi interni degli eventi scientifico-tecnologici (propensione che risulta particolarmente flebile tra gli italiani).

Come fare?

Una prima strada che si può tentare è quella del contrasto polemico.

Noi praticanti degli algoritmi siamo convinti che siano importanti, molto importanti, e da molti punti di vista; che siano in grado di influire su tante attività, su tanti atteggiamenti, perfino sulla storia (ma su questo non conviene anticipare conclusioni).

Sicuramente non può stupire che si nominino tanto gli algoritmi.

Occorre osservare che le tante citazioni degli algoritmi sono tutt'altro che omogenee: molte sono in disaccordo tra di loro, anche in palese conflitto.

Sarebbe preferibile esaminare i giudizi che coinvolgono il termine “algoritmi”, cominciando con l'osservare che a questo sostantivo plurale vengono attribuiti significati alquanto diversi.

Inoltre molti di questi giudizi appaiono in contrasto con vari fatti, con gli studi che li riguardano e, a mio parere, viste alcune delle conclusioni di molte accuse agli algoritmi, conclusioni in conflitto anche con il comune buon senso.

#### **K14 a.09**

Giudizi criticabili sugli algoritmi si continuano ad incontrare sui media più frequentati; forse, vista la crescita di strumenti e di interi sistemi di portata vastissima dei quali la “gente” sa ben poco, è quasi inevitabile che si manifestino reazioni molto preoccupate e poco informate.

Sicuramente si dovrebbe correggere una stortura. Si dovrebbe rendere ben chiara la distinzione tra le possibilità offerte dagli algoritmi per affrontare problemi la cui soluzione sarebbe vantaggiosa per tutti (cercando di non esagerare si dovrebbe parlare di soluzione evidentemente vantaggiosa per ampie fasce della popolazione) e l'impiego di algoritmi per ottenere vantaggi per pochi accorti a spese di svantaggi per molti, in genere distratti e in molti casi socialmente deboli.

**K14 a.10** Sarebbe importante chiarire che la nozione di algoritmo va collegata alla capacità di risolvere problemi, non solo in modo episodico con accorgimenti consentiti dalle circostanze, forse fortuiti, ma in modo più sistematico, con maggiormente consapevolezza e soprattutto con la possibilità di condividere gli accorgimenti da adottare e di far evolvere le tecniche.

Andrebbe chiarito che queste caratteristiche accennate rendono interessante esaminare la nozione di algoritmo in una prospettiva più ampia di quella, peraltro cruciale degli algoritmi resi operativi e talora invasivi con il supporto delle tecnologie odierne e abbastanza anticipabili.

Si dovrebbero segnalare tanti generi di algoritmi non necessariamente eseguiti da parte di automatismi sofisticati e da sistemi tecnologici facenti parte di reti di ampia portata.

Gli algoritmi sono emersi anche in epoche remote e dovrebbero essere presi in considerazione anche secondo prospettive storiche: insieme a tutta la schiera delle tecniche e delle tecnologie hanno contribuito alla determinazione di vere svolte storiche, anche se la loro influenza è stata in genere sminuita o cancellata dalla impressione destata da molteplici massacri campali, dalle verità imposte dai vincitori e dalle narrazioni fantasiose ed esagerate .

Parlare con una certa completezza degli algoritmi si presenta come impresa tutt'altro che facile. Dovrei saperne di più su tanti argomenti e essere in grado presentare in modo attraente situazioni e meccanismi piuttosto impegnativi.

**K14 a.11** A questo punto mi è venuta voglia di dire la mia.

Per questo credo che dovrei assumere alcune posizioni in contrasto con idee correnti che sembrano incontrare molte adesioni.

Ad esempio in tanti parlano di infinito, ma a mio parere molto spesso senza rendersi conto di cosa significhi questo participio passato.

E quello che vorrei dire temo possa suscitare accuse di lesa maestà, nella fattispecie di lesa Leopardi. La cosa non si prospetta per niente semplice.

Però a ripensarci sopra un tema rilevante come gli algoritmi prevalgono pareri che trascurano tanti fatti rilevanti e risultano sconclusionati. Qualche tentativo di chiarimento potrebbe forse servire. Almeno si può cercare di sollevare dubbi su accuse agli algoritmi che hanno portato a non pochi pregiudizi consolidati.

Naturalmente quando si istillano dubbi su stereotipi diffusi sono da preventivare reazioni aspre e indignate, polemiche.

Dunque intervenire o non intervenire: questo è il dilemma.

I problemi che ci troviamo davanti collegati ai cambiamenti climatici, ai regimi con scarsa attenzione ai diritti dei cittadini, alla difficoltà di adattarsi nei confronti dei cambiamenti che si accavallano e il ruolo che le attività algoritmiche hanno la possibilità di svolgere fa decidere per l'intervenire.

## K14 b. avviciniamoci agli algoritmi

**K14 b.01** La nozione di algoritmo non è semplice di per sé e per le sue ampie possibilità di manifestarsi viene affrontata con motivazioni molto diversificate e secondo molteplici punti di vista.

Qui la affrontiamo in fasi successive cominciando con semplici definizioni orientative fornite da dizionari che però in seguito dovremo sia ampliare che approfondire.

dal dizionario De Agostini (2004), ex UTET, ex Garzanti

algoritmo: procedimento matematico di calcolo; in logica matematica: procedimento meccanico che permette la risoluzione di problemi mediante un numero finito di passi; in informatica: serie di operazioni logiche e algebriche espresse in un linguaggio comprensibile dall'elaboratore, la cui sequenza costituisce un programma.

dal dizionario Treccani

qualunque schema o procedimento matematico di calcolo; un procedimento di calcolo esplicito e descrivibile con un numero finito di regole che conduce al risultato dopo un numero finito di operazioni, cioè di applicazioni delle regole

Dal dizionario Merriam Webster. algorithm: a procedure for solving a mathematical problem (as of finding the greatest common divisor) in a finite number of steps that frequently involves repetition of an operation broadly : a step-by-step procedure for solving a problem or accomplishing some end

algoritmo : una procedura per risolvere un problema matematico (ad esempio per trovare il massimo comun divisore di interi positivi) in un numero finito di passi che frequentemente richiede la ripetizione di una operazione; più estesamente: una procedura passo-passo per risolvere un problema o per conseguire un certo scopo.

**K14 b.02** Occorre dire che sulla nozione di algoritmo, sebbene sia stata ampiamente discussa da un centinaio di anni, non vi è unanimità e la sua definizione è tuttora argomento di dibattiti che si svolgono in vari tipi di ambienti.

Diamo ora una definizione molto comprensiva, che aspira ad essere molto generale, che purtroppo che presenta vari elementi piuttosto vaghi e che non può pretendere di essere definitiva.

Successivamente presenteremo varie precisazioni e varie distinzioni volte a rendere la nozione adattabile con proficua e realisticamente ai vari campi nei quali può risultare utile, cercando innanzi tutto di renderla più chiara e rendere più facile come ed entro limiti può essere utile nei vari contesti.

Per essere attenti alle applicazioni ci basiamo su una analisi delle attività che devono essere sviluppate per formare conoscenze che possano essere utilizzabili con affidabilità.

Questa analisi cerca di essere accurata, realistica e generale in modo da poter soddisfare i molti punti di vista che vengono assunti per servirsi delle questioni in esame.

**K14 b.03** Cominciamo allargando l'orizzonte con uno scenario al quale si può applicarsi la nozione di problema, altra nozione molto vasta e declinabile in molti modi.

Chiamiamo istanza di problema una specifica situazione nella quale ci si può trovare.

Abbiamo un sistema  $S_i$  (materiale, simbolica o mentale) che si può modificare, ossia si può presentare in diverse configurazioni che possono essere oggetto di osservazioni.

su ciascuna delle quali si possono ottenere determinate informazioni.

Abbiamo poi un agente  $A$  interessato ad osservare e a controllare in qualche modo la  $S_i$  attraverso la conoscenza di alcuni parametri che consentono di determinare una configurazione nella quale il sistema si può venire a trovare.

In un certo momento  $A$  conosce solo in parte  $S_i$  attraverso un insieme di informazioni  $D$  e che sente la necessità di conoscere meglio; questo è dovuto a qualche sua motivazione piuttosto importante, ad esempio per la necessità di poterla controllare meglio.

Per conoscere meglio  $S_i$  l'interessato dispone di un insieme di operazioni che si possono applicare ai parametri che caratterizzano le configurazioni che  $S_i$  può assumere e in particolare ai dati  $D$  attualmente in suo possesso; le operazioni consentono ad  $A$  di cercare di ricavare da  $D$  i nuovi dati  $R$  che ritiene gli consentiranno il migliore controllo del sistema.

In questo specifico contesto per algoritmo si intende un complesso di regole in grado di determinare una sequenza di operazioni che possono essere eseguite sui dati disponibili e sui dati forniti da operazioni precedentemente effettuate e che permettono di ottenere le nuove informazioni  $R$  che  $A$  richiede.

Ci troviamo quindi di fronte a una sequenza esecutiva costituita da passi successivi in ciascuno dei quali viene eseguita una operazione e che nel suo complesso consente di ricavare dai dati  $D$  le informazioni  $R$  che vengono chiamati risultati i quali costituiscono la soluzione della istanza di problema particolare determinata dai dati  $D$ .

**K14 b.04** Abbiamo visto un processo che porta un vantaggio ben definito all'agente che si deve supporre in grado di controllare direttamente o indirettamente le operazioni e la sequenza esecutiva.

Questo processo può essere presentato in altri modi sostanzialmente equivalenti che costituiscono metafore che possono essere efficaci per coloro che in qualche modo sono interessati a processi analoghi.

Il processo può essere presentato come percorso risolutivo che inizia da una configurazione iniziale determinata dai dati di partenza, tocca successive configurazioni caratterizzate dai successivi arricchimenti dei dati disponibili e si conclude in una configurazione finale nella quale si sono ottenuti tutti i dati che consentono un soddisfacente controllo della situazione ottenuta.

**K14 b.05** È naturale cercare di rendere la nozione di algoritmo in senso lato applicabile al maggior numero di problemi.

Questo richiede di precisare molti elementi introdotti in precedenza per ciascuno dei diversi campi applicativi.

Accade che questo comporta notevoli differenziazioni e anche polemiche su cosa si deve intendere precisamente per algoritmo.

Qui cerchiamo di tenere la nozione di algoritmo aperta e adattabile, anche al prezzo di dover trattare più tipi di algoritmi che possono avere poco in comune.

Chiamiamo risolvere ciascuna delle situazioni che si possono attribuire a un problema circoscritto trasformando un insieme di dati in un insieme di informazioni che soddisfano determinati requisiti che si possono ricondurre al raggiungimento di una meta.

Le informazioni che una esecuzione retta da un algoritmo forniscono a partire da un insieme di dati le chiamiamo insieme dei risultati.

Dal punto di vista di chi deve affrontare un problema si pone alla applicazione dell'algoritmo della corrispondente particolare esecuzione dell'algoritmo e le possiamo considerare una soluzione del problema al quale si rivolge l'algoritmo.

**K14 b.06** Prima di esaminare tutti gli elementi che compaiono in questa definizione, vediamo alcuni esempi di algoritmo trovati nell'aritmetica insegnata nelle scuole elementari.

Le regole da seguire per effettuare una somma, una differenza e un prodotto di due numeri interi positivi sono i primi algoritmi che abbiamo incontrato da bambini.

I dati sono le scritture decimali dei due operandi, i risultati si riducono alla notazione decimale di un intero.

Un algoritmo un pò più complicato conduce al quoziente e al resto della divisione tra due interi positivi.

Per prima cosa dobbiamo precisare le notazioni decimali.

Spesso serve contare gli oggetti, tangibili o meno, che si trovano in una scatola o in un barattolo e che per questo si possono considerare gli elementi di un insieme. Spesso serve anche stabilire quanto sono lunghe certe sequenze di oggetti, ad esempio quanti sono i versi di una poesia o quanti sono i giorni che abbiamo trascorsi al mare questa estate.

Il modo più semplice per rappresentare queste quantità consiste nel far corrispondere a ogni oggetto in una scatola o a ogni giorno di una sequenza di date evidenziate sul calendario un semplice segno e di allineare questi segni su un foglio di carta.

Si tratta di un modo per registrare le numerosità degli insiemi finiti o i numeri dei componenti delle liste ben comprensibile ma piuttosto primitivo; simile a quello usato dalla preistoria per tracciare tacche su un bastone per ricordare quanti giorni sono passati dalla luna nuova o quanti pesci si sono pescati.

Con queste registrazioni si possono anche ottenere facilmente somme, differenze, prodotti e anche divisioni con il dovuto resto.

Inoltre si possono anche associare le numerosità e le lunghezze di sequenze discrete all'ordinamento che consente di stabilire quale insieme è più numeroso o quale elenco presenta più componenti.

È evidente quanta importanza possano avere questi tipi di conclusioni all'interno di una tribù di cacciatori-raccoglitori.

Questo modo di contare, semplice ed essenziale, diventa però poco pratico quando si devono trattare insiemi molto grandi ed elenchi molto lunghi, come si è capito quando è nata l'agricoltura, si sono formate le prime città, si sono intrapresi viaggi più lunghi, si sono dovute gestire scorte alimentari massicce, si sono cominciati a scambiare rilevanti quantità di monete.

Si sono resi necessari nuovi sistemi di rappresentazione dei numeri interi positivi e anche di quantità frazionarie e quant'altro.

**K14 b.07** Si sono ideati molti sistemi di numerazione, prevalentemente decimali a causa dei vantaggi forniti dalla possibilità di servirsi delle dieci dita delle mani, ma per secoli non si sono avuti soddisfacenti procedimenti per i calcoli aritmetici.

Procedimenti soddisfacenti si sono avuti solo con le notazioni decimali degli indiani intorno al VI secolo, adottati poi dagli arabi e dal 1200 circa dagli europei. Solo a questo punto si sono imposti gli algoritmi delle operazioni aritmetici ancora prevalentemente adottati.

Accanto alle notazioni decimali vengono adottate le notazioni binarie, quelle naturali per i controlli quantitativi delle operazioni che si servono dei dispositivi elettronici digitali e dei sistemi informatici e telematici.

In parallelo ai sistemi di numerazione si sono sviluppati i procedimenti per la definizione delle grandezze fisiche e lo sviluppo delle elaborazioni che le riguardano, ma solo alla fine del 1700 ha cominciato a imporsi il sistema metrico decimale e la standardizzazione delle attività metrologiche che tuttora fa capo al *Système International*, quadro in continua evoluzione a causa della necessità di seguire e indirizzare gli avanzamenti scientifici e l'evoluzione della tecnologia delle misurazioni.

**K14 b.08** I procedimenti per le operazioni aritmetiche e in particolare il meccanismo del riporto per la somma si sono chiariti anche in relazione alla costruzione delle prime macchine calcolatrici meccaniche, seguite dalle elettromeccaniche e dalle elettroniche.

Un progresso fondamentale si è realizzato precisando algoritmi che in linea di principio possono funzionare per gamme illimitata di istanze: questi hanno portato alla realizzazione di strumenti di calcolo riutilizzabili e ha dato il via alla crescita dei sistemi per l'elaborazione automatica diffusa e pervasiva, fenomeno di importanza storica.

Questo è venuto dopo la esperienza dell'algoritmo per il prodotto di due interi, procedimento che richiede di scorrere due sequenze di cifre decimali e quindi di effettuare scelte che portano a diramazioni riguardanti sequenze di passi esecutivi.

Le diramazioni condizionate delle sequenze di istruzioni governate da scelte elementari ha consentito di compattare le istruzioni di un algoritmo in modo da avere un meccanismo limitato in grado di trattare un insieme molto grande, in linea di principio "illimitato" di istanze.

I tentativi di meccanizzazione dei calcoli e di elaborazioni più ambiziose all'inizio interessavano solo le élites intellettuali (Shickard, Kepler, Pascal, Leibniz, ...). Solo nel 1800 con i progressi della meccanica di precisione (con Thomas de Colmar), innescata dalla rivoluzione industriale, si è avviata una produzione in serie delle calcolatrici meccaniche e hanno cominciato a diffondersi il calcolo automatico e l'interesse pratico per gli algoritmi.

L'algoritmo è eseguibile da addetti meticolosi e implementabile mediante meccanismi.

Gli algoritmi hanno spinto a progressi culturali.

Dal meccanico all'elettromeccanico all'elettronico.

Si sono ottenuti risultati che possono essere utilizzati per soddisfare varie esigenze.

La storia appena raccontata fa pensare che gli algoritmi contribuiscano alla condivisione, ai vantaggi delle produzioni in serie, alle opportunità delle attività comuni, al progredire delle conoscenze condivise.

## K14 c. algoritmi e conflitti

**K14 c.01** La visione esclusivamente positiva degli algoritmi che si può ricavare dai discorsi precedenti, si trova in contrasto con le molte situazioni negative che si riscontrano in tutti i contesti nei quali gli algoritmi e le procedure automatiche hanno ruoli importanti.

Si deve quindi sottoporre a una attenta critica e in particolare con la individuazione dei suoi limiti.

Credo convenga partire dalla constatazione che problemi preoccupanti devono essere affrontati da tutti gli organismi viventi e che le esigenze che muovono due organismi possono trovarsi in conflitto, anche molto grave.

Queste esigenze possono essere molto forti e a grandi linee si possono ricondurre a 4 filoni; metabolismo, necessità di riparazione, esigenza di riproduzione e tendenza all'autogratificazione. Nello sfondo inoltre si colloca l'istinto di sopravvivenza accompagnato da paure, limitata capacità di percezione e valutazione e tendenza a reazioni istintive.

Limitandoci a soli umani si osserva che essi hanno continuamente dovuto sfamarsi, e da questa esigenza è derivata la rivoluzione dell'agricoltura con le sue profonde conseguenze: ampliamento delle comunità, differenziazione delle attività gerarchizzazione dei ruoli, regolazione delle acque (risaie, canali, sifoni, chiuse, magistrati delle acque), esigenza di scambi di merci e di denaro, nascita dei commerci e dei traffici.

I conflitti tra tribù per la spartizione delle poche risorse disponibili sono cresciuti trasformandosi in guerre tra popolazioni, con le conseguenti necessità militari di armi, di addestramento, di gerarchie e di spirito civico-patriottico e con le successive inevitabili distruzioni, massacri, razzie e adozione della schiavitù.

**K14 c.02** In relazione ai conflitti si possono meglio comprendere la formazione di città stato, signorie, regni e imperi con la conseguente nascita di corporazioni, di burocrazie, di apparati e di caste. All'opposto si sono avute le dissoluzioni di organismi politici rivelatisi troppo estesi e soggetti a movimenti centrifughi.

I cambiamenti dettati da conflitti si sono alternati e intrecciati fenomeni evolutivi spinti da esigenze di genere collaborativo promotrici di cooperazioni, di scambi commerciali, di alleanze e di cooperazioni; le due tendenze al conflitto e alla collaborazione molto spesso si sono mescolate o hanno subito la tendenza a virare l'una nell'altra.

Sono emerse varie situazioni ambivalenti; a fianco delle attività commerciali in relazione a regolamenti da parte dei governi locali, si è avuta l'adozione di barriere doganali, dazi ed esclusive e per contro si sono sviluppate varie forme di contrabbando e di brigantaggio; si sono spesso mescolate le attività di trasporto di beni materiali e attività di pirateria con non pochi attori che usavano passare da un ruolo al suo opposto per rapido adeguamento al mutare delle circostanze.

Questi fenomeni sono cresciuti soprattutto con l'espandersi della navigazione in relazione alle esigenze di trasporto di merci (pescato, sale, derrate alimentari, spezie, profumi e oggetti di lusso), motivata dal reagire da condizioni di svantaggio e isolamento di territori (Amalfi, Venezia, Dubrovnik, coste norvegesi, isole RyuKyu).

E la navigazione veniva praticata anche sapendo di affrontare gravissimi rischi; e spesso la sopravvivenza ai rischi del mare e delle terre lontane ha portato a tendenze di genere egoistico (feroci monopoli commerciali, rapine, tratta degli schiavi, ...).

**K14 c.03** I commerci, talora imposti da severe necessità, talora fonti di vistosi arricchimenti, hanno portato ad apertura di nuove rotte, ad esplorazioni, alla espansione delle conoscenze, alla diffusione delle idee (in particolare di quelle religiose), all'ampliamento talora rivoluzionario delle colture agricole, al miglioramento imitativo delle abitudini e degli attrezzi, all'evoluzione per ibridazione di molte tecniche. Nel corso dei secoli hanno continuato a trasformarsi e a mescolarsi le numerose motivazioni dei conflitti e hanno continuato a riemergere e a rinnovarsi le conflittualità, ma tutto questo ha anche contribuito al formarsi di molte culture più aperte delle precedenti che in tante sedi ci hanno lasciato capolavori talora in grado di modificare visioni collettive.

**K14 c.04** I problemi più o meno circoscritti, fino alle ampie problematiche alla base di intere discipline, sono spesso determinanti per svolte culturali che possono assumere il ruolo di rivoluzioni. È quindi necessario esaminarli a fondo e cercare di impostarli e risolverli in modo affidabile e cercando di essere sistematici.

**K14 c.05** Un aspetto molto rilevante dello svolgersi della storia è costituito dal formarsi dei grandi organismi umani e anche dei grandi organismi animali e vegetali.

Abbiamo quindi organismi politici ufficiali (stati, confederazioni, unioni), organizzazioni mondiali (ONU, FAO, OMS), associazioni culturali, scientifiche, professionali oggi di portata globale, compagnie industriali e commerciali multinazionali.

Nell'ambito vegetale e animale troviamo gli alveari, i formicai, i termitai le barriere coralline le reti boschive (Wide Wood Web).

Tutti questi ambiti costituiscono sfondi ben precisi di conflitti tra entità simili e tra specie viventi diverse.

Si sono tuttavia riscontrati molte simbiosi e numerose cooperazione: ricordiamo in particolare i processi di impollinazione.

Da tutto questo universo di conflitti e di rappacificazioni e cooperazione discende la varietà dei problemi che si pongono per gli esseri viventi e la necessità di sviluppare meccanismi di difesa efficienti e che possano durare e trasmettersi nel succedersi delle generazioni.

Conflitti e sviluppo di meccanismi di riparazione portano allo sviluppo di una grande varietà di meccanismi di difesa.

Tutto questo plasma gli sviluppi evolutivi nella varietà che oggi possiamo osservare su buona parte della superficie del pianeta e possiamo cominciare a intravedere anche nel resto dell'universo da noi percepibile.

Nell'ambito della storia evolutiva hanno grande importanza (e fascino) gli sviluppi delle culture con i loro scambi, i mutui arricchimenti, che si oppongono ai conflitti distruttivi e autodistruttivi (Rapa Nui).

Va tuttavia tenuto presente che i maggiori conflitti si manifestano tra specie animali e vegetali e in particolare tra insetti e tra microorganismi come funghi e batteri.

## K14 d. breve storia degli algoritmi

**K14 d.01** Si parla di algoritmi nell'ambito della matematica e dell'informatica teorica, due settori disciplinari con forti connessioni che, a mio parere, non dovrebbero essere oggetto di separazioni innaturali che sono comprensibili solo in relazione ai conflitti riguardanti poteri accademici.

Gli algoritmi sono diventati argomenti da prima pagina da non molti anni; in precedenza se ne parlava poco, ma si tratta di strumenti che derivano una grande varietà di esigenze che si sono manifestate presso tutti i popoli.

Anche nel passato sono stati affrontati in molti ambienti e con impegno, hanno conseguito importanti risultati e hanno costituito solide tradizioni.

Il termine deriva da al Kwaritzmi, un sapiente del IX secolo, nato nella regione dell'Asia centrale da noi nota come Corasmia e autore di un best seller medioevale riguardante le procedure da seguire per risolvere problemi quantitativi servendosi delle notazioni numeriche decimali indo-arabe.

Ma si trovano algoritmi in epoche più antiche.

Le prime registrazioni di algoritmi riguardano procedure passo-passo finalizzate alla soluzione di problemi numerici e sono strettamente collegati alle stesse radici della matematica.

Si trovano nella civiltà mesopotamica a partire dal 2500 aC circa, nell'antico Egitto dal 1550 aC circa, nella matematica indiana dall'800 aC in poi, nel sistema divinatorio IFA del popolo nigeriano Yaruba (500 aC ca.), nel mondo greco-ellenistico intorno al 300 aC e nella civiltà cinese dal 200 aC.

Il primo documento è una tavoletta d'argilla sumera che descrive un algoritmo per la divisione numerica, mentre tra 1800 e 1600 aC sono state prodotte tavole cuneiformi che descrivono procedure per il calcolo di vari formule con particolare attenzione a quelle che consentivano la previsione di eclissi e di altri eventi astronomici notevoli.

Algoritmi per calcoli aritmetici si trovano in documenti egizi, a partire dall'importante Papiro di Rhind (Rhind è l'antiquario, l'autore lo scriba Ahmes).

Nel mondo greco ellenistico si incontrano il crivello di Eratostene (descritto da Nicomaco di Gerasa) per la individuazione dei numeri primi, l'algoritmo di Euclide per il calcolo del massimo comun divisore di due interi; in questo ambiente culturale di procedimenti vengono date chiare dimostrazioni nell'ambito di ampie trattazioni sistematiche, ad esempio negli Elementi di Euclide. inoltre la geometria greca si preoccupava di costruzioni con riga e compasso, attività mentali richieste da esigenze concrete come le costruzioni architettoniche.

Ma forse questa è la sensazione dei posteri che possono ammirare ancora grandiosi monumenti che hanno esercitato grande influenza, come volevano i potenti committenti come i faraoni e gli imperatori mesopotamici. assiri.

Il primo documento della matematica indiana è il cosiddetto manoscritto di Bakhshali (località dell'attuale Pakistan), probabilmente scritto intorno al 940 aC su almeno 70 fogli di scorza di betulla; tratta di vari problemi esposti in versi e con le soluzioni esposte in prosa, come in molte altre opere indiane. intorno

Esempi di matematica indiana antica sono gli Shulba Sutra, la Scuola del Kerala e il Brahmasphu?asiddhanta.[17]

**K14 d.02** Molto probabilmente molte altre attività algoritmiche del passato non ci sono pervenute.

È ragionevole supporre che molte tecniche algoritmiche abbiano aiutato il lavoro dei mercanti dell'antichità: i mercanti del Mediterraneo, i Nabatei, i carovanieri che percorrevano le Vie della seta, i naviganti tra Egitto, Mar Rosso, coste indiane, stretti indonesiani e mari cinesi.

Non stupisce la mancata conoscenza dei metodi utilizzati dell'astronomia dei Maya, sviluppata in un continente allora ignoto alle culture di Europa e Asia e successivamente ignorata da colonizzatori incapaci di concepire le potenzialità di popoli considerati solo selvaggi.

Occorre inoltre osservare che molti procedimenti di calcolo sono stati tenuti segreti nel passato (come attualmente fanno spesso le grandi industrie) e questo prelude all'oblio di tante conoscenze.

**K14 d.03** Fondamentale progresso per i calcoli è stato lo sviluppo del sistema decimale posizionale da parte dei matematici indiani tra primo e quarto secolo, saggiamente ripreso dal mondo arabo nel IX secolo e riprese dagli europei nel XII secolo, a partire dai mercanti che solcavano il Mediterraneo (come Bonaccio, il padre di Leonardo Pisano, il Fibonacci), grazie alle loro conoscenze delle tecniche della navigazione.

Il primo algoritmo crittografico per la decifrazione di codici criptati fu sviluppato da Al-Kindi, il filosofo e matematico arabo del IX secolo, autore di un testo sulla decifrazione dei messaggi crittografati che fornì il primo algoritmo di decifrazione dei codici basato sulla analisi delle parole usate nella lingua di un messaggio (e anche la prima applicazione dei metodi statistici).

Gli algoritmi si trovano al centro delle contese tra gli algebristi rinascimentali italiani (Tartaglia, Cardano, Ferrari, Bombelli).

Questi progressi che hanno avuta una notevole conseguenza culturale, in quanto hanno dimostrato agli studiosi del loro tempo la possibilità di andare oltre i risultati degli antichi classici.

Questo ha contribuito notevolmente allo sviluppo delle attività scientifiche in Europa a partire dal secolo XVI (Galileo, Huygens, Cartesio, Fermat, Pascal, ...), naturalmente anche grazie alla diffusione della stampa.

Va ricordato che in un ambiente come la scuola di Kerala, indiana, ha sviluppato lo studio delle serie che servivano a calcoli astronomici secoli prima della nascita del calcolo infinitesimale con Newton e Leibniz (e i Bernoulli, Eulero, ...), ma non ha fatto uscire dal suo ambiente le relative idee che di conseguenza si sono andate esaurendo.

**K14 d.04** Alcuni storici attribuiscono grande importanza all'invenzione dell'orologio a pesi considerandolo l'invenzione chiave dell'Europa nel Medioevo; in particolare il meccanismo di scappamento a che produce il ticchettio degli orologi meccanici.

La "macchina automatica accurata" [27] ha portato rapidamente agli "automi meccanici", già nel XIII secolo.

Nel XII secolo ha portato a quelle che possiamo chiamare "macchine computazionali". Sono state realizzate le prime calcolatrici meccaniche alle quali hanno contribuito personalità come Schickard, Pascal e Leibniz.

Inizialmente queste macchine erano pezzi unici rivolti prevalentemente all'intrattenimento degli aristocratici e solo nell'800, con la mentalità indotta dalla rivoluzione industriale e con i progressi della meccanica sono diventati prodotti costruiti in numeri ragguardevoli e quindi diffuse piuttosto ampiamente e accolti entusiasticamente dalla borghesia imprenditrice capace di vedere i loro vantaggi.

Non va dimenticato Jacquard con i suoi nastri perforati e la sua lodevole generosità nel renderli ampiamente accessibili.

**K14 d.05** Dopo l'invenzione del regolo a scorrimento da parte di Oughtred sono stati Napier e gli inglesi con Briggs che hanno introdotto la tecnica dei logaritmi e le relative tavole, strumenti che hanno consentito di ridurre il faticoso calcolo dei prodotti numerici alle più abbordabili somme con la perdita

delle ultime cifre significative, del tutto inutili nella pratica, come molti elementi del perfezionismo pedante, sempre in agguato.

Importanti per la navigazione, sostenuta finanziariamente dai commerci internazionali, e per l'astronomia, opportunamente sostenuta finanziariamente dall'astrologia che per qualche secolo ha indotto alcuni potenti lungimiranti (Pietro e Caterina in Russia, Federico in Prussia) a fornire supporto mecenatesco alle scienze esatte.

Va segnalata che oggi si hanno situazioni analoghe nell'adesione di rock stars e di altre figure note al pubblico alle iniziative di beneficenza che hanno ampia visibilità).

**K14 d.06** Arriviamo nell'800 che vede il crescere delle esigenze, l'eroico sforzo pionieristico di Charles Babbage con la costruzione della macchina differenziale e il progetto della macchina analitica, realizzato solo intorno al 1890.

Questo viene considerato il primo dispositivo che si può considerare un vero e proprio computer (completo secondo Turing) e ha consentito di ampliare la portata degli algoritmi ben oltre a quanto consentono le semplici calcolatrici. La sua assistente Ada Lovelace intorno al 1850 ha progettato il primo algoritmo implementabile; serviva al calcolo dei numeri di Bernoulli.

Le calcolatrici meccaniche diventate commerciabili, grazie alla nascita della meccanica di precisione, con Thomas de Colmar, verso la fine del secolo hanno potuto soddisfare le esigenze delle case assicuratrici e dagli uffici per i censimenti nazionali (hollerith) e hanno portato alla organizzazione di massicce attività di calcolo per le quali si sono cominciate ad utilizzare le schede perforate, nel filone dei nastri di Jacquard.

Nello stesso filone si inseriscono i relé elettromeccanici e le tecnologie della commutazione telefonica, altri dispositivi che richiedono di implementare algoritmi. Nel 1890 compaiono le schede perforate di Hollerith e intorno al 1910 le telescriventi con la sua banda perforata che utilizzava il codice Baudot.

**K14 d.07** Nel 1935 furono inventate le reti di commutazione telefonica di relé elettromeccanici. Queste hanno portato all'invenzione del dispositivo di addizione digitale da parte di George Stibitz nel 1937. Mentre lavorava nei Laboratori Bell, osservò l'uso "gravoso" delle calcolatrici meccaniche con ingranaggi. "Una sera del 1937 tornò a casa con l'intenzione di testare la sua idea... Al termine del lavoro, Stibitz aveva costruito un dispositivo di addizione binario" a relé.

**K14 d.08** Nella matematica verso la fine del XIX secolo l'attenzione si sposta invece verso le tematiche teoriche e strutturalistiche.

L'agone accademico vede prevalere l'astrazione in genere considerata un buon contributo all'onore dell'uomo e in una certa misura contrapposta alle finalità computazionali che perdono d'importanza e in molti ambienti matematici piuttosto screditate.

Nel filone della formalizzazione della matematica, reso importante dallo studio dei fondamenti (Frege, Cantor, Russel, Hilbert) ha portato alla logica formale e alla visione delle dimostrazioni matematiche come serie di trasformazioni di formule secondo regole di trasformazioni esprimibili algoritmicamente.

In questo periodo nasce anche lo studio formale degli algoritmi che riprenderemo più avanti.

Nel 1928 sono iniziati i tentativi di risolvere il cosiddetto problema di decisione (Entscheidungsproblem) posto da David Hilbert.

Gli sviluppi successivi si sono rivolti a cercare di definire la "calcolabilità effettiva"[32] o il "metodo effettivo".[33]

Queste tendenze hanno portato alle funzioni ricorsive di Goedel-Herbrand-Kleene del 1930, 1934 e 1935, al lambda calcolo di Alonzo Church del 1936, alla Formulazione 1 di Emil Post del 1936 e alle macchine di Turing di Alan Turing del 1936-37 e 1939.

Qui interessa solo osservare che le questioni dei fondamenti della matematica e la logica formale inizialmente hanno messo in ombra il valore delle computazioni, ma in seguito hanno fornito basi formali solide agli sviluppi di grande interesse pratico che sono seguiti.

**K14 d.09** Accadde inoltre, grazie al crescere delle attività produttive e agli sforzi suicidi in prevalenza europei (WW1 e WW2), che i calcoli effettivi sono stati sempre più richiesti e si è giunti agli elaboratori elettronici.

Le problematiche computazionali avevano prodotto la critica di Goedel che frena l'illusione della teoria matematica fonte di verità assolute che potessero essere solidamente essere dimostrate; si sono dimostrati invece i limiti della matematica visti in chiave computazionale e le nuove prospettive aperte in particolare da Turing.

Anche questo ha contribuito a rafforzare le concezioni più empiriche della matematica.

## K14 e. definizione di algoritmo di Markov e Kleene

**K14 e.01** Abbiamo già affermato che il termine algoritmo va visto in più accezioni.

Cominciamo per presentarne una che non richiede di ricorrere a tecnicismi, esprimendosi in tono colloquiale, e che è in grado di rappresentare una vasta gamma di situazioni; di conseguenza si può supporre che sia più facilmente apprezzabile.

Essa si può associare ai nomi di Kolmogorov e Andrey Markov Jr., due importanti matematici russi che in particolare hanno avuto il merito di presentare con notevole semplicità gli elementi comuni a tante situazioni reali che hanno consentito di vederle secondo una ottica unitaria e di renderle molto più comprensibili.

Questa definizione resta un poco nel vago, ma ha il merito di essere accettata da tutti gli studiosi, i quali su varie altre questioni assumono posizioni divergenti.

[a] Un algoritmo è costituito da un complesso di istruzioni espresse con una scrittura finita rivolte a un esecutore reale o ragionevolmente realizzabile che potrebbe essere una persona, uno strumento meccanico, un dispositivo elettronico o anche altro.

Con questo abbiamo avanzato due requisiti: la finitezza della descrizione di un algoritmo e la possibilità che esso possa essere eseguito da parte di qualcuno dei suoi esecutori.

[b] Un algoritmo descrive un processo per la costruzione, a partire da alcune entità date, di nuove entità obiettivo. Queste entità possono essere di varia natura (numerica, geometrica, simbolica, strutturale, procedurale, ...); si chiede solo che esse possano avere una precisa definizione o comunque siano riconoscibili sulla base di precisi requisiti.

Risultano quindi dichiarati i requisiti di finitezza e definitezza dei dati e degli obiettivi di un algoritmo.

[c] Il processo eseguito dall'esecutore al quale si affida una attuazione dell'algoritmo si constata che si realizzi oppure si dimostra che possa realizzarsi attraverso successivi **passi** che collegano successivi **stadi**, questi riferibili a una sequenza discreta di **istanti**. Nello stadio iniziale, cioè nell'istante iniziale, all'esecutore è noto solo il sistema (finito) di informazioni che rappresenta il complesso delle le entità date. In ogni passo successivo l'esecutore è in grado di ottenere un nuovo sistema di informazioni che può dipendere da tutte le informazioni disponibili nello stadio precedente.

Con questo punto sono state richieste **la discretezza, l'automatismo e la capacità di memoria di un algoritmo**.

[d] Le informazioni ottenute in ciascun passo sono determinate univocamente dalle informazioni possedute nello stadio precedente.

Questo è il requisito di **determinismo di un algoritmo**.

[e] Le regole che consentono di effettuare un passo esecutivo sono semplici per l'esecutore e locali, cioè coinvolgono un insieme circoscritto di elementi che deve essere del tutto controllabile.

A questo punto abbiamo il requisito di **elementarità delle istruzioni e dei passi di un algoritmo**.

[f] Il complesso delle entità date in partenza può essere scelto in un insieme tendenzialmente esteso ma chiaramente definibile.

Parliamo allora di **massività o ampiezza della portata di un algoritmo**.

**K14 e.02** Per chiarire le caratteristiche degli algoritmi può essere utile riprendere in esame alcune indicazioni di procedimenti risolutivi elementari. Come esempi si possono tenere presenti le regole per lo svolgimento delle operazioni aritmetiche sulle scritture decimali degli operandi, le loro varianti binarie, la determinazione del MCD di interi e di polinomi mediante l'algoritmo euclideo, le regole

per la decomposizione di un intero in fattori primi, i procedimenti per la soluzione di un sistema di equazioni lineari con coefficienti razionali, le regole per le costruzioni geometriche classiche effettuabili con riga e compasso, l'individuazione di un percorso minimo sopra un grafo.

Fin dai primi sviluppi del pensiero matematico si è avuta la spinta a precisare “indicazioni operative” che potessero essere seguite meccanicamente da operatori umani sufficientemente affidabili per risolvere dei problemi di elevato interesse applicativo (calcoli commerciali e finanziari, misurazioni del terreno, costruzioni di edifici e di macchine, valutazioni astronomiche, ...).

In effetti queste indicazioni operative fanno sì che numerose istanze di un problema possano essere risolte da persone alle quali non si richiedono profonde competenze né grande inventiva, ma solo che devono avere la capacità di eseguire elaborazioni su numeri, su figure o su altre informazioni semplici seguendo attentamente regole computazionali chiaramente espresse.

Così facendo si riducono i rischi delle attività lasciate alla iniziativa di esecutori ingenui, che agiscono non sorrette da istruzioni adeguatamente meditate.

**K14 e.03** Con i successivi sviluppi delle apparecchiature elettroniche e con l'ampliarsi delle applicazioni dei metodi quantitativi le attività di calcolo effettivo sono diventate molto più diffuse e differenziate. La loro importanza è cresciuta in tutti i settori della produzione, della gestione, della amministrazione e, naturalmente, nella maggior parte delle settori della ricerca scientifica e tecnologica.

Dopo facili successi iniziali (indicativamente tra 1960 e 1970), si è osservato che per una buona soluzione di molti problemi importanti risulta cruciale riuscire spingere molto avanti le capacità di calcolo effettivo, nelle direzioni talora conflittuali della portata, della velocità, della precisione e della versatilità.

È quindi tornata pressante l'esigenza di chiarire indicazioni generali per i procedimenti di calcolo, insieme all'esigenza di allargare le conoscenze teoriche che possono suggerire nuovi metodi e rendere affrontabili nuove problematiche.

**K14 e.04** Le indicazioni di procedimenti risolutivi in grado di giungere a risposte definite le quali siano espresse in una forma coerente, ampiamente comprensibile e priva di ambiguità tanto da essere delegabile a diversi operatori umani o meccanici incaricati di svolgere concretamente le elaborazioni, vengono dette **algoritmi**.

## K14 f. formalizzazioni della nozione di algoritmo

**K14 f.01** Sebbene noti e ampiamente utilizzati fin dall'antichità, il problema di definire cosa siano gli algoritmi è ancora aperto (Vardi 2012).

La parola “algoritmo” deriva dal nome del matematico persiano del IX secolo Abu Jafar Muhammad ibn Musa al-Khwarizmi, che fornì regole per le operazioni aritmetiche utilizzando i numeri arabi.

In effetti, le regole che si seguono per calcolare operazioni aritmetiche di base come la moltiplicazione o la divisione sono esempi quotidiani di algoritmi. Altri esempi ben noti includono le regole per bisecare un angolo utilizzando riga e compasso, o l'algoritmo di Euclide per calcolare il massimo comun divisore. Intuitivamente, un algoritmo è un insieme di istruzioni che consentono l'adempimento di un dato compito. Nonostante questa antica tradizione in matematica, solo la moderna riflessione logica e filosofica ha proposto il compito di fornire una definizione di cosa sia un algoritmo, in connessione con la crisi fondazionale della matematica dell'inizio del ventesimo secolo (vedere la voce sulla filosofia della matematica).

La nozione di calcolabilità effettiva è nata dalla ricerca logica, fornendo una controparte formale alla nozione intuitiva di algoritmo e dando vita alla teoria della computazione. Da allora, sono state proposte diverse definizioni di algoritmi, che vanno da approcci formali a non formali, come delineato nelle sezioni successive.

### K14 f.02 3.1 Approcci classici

Andrey Markov Jr. (1954) fornisce una prima definizione precisa di algoritmo come un processo computazionale determinato, applicabile ed efficace. Un processo computazionale è determinato se le istruzioni coinvolte sono sufficientemente precise da non consentire alcuna “scelta arbitraria” nella loro esecuzione. Il computer (umano o artificiale) non deve mai essere incerto su quale passo eseguire dopo. Gli algoritmi sono applicabili per Markov in quanto valgono per classi di input (numeri naturali per operazioni aritmetiche di base) piuttosto che per singoli input (numeri naturali specifici).

Andrey Markov Jr. (1954:1) definisce l'efficacia come “la tendenza dell'algoritmo a ottenere un determinato risultato”. In altre parole, un algoritmo è efficace in quanto alla fine produrrà la risposta al problema computazionale.

Kleene (1967) specifica la finitezza come un'ulteriore proprietà importante: un algoritmo è una procedura che può essere descritta mediante un insieme finito di istruzioni e necessita di un numero finito di passaggi per fornire una risposta al problema computazionale.

Come controesempio, si consideri un ciclo while definito da un numero finito di passaggi, ma che viene eseguito all'infinito poiché la condizione nel ciclo è sempre soddisfatta. Le istruzioni dovrebbero anche essere suscettibili di esecuzione meccanica, ovvero non è richiesta alcuna intuizione perché la macchina le segua.

Seguendo la determinabilità e l'efficacia rafforzante di Markov, Kleene (1967) specifica inoltre che le istruzioni dovrebbero essere in grado di riconoscere che la soluzione al problema computazionale è stata raggiunta e interrompere il calcolo.

**K14 f.03** Knuth (1973) riprende e approfondisce le analisi di Andey Markov Jr. (1954) e Kleene (1967) e afferma quanto segue. Oltre a essere semplicemente un insieme finito di regole che fornisce una sequenza di operazioni per risolvere uno specifico tipo di problema, un algoritmo ha cinque caratteristiche importanti:

Finitezza. Un algoritmo deve sempre terminare dopo un numero finito di passaggi.

**Definitezza.** Ogni passaggio di un algoritmo deve essere definito con precisione; le azioni da eseguire devono essere rigorosamente e inequivocabilmente specificate per ogni caso.

**Input.** Un algoritmo ha zero o più input.

**Output.** Un algoritmo ha zero o più output.

**Efficacia.** In genere ci si aspetta che un algoritmo sia efficace, nel senso che le sue operazioni devono essere tutte sufficientemente basilari da poter essere eseguite in linea di principio esattamente e in un lasso di tempo finito da qualcuno che usa carta e penna. (Knuth 1973: 4-6)

Come in Kleene (1967), la finitezza riguarda sia il numero di istruzioni sia sul numero di passaggi computazionali da eseguire.

Come nella determinazione di Markov, il principio di definitezza di Knuth richiede che ogni passaggio computazionale successivo sia specificato in modo univoco.

Inoltre Knuth (1973) richiede più esplicitamente che gli algoritmi abbiano (insiemi potenzialmente vuoti di) input e output. Con algoritmi senza input o output Knuth probabilmente si riferisce ad algoritmi che utilizzano dati memorizzati internamente come input canonici o algoritmi che non restituiscono dati a un utente esterno (Rapaport 2019, cap. 7, in Altre risorse Internet).

Per quanto riguarda l'efficacia, oltre alla tendenza di Markov a ottenere un certo risultato, Knuth richiede che il risultato  $v$  venga ottenuto in un lasso di tempo finito e che le istruzioni siano atomiche, ovvero sufficientemente semplici da essere comprensibili ed eseguibili da un computer umano o artificiale.

**K14 f.04** Gurevich (2011) sostiene, da un lato, che non è possibile fornire definizioni formali di algoritmi, poiché la nozione continua a evolversi nel tempo: si consideri come gli algoritmi sequenziali, utilizzati nelle computazioni più consolidate, nella pratica informatica attuale siano affiancati da algoritmi paralleli, analogici o quantistici e come nuovi tipi di algoritmi saranno molto probabilmente proposti nel prossimo futuro. D'altro canto, si ritiene che si possa avere una analisi formale ben fondata solo se interessata ai soli algoritmi sequenziali classici.

In particolare, Gurevich (2000) fornisce una definizione assiomatica per questa classe di algoritmi.

Qualsiasi algoritmo sequenziale può essere simulato da una macchina a stati sequenziali astratti che soddisfa tre assiomi:

Il postulato del tempo sequenziale associa a qualsiasi algoritmo  $A$  un insieme di stati  $S(A)$ , un insieme di stati iniziali  $I(A)$  sottoinsieme di  $S(A)$  e una mappa da  $S(A)$  a  $S(A)$  di trasformazioni in un solo passaggio di  $A$ .

Gli stati sono descrizioni istantanee di algoritmi in esecuzione. Un'esecuzione di  $A$  è una sequenza (potenzialmente infinita) di stati, a partire da un qualche stato iniziale, tale che vi sia una trasformazione in un solo passaggio da uno stato al suo successore nella sequenza. La terminazione non è presupposta dalla definizione di Gurevich.

Le trasformazioni in un solo passaggio non devono essere atomiche, ma possono essere composte da un insieme limitato di operazioni atomiche.

Secondo il postulato dello stato astratto, gli stati in  $S(A)$  sono strutture di primo ordine, come comunemente definite nella logica matematica; in altre parole, gli stati forniscono una semantica alle affermazioni di primo ordine.

Infine, il postulato di esplorazione limitata afferma che dati due stati  $X$  e  $Y$  di  $A$  esiste sempre un insieme  $T$  di termini tale che, quando  $X$  e  $Y$  coincidono su  $T$ , l'insieme di aggiornamenti di  $X$  corrisponde all'insieme di aggiornamenti di  $Y$ .  $X$  e  $Y$  coincidono su  $T$  quando, per ogni termine  $t$  in  $T$ , la valutazione di  $t$  in  $X$  è la stessa della valutazione di  $t$  in  $Y$ . Ciò consente all'algoritmo  $A$  di esplorare solo quelle parti di stati che sono relative ai termini in  $T$ .

**K14 f.05** Moschovakis (2001) obietta che la nozione intuitiva di algoritmo non è catturata completamente dalle macchine astratte. Data una funzione- $N \rightarrow N$  ricorsiva generale  $f: N \rightarrow N$  definita su numeri naturali, di solito ci sono molti algoritmi diversi che la calcolano; le "proprietà essenziali, indipendenti dall'implementazione" non sono catturate dalle macchine astratte, ma piuttosto da un sistema di equazioni ricorsive.

Si consideri l'algoritmo mergesort per l'ordinamento di elenchi; ci sono molte diverse macchine astratte per mergesort, e sorge la domanda su quale debba essere scelta come algoritmo mergesort. L'algoritmo mergesort è invece il sistema di equazioni ricorsive che specifica la funzione coinvolta, mentre le macchine astratte per la procedura mergesort sono diverse implementazioni dello stesso algoritmo. Due domande vengono poste dall'analisi formale di Moschovakis: diverse implementazioni dello stesso algoritmo dovrebbero essere implementazioni equivalenti, e tuttavia, una relazione di equivalenza tra le implementazioni dell'algoritmo deve essere formalmente definita. Inoltre, resta da chiarire a cosa corrisponda la nozione intuitiva di algoritmo formalizzata da sistemi di equazioni ricorsive.

**K14 f.06** Primiero (2020) propone una lettura della natura degli algoritmi a tre diversi livelli di astrazione (LoA).

A un LoA molto alto, gli algoritmi possono essere definiti astraendo dalla procedura che descrivono, consentendo molti insiemi diversi di stati e transizioni. A questo LoA gli algoritmi possono essere intesi come specifiche informali, ovvero come descrizioni informali di una procedura  $P$ .

A un LoA inferiore, gli algoritmi specificano le istruzioni necessarie per risolvere il dato problema computazionale; in altre parole, specificano una procedura. Gli algoritmi possono quindi essere definiti come procedure, o descrizioni in un dato linguaggio formale  $L$  di come eseguire una procedura  $P$ . Molte proprietà importanti degli algoritmi, comprese quelle relative alle classi di complessità e alle strutture dati, non possono essere determinate al LoA procedurale e invece fanno riferimento a una macchina astratta che implementa la procedura.

In una LoA inferiore, gli algoritmi possono essere definiti come macchine astratte implementabili, vale a dire come la specifica, in un linguaggio formale  $L$ , delle esecuzioni di un programma  $P$  per una data macchina astratta  $M$ . La triplice definizione di algoritmi consente a Primiero (2020) di fornire una definizione formale delle relazioni di equivalenza per gli algoritmi in termini di nozioni algebriche di simulazione e bisimulazione (Milner 1973, vedere anche Angius e Primiero 2018). Una macchina  $M_i$  che esegue un programma  $P_i$  implementa lo stesso algoritmo di una macchina  $M_j$  che esegue un programma  $P_j$  se e solo se le macchine astratte che interpretano  $M_i$  e  $M_j$  sono in una relazione di bisimulazione.

**K14 f.07** Vardi (2012) sottolinea come, nonostante le numerose definizioni formali e informali disponibili, non vi sia un consenso generale su cosa sia un algoritmo. Gli approcci di Gurevich (2000) e Moschovakis (2001), che possono anche essere dimostrati logicamente equivalenti, forniscono solo costrutti logici per gli algoritmi, lasciando senza risposta la domanda principale. Hill (2013) suggerisce che una definizione informale degli algoritmi, che tenga conto della comprensione intuitiva che si ha degli algoritmi, potrebbe essere più utile, specialmente per il discorso pubblico e la comunicazione tra professionisti e utenti.

Rapaport (2012, Appendice) fornisce un tentativo di riassumere le tre definizioni classiche di algoritmo sopra delineate affermando che:

Un algoritmo (per l'esecutore  $E$  e per raggiungere l'obiettivo  $G$ ) è: una procedura, ovvero un insieme finito (o sequenza) di enunciati (o di regole o di istruzioni), tale che ogni istruzione sia: composta da un numero finito di simboli (o segni) sopra un alfabeto finito; la procedura è non ambigua per  $E$ , ovvero,  $E$  sa come eseguirla,  $E$  è in grado di effettuarla e può essere conclusa in una quantità di tempo

finita; E, dopo averla eseguita sa come procedere, quale procedura richiede una quantità di tempo finita (ovvero, si ferma), e che termina con G completato.

Rapaport sottolinea che un algoritmo è una procedura, ovvero una sequenza finita di istruzioni che assumono la forma di regole o istruzioni. La finitezza è qui espressa richiedendo che le istruzioni contengano un numero finito di simboli da un alfabeto finito.

**K14 f.08** Hill (2016) mira a fornire una definizione informale di algoritmo, partendo da Rapaport (2012):

Un algoritmo è una struttura di controllo composta, finita, astratta, efficace, imprescindibilmente data, che realizza uno scopo dato, sotto date disposizioni. (Hill 2016: 48).

Innanzitutto, gli algoritmi sono strutture composite piuttosto che oggetti atomici, ovvero sono composti da unità più piccole che chiamiamo passaggi computazionali. Queste strutture sono finite ed efficaci, come esplicitamente menzionato da Markov, Kleene e Knuth.

Mentre questi autori non menzionano esplicitamente l'astrattezza, Hill (2016) sostiene che è implicita nella loro analisi.

Gli algoritmi sono astratti semplicemente in quanto mancano di proprietà spatio-temporali e sono indipendenti dalle loro istanze dei problemi ai quali si rivolgono. Forniscono controllo, ovvero “contenuto che determina un qualche tipo di cambiamento da uno stato all'altro, espresso in valori di variabili e azioni conseguenti” (p. 45).

Gli algoritmi sono imperativamente dati, poiché comandano le transizioni di stato per eseguire operazioni specificate.

Infine, gli algoritmi operano per raggiungere determinati scopi sotto alcune disposizioni o precondizioni solitamente ben specificate.

Da questo punto di vista, sostiene l'autore, gli algoritmi sono alla pari con le specifiche nel loro specificare un obiettivo sotto determinate risorse. Questa definizione consente di distinguere gli algoritmi da altre strutture di controllo composte.

Ad esempio, le ricette non sono algoritmi perché non sono efficaci; né lo sono i giochi, che non sono imperativamente dati.

## K14 h. carrellata sui tipi degli algoritmi in uso

**K14 h.01** distinzione per implementazione

**K14 h.02** ricorsione

Un algoritmo ricorsivo invoca ripetutamente se stesso fino a quando non soddisfa una condizione di terminazione, ed è un metodo comune di programmazione funzionale. Gli algoritmi iterativi utilizzano ripetizioni come i loop o strutture di dati come le pile per risolvere i problemi. stack per risolvere i problemi. I problemi possono essere adatti a un'implementazione o l'altra. La Torre di Hanoi è un rompicapo comunemente risolto utilizzando un'implementazione ricorsiva. Ogni versione ricorsiva ha una versione iterativa equivalente (ma possibilmente più complessa) e viceversa.

**K14 h.03** seriali, paralleli o distribuiti

Gli algoritmi nel passato sono stati trattati presupponendo che un computer esegua un'istruzione di un algoritmo alla volta, ossia abbia un comportamento seriale; i primi algoritmi sono stati progettati per queste apparecchiature.

Successivamente sono stati sviluppati algoritmi paralleli e algoritmi distribuiti. Gli algoritmi paralleli sfruttano le architetture di computer nelle quali più processori possono lavorare su un problema contemporaneamente. Gli algoritmi distribuiti utilizzano più macchine collegate in rete. rete di computer. Gli algoritmi paralleli e distribuiti dividono il problema in sottoproblemi e si occupano di raccogliere e coordinare i risultati insieme. Il consumo di risorse in questi algoritmi non riguarda solo le elaborazioni richieste per risolvere il problema complessivo ma anche il cosiddetto overhead richiesto dalle comunicazioni tra i processori e il loro coordinamento.

Alcuni algoritmi di ordinamento possono essere parallelizzati in modo efficiente, ma la loro comunicazione è costosa. Gli algoritmi iterativi sono generalmente parallelizzabili, ma alcuni problemi non sono affrontabili con algoritmi paralleli e quindi sono chiamati problemi intrinsecamente seriali.

**K14 h.04** deterministico o nondeterministico

Gli algoritmi deterministici risolvono il problema con una decisione esatta a ogni mentre gli algoritmi nondeterministici risolvono i problemi tramite congetture. Le ipotesi sono in genere rese più precise dall'uso di euristiche.

**K14 h.05** per soluzione esatta o per soluzione approssimativa

Mentre molti algoritmi raggiungono una soluzione esatta, gli algoritmi di approssimazione cercano un'approssimazione che si avvicini alla soluzione esatta. Tali algoritmi hanno un valore pratico per molti problemi difficili.

Per esempio, il problema di Knapsack in cui c'è un insieme di oggetti e l'obiettivo è impacchettare lo zaino per ottenere il massimo totale. zaino per ottenere il massimo valore totale. Ogni elemento ha un peso e un certo valore. Il peso totale che può essere trasportato non è superiore a un numero fisso  $X$ . Quindi, la soluzione deve tenere conto dei pesi degli oggetti e dei loro valori.

**K14 h.06** algoritmi quantistici

Gli algoritmi quantistici vengono eseguiti su un modello realistico di calcolo quantistico. Il termine termine viene solitamente utilizzato per quegli algoritmi che sembrano intrinsecamente quantistici o che utilizzano alcune caratteristiche essenziali della computazione quantistica, come la sovrapposizione quantistica o l'entanglement quantistico.

**K14 h.07** Per paradigma di progettazione

Un altro modo di classificare gli algoritmi è la loro metodologia di progettazione o paradigma. Alcuni paradigmi comuni sono:

**K14 h.08** Forza bruta oppure ricerca esaustiva

La forza bruta è un metodo di risoluzione dei problemi che consiste nel provare sistematicamente ogni possibile fino a trovare la soluzione ottimale. Questo approccio può essere molto dispendioso in termini di tempo, in quanto si tratta di testare ogni possibile combinazione di variabili. Viene spesso utilizzato quando altri metodi non sono disponibili o sono troppo complessi. La forza bruta può risolvere una serie di problemi, tra cui la ricerca del percorso più breve tra due punti e la decifrazione di password.

**K14 h.09** divide e conquista

Un algoritmo divide et impera riduce ripetutamente un problema a uno o più istanze più piccole di se stesso (di solito in modo ricorsivo) fino a quando le istanze sono abbastanza piccole da poter essere risolte facilmente. L'ordinamento per unione è un esempio di divide et impera. conquistare, in cui un elenco non ordinato può essere diviso in segmenti contenenti un elemento e l'ordinamento dell'intera lista può essere ottenuto unendo i segmenti.

Una variante più semplice di divide et impera è chiamata algoritmo di decrescita e conquista, che risolve i problemi di un elenco non ordinato. che risolve un'istanza più piccola di se stesso e utilizza la soluzione per risolvere il problema più grande. soluzione per risolvere il problema più grande. Divide et impera divide il problema in più problema in più sottoproblemi e quindi la fase di conquista è più complessa rispetto agli algoritmi di conquista e decrescita.

Un esempio di algoritmo decrease and conquer è l'algoritmo di ricerca binaria.

**K14 h.10** ricerca ed enumerazione

Molti problemi (come il gioco degli scacchi) possono essere modellati come problemi su grafi.

Un algoritmo di esplorazione di grafi specifica le regole per muoversi in un grafo ed è utile per questi problemi. grafo ed è utile per questi problemi. Questa categoria comprende anche gli algoritmi di ricerca algoritmi di ricerca, enumerazione di rami e limiti e backtracking.

**K14 h.11** algoritmi randomizzati

Questi algoritmi effettuano alcune scelte in modo casuale (o pseudo-casuale). Trovano soluzioni approssimative quando la ricerca di soluzioni esatte può risultare impraticabile (si veda il metodo euristico). Per alcuni problemi le approssimazioni più veloci devono essere Per alcuni problemi, le approssimazioni più rapide devono essere caratterizzate da una certa casualità[46]. complessità temporale possano essere gli algoritmi più veloci per alcuni problemi è una questione aperta nota come questione aperta, nota come problema P contro NP. Esistono due grandi classi di algoritmi di questo tipo: Gli algoritmi Monte Carlo restituiscono una risposta corretta con alta probabilità. Ad esempio RP è la sottoclasse di questi algoritmi che viene eseguita in tempo polinomiale. Gli algoritmi di Las Vegas restituiscono sempre la risposta corretta, ma il loro tempo di esecuzione è solo probabilisticamente vincolato, ad esempio ZPP.

**K14 h.12** riduzione della complessità Questa tecnica trasforma i problemi difficili in problemi più noti risolvibili con algoritmi (auspicabilmente) asintoticamente ottimali.

L'obiettivo è trovare un algoritmo riduttivo la cui complessità non sia dominata dagli algoritmi ridotti risultanti. Ad esempio, un algoritmo di selezione trova la mediana di un elenco non ordinato ordinando

prima l'elenco (la parte costosa), poi estrae l'elemento centrale dell'elenco ordinato (la parte parte economica). Questa tecnica è nota anche come transform and conquer.

**K14 h.13** inseguimento a ritroso

In questo approccio, più soluzioni vengono costruite in modo incrementale e abbandonate quando si determina che non possono portare a una soluzione completa valida.

**K14 h.14** algoritmi di ottimizzazione

Per i problemi di ottimizzazione esiste una classificazione più specifica di algoritmi. Un algoritmo per tali problemi può rientrare in una o più delle categorie generali sopra descritte, ma anche in una delle seguenti seguenti:

**Programmazione lineare** Quando si ricercano le soluzioni ottimali di una funzione lineare vincolata da vincoli lineari di uguaglianza e disuguaglianza, i vincoli possono essere usati direttamente per produrre soluzioni ottimali. Esistono algoritmi in grado di risolvere qualsiasi problemi di questa categoria, come il popolare algoritmo simplex.[47] I problemi che possono essere risolti con la programmazione lineare includono il problema del massimo flusso per i grafi diretti. problema del massimo flusso per i grafi diretti. Se un problema richiede anche che una qualsiasi incognite siano numeri interi, allora viene classificato nella programmazione intera.

La programmazione lineare può risolvere questo problema se si può dimostrare che tutte le restrizioni per i valori interi sono superficiali, cioè le soluzioni soddisfano comunque tali restrizioni. soluzioni soddisfano comunque tali restrizioni. Nel caso generale, un algoritmo algoritmo specializzato o un algoritmo che trova soluzioni approssimate. a seconda della difficoltà del problema.

**K14 h.15** programmazione dinamica

Quando un problema mostra delle sottostrutture ottimali, cioè la soluzione ottimale può essere costruita a partire da soluzioni ottimali di sottoproblemi e sovrapposizioni di sottoproblemi, vale a dire che gli stessi sottoproblemi sono utilizzati per risolvere diverse istanze di problema, un approccio più rapido chiamato programmazione dinamica un approccio più rapido, chiamato programmazione dinamica, che evita il di calcolare nuovamente le soluzioni. Per esempio, l'algoritmo di Floyd- Warshall, il percorso più breve tra un vertice iniziale e uno finale tra un vertice di partenza e uno di arrivo in un grafo ponderato può essere trovato utilizzando il percorso più breve verso la meta da tutti i vertici adiacenti. La programmazione dinamica programmazione dinamica e la memorizzazione vanno di pari passo. A differenza del divide et impera, i sottoproblemi di programmazione dinamica spesso si sovrappongono. La differenza tra programmazione dinamica e la semplice ricorsione è la memorizzazione delle chiamate ricorsive. Quando i sottoproblemi sono indipendenti e non si ripetono, la memorizzazione non è utile; pertanto la programmazione dinamica non è applicabile a tutti i problemi complessi. tutti i problemi complessi. Utilizzando la memoizzazione, la programmazione dinamica riduce la complessità di molti problemi da esponenziale a polinomiale.

**K14 h.16** procedimenti greedy

Gli algoritmi greedy, analogamente a quelli di programmazione dinamica, lavorano esaminando le sottostrutture, in questo caso non del problema ma di una determinata soluzione. Tali algoritmi partono da una soluzione e la migliorano apportando piccole modifiche. Per alcuni problemi trovano sempre la soluzione ottimale ma per altri possono fermarsi a degli optima locali.

L'uso più popolare degli algoritmi greedy è quello di trovare alberi spanning minimi di grafi senza cicli negativi. Huffman Tree, Kruskal, Prim, Sollin sono algoritmi greedy in grado di risolvere questo problema di ottimizzazione. risolvere questo problema di ottimizzazione.

**K14 h.17** atteggiamento euristico

Nei problemi di ottimizzazione, gli algoritmi euristici trovano soluzioni vicine alla soluzione ottimale quando la ricerca della soluzione ottimale non è praticabile. Questi algoritmi si avvicinano sempre di più alla soluzione ottimale man mano che procedono. In linea di principio, se eseguiti per un tempo infinito, troveranno la soluzione ottimale. In teoria, se vengono eseguiti per un tempo infinito, troveranno la soluzione ottimale in un tempo relativamente breve. Questi algoritmi includono ricerca locale, ricerca tabu, simulated annealing e algoritmi genetici. Alcuni, come l'annealing simulato, sono algoritmi nondeterministici, mentre altri, come la ricerca tabu, sono algoritmi deterministici. Quando è noto un limite sull'errore della soluzione non ottimale, l'algoritmo viene ulteriormente classificato come un algoritmo di approssimazione.

## K14 i. algoritmi e politica

**K14 i.01** Il mondo della politica negli ultimi decenni ha dovuto interessarsi sempre di più degli algoritmi; questo interesse è particolarmente cresciuto negli ultimi anni con la crisi del Covid19 e con il prepotente emergere dell'Intelligenza Artificiale (che qui abbrevio con AI).

Questi cresciuti interessi non possono meravigliarci. Gli uomini politici dovrebbero soprattutto prendere delle decisioni sempre più impegnative; gli scenari che devono comprendere si sono fatti sempre più ampi ed intricati. La crescita delle relazioni commerciali, delle interdipendenze merceologiche, delle comunicazioni e delle esigenze comporta (dovrebbe comportare) la necessità dei decisori, sia negli organismi pubblici che nei privati, di tener conto di aree geografiche e industriali sempre più estese e intricate, ossia ricche di connessioni.

Questa necessità si è ulteriormente intensificata con l'accelerazione delle innovazioni tecnologiche e dei cambiamenti sociali (in larga misura conseguenti), con la maggiore richiesta di certe risorse che ci si illudeva fossero illimitate, con le crisi della pandemia, del clima della vicinanza delle guerre, e delle migrazioni. Senza dimenticare lo sfondo degli incombenti squilibri demografici.

I decisori politici (in senso lato) dovrebbero quindi esaminare situazioni complesse e sfaccettate che, direttamente o indirettamente, potrebbero riguardare milioni di persone e miliardi di eventi umani, economici e climatici.

Inoltre in varie circostanze risulta necessario prendere provvedimenti in tempi molto ridotti.

Molti organismi, soprattutto se dotati di ampie risorse materiali e di capacità di far tesoro delle esperienze e di servirsi di svariate tecnologie, si sono attrezzati per raccogliere informazioni utili e per valutare le conseguenze delle scelte da assumere.

Spesso comunque le decisioni che possono essere determinanti trovano i decisori in difficoltà tutt'altro che trascurabili.

**K14 i.02** Notoriamente molte scelte politiche (e di strategia economica) vengono decise sulla base delle mitologie che sono state utilizzate dai decisori per acquistare il loro potere attuale, recente o trascorso.

Gli esempi si sprecano, soprattutto negli organismi che contano su tradizioni che fanno riferimento a situazioni che si finge siano simili alle attuali.

In questi casi i decisori devono tenere in conto i messaggi della loro propaganda politica o commerciale più recente (contando molto sulla dimenticanza da parte dell'elettorato di loro enunciazioni precedenti).

Quando risulta conveniente prendere decisioni che possono far sospettare atteggiamenti contraddittori, incoerenze, trasformismo o gabbana rivoltata, spesso si assumono toni drammatici, narrazioni vittimistiche, denunce di complotti oppure promesse mirabolanti.

In ogni caso si fa molto ricorso alla retorica, all'enfasi e alle iperboli; per questo si può ricorrere a molte tradizioni italiane; in particolare si sprecano le metafore, il ricorso a successi sportivi e le attribuzioni ad altri, esclusivamente, di insuccessi ben presenti.

Sono molto praticate anche le acrobazie tra i dati statistici; ogni cenno alla razionalità viene accuratamente evitato.

**K14 i.03** Sarebbe invece opportuno che le decisioni importanti fossero prese dopo aver consultato fonti informative e aver ponderato le valutazioni delle conseguenze in grado di aiutarli.

Queste pratiche però sono impegnative; in particolare dovrebbero essere adottate non solo episodicamente, ma devono essere seguite e aggiornate con la continuità necessaria per ottenere buone garanzie di coerenza e di riduzione dei rischi.

Ogni genere di sistema di supporto alle decisioni deve essere ben conosciuto e aggiornato.

A rendere poco ambiti questi sistemi contribuisce anche il fatto che non possono essere esibiti come pratiche lodevoli a una opinione pubblica poco propensa ad occuparsi della loro validità: troppo faticoso, peggio che leggere con attenzione le clausole di un contratto assicurativo.

Sarebbe necessario sollecitare l'opinione pubblica verso la maggiore razionalità delle valutazioni e delle scelte da parte dei politici.

Questo può essere fatto con attente presentazioni delle situazioni nelle quali un approccio più razionale nelle valutazioni e nelle decisioni ha condotto a sensibili vantaggi, in confronto con situazioni nelle quali atteggiamenti opposti dei decisori hanno condotto a insuccessi vistosi.

**K14 i.04** sono auspicabili interventi algoritmici il più possibile razionali che siano in grado di sostenere le scelte politiche,

Solo strumenti automatizzati possono consentire di tenere sotto controllo le grandi quantità di dati che possono servire a prendere buone decisioni.

Una spinta in questa direzione richiede una cessione di potere decisionale da parte dei politici: questo rende prevedibili forti opposizioni che prevedibilmente sarebbero accompagnate da accuse di deumanizzazione delle scelte stesse, con immagini di situazioni distopiche di macchine o biechi tecnocrati che prendono il controllo dei poteri politici.

Si può sperare solo in una graduale crescita dei comportamenti razionali che sicuramente sarà favorita dalla crescita della efficienza degli algoritmi che potranno essere implementati.

Questa auspicata politica aumentata richiederebbe di essere accuratamente e continuamente studiata, monitorata e aggiornata.

Inoltre richiederebbe di essere controllata sul piano giuridico e attentamente normata; si tratta di attività prevedibilmente molto impegnative.

In questa prospettiva sono prevedibili conflitti molto aspri che possono coinvolgere una ampia gamma di interessi e di valori.

Sono anche prevedibili movimenti di opinione decisamente contrari sia dovute a comprensibili timori (come in tutti i casi di cambiamenti rilevanti e rapidi) sia dovute a campagne sostenute da forti interessi di parte che, come più volte nel passato possono servirsi di disinformazione e denigrazioni sistematiche. Non sono da escludere neppure distorsioni dei procedimenti e degli intendimenti che possono condurre a derive autoritarie.

**K14 i.05** Ovviamente su questi cambiamenti non si possono oggi fare previsioni che pretendano di essere affidabili.

Si deve comunque tenere conto che davanti a noi sono prevedibili con buona convinzione, progressivamente negli strumenti, nelle tecnologie e nelle corrispondenti sperimentazioni che rendono assai improbabile il mantenimento dello status quo del produrre decisioni politiche di ampia portata.

Molte scelte politiche richiedono di esaminare situazioni complesse e sfaccettate che coinvolgono milioni e talora miliardi di parametri; inoltre in alcune situazioni risulta necessario prendere provvedimenti in tempi molto ridotti.

Con richieste di questo genere gli uomini si possono trovare in gravi difficoltà.

Sarebbe opportuno che si avvalgano di sistemi informativi in grado di aiutarli.

Non basta che questi aiuti vengano richiesti episodicamente. I sistemi in grado di aiutare e talora di sostituire il decisore umano devono essere adeguati e preparati.

Questa politica aumentata dovrebbe essere prevista e normata. In questa prospettiva si possono prevedere conflitti molto aspri che possono coinvolgere una ampia gamma di interessi e di valori.

## **K14 j. algoritmi, leggi e giustizia**

**K14 j.01** Si parla tanto di algoritmi soprattutto in relazione a sistemi software con elevate prestazioni che intendono avere grande portata e che intendono influenzare comportamenti e opinione di larghi gruppi di persone.

Il tono dei discorsi in genere è piuttosto drammatico e tende a suggerire timori per possibili sviluppi volti a massificare o addirittura a distruggere.

Questi algoritmi si rivolgono alle persone considerandole principalmente come compratori e con la costante preoccupazione di aumentare la loro propensione verso i consumi.

Queste pagine cercano di introdurre gli algoritmi in modo utile cercando di fare chiarezza sulla loro natura e sui loro diversi aspetti

Si possono evidenziare diverse accezioni del termine e risulta importante cercare di collegare queste diverse accezioni

Testo fruibile in <https://www.mi.imati.cnr.it/alberto/> e [https://arm.mi.imati.cnr.it/Matexp/matexp\\_main.php](https://arm.mi.imati.cnr.it/Matexp/matexp_main.php)