

13 La creazione dei grandi sistemi: sviluppo tecnologico e assetti organizzativi

SOMMARIO

13.1 I sistemi tecnici del mondo industriale: complessità, organizzazione e governo del sistema

13.2 Le origini dell'ingegneria del controllo

13.3 Scienza, tecnologia e industria nella creazione dei grandi sistemi tecnologici

13.4 Tecnologie organizzative e cultura del controllo: dall'ingegneria delle macchine all'ingegneria dei sistemi

Letture 16 Scienza dei sistemi e tecnologia dei sistemi

13.1 I sistemi tecnici del mondo industriale: complessità, organizzazione, governo del sistema

“Nel passato per primo vi era l'uomo. Nel futuro per primo vi sarà il Sistema”, scriveva perentoriamente Taylor (v. Kanigel 1997). Da Vauban a Coulomb, fino a Babbage e a Taylor, abbiamo individuato alcuni passaggi dell'itinerario intellettuale dell'idea di *sistema* nella tecnica e nell'ingegneria moderne. La Rivoluzione Industriale rappresentò un forte salto in questa direzione. Infatti, essa vide una trasformazione dello spazio e delle attività, nei paesi dell'area occidentale del mondo, contrassegnata dal dispiegarsi dei primi sistemi tecnici: oltre alle fabbriche e ai grandi impianti di estrazione mineraria (nel linguaggio moderno, i sistemi di produzione), la rete stradale e dei canali navigabili (i sistemi di trasporto) e il telegrafo (sistemi di comunicazione).

L'organizzazione di questi sistemi fu messa in piedi secondo la metodologia empirica e di prova ed errore tipica del sapere tecnico-operativo, in modo quindi non dissimile dell'organizzazione degli antichi cantieri edili o degli opifici. Mentre le macchine e i dispositivi tecnici diventavano oggetto di studio teorico (tecnologico), gli aspetti organizzativi erano lasciati all'esperienza di singoli tecnici o imprenditori oppure alle decisioni collegiali dei corpi statali degli ingegneri. Eppure, dagli aspetti organizzativi e gestionali dipendeva fortemente il successo delle iniziative imprenditoriali in un contesto di forte concorrenza come quello britannico e statunitense. E, d'altra parte, questi aspetti erano anche centrali nei tentativi europei di dare spazio nella vita economica sia alla libertà di impresa, sia al bene pubblico e alla diffusione del benessere: basti pensare al problema dei pedaggi e delle tariffe nei sistemi di trasporto. Infine, dalle decisioni organizzative e gestionali dipendevano le condizioni di vita di molti uomini e donne: le parole di Taylor esprimono efficacemente il paradosso della gestione sistematica, massimo punto di sviluppo del desiderio ancestrale dell'uomo di liberarsi

dalle fatiche del lavoro e di migliorare la propria vita attraverso la tecnica, che come una piovra invadeva tutti gli spazi fino ad espellere l'essere umano. Ciò che Taylor prevedeva e auspicava, l'avvento del Sistema, rifletteva le istanze di una fredda razionalità scientifica che si alleava al progresso industriale. Un tale progetto era condiviso da molti, guardato con timore da molti altri e dipinto in termini di incubo dalla fantascienza che fiorì a cavallo fra Ottocento e Novecento.

Sistema tecnico e organizzazione

La parola «sistema» deriva da un verbo greco che significa “porre insieme, riunire” e indica un aggregato organico e strutturato di parti tra loro interagenti, siano esse parti fisiche o anche idee (come nei “sistemi filosofici”).

Anche le macchine sono composte di parti, e la loro progettazione e operazione dipende in gran parte dall'interazione fra tali parti; abbiamo visto che fin dai primordi del pensiero “tecnologico” greco si è tentato di analizzare le macchine in termini delle loro parti. Tuttavia, nel pensiero tecnico classico, la macchina – dalla puleggia alla ruota idraulica – è vista come un'unità, in rapporto allo scopo al quale è destinata.

A partire dalla fine del Seicento, si comincia ad avere consapevolezza dell'esistenza di realizzazioni tecniche che permettono di raggiungere un determinato scopo proprio attraverso l'interazione fra molte parti. La parola «sistema» fu già usata da Vauban per riferirsi all'intricato impianto da lui ideato per le fortificazioni militari. Ma sono soprattutto le fabbriche della Rivoluzione Industriale l'archetipo di *sistema tecnico*, del quale le singole macchine non sono altro che parti interagenti.

La mera giustapposizione delle parti non forma il sistema tecnico. Ogni sistema è presieduto dallo scopo per il quale esso è concepito e realizzato e per il cui raggiungimento opera. Le sue parti devono quindi essere in grado di operare insieme per raggiungere un fine determinato. In altre parole, al sistema deve essere data una struttura ordinata volta al raggiungimento del suo scopo, ossia un'«organizzazione».

Fra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento, l'avanzare dell'industrializzazione fu contrassegnato dallo sviluppo dei sistemi di produzione (nuove tipologie di fabbrica, e soprattutto la grande azienda di produzione di massa ben rappresentata dalle industrie automobilistiche) e dalla sovrapposizione, a quelli già dispiegati, di nuovi sistemi di trasporto (la rete ferroviaria) e di comunicazione (il telefono, la radio). Tuttavia, la discontinuità più radicale con il periodo precedente è rappresentata forse dalla creazione, con la diffusione dell'elettricità, di un sistema capillare di distribuzione dell'energia (anticipato

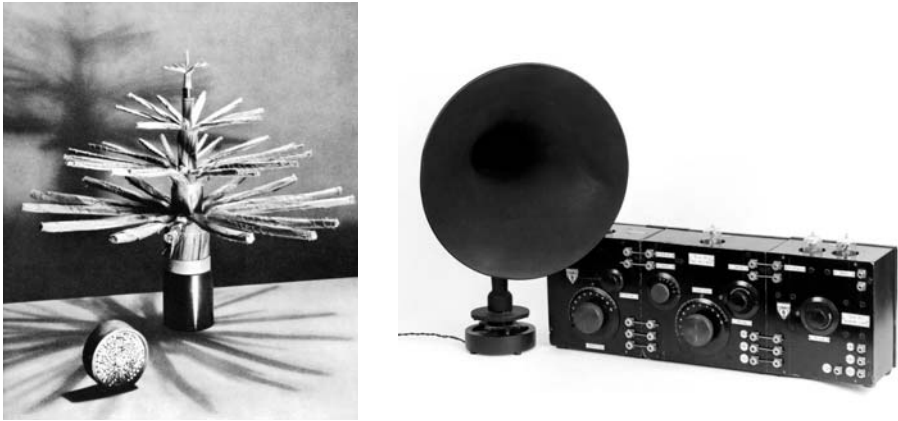


Fig. 13.1 La tecnologia delle comunicazioni negli anni Venti, negli archivi dell'azienda Siemens (a) sezione del cavo telefonico impiegato nella linea Berlino-Colonia impiantata dalla Siemens nel 1921, l'embrione della rete telefonica di lunga distanza in Europa (b) il ricevitore radio Siemens-D-Zug presentato nella prima Grande Esposizione Tedesca della Radio del 1924.

soltanto dal sistema di distribuzione del gas per illuminazione e riscaldamento prima a Londra e poi in altre città). Dal punto di vista organizzativo, si delineavano due strutture fondamentali: la *linea* o flusso continuo dettato dal processo produttivo nell'industria; e la *rete* tipica delle attività di trasporto, di distribuzione e di comunicazione. La fabbrica aveva rappresentato una sfida concettuale centrale per l'ingegneria dell'Ottocento. Il suo posto nel pensiero tecnico fu occupato progressivamente da realizzazioni di grandi dimensioni, estese a rete su un ampio territorio, che portarono in primo piano i problemi di configurazione e di controllo dei processi di un sistema, in rapporto agli obiettivi da raggiungere.

La rete ferroviaria fornì un modello concettuale dell'idea di controllo dei processi fra i dirigenti aziendali. Le tecniche di gestione aziendale messe in atto a questo scopo furono essenzialmente di due tipi: 1) tecniche contabili, che sfruttavano i flussi numerici contabili per ottenere una visione strutturale del sistema, dei suoi processi interni e dei suoi rapporti con l'esterno; 2) tecniche di comunicazione, che sfruttavano l'informazione e i rapporti umani interni all'azienda per imporre un rigido controllo interno. La rete ferroviaria fornì anche un primo terreno di prova di un approccio di impronta ingegneristica, basato sulle idee di decisione e di ottimizzazione formulate attraverso variabili e rapporti matematici. Questo approccio di "ingegneria matematica" – lo abbiamo visto nella lettura 15 – trovò espressione compiuta nella formulazione della programmazione matematica di Dantzig, volta al "controllo stretto di un'organizzazione".



Fig. 13.2 La Potsdamer Platz, nel centro di Berlino, nel 1936 (i semafori elettrici automatici erano stati installati dalla Siemens nel 1924). Il tessuto industriale della Germania, sfruttato da Hitler ai suoi folli scopi, fu completamente distrutto durante la guerra. Gli scienziati tedeschi emigrati negli Stati Uniti, fra cui molti ebrei perseguitati dal regime nazista, diedero un fondamentale contributo alla supremazia degli Stati Uniti nella seconda metà del Novecento.

Negli anni in cui Dantzig elaborava le sue idee e scriveva i primi lavori, l'idea di "controllo" era al centro di una profonda elaborazione, da angoli visuali diversi, che l'avrebbero portata a svolgere un ruolo centrale nel pensiero tecnologico del Novecento. L'approccio "prescrittivo" ai fenomeni tipico della tecnica, che abbiamo visto svilupparsi a partire dalla visione della macchina come "inganno" (vale a dire, da una posizione di inferiorità del tecnico nei confronti della Natura), sfociò infatti nel secolo scorso in una visione dell'essere umano capace di *governare* saldamente i processi da lui innescati, i sistemi artificiali e, attraverso di essi, l'intera realtà nella quale si muove. Questo "governo" tanto a lungo agognato diventò possibile grazie allo sviluppo di tre nuovi tipi strumenti tecnici: le tecnologie dell'automazione (che costituiscono il cuore della cosiddetta ingegneria del controllo), le tecnologie dell'informazione e le tecnologie organizzative. Il loro sviluppo avvenne in simbiosi, soprattutto nella seconda metà del secolo: esse scambiarono idee, terminologia e modelli matematici, per agire su aspetti distinti dei sistemi. In particolare, l'idea di controllo delle componenti organizzative dei sistemi artificiali si sviluppò come un corrispettivo delle tecnologie di controllo automatico che governano le componenti materiali del sistema, e quindi per questa via il problema gestionale fu riassorbito all'interno della cultura dell'ingegnere.

Complessità e controllo

L'evoluzione, la crescita e la diffusione dei sistemi tecnici ha portato in primo piano l'idea di «complesso», di «complessità». Questa parola deriva da un verbo latino che significa «stringere, comprendere, abbracciare», e quindi in definitiva si collega all'idea di riunione solidale di parti o elementi che è insita nella nozione di sistema. Nel pensiero tecnico, la nozione di complessità esprime la difficoltà di ottenere da quell'insieme di parti il comportamento prefissato e quindi di raggiungere lo scopo assegnatogli, dovuta alle grandi dimensioni del sistema (un gran numero di componenti) oppure al gran numero delle interazioni fra le componenti, o alla constatazione che esse non si ricompongono in modo lineare (il tutto non si riduce alla somma delle parti). Si tratta quindi di una difficoltà di comprensione e descrizione e quindi di un margine d'incertezza, che a sua volta porta a una difficoltà nell'esercitare un controllo.

Il pensiero tecnico ha un'antica consuetudine con tali difficoltà, che si è espressa attraverso l'idea della macchina e della tecnica come un ingannare la Natura. Il pensiero scientifico classico ha avuto invece al centro l'idea di semplicità, secondo la quale tutti i fenomeni naturali possono essere analizzati e ridotti ad alcuni principi di base che li regolano, le leggi naturali. L'influsso del pensiero scientifico sul pensiero tecnico ha quindi contribuito a far superare da quest'ultimo l'idea dell'artificiale come inganno, sostituendola con la fiducia nella capacità umana di comprendere e di governare gli oggetti, le procedure e i sistemi tecnici. Il passaggio dall'utilizzazione di energia per lo sviluppo dell'azione delle macchine, in base al comando umano (la prima fase dell'automatismo), al comando automatico dell'azione, sviluppate grazie a un'analisi matematica teorica del problema, rappresentò un punto di svolta fondamentale nella moderna concezione di controllo o governo della realtà artificiale.

Questi tre nuovi settori tecnologici segnarono una rottura fondamentale con la vecchia tecnica come arte, la tecnica dell'approssimazione e della prova ed errore, poiché la loro origine fu strettamente legata a concetti scientifici e il suo sviluppo fu accompagnato da approfonditi studi matematici dei fenomeni e dei dispositivi tecnici. Abbiamo visto nel capitolo 12 lo sviluppo della programmazione matematica e della ricerca operativa che sono alla base delle cosiddette *tecnologie organizzative*. Le *tecnologie dell'informazione* hanno come antecedente immediato le macchine di calcolo diventate d'uso abbastanza comune nell'Ottocento e le macchine di elaborazione dell'informazione tramite schede perforate sviluppate dall'ingegnere americano Hermann Hollerith (1860-1929) e commercializzate dall'IBM all'inizio del Novecento. Lo sviluppo del computer si colloca sullo sfondo dello sviluppo dell'ingegneria dei sistemi e, come è ben noto, il suo influsso nella cultura contemporanea va

ben oltre questo ambito. Non ci occuperemo qui della storia dell'informatica o delle scienze e dell'ingegneria dell'informazione (il lettore interessato può consultare ad esempio Breton 1992). Ci basta ricordare che, nei primi decenni del Novecento, l'elettricità e poi l'elettronica resero possibile il progetto dell'elaboratore elettronico, grazie anche al concorso di gruppi di ricerca in vari paesi, e nel periodo della Seconda Guerra Mondiale si ebbe il definitivo passaggio dalle macchine analogiche a quelle digitali, sancito dalla costruzione dell'EDVAC, il primo elaboratore elettronico programmabile.

Nel paragrafo successivo ci occuperemo con più dettaglio dello sviluppo delle *tecnologie dell'automazione* (l'automatica o ingegneria del controllo), che hanno reso possibile – in un processo continuo di miglioramento e di innovazione – il funzionamento automatico di macchine, veicoli e armi di ogni tipo. Esse hanno consentito di sviluppare la robotica e di compiere passi importanti verso l'eliminazione dell'intervento umano nel funzionamento degli impianti industriali e dei sistemi di grandi dimensioni in ambito civile e militare, o comunque la sua integrazione con l'insieme “meccanico” da una posizione di supervisione e governo.

13.2 Le origini dell'ingegneria del controllo

Le tecnologie dell'automazione riguardano i dispositivi di regolazione e controllo del funzionamento delle macchine, che permettono di renderle automatiche, ossia di svolgere il loro compito da sole, senza intervento umano, non soltanto per applicare una forza (come nel caso dell'uso della ruota idraulica, il primo passo del “macchinismo industriale”), ma nemmeno per comandare l'azione della macchina. Siamo qui – sono le parole di Koyré (2000: 50-51, n.1), a proposito di un passo della *Politica* nel quale Aristotele afferma che la schiavitù non sarebbe più necessaria se le spole e i plectri potessero mettersi in moto da soli – di fronte all’“essenza stessa della macchina, l'*automatismo*, che le macchine hanno realizzato pienamente solo nei nostri tempi”. Tali dispositivi, basati su un'analisi matematica molto sofisticata del problema, iniziarono a essere sviluppati nell'Ottocento, soprattutto a partire dalle domande teoriche e pratiche poste dalla regolazione della macchina a vapore.

La macchina a vapore ha un valore paradigmatico nell'emergere della moderna filosofia tecnica che ha al suo centro l'idea di controllo. Essa fu inventata, sul finire del Settecento, quando ancora il ruolo della scienza nello sviluppo tecnico era modesto, e fu frutto dell'arte e dell'intuizione dei fenomeni tipica del tecnico classico. Il regolatore della velocità brevettato dallo stesso Watt fu da lui sviluppato seguendo ancora una volta la metodologia di ricerca che lo aveva guidato nello studio del rendimento della macchina di Newcomen e nello sviluppo del proprio brevetto. Il desiderio di capire i fenomeni fisici che spiegano il funzionamento della macchina a vapore furono alla base dello sviluppo della termodinamica e di un concetto centrale nella scienza moderna: l'energia. Cent'anni dopo il regolatore di Watt, lo studio teorico

della regolazione del movimento dei motori, ossia delle macchine a vapore e delle turbine idrauliche e a vapore, condotto da alcuni fra i più importanti scienziati e ingegneri dei decenni finali dell'Ottocento, grazie alla descrizione del problema in termini di equazioni differenziali, sollevò interessanti domande da un punto di vista strettamente matematico e portò alla nascita di un nuovo settore di studio dell'ingegneria, con importanti ricadute nell'ambito industriale.

Le origini della teoria dei sistemi e del controllo: fra ingegneria e matematica

Il problema principale che presentavano i regolatori di velocità delle macchine era l'insorgere della instabilità del moto, come fu osservato da due illustri scienziati britannici: prima dall'astronomo George Biddell Airy (1801-1892), in un lavoro pionieristico pubblicato nel 1840 relativo a un dispositivo usato nell'Osservatorio di Greenwich dove lavorava; e poi da Maxwell, in un famoso articolo intitolato "On governors", pubblicato nel periodico «Proceedings of the Royal Society» nel 1868, nel quale provava a esaminare da un punto di vista generale il problema che era alla base di diversi modelli di regolatori, fra cui uno progettato da Jenkin. Entrambi suggerirono di descrivere il problema con lo strumento centrale dello studio del moto nella meccanica teorica, le equazioni differenziali (Maxwell aveva pubblicato pochi anni prima uno studio sulla stabilità del moto degli anelli di Saturno).

Lo studio di Maxwell era motivato da un problema tecnico, ma non mirava alle ricadute pratiche immediate. Egli scriveva: "Propongo ora, senza entrare in nessuno dei dettagli di meccanismi, di indirizzare l'attenzione degli ingegneri e dei matematici verso la teoria dinamica di tale regolatore [governor]" (Maxwell 1868: 271). Lo studio del problema dal punto di vista puramente matematico avrebbe portato ad alcuni dei primi studi dell'analisi non lineare, una linea di ricerca che alla fine del Novecento è tornata di gran moda proprio nel tentativo di confrontarsi con la complessità nei sistemi naturali ed artificiali. L'impostazione di Maxwell fu sviluppata in vista delle applicazioni tecniche industriali da due autori che rappresentano bene l'evoluzione del pensiero tecnologico e delle scienze dell'ingegnere sul finire dell'Ottocento.

Il primo è Ivan Alekseevich Vyshnegradsky (1831-1895), laureato presso la Facoltà di Fisica e Matematica di San Pietroburgo e professore di matematica e di meccanica dell'Accademia di Artiglieria e di meccanica dell'Istituto Tecnico di San Petersburg, del quale divenne direttore nel 1875. Egli ebbe quindi un ruolo da ingegnere statale impegnato nella modernizzazione della Russia, prima con incarichi tecnici nelle manifat-

ture militari e nelle ferrovie e alla fine della sua carriera con alte responsabilità presso il Ministero delle Finanze. I suoi lavori sulla teoria della regolazione automatica delle macchine a vapore (pubblicati negli anni 1876-78 in varie lingue, e che suscitarono grande interesse all'estero) segnano l'inizio della fiorente scuola russa di meccanica, che continuò a prosperare anche nell'epoca sovietica. Questa scuola si caratterizzò per l'attenzione duplice sia ai problemi del moto in generale, sia ai problemi di ingegneria meccanica, e anche per la scelta di trattare i problemi applicativi con una formulazione matematica rigorosa, la quale portò a far diventare la teoria dei sistemi e del controllo una branca specifica della matematica applicata.

Il secondo è Aurel Boleslav Stodola (1859-1942), un ingegnere meccanico laureato presso la prestigiosa Scuola Tecnica Superiore di Zurigo, della quale diventò professore nel 1892, dopo alcuni anni di lavoro presso le ferrovie statali ungheresi, presso la manifattura di pellame di suo padre e, infine, come ingegnere capo di una azienda di Praga, la Ruston, nella quale si occupò della progettazione di macchine a vapore. Egli fu un rappresentante tipico dell'ingegneria industriale dell'epoca e la massima autorità nella tecnologia delle turbine a vapore. La sua fama si basava sulla grande competenza matematica e sui suoi vasti interessi, che riguardavano sia la meccanica teorica (uno dei suoi colleghi e amici affezionati fu Albert Einstein, anche lui professore al Politecnico di Zurigo), sia le applicazioni industriali: grazie al contributo della sua scuola le aziende svizzere acquisirono un ruolo di primo piano in questo settore. Sulla scia dei lavori di Vyshnegradsky, egli studiò i sistemi di regolazione di velocità nelle centrali idroelettriche e nelle turbine a vapore, avvalendosi anche del contributo del collega matematico Adolf Hurwitz (1859-1919).

Nell'ingegneria del controllo la matematica assunse un ruolo di primo piano, non solo come linguaggio delle scienze fisiche, ma anche, direttamente, fornendo strumenti di descrizione e di progettazione dei dispositivi di controllo.

Già nei mulini ad acqua e a vento erano utilizzati dei dispositivi di frenaggio attivati dalla forza centrifuga; essi permettevano di mantenere la velocità costante al diminuire del carico utile, ma l'energia non utilizzata veniva dissipata per attrito. Per evitare un analogo spreco nelle macchine a vapore (come abbiamo visto, già il primo brevetto di Watt riguardava la diminuzione del loro consumo di combustibile), il regolatore di Watt utilizzava la forza centrifuga di un sistema di contrappesi ruotanti, i quali agivano su una valvola che diminuiva o aumentava l'afflusso del vapore dalla caldaia. Dall'azione della macchina stessa, quindi, proveniva l'informazione sul suo stato, e il dispositivo di regolazione, sensibile allo scostamento tra la velocità desiderata e quella effettiva, riusciva a ripristinare la velocità desiderata, con un'azione sulla macchi-

na. Questo “anello” d'informazione, che accompagna l'azione puramente meccanica della macchina, è chiamato, nella terminologia oggi in uso, «retroazione» (a partire da un comportamento misurabile all'uscita, il dispositivo di controllo sviluppa in ingresso un'azione controllata dalla misura ottenuta), oppure con il termine inglese *feedback* (l'informazione viene reinserita nel sistema).

Nella seconda metà dell'Ottocento furono sviluppati regolatori meccanici e idraulici la cui azione era sempre più precisa, e non soltanto proporzionale allo scostamento nelle misure. In alcuni di essi l'azione svolta era proporzionale alla quantità di errore accumulata nel tempo (si parla in termini moderni di azione integrale, perché in termini matematici si usa l'integrale dell'errore); in altri, come alcuni sviluppati da Stodola, l'azione era attenuata quando l'errore era in diminuzione e aumentava quando era in aumento (l'azione derivativa, cosiddetta perché proporzionale alla derivata dello scostamento misurato). Oltre alle applicazioni industriali, alcuni dispositivi riguardavano la guida del movimento, delle navi (il servotimone) oppure delle torpedini. L'interesse militare di questi sviluppi si rese evidente durante la Prima Guerra Mondiale, e fece la fortuna del tecnico-imprenditore statunitense Elmer Sperry (1860-1930), fondatore dell'azienda Sperry Gyroscope Company.

Lo sviluppo dell'elettrotecnica e delle telecomunicazioni, ed in particolare gli studi legati alla regolazione della trasmissione del suono nel telefono, negli anni Venti e Trenta del Novecento, furono lo scenario di un'evoluzione della visione del ruolo dei meccanismi di regolazione all'interno di una configurazione tecnica che portò dall'idea classica di regolazione strettamente collegata ai dispositivi tecnici concreti verso una visione astratta, indipendente dai processi fisici concreti. Molti dei lavori relativi a questi problemi, scritti da ingegneri americani come John R. Carson (1887-1940), Harold S. Black (1898-1983), Harry Nyquist (1889-1976) e Hendrik W. Bode (1905-1982), furono pubblicati sul «Bell System Technical Journal» dei Laboratori Bell. Gli studi riguardavano questioni quali le distorsioni del segnale, fornendo una descrizione matematica della linea di trasmissione in termini di equazioni differenziali; oppure l'uso di filtri volti alla trasmissione simultanea di più conversazioni. L'attenzione veniva quindi concentrata sull'elaborazione del segnale, ossia sull'analisi del rapporto fra il segnale in ingresso (*input*) e quello in uscita (*output*), indipendentemente dai processi fisici reali che collegano entrambi i segnali. In questo contesto, soprattutto in collegamento agli studi volti a correggere le distorsioni dovute all'uso degli amplificatori elettronici per le linee telefoniche di lunga distanza, fu usata per la prima volta la parola *feedback*.

Nel libro *Network analysis and feedback amplifier design* (1945), Bode offriva un'esposizione d'insieme di questo nuovo approccio, emerso nell'ambito dell'ingegneria delle comunicazioni, ma che avrebbe modificato profondamente il pensiero ingegneristico del Novecento. Infatti, nella progettazione di dispositivi tecnici per la telefonia la visione classica della “macchina” veniva trasformata in due diverse direzioni, entrambe tendenti a un allontanamento dall'oggetto reale e dalla fisica del suo funzionamento. Da una parte, il singo-

lo dispositivo (ad esempio, l'amplificatore) aveva, accoppiata alla sua descrizione materiale, una descrizione matematica in termini di schemi ingresso-uscita e di "funzioni di trasferimento" basate sulla trasformata di Laplace, che forniva criteri di stabilità matematico-geometrici, necessari, nella progettazione tecnica, a governare "i disturbi" (in questo caso, distorsione e rumore) in relazione agli scopi desiderati. Dall'altra, il funzionamento del dispositivo era esaminato in un contesto di rete (*network*), ossia inserito in una configurazione di sistema volto a un fine, al quale contribuivano i vari elementi, fra cui alcuni in funzione di regolazione e controllo; tali sistemi erano illustrati graficamente tramite diagrammi a blocchi che individuavano rapporti funzionali e anelli di retroazione.

Gli anelli di retroazione sono la base della moderna concezione di «controllo», inteso come autoregolazione, come imposizione a un sistema tecnico di un certo comportamento senza intervento umano, tramite i cosiddetti «servomeccanismi» che processano un segnale in uscita dal sistema trasformandolo in un segnale in ingresso adeguato agli scopi voluti. Questa nuova impostazione fu

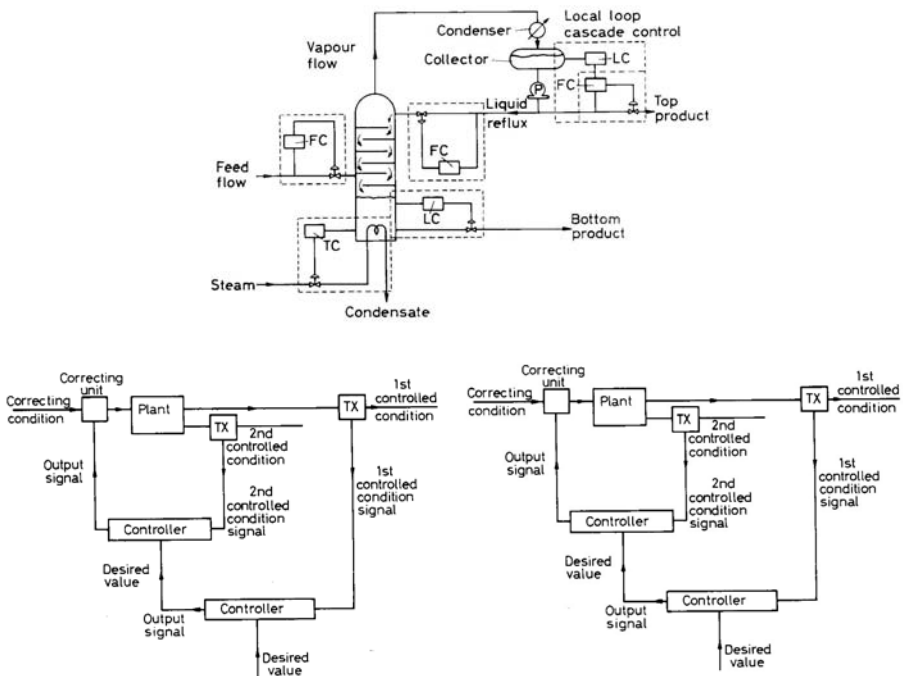


Fig. 13.3 Diagrammi a blocchi e anelli di retroazione: l'applicazione dell'elettronica all'automazione di un impianto chimico industriale nel volume *Progress in automation* (1960). Nella figura in alto sono individuati gli anelli locali, analizzati attraverso i diagrammi di controllo in basso.

alla base degli studi sull'automatizzazione del puntamento e del tiro antiaereo sviluppati negli Stati Uniti durante la Seconda Guerra Mondiale, coordinati da una divisione del NDRC nota come Fire Control Section, in collegamento con l'Applied Mathematics Panel, entrambi sotto la direzione di Warren Weaver.

Questi studi, condotti dai Laboratori Bell e da un laboratorio creato presso il Massachusetts Institute of Technology, il MIT, dal NDRC – di fatto la sua iniziativa più impegnativa – e noto come Radiation Laboratory, portarono a sostituire la visione tradizionale del tiratore con la sua arma con la visione di un *sistema* elettrico-meccanico di elementi integrati, in grado di sostituire le capacità di coordinamento e sintesi dell'essere umano e di superare i suoi limiti sensoriali e di reazione. Un tale sistema includeva, oltre all'arma (con i suoi vari meccanismi anche di movimento), dispositivi come il radar e gli elaboratori di dati analogici (direttori o predittori), ed eventualmente anche esseri umani, oppure un dispositivo di controllo, un servomeccanismo, che guidava il movimento dell'arma e comandava il fuoco. Ad esempio, i cannoni anti-aerei collocati sulle navi erano maneggiati, all'inizio della guerra, da due marinai con l'ausilio di un predittore elettrico che determinava l'angolo di tiro; l'intervento umano fu sostituito da un servomeccanismo che azionava il cannone in risposta allo spostamento fra l'angolo desiderato e l'angolo reale del canone. Come ha scritto Judy Klein (2001), "l'analisi e la progettazione delle armi per distruggere l'aviazione nemica stimolò lo studio di *sistemi* che combinavano la matematica della retroazione delle reti di informazione con la matematica della regolazione dell'energia nei sistemi meccanici". Alla fine della guerra, sulle navi portaerei erano stati creati dei centri di comando delle operazioni (composti di una sala di controllo delle operazioni e di un'altra di controllo delle informazioni) nelle quali le esigenze militari si plasmavano in strumenti tecnici e organizzativi.

È interessante sottolineare un fondamentale passaggio nella storia dell'automazione che emerse in relazione con questo problema militare e che riguarda il rapporto (e il confronto) fra uomo e macchina. Infatti, nel 1922 Nicholas Minorsky (1885-1970), in un articolo pubblicato nella rivista della Società americana di ingegneri navali intitolato "Directional stability of automatically steered bodies", aveva presentato una sintesi della tradizione di studi sulla regolazione. Egli formulò infatti la legge matematica del controllo basato sull'azione combinata proporzionale-integrale-derivativa, la quale sarebbe diventata la base della progettazione dei regolatori PID che si diffuse nelle applicazioni industriali a partire dagli anni Quaranta (Bennett 1984). Minorsky aveva tratto ispirazione dall'osservazione del comportamento di un timoniere, ossia del legame fra le sue azioni di direzione e di regolazione e la sua conoscenza delle reazioni della nave sia al movimento del timone, sia ai "disturbi" (in questo caso, disturbi esterni quali i venti e le correnti marine). Se il governo delle navi, e quindi l'emulazione del comportamento umano, era stato uno dei contesti in cui si era formata l'idea di classica di regolazione, la moderna idea di controllo si forgiò in relazione con il nuovo contesto degli aerei, nei quali la percezione e l'intuizione umana erano messe a dura prova sia a causa dell'elevata velocità degli aerei (nel tiro terra-aria), sia a causa delle difficoltà di cal-

colo legate alle velocità relative (nel tiro aria-aria). Infatti, nel periodo bellico, oltre agli sviluppi di stampo ingegneristico di strumenti di controllo, furono messi alla prova anche tecniche di allenamento dei tiratori basati sugli studi sulla percezione, condotti da un comitato di ricerche nato sempre in quel periodo, l'Applied Psychology Panel.

Nel tiro antiaereo bisognava prendere di mira un bersaglio in movimento, guidato da un essere umano: infatti si trattava non soltanto di un calcolo balistico, ma di una previsione sulla posizione futura. Per ottenerla, l'idea era basarsi sulla conoscenza delle posizioni passate dell'aereo, usando tecniche statistiche. Sui metodi di predizione della posizione lavorò un illustre matematico, professore del MIT, Norbert Wiener (1894-1964), insieme all'ingegnere Julian H. Bigelow (n. 1913). Wiener presentò la sua analisi matematica teorica del problema in un rapporto intitolato *Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series with engineering applications*, scritto nel 1942, e che ebbe un grande influsso scientifico e culturale, anche se – come altre memorie scientifiche riguardanti l'esperienza bellica – per alcuni anni rimase coperto dal segreto militare e circolò soltanto fra gli addetti ai lavori (fu pubblicato nel 1949).

Negli anni 1945-55 vi fu un'ondata di straordinario entusiasmo e sviluppo dell'ingegneria di controllo negli Stati Uniti, in ambito accademico e industriale. Furono pubblicati un gran numero di saggi sull'argomento – molti dei quali ad opera di studiosi dei sistemi per implementare il radar del Radiation Laboratory del MIT e dei Laboratori Bell – fra cui ebbe particolare successo il libro *Theory of servomechanisms* (1947) scritto in collaborazione da un fisico, Hubert M. James, un matematico, Ralph S. Phillips e un ingegnere, Nathaniel B. Nichols (Bissel 1996). Molte aziende fornitrici delle forze armate iniziarono a offrire i propri prodotti per l'applicazione all'automazione industriale. Nella seconda metà del Novecento, lo sviluppo dei dispositivi di controllo (regolatori e servomeccanismi), in combinazione con lo sviluppo dell'informatica, portò alla creazione di macchine e dispositivi automatici di ogni genere, all'automazione delle fabbriche e gli impianti industriali e alla creazione dei sistemi tecnici militari e civili di grandi dimensioni. Queste macchine, dispositivi e sistemi, hanno trasformato la vita quotidiana nei paesi industrializzati e hanno anche condizionato la vita dell'intero pianeta e gli equilibri internazionali, a causa del loro ruolo nelle comunicazioni globali e negli equipaggiamenti e sistemi militari.

Flessibilità, complessità, integrazione nella produzione manifatturiera del Novecento

Le imprese manifatturiere statunitensi, arrivate alla vigilia della guerra impregnate dalla filosofia della produzione di massa, si confrontarono con difficoltà con l'esigenza di aumentare la flessibilità degli impianti, necessaria per assemblare prodotti come gli aerei o i carri armati sulla cui pro-

gettazione si lavorava ancora introducendo continue modifiche e miglioramenti, anche in risposta all'esperienza in combattimento, e anche per rispondere all'evoluzione delle richieste militari, in corrispondenza alla situazione sullo scenario bellico. Si proponeva così l'esigenza di recuperare aspetti della produzione artigianale specializzata che l'evoluzione tecnica e organizzativa sembrava aver condannato alla sparizione. La necessità di controbilanciare gli aumenti di produttività, frutto di soluzioni organizzative "razionali" ma rigide, con la capacità di rispondere all'evoluzione del contesto generale di mercato nel quale operano le aziende industriali sarà una delle sfide principali, sul piano tecnologico-organizzativo, nella seconda metà del Novecento. Questa sfida si riproporrà a più riprese in contesti diversi e riceverà risposte diverse, che sono spesso, ancora una volta, il riflesso di aspetti culturali più generali.

Dal confronto fra l'evoluzione dell'industria aeronautica in Gran Bretagna, Stati Uniti e Germania durante la Seconda Guerra Mondiale (Zeitlin 1995) emerge, ad esempio, che gli industriali britannici svilupparono metodi organizzativi volti alla produzione flessibile simili a quelli "just in time" applicati con gran successo dalle firme giapponesi, negli anni Settanta e Ottanta, nella produzione di automobili e di prodotti elettronici di consumo. Inoltre, la sconfitta tedesca nella guerra ha portato ad attribuire all'industria tedesca una debolezza dovuta alla mancata adozione dei metodi tayloristi e al perdurare della fiducia nelle elevate competenze specializzate dei lavoratori e del personale tecnico; ma un'analisi più attenta permette di osservare le grandi capacità del modello tedesco, anch'esso legato alla tradizione industriale europea, sia dal punto di vista della produttività, che della flessibilità produttiva. Le cause delle difficoltà attraversate dall'industria risiedono nei problemi legati alla situazione di guerra: dal problema delle forniture, a quello della necessità di spezzettare le operazioni – pur opportunamente organizzate in sequenza – eseguendole in impianti separati come misura di precauzione contro gli attacchi dall'aria). Ma soprattutto, le cause principali risiedono nei conflitti e nella disorganizzazione all'interno del Ministero dell'Aeronautica nell'ambito della struttura di potere della Germania nazista.

La rigidità del sistema americano di produzione aumentò ulteriormente con la diffusione dell'automazione industriale nel dopoguerra. Tuttavia, i risultati raggiunti dal punto di vista della produttività, e l'influsso culturale della superpotenza americana nel mondo industrializzato occidentale, portò a una diffusione generale del modello delle fabbriche americane. Lo sviluppo dei FMS (Flexible Manufacturing Systems) negli anni Settanta tenterà di offrire una risposta a questi problemi, ritornati di nuovo in primo piano con l'evoluzione del mercato e dei consumi (richieste di qualità e di diversificazione della produzione), grazie all'uso coordinato di macchine utensili e sistemi di trasporto a controllo numerico, ossia programmabili, controllati da una rete informatica di supervisione.

13.3 Scienza, tecnologia e industria nella creazione dei sistemi tecnici di grandi dimensioni

La fine della Seconda Guerra Mondiale segnò la fine del predominio dell'Europa, e soprattutto della Gran Bretagna, della Germania e della Francia sulla scena internazionale, e l'ascesa degli Stati Uniti d'America a un nuovo ruolo di superpotenza sul piano economico, politico e culturale, e in particolare di guida dello sviluppo industriale e scientifico-tecnologico. Il modello di sviluppo statunitense, erede di quello europeo, si contrapponeva radicalmente a quello comunista che era stato la base della creazione dell'URSS, l'Unione delle Repubbliche Socialiste Sovietiche, uno stato sovranazionale che comprendeva la Russia e molte altre aree centroeuropee e asiatiche. Nel febbraio del 1945 fu firmato nella cittadina di Yalta, in Crimea, un accordo fra Gran Bretagna, Stati Uniti e Unione Sovietica che scongiurò lo scoppio di una terza guerra mondiale, al prezzo però dell'imposizione del regime comunista e della supremazia dell'Unione Sovietica nei paesi dell'Europa orientale. Nella conferenza di San Francisco dell'aprile-giugno del 1945, mentre la Germania si arrendeva, fu fondata l'Organizzazione delle Nazioni Unite, nell'ambito della quale iniziarono i lavori per il controllo internazionale degli armamenti.

Tuttavia, l'allentamento della tensione fu effimero: superata la crisi del 1948 dovuta al blocco da parte dell'Unione Sovietica dell'accesso terrestre a Berlino Ovest (la cui spartizione era parte dell'accordo di Yalta), di cui abbiamo detto nel capitolo 12, nel febbraio 1949 i comunisti entrarono a Pechino, il 29 ottobre di quell'anno l'Unione Sovietica effettuò il primo esperimento nucleare in Siberia, e nel giugno del 1950 le truppe della Corea del Nord comunista invasero il Sud, provocando l'intervento americano sotto la bandiera dell'ONU. Era l'inizio della Guerra Fredda, durata circa quarant'anni e finita soltanto con la caduta del Muro di Berlino nel 1989 e la fine dell'Unione Sovietica tre anni dopo. Di conseguenza, la struttura organizzativa che era stata messa in piedi negli Stati Uniti negli anni della Seconda Guerra Mondiale per sostenere e indirizzare la ricerca scientifica e lo sviluppo tecnologico, attraverso i finanziamenti concessi soprattutto dalle forze armate, continuò a operare nella nuova fase storica, con alcune modifiche pratiche che non intaccavano l'impostazione culturale di fondo.

La nuova situazione internazionale, di pace armata, rendeva possibile estendere il sostegno governativo a progetti scientifici senza uno scopo applicativo immediato, anche perché l'impegno degli scienziati durante la guerra aveva consolidato definitivamente la convinzione – che abbiamo visto emergere e svilupparsi in Europa fra Settecento e Ottocento fra i filosofi e gli uomini colti – che la ricerca scientifica perseguita liberamente poteva rivelare in un secondo tempo potenzialità applicative inaspettate, in ambito militare o industriale. Di conseguenza, persino gli studi matematici astratti, condotti senza apparente collegamento con problemi applicativi, ricevevano finanziamenti da parte delle autorità militari (attraverso agenzie come l'Office of Naval Research), che avevano visto grandi matematici come Wiener o von Neumann

all'opera in problemi di sviluppo e progettazione degli armamenti. Tuttavia, l'atmosfera degli anni Cinquanta e Sessanta fu contrassegnata da un'estrema sensazione di pericolo nazionale, e le iniziative militari, tecnologiche e industriali – alle quali partecipò la crema degli scienziati centroeuropei rifugiati o semplicemente emigrati negli Stati Uniti – furono intraprese all'insegna di una situazione di emergenza prebellica.

Industria e commesse militari negli Stati Uniti: un'alleanza vincente

L'industria privata americana, ancora una volta, ricevette un grande stimolo dall'iniziativa federale in ambito militare. Molte delle grandi aziende americane nelle manifatture elettriche e automobilistiche che erano cresciute nei decenni finali dell'Ottocento e di inizio Novecento avevano avuto un ruolo da protagoniste durante la Seconda Guerra Mondiale. Nel 1940, per esempio, dopo l'appello del presidente Roosevelt per la costruzione di 50000 aerei in due anni, la Ford applicò il suo modello di produzione di massa in un nuovo impianto a Willow Run (nel Michigan) dedicato alla manifattura del bombardiere Consolidated B-24. La Western Electric, Westinghouse e Chrysler fabbricarono a partire dal 1942 il dispositivo radar SCR-268, il quale forniva i dati, prima ai dispositivi meccanici direttori del fuoco costruiti dalla Sperry Gyroscope Company, e poi al direttore elettrico sviluppato dai Laboratori Bell a questo scopo, l'M-9: questo sistema fu messo all'opera nella lotta contro i razzi tedeschi V-1. Infine, i dispositivi dell'IBM erano usati sia per il calcolo numerico, sia negli uffici che si occupavano della pianificazione (come quello in cui lavorava Dantzig, di cui abbiamo parlato nel capitolo 12), mentre, ricordiamo per inciso, un'azienda concessionaria, la Dehomag, forniva gli stessi strumenti al governo della Germania nazista.

Durante la Guerra Fredda l'alleanza fra le strutture della gestione pubblica statunitense, l'industria privata e l'élite dei ricercatori – gli scienziati e gli ingegneri attivi nelle università e nei laboratori di ricerca industriale – si rafforzò ancora, anche attraverso vincoli personali e il trasferimento di singoli individui da uno all'altro settore. L'aeronautica civile e militare e gli usi civili e militari dei controlli automatici si svilupparono in simbiosi, e furono fondate numerose aziende in questi settori. Gli elaboratori elettronici furono sviluppati essenzialmente con il sostegno dei fondi pubblici nelle varie università e agenzie pubbliche, ma nel corso degli anni Cinquanta lo Stato lasciò lo sviluppo di questa tecnologia alle aziende private, e diventò un committente anche in questo settore. Così, ad esempio, gli ingegneri elettronici del National Bureau of Standards, che nel giugno 1950 avevano inaugurato un computer progettato e costruito al suo interno (SEAC, Standards Eastern Automatic Computer) con fondi militari –

nonostante si trattasse di un'agenzia civile dipendente dal Ministero del Commercio –, furono costretti a riorientarsi verso un lavoro di consulenza nell'ambito dell'introduzione dei sistemi di elaborazione elettronica dei dati (EDP) nella pubblica amministrazione.

Forse il progetto più noto e che è diventato l'immagine più diffusa dell'alleanza fra la tecnologia e gli obiettivi militari fu il Laboratorio de Los Alamos, creato dallo Stato durante la Guerra per lo sviluppo delle armi basate sulla fisica nucleare, dove fu sviluppata la bomba atomica sotto la direzione scientifica di Robert Oppenheimer (1904-1967). L'esplosione delle bombe atomiche nelle città giapponesi di Hiroshima e Nagasaki scosse fortemente le coscienze nei paesi dell'occidente industrializzato e gettò un'ombra sulla visione allora ampiamente condivisa della tecnologia, non soltanto fra i ricercatori ma anche fra i cittadini in generale. Dopo decenni di entusiasmo per lo sviluppo tecnico, considerato fattore di progresso materiale e morale delle società, e di ammirazione per le potenzialità di un pensiero tecnologico alleato della scienza, erano davanti agli occhi di tutti i pericoli insiti nella tecnologia e la responsabilità della politica e della società di fronte alle scelte di indirizzo dello sviluppo tecnologico. Fra gli scienziati (incluso lo stesso Einstein, che durante la guerra aveva appoggiato lo sviluppo della bomba) vi fu un'ondata di rifiuto e un movimento di opinione per porre freno allo sviluppo delle armi nucleari. Tuttavia, i governi degli Stati Uniti decisero durante la Guerra Fredda la ricerca e la produzione di queste armi, in corsa con l'analogo sviluppo nell'Unione Sovietica, e lo sviluppo di questa tecnologia diventò un obiettivo molto ambito a livello internazionale. L'attività a Los Alamos, alla quale parteciparono scienziati come Edward Teller (1908-2003), John von Neumann o Stanislaw Ulam (1909-1984), proseguì sotto l'egida della Atomic Energy Commission, creata con una legge del 1946.

Gli scenari da incubo che apriva la corsa alle armi nucleari pendevano sulle sorti dell'intero pianeta nella seconda metà del Novecento. Tuttavia, forse un altro aspetto dello sviluppo tecnologico legato agli obiettivi militari contrassegnò più fortemente ancora l'atmosfera culturale di quel periodo, contribuendo a sfumare i timori suscitati dalla bomba atomica e a mantenere la fiducia dell'opinione pubblica nello sviluppo della tecnologia e, soprattutto, nella possibilità di mantenere il controllo su tale sviluppo. Si tratta della realizzazione dei sistemi di grandi dimensioni, nella difesa e nella ricerca aerospaziale, che rappresentarono agli occhi dei contemporanei un vero e proprio "trionfo della tecnica". Essi integravano al loro interno componenti meccaniche, elettriche e organizzative, sfruttando le nuovissime tecnologie dell'automazione, dell'informazione, della comunicazione e della programmazione. "Trionfo" relativo, se si pensa che il primo progetto di questo genere, una struttura tecnologica di avanguardia volta alla difesa del territorio nazionale degli Stati Uniti contro l'attacco aereo dei bombardieri a lungo raggio, noto come SAGE

(Semiautomatic Ground Environment), fu in parte un fallimento. Infatti, dopo anni di elaborazione, quando fu inaugurato il suo primo settore operativo, nel 1958, la minaccia reale erano diventati i missili intercontinentali. Furono costruiti due terzi circa dei centri direzionali previsti, ma le forze armate limitarono progressivamente il loro impegno in questo ambizioso progetto e lo lasciarono “spegnersi”, fino alla chiusura negli anni Ottanta di tutti i suoi nodi.

Il progetto SAGE derivava direttamente dai sistemi di tiro antiaereo sviluppati negli Stati Uniti durante la guerra, da una parte e, dall'altra, dagli studi dei gruppi di ricerca operativa britannica sulla difesa del suolo della Gran Bretagna volto a ottimizzare le risorse umane e tecniche (aerei, radar, telefoni) estese sul territorio, nei centri operativi, negli aeroporti militari e nelle postazioni radar. Infatti, si trattava di creare un sistema di difesa integrato basato sul radar, sulle tecnologie di comunicazione e sui servomeccanismi, sviluppando a tale scopo i nuovi elaboratori elettronici programmabili. Queste macchine erano il frutto più maturo di una serie di progetti di automatizzazione del calcolo e del trattamento dell'informazione (alcuni intrapresi in solitario, come quello di Konrad Zuse (1910-1995) in Germania). Fra questi, ebbe particolare successo quello condotto presso la Moore School of Electrical Engineering dell'Università di Pennsylvania, sostenuto dall'Army Ordnance Department, che portò alla realizzazione degli elaboratori digitali, prima l'ENIAC (Electronic Numerator, Integrator, Analyser and Computer) e soprattutto dell'EDVAC (Electronic Discrete Variable Computer), l'archetipo dei moderni computer programmabili (o codificabili, usando l'espressione adoperata all'epoca, poiché come si è visto la parola “programma” era usata in quegli anni nel senso usato nella pianificazione).

Nel 1944, con il sostegno della Marina statunitense, era stato creato presso il MIT il Servomechanisms Laboratory per progettare e sviluppare un computer-analizzatore nei problemi di stabilità e controllo degli aerei. Nel laboratorio, sotto la direzione di Jay W. Forrester (n. 1918) iniziò lo sviluppo di Whirlwind, un elaboratore digitale concepito specificamente per i problemi di controllo in tempo reale emersi in ambito bellico – ma la cui soluzione aveva una portata potenzialmente molto più ampia – e quindi da una prospettiva diversa dagli elaboratori, come quello sviluppato presso l'Istitute for Advanced Study di Princeton da von Neumann e Bigelow, volti al calcolo scientifico. Questa filosofia fu adottata dall'Aeronautica Militare statunitense (AF, Air Force), che nel 1947 era diventata un'arma indipendente (separata dall'Esercito), e che fu al centro dello sviluppo dei grandi sistemi della difesa. All'interesse primordiale dell'AF per gli aerei in chiave offensiva, e di conseguenza anche per l'industria aeronautica, si aggiungeva ora un interesse nuovo per gli sviluppi della tecnologia elettronica (il cosiddetto Air Defense Electronic Environment, Hughes 2000: 43), che fornivano la trama immateriale di informazione e di controllo, essenziale nei problemi della difesa moderna a causa dello sviluppo dei veicoli e delle armi “intelligenti”.

Le iniziative e i finanziamenti dell'AF ebbero notevolissime ricadute in termini di espansione delle aziende attive nel settore dell'aeronautica (Boeing,

Douglas Aircraft) negli Stati Uniti e nello sviluppo delle aziende nel settore elettronico. Ma l'influsso culturale di tali iniziative e finanziamenti andò molto oltre il ben collaudato modello di alleanza fra stato e industria privata legato alle commesse militari. Innanzitutto, come effetto dell'influenza dell'esperienza durante la guerra su alcuni settori dei responsabili militari, consapevoli della crescente componente tecnologica della guerra moderna, esse mobilitarono alcuni dei più grandi scienziati dell'epoca e molti fra i migliori ingegneri (accademici, ma anche attivi nell'industria). Alcuni di questi avevano posti di responsabilità, agendo come interfaccia fra i responsabili militari e la comunità dei ricercatori. È il caso di due famosi emigrati di origine ungherese: Theodor von Kármán (1881-1963), direttore del Laboratorio di Aeronautica Guggenheim del California Institute of Technology, che fu il presidente del Scientific Advisory Board dell'AF; e von Neumann, che fu invece presidente del comitato scientifico del progetto Atlas, la prima tappa del programma di sviluppo dei missili ballistici intercontinentali (ICBM, Intercontinental Ballistic Missiles) statunitensi. Molti altri studiosi (matematici, fisici, ingegneri, ma anche economisti e studiosi di scienze umane e sociali) lavorarono per un centro di ricerca in California, la RAND (Research and Development Corporation), fondato dalla Douglas Aircraft e diventato nel 1948 un'azienda senza scopo di lucro, sostenuta finanziariamente dall'AF ma non soltanto (un contributo sostanziale fu conferito dalla Ford Foundation).

La mobilitazione culturale sollecitata dagli interessi dell'AF ebbe, di conseguenza, un grande influsso sullo sviluppo dell'ingegneria del Novecento, non solo per quanto riguarda i progressi nelle singole tecnologie (aeronautica, delle comunicazioni, informatica, e così via), ma anche perché mise di fronte agli ingegneri un nuovo genere di problemi, quelli di integrazione e coordinamento di progetti tecnici di grande complessità. Furono create aziende volte alla consulenza specifica nella progettazione e gestione dei sistemi, sia aziende *nonprofit* come la RAND, sia private, come la famosa Ramo-Wooldridge Corporation. L'"ingegneria dei sistemi" si sviluppò essenzialmente fra gli ingegneri attivi nel settore dell'elettronica e delle comunicazioni.

I problemi di "ingegneria dei sistemi" emersero per la prima volta nel corso dello sviluppo del sistema SAGE, che fu condotto sotto la guida del Laboratorio Lincoln del MIT, fondato a questo scopo nel 1951 a Bedford (nel Massachusetts). All'interno di questo centro continuò lo sviluppo del computer Whirlwind, oltre ad altri settori dedicati agli aspetti legati al radar e alle comunicazioni (Hughes 2000). Nel 1953 il Laboratorio definì l'"architettura del sistema": il territorio degli Stati Uniti era diviso in otto settori, ognuno di essi sotto l'egida di un "combat center", un centro operativo che riceveva, tramite linee telefoniche, ed elaborava, con il sostegno di un computer tipo Whirlwind, informazione da 32 sottosettori. Ognuno di essi era presidiato da un centro operativo dotato di un computer e nel proprio territorio erano sparse postazioni radar di vari livelli, fra cui alcune in piattaforme collocate sulle acque costiere che trasmettevano i dati via microonde radio. Il sistema doveva essere integrato con altri due: un sistema provvisorio sul quale lavoravano i Bell

Laboratories che era basato sul sistema ereditato dal periodo bellico e un sistema più specifico, noto come Distant Early Warning System, che stava costruendo la Western Electric. Nello stesso anno fu messo alla prova per la prima volta un primo modello sperimentale di un settore SAGE, noto come Cape Cod System, basato sulla rete formata da un centro di direzione che usava il computer Whirlwind, da un radar a lungo raggio collocato presso Cape Cod, nel Massachusetts, e da alcune altre postazioni radar meno potenti sparse nella zona del New England. Ciò che dal punto di vista dei responsabili militari era un sistema di difesa antiaerea era anche, dal punto di vista degli ingegneri del MIT che lo avevano sviluppato, un sistema di elaborazione dell'informazione e di controllo in tempo reale basato sulla tecnologia elettronica.

SAGE e il “pensiero dei sistemi”: una riflessione sulla parola «sistema» risalente al 1950

In un rapporto risalente all'ottobre del 1950, la prima commissione incaricata dall'AF di esaminare la situazione e le prospettive future della difesa degli Stati Uniti contro eventuali attacchi dall'aria – presieduta dal fisico Georges E. Valley, professore del MIT, che ebbe un ruolo di primo piano nel progetto SAGE – incluse nel suo rapporto una riflessione sull'idea di sistema. Si sottolineava la necessità di collegare l'idea di sistema come modello/schema (*pattern*, in inglese) e disposizione/assetto (*arrangement*) con quella di organismo, e quindi con la nozione di obiettivo/fine e con quella di funzione. Emergevano qui sia l'idea del sistema tecnico come sede dell'interazione uomini-macchine (fondamentale nei pionieri dell'ingegneria del controllo, come Wiener), sia l'analogia con l'essere umano (che ispirò alcuni dei pionieri dell'informatica, come von Neumann). Di conseguenza, facevano la loro comparsa nell'ambito tecnologico concetti come quello di discernimento/decisione (*judgement*).

La parola è in sé molto generale [...come ad esempio] il “sistema solare” e “il sistema nervoso”, in cui la parola concerne assetti particolari di materia; vi sono anche sistemi filosofici, sistemi per vincere alle corse, e sistemi politici; vi sono i sistemi isolati della termodinamica, il Sistema Centrale della città di New York, e i vari sistemi zoologici.

Il Sistema di Difesa Aerea ha punti in comune con molti di questi vari tipi di sistemi. Ma fa anche parte di una categoria particolare di sistemi: la categoria degli organismi [... definiti come] “una struttura composta di parti distinte costituita in modo tale che il funzionamento delle parti e le loro relazioni reciproche è governata da la loro relazione con il tutto”. L'accento non è soltanto sullo schema e sull'assetto, ma su questi in quanto determinati dalla funzione, un attributo desiderato nel Sistema di Difesa Aerea.

Il Sistema di Difesa Aerea, quindi, è un organismo [...] Che cosa sono gli organismi? Ve ne sono di tre tipi: gli organismi animati, fra cui gli animali e i gruppi di animali, incluso l'uomo; gli organismi in parte animati, che coinvolgono animali insieme con dispositivi inanimati, come nel Sistema di Difesa Aerea; e gli organismi inanimati come i distributori automatici. Tutti questi organismi posseggono in comune: componenti sensori, impianti di comunicazione, dispositivi di analisi dei dati, centri di discernimento, direttori dell'azione, e effettuatori, ossia agenti esecutivi [...]

È funzione di un organismo [...] il raggiungimento di un dato fine.

[Tratto da "Air Defense System: ADSEC Final Report", citato in Hughes 2000: 21-22]

La progettazione di SAGE fu sviluppata inizialmente secondo l'impostazione tradizionale dell'ingegneria, ossia come un insieme di singoli problemi di progettazione e di produzione delle sue componenti. Beninteso, le sole forze del MIT non bastavano a far fronte all'enorme varietà di problemi coinvolti nell'iniziativa, sia per quanto riguarda lo sviluppo tecnologico, sia la produzione industriale degli elementi. Ad esempio, quando si arrivò al passaggio dal computer Whirlwind alla progettazione di prototipi volti alla produzione industriale fu coinvolta l'azienda IBM, che trasse enorme vantaggio da questa esperienza, in termini di conoscenze e di ricavi successivi: si trattò di una delle prime esperienze di produzione in serie di computer (alcune decine di computer AN/FSQ-7 che dovevano essere installati nei centri direzionali dei vari settori di SAGE). Un altro problema riguardava la programmazione dei computer. Anche qui il MIT si rivolse altrove: se ne occupò prima la RAND, e fu poi creata, sul modello di quest'ultima, la System Development Corporation, che si occupò anche della formazione del personale per i centri di direzione delle operazioni.

Negli anni successivi, tuttavia, si rese sempre più evidente che il buon funzionamento dell'intero progetto, sia nelle fasi di pianificazione e di realizzazione, sia quando esso entrasse in funzione, presentava una complessità tale da non poter essere lasciato al buon senso o alle soluzioni caso per caso. Oltre agli aspetti legati direttamente all'elaborazione dell'informazione e a quelli relativi al controllo degli armamenti, sui quali si era concentrato il Laboratorio Lincoln, vi erano quelli relativi alla progettazione e costruzione dei centri operativi, degli impianti radar, della rete telefonica, degli aerei, dei missili terra-aerea e degli altri sistemi d'arma; e ognuno di questi era la responsabilità di un appaltatore fra le aziende industriali (fra cui Western Electric, Bendix Radio, i Laboratori Bell o Boeing), il quale aveva a sua volta altri subappalti. Tuttavia, da questo punto di vista, il progetto SAGE fu un esperimento pilota. La consapevolezza dell'esistenza di un problema gestionale e organizzativo di base emerse lentamente, e questa circostanza fu alla radice di molti disfunzio-

ni, che, come ha scritto Thomas Hughes, spiegano in parte il suo relativo insuccesso. D'altra parte, in quegli anni la stessa giovane Air Force si confrontava con continui problemi di coordinamento dei vari progetti e delle varie unità militari create per la loro supervisione.

Solo nel 1958 fu affrontato finalmente il problema gestionale e organizzativo riguardante SAGE, con la creazione di una nuova azienda, ancora una volta *nonprofit*, MITRE Corporation, alla quale si trasferirono molti ricercatori che avevano lavorato nel gruppo di Forrester. Questa decisione era difatti un'eco delle riflessioni sorte nell'ambito di un'altra ambiziosa iniziativa dell'AF, il progetto di sviluppo del missile ballistico intercontinentale Atlas (Atlas ICBM), il primo fra i sistemi missilistici americani che segnarono gli equilibri militari e politici internazionale del periodo centrale della Guerra Fredda. Infatti, il bilancio del progetto SAGE nell'ambito delle tecnologie mette in evidenza, come ha mostrato Hughes, che esso diede un enorme contributo allo sviluppo dell'informatica (tecnologia dell'elaboratore elettronico digitale e programmazione) e dell'automazione (la sostituzione dell'uomo nella trasmissione e nell'analisi delle informazioni e anche l'azione umana di comando nelle operazioni di difesa antiaerea); mentre per quanto riguarda il coordinamento, ossia il controllo in senso organizzativo e operativo, esso servì essenzialmente a rendere palese l'esigenza di nuove tecnologie dell'organizzazione.

13.4 Tecnologie organizzative e cultura del controllo: dall'ingegneria delle macchine all'ingegneria dei sistemi

Dal punto di vista dell'evoluzione della questione organizzativa, il sistema SAGE, o per meglio dire il progetto SAGE, rappresentò forse il culmine di una lunga preistoria di grandi progetti tecnici che costellano la storia dell'ingegneria civile, dell'ingegneria militare e dell'ingegneria industriale. Gli Stati Uniti si imbarcarono allora in un'iniziativa che riguardava la sicurezza di un paese che occupava quasi un continente, nella quale furono impegnati fondi ingenti, che coinvolse l'industria nazionale più potente del mondo e fu pensata da una cultura tecnica ricca e ambiziosa. L'entità e la portata di tale iniziativa furono scoperte man mano che essa si sviluppava, e il motore del suo sviluppo furono le singole tecnologie riguardanti le componenti materiali del sistema. In contrasto con quest'esperienza, nel progetto Atlas ICBM l'attenzione fu posta molto presto sul problema organizzativo, ossia sugli aspetti manageriali che erano essenziali per la buona riuscita del progetto. Infatti, in questo caso l'iniziativa che ci si accingeva a intraprendere poneva in primo piano i problemi di gestione di un progetto volto alla realizzazione di un prodotto tecnico complesso quale il sistema d'arma che si voleva mettere a punto.

Il comitato di valutazione dei missili strategici stabilito nel 1953 dall'AF, oltre a dare un parere positivo sull'opportunità di iniziare il progetto, concentrò subito l'attenzione sull'esigenza di considerare il problema organizzativo come problema tecnologico a sé stante, e discusse l'opportunità di fondare a tale

scopo un'istituzione parauniversitaria, oppure di incaricare la pubblica amministrazione di un tale compito, decidendo infine per l'affidamento a un'azienda privata di consulenza. La scelta cadde su un'azienda, la Ramo-Wooldridge Corporation, creata da due membri del comitato, gli ingegneri Simon Ramo (n. 1913) e Dean E. Wooldridge (1913-1985). Subito dopo, nel 1954, il comitato decise di modificare il proprio nome in ICBM Scientific Advisory Committee, scelse von Neumann come presidente e affidò alla Ramo-Wooldridge tutti gli aspetti gestionale legati al progetto: dalle stesse riunioni del comitato von Neumann alla concezione globale del progetto del sistema missilistico, dalle specifiche dei contratti con le varie aziende titolari degli appalti, fino al coordinamento generale e le valutazione dell'andamento del progetto.

La decisione di questa commissione ebbe un impatto culturale forte sull'ingegneria, ed in particolare sui settori di punta, emblematici dell'ingegneria del Novecento. Come ha scritto Hughes, si trasferiva in questo modo il ruolo di coordinamento e gestione che era stato spesso riservato alle aziende del settore aeronautico, in qualità di titolari dell'"appalto principale" per conto dell'AF, alle aziende del settore elettronico: "Raccomandando che la Ramo-Wooldridge agisse come ingegnere di sistemi, il comitato aveva sostituito gli ingegneri familiarizzati con la pratica tradizionale nel campo dell'ingegneria aeronautica con scienziati e ingegneri di formazione scientifica e con particolarmente esperienza in elettronica e informatica. Per il comitato, la struttura aeronautica era meramente una piattaforma per portare sistemi complessi di guida elettronica e controllo di tiro" (Hughes 2000: 98). Quindi si spingeva verso la creazione di un approccio teorico ai problemi manageriali tagliato sul modello della nuova ingegneria elettronica, informatica e dei controlli automatici.

Questo modello includeva – lo abbiamo visto nel paragrafo precedente – due elementi fondamentali. Da una parte, si partiva da un approccio globale ai problemi in termini di sistema e contrassegnato dal pensiero tecnologico del "controllo". Dall'altra, l'accento veniva posto, in ogni singolo problema, sull'individuazione delle strutture logiche e matematiche sottostanti, e quindi si sceglieva un modo di confrontarsi con la realtà materiale concreta che faceva uso di uno schermo teorico astratto. La distanza fra questo modello epistemologico e quello dell'ingegneria precedente fu sottolineato in quegli anni parlando del passaggio dall'"ingegneria delle macchine all'ingegneria dei sistemi". Dalla prospettiva che abbiamo acquisito nel nostro percorso attraverso la storia dell'ingegneria, questo passaggio rappresenta l'inizio di una terza fase nell'evoluzione del pensiero tecnico sulla Natura e sull'artificiale, dopo quella dell'ingegneria classica e quella dell'ingegneria moderna, quasi un'ingegneria "modernista" o "postmoderna". Come nei casi precedenti, la trasformazione del pensiero dell'ingegnere fu accompagnata da un riposizionamento della figura professione dell'ingegnere.

Ovviamente questa trasformazione fu il frutto di molti contributi individuali e della stessa evoluzione delle tecnologie, non solo negli Stati Uniti. Tuttavia, non vi è dubbio che il comitato Atlas ICBM ebbe un ruolo significativo in questo processo. Al riguardo, basta esaminare la sua composizione – nelle

due fasi che abbiamo descritto – che può essere considerata rappresentativa dell'élite tecnico-scientifica della costa ovest degli Stati Uniti, in contrasto con il gruppo del MIT coinvolto nel progetto SAGE, che rappresentava invece la potente area culturale del nord-est del paese. Oltre a von Neumann e un gruppo di fisici e ingegneri professori del California Institute of Technology – generalmente considerato portabandiera di un approccio scientifico ai problemi della tecnica –, ne furono membri il presidente della RAND, Frank Collbohm, l'ingegnere e professore del MIT Jerome Wiesner (n. 1915, futuro rettore del MIT e consulente per la scienza del presidente Kennedy); e alcuni ingegneri di aziende private, come gli stessi Ramo e Wooldridge, e soprattutto Bode, dei Laboratori Bell. Il progetto SAGE era partito da un tentativo ancora debole di esplorazione della visione astratta di sistema, e si era subito indirizzato verso lo sviluppo e la progettazione delle componenti "reali" del sistema, concepito ancora intuitivamente, sulla base delle immagini ereditate dall'implementazione del radar durante la Seconda Guerra Mondiale. Il progetto ICBM partiva invece sotto la spinta di una richiesta forte di un approccio teorico di tipo scientifico, impostato da studiosi come Bode e von Neumann, che avevano sviluppato la visione dei processi materiali (rispettivamente nelle comunicazioni e nell'elaboratore elettronico) attraverso diagrammi di flusso e circuiti di retroazione di impulsi e segnali portatori di informazione.

L'impostazione del comitato trovò piena accoglienza nel responsabile militare del progetto Atlas ICBM, Bernard Schriever (n. 1910, nato a Brema in Germania e diventato cittadino americano nel 1923). Sotto la direzione di Schriever – esperto pilota e con una formazione da ingegnere militare – lo sviluppo del progetto Atlas ICBM e le sue fasi successive (i missili Titan e Minuteman), e in particolare il lavoro della Ramo-Wooldridge, ebbero un ruolo pionieristico nella creazione della figura dell'"ingegnere dei sistemi", concepita come un'evoluzione della figura dell'ingegnere esperto in elettronica, automazione e informatica, arricchito da una competenza specifica delle tecniche gestionali: quindi una figura professionale straordinariamente complessa, in corrispondenza alle responsabilità che gli venivano affidate in progetti e sistemi complessi. Nei settori di avanguardia dell'industria americana, sotto l'impulso delle commesse militari, negli anni Cinquanta e Sessanta del Novecento l'ingegnere recuperava quindi parte delle competenze gestionali che nei decenni precedenti erano state affidate ai manager, interpretandole però in un modo diverso, ossia all'interno della tradizione gestionale della cultura tecnica e soprattutto secondo il pensiero tecnologico tipico delle discipline di appartenenza.

L'ingegnere dei sistemi aveva a sua disposizione, in primo luogo, le varie tecniche gestionali sviluppate nei decenni precedenti dalle varie scuole in ambito manageriale, con il quale vi fu un'interazione con influenze reciproche. In quegli anni gli ingegneri si volsero di nuovo verso le questioni di economia e di *management science*: sappiamo che non si trattava di una novità assoluta, bensì di un "ritorno di fiamma" di una lunga tradizione di interesse per le questioni *soft* – gestione di progetti, organizzazione industriale, economia applli-

cata ed economia teorica – che abbiamo seguito fino a Fayol e Taylor e che all’inizio del Novecento si era interrotta per un certo periodo, un periodo di concentrazione sulle tecnologie *hard*. D’altra parte, gli anni della stella ascendente del taylorismo, della cultura manageriale e della gestione scientifica del lavoro erano stati un periodo straordinariamente creativo nell’ambito tecnologico, che aveva visto gli ingegneri confrontarsi con il problema del controllo dei sistemi artificiali di ogni genere. Questo nuovo avvicinamento ai problemi operativi, dopo tanti tentativi rimasti isolati, portò infine alla creazione di ciò che possono bene essere definite le «tecnologie organizzative» dell’ingegnere, un dei frutti intellettuali della cultura del controllo che si diffuse negli Stati Uniti e nelle società industrializzate negli anni della Guerra Fredda. Due aspetti importanti della cultura del controllo contribuirono a forgiare le nuove tecnologie organizzative: da una parte, le tecniche di programmazione matematica – vale a dire, le tecniche di pianificazione basate sull’ottimizzazione, la cui origine abbiamo seguito nel capitolo 12 – e, dall’altra, le tecniche derivate dal trasferimento dei modelli dell’ingegneria di controllo ai problemi gestionali.

La continuità con la tradizione precedente si manifestò infatti nel risorgere, e questa volta in modo deciso e destinato a consolidarsi, di un approccio matematico a tali questioni. L’ambito disciplinare, potremmo quasi dire “l’etichetta” sotto cui si raccolsero le nuove tecnologie organizzative di stampo ingegneristico, fu quella della ricerca operativa, che per prima, nel periodo bellico, aveva raccolto l’eredità dell’idea di un approccio scientifico-sistematico ai problemi operativi legati all’impiego delle tecniche. Negli anni Cinquanta furono esplorate intensamente le potenzialità di tale approccio in contesti militari diversi dal teatro di guerra, ossia nei grandi progetti e sistemi che abbiamo visto svilupparsi durante la Guerra Fredda; e anche in ambito civile, nella produzione di beni e servizi. Ciò che era stato inizialmente un progetto di azione guidato dagli strumenti scientifici di fronte all’emergenza diventò progressivamente una vera e propria disciplina fortemente matematizzata.

Questa trasformazione può essere seguita attraverso i testi di ricerca operativa pubblicati nel dopoguerra. Infatti, sotto la stessa etichetta, nel giro di pochi anni vedevano la luce libri con contenuti molto diversi, preceduti da introduzioni dove gli autori proponevano riflessioni su un’evoluzione che essi stessi contribuivano a forgiare (Rider 1994). L’esperienza bellica del gruppo di ricerca operativa del MIT fu raccolta subito dopo la fine della guerra in un saggio di Morse, in collaborazione con George E. Kimball (1906), che circolò per alcuni anni coperto dal segreto militare e nel 1951 fu pubblicato da MIT University Press e l’editore Wiley sotto il titolo *Methods of operations research*. Il libro era strutturato attorno a grandi problemi operativi militari (misure di efficienza, analisi tattica di misure e contromisure, valutazione delle armi e dei loro usi, organizzazione e procedure), mostrando per ognuno di essi l’impostazione sistematica del problema e gli strumenti scientifici di analisi, con l’uso quindi di formule matematiche e di analisi statistiche. Morse fu il primo presidente dell’Operation Research Society of America (ORSA), creata nel 1952

insieme al suo giornale, che era in origine un'associazione interdisciplinare. Negli anni Cinquanta il numero dei suoi membri crebbe velocemente, come anche le pubblicazioni sull'argomento, e furono creati corsi di ricerca operativa in alcune università e politecnici.

Nel 1957 fu pubblicato un libro derivato in parte da un corso che si svolgeva da vari anni presso il Case Institute of Technology (a Cleveland, nell'Ohio), *Introduction to operations research*, strutturato dagli autori – C. West Churchman (n. 1913), Russell L. Ackoff (n. 1919) e E. Leonard Arnoff – attorno ad alcuni problemi operativi generali, quali l'allocazione e l'analisi delle attività, la tempificazione, le code o la gestione delle scorte. Il legame fra le situazioni operative concrete in ogni ambito (militare, industriale, amministrativo) e gli strumenti teorici era costituito da una metodologia basata sulla costruzione di un modello corrispondente alla natura del problema, e il libro forniva anche orientamenti per implementare e trattare i dati nei casi applicativi.

La definizione generale dei problemi operativi era basata sull'individuazione della struttura matematica soggiacente a vari gruppi di problemi. I primi fra questi erano quelli trattati con le tecniche della programmazione lineare, che negli anni Cinquanta ebbero un grande sviluppo, usando sia tecniche algebriche (matrici e disuguaglianze) sia la formulazione in termini di teoria dei grafi già adoperata dei problemi di trasporto, che portò alla creazione dell'analisi delle reti di flusso. Molte di queste ricerche furono condotte presso la RAND – ne è un esempio importante il libro *Flows in networks* (1962) di Lester R. Ford (n. 1927) e Delbert Ray Fulkerson – e in collegamento con i grandi progetti militari, come nel caso della tecnica di gestione di progetti nota come PERT (Program Evaluation and Review Technique, tecnica per la valutazione e revisione di progetto). PERT fu sviluppato nel 1958 da una ditta di consulenza gestionale, Booz, Allen & Hamilton, per conto della Marina statunitense, per la gestione del progetto di sviluppo del missile Polaris (un missile a medio raggio lanciato dai sottomarini). Questo strumento organizzativo, volto al controllo dei tempi di realizzazione dei progetti condotti in condizioni di incertezza anche perché legati allo sviluppo tecnologico, analizzava il flusso di attività sfruttando le potenzialità del computer. Esso ebbe un enorme successo anche nell'industria – insieme al CPM (Critical Path Method, metodo del percorso critico) sviluppato da J. E. Kelley nello stesso periodo per la gestione dei tempi e dei costi nella costruzione degli impianti chimici dell'azienda E. I. Dupont de Nemours – e stimolò l'interesse della cultura manageriale per gli strumenti matematici e statistici (Sapolsky 1972).

Al filone della programmazione matematica applicata alla gestione di progetti e alla pianificazione industriale si aggiunse negli anni Cinquanta quello delle tecniche di gestione basate sull'uso degli strumenti dell'ingegneria di controllo, iniziate con lo sviluppo delle tecniche di gestione delle scorte, in inglese *inventory control* (Klein 1999). Nel 1952 l'economista Herbert Simon (1916-2001) pubblicò nella rivista «Econometrica» un articolo intitolato “On the application of servomechanism theory in the study of production control”. Insieme all'ingegnere elettrico Charles C. Holt e altri colleghi della

School of Industrial Administration fondata nel 1949 presso il Carnegie Institute of Technology (a Pittsburgh, in Pennsylvania), egli sviluppò il “servomechanism approach” nell’ambito di un contratto con la Marina statunitense sulla pianificazione e controllo della produzione industriale: si trattava di considerare il problema in termini di sistema, costruire le equazioni differenziali che lo governano e applicare tecniche e concetti dell’ingegneria di controllo. Nel corso di queste ricerche fu applicato il modello EWMA (Exponentially Weight Moving Average), sviluppato per fare previsioni dei movimenti del velivolo nemico nel controllo del tiro aria-aria, ai problemi di previsione legati alle scorte e la pianificazione della produzione.

I vari strumenti che abbiamo menzionato diventarono progressivamente parte della ricerca operativa, contribuendo a creare il suo nuovo profilo come disciplina matematica, ossia come insieme di modelli matematici e strategie nella risoluzione di problemi, di interesse per ingegneri e dirigenti aziendali. Nei libri di testo si riscontra progressivamente l’affermarsi di alcune tecniche fondamentali, divise in grandi gruppi secondo il tipo di problema considerato in astratto e anche secondo l’approccio matematico scelto: tecniche deterministiche/probabilistiche, ottimizzazione continua/combinatoria, programmazione lineare/non lineare. I contatti interdisciplinari che erano alla base del suo sviluppo portarono progressivamente alla visione della ricerca operativa come una scienza economico-sociale applicata, suscettibile di essere usata nei problemi gestionali dei sistemi di produzione di beni e servizi, dei sistemi amministrativi e dei sistemi sociali.

Il trasferimento dei modelli matematici della teoria del controllo dai dispositivi di tiro, non soltanto a problemi relativi ai magazzini e alle scorte, ma anche ai problemi teorici del funzionamento dell’economia, è un esempio molto significativo della metodologia modellistica tipica della matematica applicata moderna, basata sull’analogia matematica. Tale metodologia, come abbiamo visto nel capitolo 12, invalidava gli ostacoli epistemologici che avevano intralciato nell’Ottocento lo sviluppo delle tecnologie matematiche dell’organizzazione. Tuttavia, questo trasferimento non fu basato soltanto sull’uso “pragmatico” dei modelli. In realtà, esso ebbe delle connotazioni filosofiche forti, in quanto fu animato dal rinascere della visione dell’uomo come macchina, quell’idea di stampo materialistico che ha alle spalle una lunga storia, che aveva avuto molti sostenitori nel Settecento ed era stata oggetto di radicale rifiuto nell’Ottocento. La visione dell’uomo – e dell’animale – come macchina ha accompagnato lo sviluppo del macchinismo e si è manifestata anche attraverso le immagini forti degli automi e dei robot. In particolare, lo sviluppo dell’ingegneria di controllo, lo abbiamo visto, aveva avuto presto al proprio centro l’uomo come esempio da emulare con le macchine oppure da migliorare e sostituire con esse.

Dall’esperienza durante la Seconda Guerra Mondiale, con la fusione delle esperienze tecniche nel campo delle comunicazioni e del controllo, e anche dagli scambi con studiosi del sistema nervoso umano, Wiener trasse ispirazione per la stesura di un saggio che ebbe un grande influsso negli anni

Cinquanta e Sessanta, intitolato *Cybernetics: control and communication in the animal and the machine* (1948). Egli assegnava un ruolo fondamentale nella comprensione dei comportamenti intenzionali agli anelli di retroazione, facendo ricorso all'immagine classica negli studi sul controllo del timoniere (in greco *kybernetes*). Attorno alle idee di Wiener si era raccolto un gruppo di ricerca formato da scienziati, ingegneri, medici e studiosi delle scienze sociali e umane, che lavorava allo sviluppo di una nuova disciplina trasversale, la cibernetica, che nelle intenzioni dei suoi sostenitori doveva portare la scienza su terreni inesplorati, quelli del cervello umano, del comportamento e dei sistemi sociali complessi. Le idee della cibernetica ebbero molta diffusione fra gli ingegneri, in particolare fra quelli che guardavano con interesse alla creazione di una nuova ingegneria dei sistemi.

L'eco dell'analogia uomo-macchina si ritrova in questo periodo anche nelle ricerche volte ad applicare i modelli matematici dell'ingegneria di controllo ai problemi economici generali, e quindi a confrontare i processi di controllo economico con quelli tecnologici. La loro impostazione è efficacemente riassunta dal titolo di un libro dell'ingegnere britannico Arnold Tustin (1899-1994), professore dell'università di Birmingham, riguardante l'applicazione dei metodi per lo studio della stabilità sviluppati in ambito tecnologico alla stabilità del mercato, *The mechanism of economic system. An approach to the problem of economic stabilisation from the point of view of control-system engineering* (1954). Tustin è un esempio fra tanti di ingegneri autori di importanti contributi alla teoria dei sistemi e del controllo che si impegnarono attivamente a diffondere le loro idee fra gli economisti, e che ebbero una forte attrazione verso l'idea di esplorare l'economia e la società dal punto di vista dell'ingegneria dei sistemi. Quanto agli economisti, l'organizzazione della ricerca nel periodo della Seconda Guerra Mondiale e i finanziamenti militari nel dopoguerra li misero a contatto con tecniche matematiche come la programmazione lineare e la teoria dei sistemi e del controllo applicate ai problemi reali della pianificazione, la previsione e la gestione delle scorte. Essi le accolsero con entusiasmo e le applicarono nel seguito anche ai problemi dell'economia teorica.

Nel settembre del 1952 la rivista di divulgazione scientifica «Scientific American» uscì con un numero monografico dedicato ai controlli automatici (Klein 2001). Esso includeva un articolo di Tustin sul concetto di feedback e sulle sue potenziali applicazioni allo studio del fenomeno dell'autoregolazione non solo nelle macchine ma anche nei processi vitali e negli affari umani. Ma vi si trovava ancora un altro, scritto da un'illustre economista, Wassily Leontief, dal titolo "Machines and man": l'economia industriale funziona come un meccanismo di feedback, affermava Leontieff, e quindi non poteva sorprendere ai suoi lettori che gli economisti moderni facessero ricorso agli stessi sistemi di equazioni differenziali adoperati dai progettisti di servomeccanismi. Il numero era costellato di pubblicità entusiaste di ditte come Sperry, Ford Instrument Company, Douglas e Industrial Control, Inc. che si preparavano a confrontarsi con le sfide dell'automazione industriale.

Lettura 16

L'approccio sistemistico: scienza dei sistemi e tecnologia dei sistemi

Nel 1967 il biologo di origine austriaca Ludwig von Bertalanffy (1901-1972) pubblicò un saggio intitolato *General system theory*, nel quale prendeva spunto dagli sviluppi della teoria matematica dei sistemi dinamici nella biologia, nella tecnologia e nell'economia per proporre una nuova filosofia scientifica che doveva sostituire o complementare il pensiero riduzionista, ossia la decomposizione analitica e la ricerca del semplice, con un pensiero "olistico", ossia la ricomposizione sintetica e l'indagine del complesso, quindi del "sistema". Il libro cercava di contrastare il riduzionismo della biologia molecolare allora in auge, e più in generale, com'egli scriveva, "le teorie dichiaranti che la realtà è un *nient'altro che* (un cumulo di particelle fisiche, geni, riflessi, istinti e via dicendo)". Alcuni studiosi affermano che von Bertalanffy era stato influenzato dal pensiero di Bogdanov (che circolò anche nell'area europea di lingua tedesca prima della guerra), autore che, tuttavia, egli non menzionava. Egli prendeva invece spunto dal modo in cui, nella prima metà del Novecento, gli ingegneri e gli studiosi di ricerca operativa si erano confrontati con categorie come quella di "finalità" e soprattutto quella di "organizzazione" (un concetto in origine quasi esclusivamente inteso in senso biologico), senza rinunciare all'impalcatura matematica. Il libro ebbe molto impatto fra gli studiosi delle scienze sociali e fra gli ingegneri, i quali vedevano assegnare all'ingegneria dei sistemi un ruolo-guida epistemologico nella comprensione dei fenomeni mai prima di allora riconosciuto al pensiero tecnico.

Nella sfera del pensiero scientifico stanno entrando degli enti di un tipo essenzialmente nuovo. La scienza classica, nelle sue varie discipline (chimica, biologia, psicologia o scienze sociali), tentava di isolare gli elementi dell'universo osservato – composti chimici ed enzimi, cellule, sensazioni elementari, individui in libera competizione, e altro ancora – sperando che, nel rimettere insieme tali elementi, concettualmente o sperimentalmente, si potesse ottenere, rendendolo intelligibile, il complesso, ovvero il sistema – e poteva trattarsi della cellula, della mente o della società. Ora abbiamo imparato che, al fine della comprensione, non sono necessari solamente gli elementi, ma anche le loro interrelazioni: e cioè l'interagire degli enzimi entro una cellula e quello di molti processi mentali consci oppure inconsci, nonché la struttura e la dinamica dei sistemi sociali e via dicendo. E questo rende necessaria un'opera di ricerca sui vari sistemi esistenti nel nostro universo osservato, tenendo conto della loro specificità e della loro legittimità. Inoltre, si scopre che esistono degli aspetti generali, delle corrispondenze e degli isomorfismi che sono comuni a tutti i "sistemi". Ed è questo il regno della *teoria generale dei sistemi*; questi parallelismi e questi isomorfismi appaiono infatti – a volte in modo sorprendente – in sistemi che, sotto altri aspetti, sono tra di loro completamente diversi. La teoria generale dei sistemi costituisce allora l'esplorazione scientifica del "tutto" e della "globalità", e cioè di nozioni che, sino a non molto tempo fa, erano considerate metafisiche e tali da trascendere i confini delle scienze. Per trattare queste nozioni sono stati sviluppati concetti, modelli e campi matematici interamente nuovi, come la teoria dei sistemi dinamici, la cibernetica, la teoria degli automatismi, l'analisi dei sistemi mediante le teorie degli insiemi, delle reti e dei grafi, e così via.

Un secondo regno è quello della "tecnologia dei sistemi", e cioè quello costituito dai problemi che sorgono nella tecnologia e nella società moderna, comprendendo l'"indirizzo pesante" dei calcolatori, dell'automazione, dei dispositivi autoregolanti, ecc., e l'"indirizzo leggero" dei nuovi sviluppi e delle nuove discipline in campo teorico.

La tecnologia e la società moderne sono diventate così complesse che i metodi e gli strumenti tradizionali d'indagine non sono più sufficienti, e sono diventate necessarie forme d'approccio ai problemi che hanno una natura olistica o fondata sui sistemi, generalizzante e interdisciplinare. Il che è vero sotto molti punti di vista. Abbiamo dei sistemi, a molti livelli, che necessitano di un controllo scientifico: ecosistemi, la cui perturbazione produce come risultato il sorgere di pressanti problemi, come quelli dell'inquinamento; organizzazioni formali, come un apparato burocratico, un sistema educativo o un esercito; gravi problemi che appaiono nei sistemi socio-economici, nelle relazioni internazionali, in politica e nella questione del deterrente bellico. Indipendentemente dalle questioni vertenti sul punto raggiungibile alla comprensione scientifica (cui si oppone l'ammissione dell'irrazionalità degli eventi culturali e storici), e sui limiti entro i quali sia possibile realizzare un controllo scientifico (o se addirittura un tale controllo sia da desiderare), non c'è ombra di dubbio sul fatto che questi siano essenzialmente dei problemi connessi ai sistemi, e cioè dei problemi di interrelazione fra un gran numero di "variabili". Lo stesso è vero in riferimento a questioni più ristrette, come quelle che si incontrano nei settori dell'industria, del commercio e dell'armamento. Le esigenze di tipo tecnologico hanno portato a nuove concezioni e a nuove discipline: in parte almeno, queste ultime hanno una grande originalità e stanno introducendo nuove nozioni fondamentali, come la teoria del controllo e dell'informazione, le teorie dei giochi e delle decisioni, le teorie dei circuiti, ecc. Ed ancora una volta la caratteristica comune è stata quella che tutte queste teorie sono state i frutti di determinati e concreti problemi tecnologici, ma che i modelli, le concettualizzazioni e i principi – quali, ad esempio, i concetti di informazione, retroazione, controllo, stabilità, teoria dei circuiti, ecc. – hanno superato di gran lunga i confini delle specializzazioni, sono stati di natura interdisciplinare e si sono rivelati come indipendenti dalle loro realizzazioni in campi particolari, come viene esemplificato dai modelli isomorfi di retroazione nei sistemi meccanici, idrodinamici, elettrici, biologici ecc. [...]

Si ha, in terzo luogo, una *filosofia dei sistemi*, e cioè un nuovo orientamento del pensiero e dell'elaborazione di un'immagine del mondo che segue all'introduzione del "sistema" come nuovo paradigma scientifico (in contrasto con il paradigma analitico, meccanicista e dotato di una causalità unidirezionale, paradigma che è caratteristico della scienza classica). Come ogni teoria scientifica di vasta portata, anche la teoria generale dei sistemi ha i suoi aspetti "metascientifici", o filosofici. Il concetto di sistema costituisce un nuovo paradigma, per usare il modo di esprimersi di Thomas Kuhn, oppure, nel linguaggio del presente autore, una "nuova filosofia della natura", che combatte le "cieche leggi della natura" della concezione meccanicista del mondo e il modo di intendere il processo naturale quasi si fosse al livello di una favola di Shakespeare narrata a un idiota, servendosi, per far questo, di una concezione organicista del "mondo come grande organizzazione".