

---

# *Matematica, Cultura e Società*

RIVISTA DELL'UNIONE MATEMATICA ITALIANA

---

SILVIA BENVENUTI, LINDA PAGLI

## **Refrigerator Ladies**

*Matematica, Cultura e Società. Rivista dell'Unione Matematica Italiana, Serie 1, Vol. 1*  
(2016), n.1, p. 51–64.

Unione Matematica Italiana

[<http://www.bdim.eu/item?id=RUMI\\_2016\\_1\\_1\\_1\\_51\\_0>](http://www.bdim.eu/item?id=RUMI_2016_1_1_1_51_0)

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

---

*Articolo digitalizzato nel quadro del programma  
bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica)*

*SIMAI & UMI*

<http://www.bdim.eu/>



# Refrigerator Ladies

Silvia Benvenuti

Università di Camerino

E-mail: [silvia.benvenuti@unicam.it](mailto:silvia.benvenuti@unicam.it)

Linda Pagli

Università di Pisa

E-mail: [linda.pagli@unipi.it](mailto:linda.pagli@unipi.it)

**Sommario:** *L'ENIAC, primo computer elettronico, digitale, general purpose, faceva parte di un progetto segreto del ministero della difesa degli Stati Uniti durante la seconda guerra mondiale. Sei giovani matematiche ne progettarono tutto il software pur non avendo a disposizione linguaggi di programmazione, né manuali e nemmeno sistemi operativi; senza conoscerne l'architettura, divennero esperte del nuovo computer e programmarono con successo complicati calcoli balistici di traiettorie, fondando la moderna programmazione.*

*Nel 1946, con l'esecuzione del primo programma, il progetto divenne pubblico ed ebbe enormi ripercussioni sulla stampa, ma il successo dell'ENIAC fu attribuito solo agli ingegneri che lo costruirono. La storia delle ragazze programmatrici si perse. Per lungo tempo le giovani donne fotografate all'epoca insieme all'enorme marchingegno pieno di cavi e spinotti furono scambiate per modelle ritratte accanto a un elettrodomestico!*

*Fu una programmatrice di Harvard che, negli anni ottanta, ricostruì la storia, intervistando direttamente alcune di loro e mettendo in luce l'incredibile lavoro che furono in grado di portare avanti.*

**Abstract:** *The ENIAC, the first electronic, digital, general purpose, computer, was part of a secret project of the US defense during World War II. Six young women mathematicians planned its software, while programming languages, or even manuals and operating systems, were not available; without knowing the architecture of the new computer, they became familiar with it and they performed complicated calculations of ballistic trajectories, founding this way the modern programming.*

*In 1946, with the execution of the first program, the project became public and had enormous reverberations in the press, but the ENIAC's success was attributed only to the engineers who built it. The history of its programmer girls got lost. For a long time the young women photographed together with the huge machinery full of plugs and wires were confused with models posing next to an electrical appliance!*

*Eventually, in the eighties, an Harvard programmer rebuilt the story, interviewing some of them directly and highlighting the incredible work they were able to carry on.*

## 1. – Introduzione

L'ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) è stato il primo computer elettronico digitale *general purpose* della storia: i risultati del primo programma funzionante risalgono al 1946. Tante le foto in bianco e nero: mostrano stanzoni tappezzati di armadi bucherellati, grovigli di fili penzo-

loni e alcune giovani donne che ci armeggiano, tutte rigorosamente in gonnella, secondo la moda dei tempi. L'ENIAC era un *mostro* di 180 metri quadri e 30 tonnellate, che conteneva 18.000 valvole e produceva un calore infernale e un pessimo odore di fili scaldati. Assorbiva tanta di quella energia elettrica che la prima volta che è stato messo in funzione ha provocato un *black out* in un quartiere intero di Filadelfia; era stato progettato per eseguire in modo velocissimo complicati calcoli matematici e ha rappresentato il primo tentativo di computer di successo.

---

*Accettato:* il 14 marzo 2016.

La presenza delle giovani donne, nelle fotografie dell'epoca (figura 1), lo ingentilisce, dandone un'impressione più casalinga, quasi di un elettrodomestico. Infatti vennero chiamate "Refrigerator ladies", le signore del frigorifero, così l'immagine di un'apparecchiatura tecnologica accanto a giovani donne viene automaticamente interpretata con la chiave di lettura dei tempi, cioè con le ragazze a occuparsi (seppur in modo moderno) dei lavori di casa. Però quelle ragazze non erano né modelle della pubblicità, né reali casalinghe: erano fior fiore di matematiche, selezionate nelle migliori università, assoldate per far fronte a un compito difficilissimo [5]. Ma raccontiamo la storia dall'inizio.

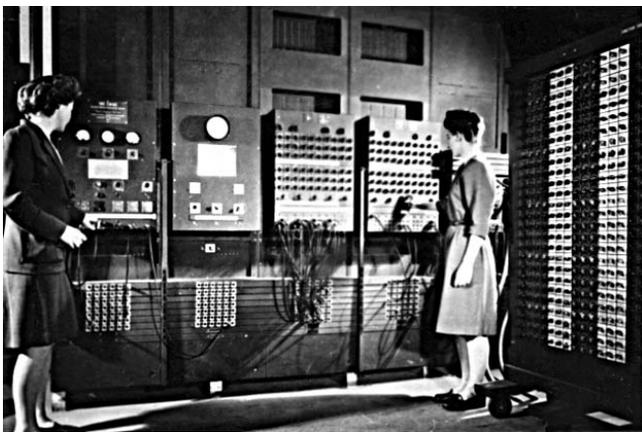


Fig. 1. – Calcolatrici al lavoro sull'ENIAC: si riconoscono a sinistra Betty Jennings e a destra Frances Bilas, CREDITS: United States Army [Public domain], via Wikimedia Commons.

### 1.1 – I calcolatori umani e la balistica della seconda guerra mondiale

Durante la seconda guerra mondiale un gruppo cospicuo di circa duecento persone, per lo più donne, fu impiegato dal ministero della difesa americano come *computer*, parola che a quei tempi significava persona capace di eseguire senza errori complicati calcoli matematici. Tanti uomini erano in guerra, dunque la maggioranza del gruppo era costituita da donne, giovani matematiche selezionate nelle università dell'area di Baltimora e Filadelfia. La convinzione di quei tempi era che le donne fossero particolarmente adatte a un lavoro complesso, ma tedioso e ripetitivo, e che lo svolgessero in modo più accurato e veloce dei colleghi

maschi [19, 2], peraltro poco disponibili a causa della situazione contingente. I computer umani dovevano eseguire complessi calcoli balistici per armi da guerra, un esempio dei quali viene descritto chiaramente da una ragazza di 22 anni neo assunta, Kathleen McNulty [19, 14]:

«Un esempio di integrazione numerica è quando prendi, in questo caso particolare, il percorso di un proiettile dall'istante di tempo in cui esce dalla canna della pistola fino a quando tocca terra. È un'equazione molto complicata che richiede circa quindici moltiplicazioni, una radice quadrata e non so che cos'altro. Devi descrivere dove si trova il proiettile dal momento che lascia la canna, ogni decimo di secondo, e devi tener conto di tutte le cose che possono influenzarne il percorso. Le prima cosa è la velocità con cui il proiettile è stato sparato dalla canna, poi anche l'angolo da cui è stato sparato fuori, e la sua dimensione. Tutto questo incorporato in una funzione data, detta funzione balistica.

Siccome il proiettile viaggia attraverso l'aria, prima di arrivare al suo punto più alto, è costantemente spinto in basso dalla gravità. È poi influenzato dalla pressione dell'aria e anche dalla temperatura. [...]

Poi, finiti i tutti i calcoli, bisogna interpolarne i valori per capire qual era il punto più alto e dove ha toccato terra...»

Come si capisce, il lavoro delle computer richiedeva un altissimo livello di specializzazione matematica, che includeva anche la risoluzione di equazioni differenziali non lineari a molte variabili. Il loro compito era quello di generare le cosiddette tavole *firing* e *bombing*, da utilizzare nei calcoli balistici (figura 2). Il lavoro di computer era fondamentale per lo sforzo bellico.

Vediamo di chiarire meglio i termini del problema: con il termine *balistica* (dal greco “βάλλειν”, ovvero “lanciare”) si indica lo studio del moto di un proiettile, inteso come un corpo dotato di una velocità iniziale e senza alcun tipo di propulsione autonoma. Le computer, in particolare, dovevano concentrarsi sulla cosiddetta balistica *esterna*, ovvero su quella parte della balistica che si interessa del comportamento di una massa lanciata con una certa velocità iniziale, indipendentemente dal modo in cui questo lancio sia realizzato (con una catapulte, con una balestra, con lo scoppio di una carica nella canna di un'arma da fuoco, ecc.).

Se riesumate le vostre conoscenze di fisica meccanica, vi sarà immediatamente evidente che

Third Charge : H.E. (Streamline) Proj.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
*50 per cent. Probability Zones.		Angle subtended by		Variation of 100 Yards in Range requires Alteration in Elevation of	Fuze Scale for Fuze No. 210 (See Note Page 47)		Angle of Projection.	Range.
Length.	Breadth.	100 Metres.	100 Feet.					
yards.	yards.	° /	° /	° /			° /	yards.
20	3	1 2	0 19	0 18	17.3		12 53	6100
20	3	1 1	0 18	0 18	17.6		13 11	6200
20	3	1 0	0 18	0 18	18.0		13 29	6300
20	3	0 59	0 18	0 18	18.3		13 47	6400
20	3	0 58	0 18	0 18	18.7		14 5	6500
20	3	0 57	0 17	0 18	19.1		14 23	6600
20	3	0 56	0 17	0 19	19.4		14 42	6700
20	3	0 55	0 17	0 19	19.8		15 0	6800
20	3	0 54	0 17	0 19	20.2		15 19	6900
20	3	0 54	0 16	0 19	20.5		15 38	7000
20	3	0 53	0 16	0 19	20.9		15 57	7100
20	3	0 52	0 16	0 20	21.3		16 17	7200
20	3	0 51	0 16	0 20	21.7		16 36	7300
20	4	0 51	0 15	0 20	22.1		16 56	7400
20	4	0 50	0 15	0 20	22.4		17 16	7500
30	4	0 49	0 15	0 20	22.8		17 36	7600
30	4	0 49	0 15	0 21	23.2		17 56	7700
30	4	0 48	0 15	0 21	23.6		18 17	7800
30	4	0 48	0 15	0 21	24.0		18 38	7900
30	4	0 47	0 14	0 21	24.4		18 59	8000
30	4	0 46	0 14	0 21	24.8		19 20	8100
30	4	0 46	0 14	0 22	25.2		19 42	8200
30	4	0 45	0 14	0 22	25.6		20 4	8300
30	5	0 45	0 14	0 22	26.0		20 26	8400
30	5	0 44	0 13	0 22	26.5		20 48	8500
30	5	0 44	0 13	0 23	26.9		21 11	8600
30	5	0 43	0 13	0 23	27.3		21 34	8700
30	5	0 43	0 13	0 23	27.7		21 57	8800
30	5	0 42	0 13	0 23	28.2		22 20	8900
30	5	0 42	0 13	0 24	28.6		22 44	9000

\* The practical 50 per cent. zones should be taken as twice the experimental

Third Charge : H.E. (Streamline) Proj.

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Time of Flight.	Corrections to Range due to Differences from Normal Conditions.						Range.	Corrections to Line.	
	Bar. For Rise of 1 Inch Add	Air Temp. For Rise of 10° F. Subtract	Charge Temp. For Rise of 10° F. Subtract Cordite W.	1 lb. Increase in weight of Shell.	Correc-tion to range for H.E. Mark 10 fuze No. 119 (with cap)	Range.		yards.	Extra Deflection for Drift. (Marks IVr and Vr 25/18-pr. carriages.) (See Note on Drift, p. 62.)
17-28	51	62	17	+ 8	+154	6100	6 R		
17-63	53	63	17	+ 8	+158	6200	6 R		
17-98	54	65	17	+ 8	+162	6300	6 R		
18-34	56	66	17	+ 8	+166	6400	6 R		
18-70	57	68	17	+ 8	+170	6500	6 R		
19-06	58	69	17	+ 7	+174	6600	7 R		
19-42	60	71	17	+ 7	+179	6700	7 R		
19-79	61	72	17	+ 7	+183	6800	7 R		
20-16	62	74	18	+ 7	+187	6900	7 R		
20-53	64	76	18	+ 7	+191	7000	7 R		
20-91	65	77	18	+ 6	+195	7100	7 R		
21-29	66	79	18	+ 6	+199	7200	7 R		
21-67	68	80	18	+ 6	+203	7300	8 R		
22-05	69	81	18	+ 6	+207	7400	8 R		
22-43	71	83	18	+ 6	+212	7500	8 R		
22-82	72	84	19	+ 5	+216	7600	8 R		
23-21	73	86	19	+ 5	+220	7700	8 R		
23-60	75	87	19	+ 5	+224	7800	8 R		
24-00	76	88	19	+ 5	+228	7900	9 R		
24-40	77	90	19	+ 5	+232	8000	9 R		
24-80	79	91	19	+ 4	+236	8100	9 R		
25-21	80	93	19	+ 4	+240	8200	9 R		
25-62	81	94	20	+ 4	+244	8300	9 R		
26-03	83	95	20	+ 4	+248	8400	9 R		
26-45	84	97	20	+ 4	+252	8500	10 R		
26-87	85	98	20	+ 3	+257	8600	10 R		
27-30	87	100	20	+ 3	+261	8700	10 R		
27-73	88	101	21	+ 3	+265	8800	10 R		
28-17	90	102	21	+ 3	+269	8900	10 R		
28-61	91	104	21	+ 3	+274	9000	11 R		

50 per cent. zones in Columns 1 and 2 where safety of troops is involved.

Fig. 2. - Tavola di tiro del fucile Garand m1, di ordinanza negli Usa dal 1936 al 1957.

il movimento del proiettile è condizionato dalla forza di gravità. Molti di voi inoltre osserveranno subito che, per stimare adeguatamente il comportamento del proiettile, si deve considerare l'attrito del mezzo fisico in cui si muove. C'è inoltre da tener conto del vento, che può frenare o accelerare l'incedere del proiettile, e addirittura deviarlo dal piano di lancio. Se poi volete considerare la situazione reale e non solo il problema ideale, vi accorgete che la traiettoria è influenzata da molti altri fattori: l'angolo di inclinazione dello sparo, la pressione, la temperatura, l'umidità dell'aria (che ne determinano la densità). Per non parlare dei cosiddetti *long range factors*, che entrano in gioco quando il tempo di volo e la distanza da percorrere si fanno molto lunghi: il *drift giroscopico*, dovuto all'interazione della massa e aerodinamica del proiettile con l'atmosfera

in cui si muove; l'effetto di Magnus che tende a spostare il proiettile perpendicolarmente alla direzione del vento, e quello di Poisson, che dipende dall'inclinazione del proiettile rispetto alla traiettoria; quelli di Coriolis e di Eötvös, dovuti alla rotazione della Terra (figura 3).

In breve, se l'immagine naïf che tutti abbiamo in mente è quella di una bella parabola (fig. 4), la cui gittata  $d$  (da un'altezza  $y_0$ , con velocità  $v$  e inclinazione di lancio  $\theta$ ) si calcola con la semplice equazione "base"  $d = \frac{v \cos \theta}{g} \left( v \sin \theta + \sqrt{(v \sin \theta)^2 + 2gy_0} \right)$  (che governa il comportamento di un proiettile nel vuoto, soggetto alla sola accelerazione di gravità  $g$  [18]), la situazione reale è modellizzata da equazioni molto più complesse. Una descrizione matematica semplificata del volo di un proiettile nel piano (e quindi senza tener conto del vento, né degli effetti

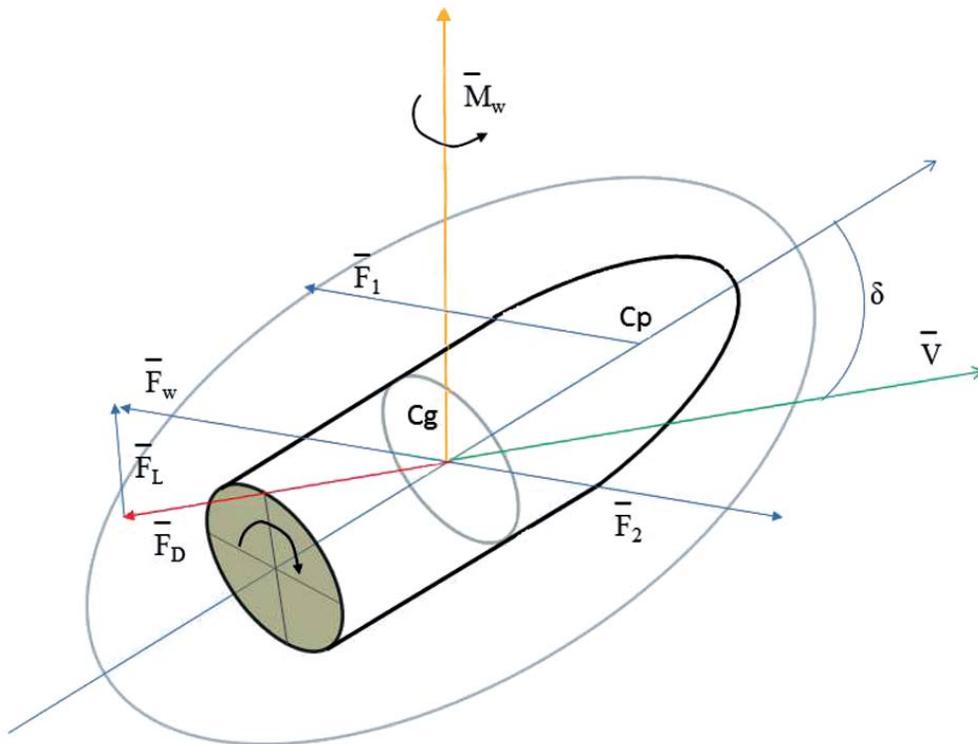


Fig. 3. – Forze agenti su un proiettile in volo: indicato con  $C_g$  il baricentro, con  $C_p$  il centro di pressione e con  $\delta$  l'angolo tra l'asse del proiettile e il vettore  $\vec{V}$  della sua velocità,  $\vec{F}_1$  è la forza esercitata dall'aria come mezzo viscoso, applicata su  $C_p$ ;  $\vec{F}_2$  e  $\vec{F}_w$  sono una coppia di forze uguali e opposte applicate su  $C_g$ , con modulo uguale a quello di  $\vec{F}_1$ ;  $\vec{F}_D$  è la resistenza aerodinamica o ritardatrice;  $\vec{F}_L$  è la forza portante o sustentatrice;  $\vec{M}_w$  è il momento della coppia  $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ . (attenzione: su tutti i vettori ci vorrebbe la freccina - ma nella figura in effetti non si vede). Fonte Wikipedia, Demostene119 (Own work) [CC BY-SA 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>)], via Wikimedia Commons

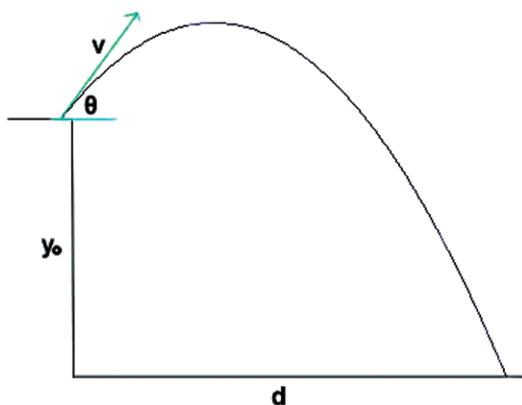


Fig. 4. – Traiettoria di un proiettile nel vuoto.

di lungo raggio) si può ottenere tramite le seguenti equazioni differenziali [9, 11]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -E \frac{dx}{dt}, \quad \frac{d^2y}{dt^2} = -E \frac{dy}{dt} - g,$$

$$E = \frac{G(v)H(y)}{c}.$$

In tali equazioni,  $x$  è la distanza orizzontale,  $y$  è la quota,  $t$  è il tempo,  $g$  è l'accelerazione di gravità e gran parte della difficoltà è nascosta in  $E$ : si tratta di una funzione empirica di notevole complessità, che dipende dalla resistenza  $G(v)$  che l'aria oppone all'avanzamento del proiettile (quadratica rispetto alla velocità  $v$ ) e dalla densità dell'aria  $H(y)$  (rispetto alla densità a livello del mare). La costante  $c$ , detta *coefficiente balistico*, ingloba invece fattori dipendenti dalla natura fisica e geometrica del proiettile considerato, stimata empiricamente da esperti di balistica. Per la funzione  $E$  esistevano all'epoca tabelle di valori pre-calcolati: tali tabelle, disponibili allora per un'ampia gamma di funzioni matematiche, facilitavano i calcoli delle computer che, consultate le tavole relative alla funzione in esame, dovevano sostituirne i valori nella formula, in modo da ottenere il risultato specifico [9].

Volendo invece tener conto del vento e dell'effetto di Coriolis, sia pur nell'ipotesi semplificativa che il proiettile sia una particella, le equazioni da conside-

rare sono tre, così come le direzioni in cui si svolge il moto [11]:

$$\begin{aligned}\frac{d^2x}{dt^2} &= -E\left(\frac{dx}{dt} - w_x\right) + \lambda_1 \frac{dy}{dt}, \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -E\frac{dy}{dt} - g - \lambda_1 \frac{dx}{dt}, \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= -E\left(\frac{dz}{dt} - w_z\right) + \lambda_3 \frac{dy}{dt} + \lambda_2 \frac{dx}{dt}.\end{aligned}$$

dove  $(\lambda_3, -\lambda_2, -\lambda_1)$  sono il doppio dei valori delle componenti della velocità angolare della terra nel sistema  $(x, y, z)$  (e dove si omettono la componente verticale del vento e i contributi della forza di Coriolis coinvolgenti  $\frac{dz}{dt}$  perché trascurabili rispetto ai termini rimanenti).

Già impostare il problema, come vedete, non è cosa del tutto banale. Risolverlo, compilando così le tabelle di tiro di cui le forze armate avevano bisogno, e con l'urgenza della seconda guerra mondiale in atto, lo era ancor meno.

Per calcolare la traiettoria risultante dalle equazioni sopra riportate è necessario infatti risolverle numericamente: in primo luogo bisogna dunque discretizzarle, usando per esempio il metodo di Heun (una variazione del metodo di integrazione numerica di Eulero). L'unica variabile indipendente nelle equazioni è il tempo: un  $\Delta t$  tipico, come osserva Kathleen McNulty nella citazione riportata in precedenza, è un decimo di secondo. Sempre nelle parole della nostra calcolatrice, mediante interpolazione si ottengono il punto di massima altezza e la distanza massima. Ogni passo del metodo richiede un certo numero di somme e purtroppo anche diverse moltiplicazioni/divisioni, molto più "costose", in termini di tempo e complessità, per le calcolatrici da tavolo (le più diffuse delle marche Friden, Marchant o Monroe), unico ausilio delle calcolatrici umane. Ogni passaggio richiede inoltre la consultazione dei dati tabulati della funzione empirica. Per ciascun cannone (o fucile, o catapulta, ...) bisogna calcolare tante tavole quanti sono i tipi di proiettili che vogliamo che spari. L'elaborazione di ciascuna tavola richiede il calcolo di 2000-4000 traiettorie diverse, oltre a diversi altri calcoli ausiliari e di verifica. Non stupisce, con queste

premesse, che il tempo di calcolo stimato per una traiettoria di 30 secondi fosse di 20 ore/uomo (o donna, nello specifico!). Se pensate a quanto doveva essere noioso questo tipo di lavoro, in cui tra l'altro era spesso necessario annotare a mano i risultati di calcoli ausiliari per poi re-introdurli nella calcolatrice da tavolo, non vi stupirà che i calcoli contenessero spesso errori di vario genere.

Per rendere più veloci i processi il Ballistic Research Laboratory (BRL) per cui lavoravano le computer si serviva anche di un piccolo analizzatore differenziale, ispirato al primo del suo genere, progettato negli anni '30 da Vannevar Bush presso il prestigioso MIT: con tale strumento, il calcolo di una traiettoria di 30 secondi richiedeva dai 15 ai 30 minuti, ma i risultati erano meno precisi di quelli ottenuti con le calcolatrici manuali. Senza contare che l'analizzatore differenziale necessitava di un processo di aggiustamento meccanico lungo e complesso per passare da una traiettoria all'altra, e dunque della presenza di un esperto durante tutto il processo di calcolo.

Un altro problema, che rese di fatto imprescindibile l'utilizzo di strumenti di calcolo più avanzati, è dovuto al comportamento del proiettile ad alte velocità. Come dice in proposito Kathleen McNulty [19]:

«Quando il proiettile raggiunge una certa velocità, cioè va giù fino a 1.100 piedi al secondo, che sarebbe la velocità del suono, traballa terribilmente...quindi invece di calcolare la sua posizione ogni decimo di secondo la devi ricalcolare ogni centesimo di secondo per essere sicuri di farlo accuratamente.»

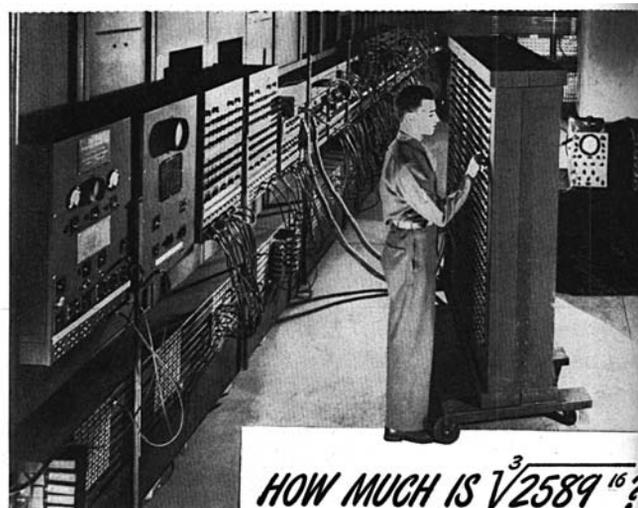
Il problema di cui parla Kathleen è legato alla forte non linearità del coefficiente d'attrito nel passaggio dalla zona sonica a quella supersonica: per velocità molto elevate, infatti, una piccola variazione della velocità determina una grossa variazione del coefficiente di attrito. E purtroppo il metodo delineato dalla nostra calcolatrice non è efficace per calcolare accuratamente la traiettoria del proiettile: questo perché, quando il proiettile si muove a velocità supersoniche, il problema di integrarne la traiettoria diventa *stiff*, e quindi difficile e lento da risolvere con metodi numerici. In particolare, diventa impossibile da risolvere con i metodi di integrazione cui si è accennato sopra (metodi espliciti) perché anche se, come dice Kathleen, si riduce il  $\Delta t$ , l'errore non conver-

ge. Serve quindi un diverso metodo per l'integrazione del moto: un sistema *predittore/correttore*. Idea centrale di un tale sistema è la seguente: integrato il valore al tempo  $t$ , fornire una stima del valore al tempo  $t + \Delta t$  con un metodo esplicito (predittore); in seguito, correggere il valore stimato con un metodo implicito (correttore). Continuando questo processo si può arrivare, in linea di principio, all'ordine di accuratezza desiderato, a patto però di effettuare un'enorme quantità di calcoli, difficili da gestire coi mezzi dell'epoca.

Per tutti questi motivi, la responsabilità delle calcolatrici (umane, si intende) era davvero enorme: le tavole che venivano loro richieste dovevano servire per progettare nuovi fucili e per suggerire modifiche in quelli già in uso, e tali tavole servivano...subito! La pressione sotto la quale le calcolatrici si trovavano a lavorare era fortissima, perché le tavole di tiro e di bombardamento erano indispensabili per poter effettivamente utilizzare le nuove armi, che pure erano già state realizzate in quantità e distribuite sui campi di battaglia. Per avere un'idea delle richieste che pervenivano al BRL considerate che durante una settimana del mese di agosto del '44, mentre era stato portato a termine il calcolo manuale di 15 tavole di tiro, si lavorava su altre 74 e ne rimanevano in sospeso ulteriori 40. Era assolutamente necessario velocizzare le procedure di calcolo, inventando uno strumento in grado di aggirare il collo di bottiglia costituito dall'utilizzazione di strumenti di calcolo meccanici o analogici.

Furono proprio questi problemi a stimolare la costruzione del primo calcolatore: l'ENIAC fu progettato con questo scopo. Grazie a questo "Frankenstein matematico", "cervello elettronico" o "Einstein meccanico" (come lo definì una stampa sensazionalistica al momento della sua presentazione ufficiale, nel febbraio del 1946) i tempi si ridussero drasticamente: «ENIAC calcola la traiettoria più velocemente di quanto ci mette il proiettile a compierla» dice in proposito, coniando uno slogan perfetto, Marie Bierstein, un'altra calcolatrice [cfr. 2]. Senza esagerazioni, visto che una traiettoria di 30 secondi si poteva in effetti calcolare in poco meno di questo tempo, grazie al nuovo calcolatore.

Che vale quindi la pena di conoscere un po' meglio.



**The Army's ENIAC can give you the answer in a fraction of a second!**

Think that's a stumper? You should see some of the ENIAC's problems! Brain twisters that if put to paper would run off this page and feet beyond . . . addition, subtraction, multiplication, division - square root, cube root, any root. Solved by an incredibly complex system of circuits operating 18,000 electronic tubes and tipping the scales at 30 tons!

The ENIAC is symbolic of many amazing Army devices with a brilliant future for you! The new Regular Army needs men with aptitude for scientific work, and as one of the first trained in the post-war era, you stand to get in on the ground floor of important jobs

**YOUR REGULAR ARMY SERVES THE NATION AND MANKIND IN WAR AND PEACE**

212 POPULAR SCIENCE

which have never before existed. You'll find that an Army career pays off.

The most attractive fields are filling quickly. Get into the swim while the getting's good! 1½, 2 and 3 year enlistments are open in the Regular Army to ambitious young men 18 to 34 (17 with parents' consent) who are otherwise qualified. If you enlist for 3 years, you may choose your own branch of the service, of those still open. Get full details at your nearest Army Recruiting Station.

**A GOOD JOB FOR YOU**  
**U. S. Army**  
CHOOSE THIS  
FINE PROFESSION NOW!

Fig. 5. - Chiamata alle armi (informatiche), Popular Science, ottobre 1946, p. 212.

## 2. - Dall'uomo alla macchina: hardware e software dell'ENIAC

Il governo degli Stati Uniti a partire dal 1943 finanziò un progetto pionieristico per la costruzione di una macchina da calcolo, che fosse in grado di eseguire gli stessi calcoli manuali ma più velocemente e in modo automatico. L'ENIAC fu progettato e costruito alla Moore School of Electrical Engineering dell'Università della Pennsylvania, per il Ballistic Research Laboratory, un ex centro di ricerca dell'esercito degli Stati Uniti d'America dove erano impiegate le ragazze computer, da un team di ingegneri guidato da J. Presper Eckert [16] e John Mauchly [17]. I progettisti riuscirono a portare a termine il progetto e la costruzione della macchina. In un tempo relativamente breve l'*hardware*, cioè i circuiti elettronici e le connessioni, erano stati messi a punto.

BLOCK FLOW CHART FOR COMPUTATION OF FIRING TABLES

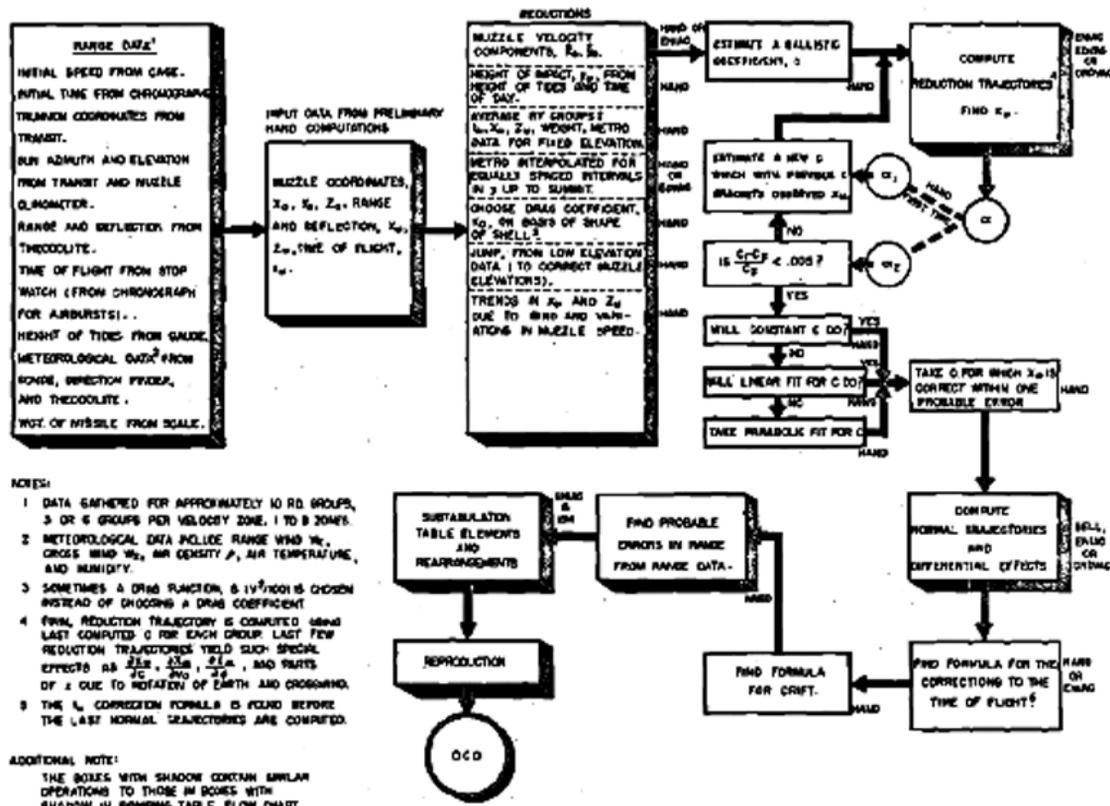


Fig. 6. – Flow chart per il calcolo di una tavola di tiro (di tipo *firing*) [11, p. 35].

Bisognava scrivere i programmi, cioè progettare il *software* necessario alla risoluzione dei problemi.

All'interno del gruppo di calcolatrici umane vennero selezionate le sei più brillanti, tutte laureate in matematica e poco più che ventenni. Nessuna di loro dopo la laurea aveva considerato la possibilità di un lavoro come insegnante, cercavano qualcosa di diverso e erano state attratte dalla possibilità di operare come computer come dal fatto di poter contribuire alle emergenze create dal periodo di guerra. Dopo un breve addestramento, furono impiegate a programmare le procedure di calcolo, precedentemente eseguite a mano, in modo da farle eseguire autonomamente alla macchina. Il loro compito era molto arduo: dovevano adottare nuovi schemi mentali, inventarsi modi di procedere, fare fronte ai limiti fisici imposti dalla macchina e ad altri impedimenti enormi. Infatti non avevano a disposizione linguaggi di programmazione, né manuali, né un sistema operativo. Il progetto ENIAC, inoltre, era stato commissionato e doveva servire per scopi militari, quindi restare completamente *top secret*.

Il piccolo gruppo di ragazze riuscì nell'impresa, furono le prime programmatrici mai esistite: loro crearono il *software* dell'ENIAC. Per capire il tipo di problemi a cui dovettero far fronte e per apprezzare pienamente il lavoro originale che furono capaci di portare a termine, bisogna descrivere un po' più in dettaglio la struttura dell'ENIAC, inizialmente del tutto ignota alle ragazze. A forza di prove e di esperimenti riuscirono a ricostruire completamente struttura e funzionamento della macchina, impararono sperimentando e qualche volta sottoponendo a interrogatori sfinenti i progettisti che capitavano a tiro, riuscendo a strappare magari un piccolo dettaglio, che si rivelava fondamentale per progredire nella comprensione del tutto. Riuscirono talmente bene in questo processo di *reverse engineering* che furono capaci alla fine di rilevare errori di funzionamento anche al livello della singola valvola.

Lo schema dell'architettura dell'ENIAC [26, 6] mostrato in figura 7 è composto da cinque diversi blocchi funzionali. Non essendo un computer a programma memorizzato, la sua architettura non è di

tipo *von Neumann*, vale a dire non funziona estraendo ed eseguendo una dopo l'altra le istruzioni del programma, ma può essere considerata di tipo *data flow*, se si vuole usare un termine specialistico. In un'architettura *data flow* il flusso dell'esecuzione dipende dai dati e permette di programmare più istruzioni in parallelo, come vedremo. L'informazione non è ancora codificata in binario come nei computer più moderni ma usa cifre a base dieci. Consideriamo per prima cosa l'unità di memoria: è composta da solo 20 registri per la lettura o la scrittura di un valore di 10 cifre decimali ciascuno, che funzionano anche da accumulatori, cioè sono in grado di sommare al valore memorizzato un nuovo valore in ingresso. Questa operazione può anche essere ripetuta varie volte.

La sottrazione può essere eseguita con la somma del complemento a 10, mentre moltiplicazione, divisione e radice quadrata possono essere eseguite soltanto in un componente della memoria (quello all'estrema destra nello schema), una alla volta. Moltiplicazioni e divisioni per piccoli valori possono anche essere realizzate con la ripetizione di somme e sottrazioni direttamente negli accumulatori. I valori su cui operare vengono inseriti attraverso l'unità di ingresso/uscita, dotata sia di un lettore di schede perforate che di un pannello per inserire direttamente i valori costanti e infine di una stampante per i risultati. Dunque l'ENIAC poteva lavorare soltanto sull'informazione accumulata su 20 registri decimali, se non si contano le tabelle dei numeri e le costanti inserite a mano. Ricordandosi il tipo di calcoli descritti precedentemente, programmare in questo modo problemi complessi sembra un'impresa impossibile. L'unità di controllo contiene essenzialmente l'unità di temporizzazione (*cycling unit*) che fornisce i treni d'impulsi per sincronizzare le operazioni e l'unità di avvio. Il controllo, a differenza dei computer successivamente progettati, non contiene memorizzato il programma da eseguire. Programmare e cambiare programma era molto difficile. Veniva usata la cosiddetta *direct programming*, per mezzo della quale si doveva intervenire direttamente nella connessione delle unità con i cavi e cambiare le impostazioni. Era come riprogettare l'ENIAC per farlo funzionare ogni volta come un computer dedicato alla risoluzione del problema specifico. L'unità *function table unit* è una memoria a sola lettura che contiene le famose tabelle a valori

precalcolati di funzioni note, da utilizzare nel corso del calcolo di una funzione più complessa. La *master programmer* viene usata per programmare cicli o per far partire due o più diverse computazioni in parallelo. L'architettura è poi dotata di due linee di comunicazione principali, dette bus, una per il trasporto dei comandi di controllo (*control bus*) e una per il trasporto dei dati (*data bus*), che possono trasportare un valore di dieci cifre per volta per mezzo di un connettore a dieci linee. A questi bus va aggiunto quello di sincronizzazione, con il compito di mandare impulsi. Le unità non sono collegate ai bus in modo fisso, ma connesse ogni volta in modo funzionale allo specifico programma. È compito del programmatore trovare e disporre l'interconnessione appropriata.

Ciascun accumulatore può ricevere in ingresso un valore da 5 diversi canali, ognuno dei quali, regolato da un apposito segnale di controllo, può essere connesso a uno o più altri accumulatori oppure a ogni altra unità utile (ingresso, tabelle delle funzioni, master programmer).

Ognuno degli accumulatori inoltre produce in uscita due possibili valori: il valore memorizzato oppure il suo complemento da utilizzare per le sottrazioni. A queste funzionalità va aggiunta la possibilità di ripetere una stessa operazione più volte: un impulso in uscita segnala quando la ripetizione dell'operazione termina. Per capire meglio cosa significhi progettare un programma in questo contesto prendiamo in esame un paio di semplici esempi: il primo è il calcolo della somma di due matrici e il secondo il calcolo della serie di Fibonacci.

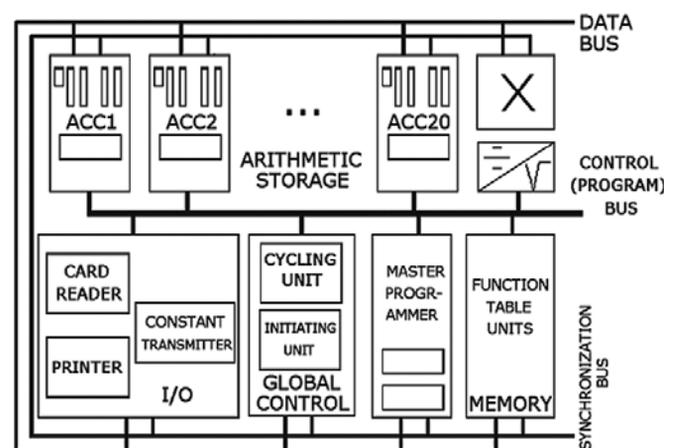


Fig. 7. – Architettura dell'ENIAC (riprodotto da [24]).

Indichiamo le due matrici d'ingresso come A e B e facciamo l'ipotesi che la loro dimensione sia  $3 \times 3$ ; la matrice risultato C sarà anch'essa di dimensione  $3 \times 3$ . I valori contenuti nelle due matrici di input sono simbolici, come quelli della matrice risultato (vedi figura 8).

$$\begin{array}{ccc}
 a & b & c \\
 A & d & e & f \\
 & g & h & i
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccc}
 l & m & n \\
 B & o & p & q \\
 & r & s & t
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccc}
 a+l & b+m & c+n \\
 C & d+o & e+p & f+q \\
 & g+r & h+s & i+t
 \end{array}$$

Fig. 8. – La somma delle due matrici di ingresso A e B produce come risultato la matrice C, ove ogni elemento è dato dalla somma degli elementi di A e B in posizione corrispondente.

Per programmare in modo efficiente questo problema sulla struttura dell'ENIAC bisogna sfruttare al massimo la possibilità di eseguire operazioni, in questo caso di somma, in parallelo. Infatti nel calcolo di C le 9 somme sono tutte indipendenti e possono essere calcolate contemporaneamente. Allora il programma per l'ENIAC carica dall'unità d'ingresso i primi nove accumulatori per ricevere ciascuno un valore della matrice A, nell'ordine *a* al primo accumulatore, *b* al secondo e così via. Dall'unità d'ingresso invia successivamente i valori della matrice B agli stessi accumulatori, *l* al primo accumulatore, *m* al secondo ecc. Ogni accumulatore somma il secondo valore ricevuto a quello inizialmente caricato. La matrice somma, C, è ora memorizzata, una riga dopo l'altra, nei primi nove accumulatori, pronta per essere stampata. La struttura dell'ENIAC permette di progettare un algoritmo altamente ottimizzato e velocissimo in quanto si è potuto sfruttare al massimo il parallelismo intrinseco al problema. Il programma per un computer di tipo sequenziale avrebbe richiesto la lettura delle due matrici e il loro trasferimento in memoria centrale e un doppio ciclo sugli indici di riga e colonna per calcolare una dopo l'altra tutte le somme. Naturalmente la soluzione semplicissima per l'ENIAC è consentita dal fatto che le matrici in gioco sono molto piccole e possono essere interamente contenute nei 20 accumulatori disponibili. Lavorare con matrici più grandi avrebbe richiesto la ripartizione in sottomatrici e la scrittura temporanea dei risultati parziali da ricombinare a fine procedimento, cioè una soluzione ben più complessa, tenendo conto che, per le dimensioni limitate della memoria, i risultati temporanei avrebbero dovuto essere mandati in output e reinseriti di nuovo al momento opportuno.

Consideriamo ora il problema di calcolare i numeri della serie di Fibonacci fino al 49-esimo, che è l'ultimo della serie ad avere un numero di cifre minore o uguale di dieci. Ricordiamo che al variare di *i* tra gli interi positivi l'*i*-esimo numero di Fibonacci si definisce in funzione dei numeri precedentemente calcolati come:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 1, & F_2 &= 1, \\
 F_i &= F_{i-1} + F_{i-2} & \text{per } i &\geq 2.
 \end{aligned}$$

Per calcolare i numeri della serie ci occorrono due accumulatori: chiamiamoli *acc1* e *acc2*.

Il programma produce come output la serie di Fibonacci a partire da  $F_3$ . Carichiamo *acc1* dall'esterno con il valore costante 1, e trasferiamo il contenuto di *acc1* in *acc2* ( $acc1 \rightarrow acc2$ ), poi eseguiamo il gruppo di istruzioni:

$$\begin{aligned}
 &acc1 + acc2 \rightarrow acc1; \\
 &stampa\ acc1; \\
 &acc1 \rightarrow acc2; acc2 \rightarrow acc1;
 \end{aligned}$$

fintanto che il risultato in *acc1* non genera un valore troppo grande. All'inizio *acc1* e *acc2* contengono il valore 1, e corrispondono a  $F_1$  e  $F_2$ . Si calcola la somma  $acc1 + acc2$  in *acc1*, generando  $F_3 = 2$ , che viene inviato all'unità di uscita (*stampa acc1*). Le ultime due istruzioni del ciclo prevedono di trasferire il valore contenuto in *acc1* nell'accumulatore *acc2* e quello in *acc2* in *acc1* in modo da preparare i valori per la somma seguente: cioè il valore che all'iterazione precedente rappresentava  $F_{i-1}$ , contenuto in *acc2*, diventa ora  $F_{i-2}$  e viene memorizzato in *acc1*, mentre il valore  $F_i$ , contenuto in *acc1*, diventa  $F_{i-1}$  e viene memorizzato in *acc2*. L'esecuzione successiva calcolerà la somma di  $2 + 1$  generando  $F_4 = 3$ . I numeri della serie continuano a essere calcolati così fino a quando nell'ultima somma non si rileverà un riporto nella cifra più significativa indicatore di un numero troppo grande.

In questo caso il programma per l'ENIAC, semplificato di molti dettagli poco interessanti ma che comunque dovevano essere specificati, risulta molto simile a quello che si può scrivere per un computer attuale, eccetto l'esecuzione dell'ultima istruzione del ciclo che prevede l'esecuzione parallela di due trasferimenti, operazione proibita in un programma sequenziale. Da notare inoltre che eseguendo le due

operazioni in sequenza, ci sarebbe stato bisogno di un terzo registro per la memorizzazione temporanea di acc2, perché la prima istruzione (acc1 → acc2) ne avrebbe distrutto il contenuto. Viceversa operando in parallelo, con le uscite di acc1 collegate con le entrate di acc2 e le uscite di acc2 collegate con le entrate di acc1, all'arrivo dell'impulso di sincronismo che avvia la scrittura nei registri, le due istruzioni possono essere eseguite contemporaneamente.

Naturalmente diverso è il valore massimo che si può rappresentare per superamento della capacità del singolo accumulatore. Per poter andare avanti a generare numeri più grandi con l'ENIAC si sarebbe dovuta gestire in maniera esplicita la rappresentazione su più registri dei vari numeri con la relativa complicazione nell'esecuzione della somma.

### 3. – E intanto, in Italia: Picone, il calcolo automatico e FINAC

La storia che abbiamo appena raccontato ha una significativa appendice italiana cui accenniamo brevemente, rimandando a testi più specifici [8, 12, 21] per una trattazione esaustiva. Appendice che si conclude con l'approdo nel cortile del CNR di Roma, nel gennaio 1955, delle trentadue casse, dal peso complessivo di dodici tonnellate, contenenti le diverse parti di FINAC, computer inglese fortemente voluto da Mauro Picone, principale attore di dieci anni di iniziative volte a dotare il Nazionale Istituto di Calcolo (IAC) di un calcolatore.

È infatti proprio la presentazione di ENIAC a suscitare la curiosità di Picone, motivandolo a lottare per non rimanere indietro. Picone, in realtà, il computer l'avrebbe voluto costruire in proprio, come testimoniano numerose lettere e la sua frenetica ricerca di contatti con i ricercatori dei laboratori più importanti degli Stati Uniti [21]. L'acquisto di uno dei modelli già esistenti sul mercato rappresenta quindi una parziale sconfitta, da parte di Picone, che tuttavia dette prova di notevole pragmatismo nell'intraprendere con decisione la nuova strada. Quello che in fondo contava, in quel momento, era infatti dotare l'IAC di una macchina con «possibilità veramente grandiose e velocità direi sbalorditiva nello adempimento dei calcoli che sono di pertinenza di questo Istituto». Ed era importante, soprattutto,

dotare l'Italia di scienziati in grado di utilizzarla. Come osserva Picone in un suo intervento a un Convegno del 1958 [cfr. 21],

«ho considerato i progressi dell'Analisi matematica offerti dall'automazione del calcolo e [...] visto che essi ne hanno provocato in importanti ricerche di fisica. [...] Unico persistente ostacolo a tali progressi è il numero insufficiente di matematici, di fisici e di ingegneri che si dedicano al calcolo automatico, insufficienti non soltanto in Italia, ma ovunque, anche negli Stati Uniti d'America».

E continua:

«Rivolgo quindi un caldo appello allo Stato e agli industriali, a capo di industrie prospere, perché istituiscano borse di studio o premi ai giovani studenti delle Facoltà di Scienze o Ingegneria perché considerino una meta degna delle loro aspirazioni quella di diventare sapienti sostenitori dell'automazione del Calcolo nella Scienza, nella Tecnica e nelle Industrie».

Tutto questo perché, inutile nascondersi dietro a un dito, per poter fare scienza è necessario avere i finanziamenti adeguati. Non a caso la costruzione dello stesso ENIAC avviene in un centro militare, e per scopi bellici.

La vicenda dell'ENIAC ci fornisce lo spunto per una riflessione sui rapporti tra ricerca e applicazioni militari. Il primo calcolatore digitale della storia nasce per far fronte a ricerche belliche: progettazione e messa in funzione sono finanziate dalla US Army. Tuttavia, il problema del calcolo delle tavole di tiro è significativo per molti altri motivi, e ha ricadute di grande interesse "scientifico": in primo luogo, il problema richiede tutti i venti registri che costituiscono la potenza di calcolo dell'ENIAC, e come tale identifica il tipo di problemi che possono essere trattati su una macchina di questo tipo, enfatizzandone per converso i limiti; in secondo luogo, per poter adattare il problema a uno strumento di calcolo con le limitazioni dell'ENIAC, è stato necessario testare molti metodi diversi, e l'esperienza acquisita in questo modo si è rivelata utile per impostare problemi più complessi su macchine più potenti, quando queste sono state disponibili; altra conseguenza importantissima fu l'impulso allo sviluppo di nuove macchine per aumentare la flessibilità e l'applicabilità [22]. Poco dopo l'ENIAC, per esempio, von Neumann, che si era molto interessato al nuovo computer, ideò il suo modello (detto appunto mac-

china di von Neumann) di computer, usato ancora adesso, e per esempio si passò alla codifica binaria dell'informazione, al posto di quella decimale dell'ENIAC, poi universalmente impiegata.

Si tratta cioè di un esempio abbastanza paradigmatico di come una tecnologia nata da uno scopo militare si può “riciclare” con applicazioni civili di fondamentale importanza. La storia della scienza è di fatto costellata di episodi di questo tipo: volendo limitarci agli ultimi due secoli, si pensi alla ricerca operativa, un'intera disciplina che vede i suoi inizi subito prima della seconda guerra mondiale, su impulso della Royal Army britannica, o si pensi a tutta la ricerca aerospaziale, che ha senz'altro ricevuto il suo impulso primigenio ai tempi della guerra fredda; si pensi infine al tema della crittografia (ma l'elenco si potrebbe allungare a piacere). Per fare un esempio terra terra, il Gps, che molti di noi utilizzano quotidianamente, è stato creato e realizzato nel 1973 dal Dipartimento della Difesa statunitense (U.S. DoD), che ne ha poi abilitato a usi civili una versione meno accurata nel 1991 (migliorata a partire dal 2000 sotto la presidenza Clinton).

Questo ripropone per l'ennesima volta un dilemma etico col quale gli scienziati dei nostri giorni, una volta «conosciuto il peccato», devono necessariamente fare i conti. Tema che però risulta sghembo agli scopi del presente articolo, per cui rimandiamo il lettore ad altri e ben più adeguati approfondimenti.

#### 4. – Le ragazze del frigorifero

Ma concludiamo ritornando alle nostre computer. Non si sa come le ragazze avrebbero risolto i problemi specifici descritti nel paragrafo 2, ma si sa che hanno risolto brillantemente altri problemi come quelli posti dai calcoli balistici e quello della generazione delle tavole dei quadrati e cubi. L'ENIAC era un computer parallelo con tutti i problemi e le opportunità che un computer di questo tipo offre, e se si pensa anche a tutte le altre difficoltà incontrate, come quella di non poter mantenere i risultati temporanei, le connessioni e i settaggi che dovevano esplicitamente predisporre, il fatto che siano riuscite a far funzionare perfettamente programmi complessi ha del miracoloso. Per le ragazze, a sentire le loro

testimonianze, fu un periodo esaltante: il loro compito era molto stimolante, lavoravano e vivevano tutte insieme, non avevano orari, erano lontane dalla famiglia, quindi godevano anche di una libertà straordinaria e di uno stipendio abbastanza consistente per l'epoca. Le ore passate alla macchina erano innumerevoli, ma affrontate sempre con entusiasmo e determinazione. Gradualmente, stavano riuscendo a padroneggiare il funzionamento della macchina.

Era il febbraio del 1946, il programma richiesto per la dimostrazione era quello delle traiettorie, la cui complessità è stata descritta precedentemente; la sera precedente la dimostrazione il programma funzionava perfettamente *eccetto* il fatto che non la smetteva di calcolare quando avrebbe dovuto, cioè all'impatto col terreno. Lavorarono fino alle due di notte provando e riprovando senza successo. Durante la notte Elisabeth Snyder, una delle ragazze, ebbe l'illuminazione, pare durante il sonno. La mattina dopo cambiò uno *switch* sul Master Programmer e il problema si risolse. Il programma funzionò perfettamente, riuscì a calcolare la traiettoria di una bomba in un tempo minore di quello impiegato dalla bomba stessa a toccare terra, mille volte più veloce di ogni calcolo precedente. La dimostrazione fu perfetta [2].

Le ragazze erano Frances Bilas, Betty Jean Jennings [15], Ruth Lichterman, Kathleen McNulty, Frances Elizabeth Snyder e Marlyn Wescoff. Il documentario *Top Secret Rosies* [24], che riprende ormai anziane quelle ancora in vita, descrive bene, attraverso le loro stesse parole e le foto che le raffigurano ai tempi dell'avventura dell'ENIAC, la loro vicenda sia scientifica che umana. Bellissima è Marlyn Wescoff, che sorridendo quasi timidamente spiega come fossero ben consapevoli di fare un lavoro difficile, urgente e molto importante, e questa consapevolezza rendesse accettabili e quasi divertenti i turni massacranti cui si auto-sottoponevano. Una canuta Jean Jennings, molto somigliante sia nell'energia che nel piglio alla nostra Margherita Hack, racconta come, figlia di contadini, non volesse affatto sposare un fattore e fare un mucchio di figli, ma cercasse qualcosa di diverso, che le sue capacità matematiche le consentirono di raggiungere. E chiosa definendosi «la persona più fortunata del mondo» per aver conosciuto, oltre alle ragazze, i progettisti dell'ENIAC, a cui è grata per «aver dato alla [sua] vita

un significato che non avrebbe mai potuto avere in nessun altro modo». Anche perché la loro avventura non si concluse coi relativamente pochi anni che passarono lavorando all'ENIAC: a differenza di molte altre donne impiegate in tempo di guerra, e ritornate con la pace alla loro vita precedente, tutte le ragazze dell'ENIAC hanno continuato a lavorare nel mondo della programmazione, sia dentro che fuori della UsArmy. E questo nonostante tutte, anche Jean Jennings che apparentemente non ne voleva sapere, abbiano avuto molti figli e non pochi mariti.

Il loro lavoro ha la dignità di una ricerca scientifica pionieristica di valenza paragonabile al progetto dello stesso ENIAC. Il loro prezioso contributo fu fondamentale per lo sviluppo di altri programmi importanti e dei modelli seguenti di computer, la loro competenza fu la base dello sviluppo di tutto il software successivo. Al tempo si presero un po' di riconoscimenti ma rimasero sempre in seconda linea, offuscate dalla gloria degli ingeneri progettisti. Addirittura non furono nemmeno invitate alla cena di gala dopo la dimostrazione [24]. La loro storia si è persa, è rimasta solo quella degli ingegneri che hanno riscosso tanti premi e riconoscimenti. Le ragazze sono rimaste a fare le "Refrigerator ladies" nelle foto di repertorio, finché qualcuno, per l'appunto una giovane studentessa di Harvard, Kathy Kleiman, programmatrice anch'essa e in cerca di modelli a cui ispirarsi, non ne ha ritrovato la vera storia nel 1985. Realizzò una serie di preziose interviste alle programmatrici ENIAC ancora viventi, che hanno permesso di ricostruire precisamente il loro lavoro all'ENIAC e attribuirvi la giusta valenza. Da questa esperienza è nato il documentario "The computer" presentato al festival internazionale del cinema a Seattle nel maggio del 2014 [10].

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] W. BARKLEY FRITZ. ENIAC - A Problem Solver. *IEEE Annals of History of Computing*, Vol.16, N.1, 1994.  
 [2] W. BARKLEY FRITZ. The Women of ENIAC. *IEEE Annals of History of Computing*, Vol.18, N.3, 1996.  
 [3] J. J. BARTIK (Rickman, Jon T.; Todd, Kim D., eds). *Pioneer programmer: Jean Jennings Bartik and the computer that changed the world*, Truman State University Press (2013).

[4] T. J. BERGIN ed., *50 years of Army Computing. From ENIAC to MSRC*, Proceedings della conferenza omonima tenuta all'Aberdeen Proving Ground, Novembre 1996.  
 [5] P. M. BORENSZSTEJN: Sobre Mujeres. "Hombres y Maquinas, relatos informaticos pero no tanto", Editorial Antigua, 2015.  
 [6] J. G. BRAINERD and T. K. SHAPLESS. The ENIAC. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 87, N. 6, 1999.  
 [7] A. G. BROMLEY, *British Mechanical Gunnery Computers of World War II*, Technical Report 223, Basser Department of Computer Science, University of Sydney, 1984.  
 [8] A. CELLI, M. MATTALIANO, *Mauvo Picone e i primi progetti per un calcolatore italiano italiano in La CEP prima della CEP*, AA.VV., Pisa University Press, 2013.  
 [9] M. P. DOMÍNGUEZ, *ENIAC, matemáticas y computación científica*, Gaceta de la Real Sociedad Matematica Española, Vol. 2, N° 3, 1999, p. 495-518.  
 [10] ENIAC Programmers Project - Team. [www.ENIACprogrammers.org/team.shtml](http://www.ENIACprogrammers.org/team.shtml)  
 [11] S. GORN, M. L. JUNCOSA, *On the computational procedures for firing and bombing tables*, BRL Report n. 889, 1954.  
 [12] A. GUERRAGGIO, M. MATTALIANO, P. NASTASI, *Calcoli di guerra*, Sapere, 2006.  
 [13] T. HAIGH, M. PRIESTLEY, C. ROPE, *ENIAC in Action: Making and Remaking the Modern Computer*, MIT press, 2016.  
 [14] <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Antonelli.html> biografia di Kathleen Rita McNulty Mauchly Antonelli.  
 [15] <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Bartik.html> biografia di Betty Jean Jennings Bartik.  
 [16] [http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Eckert\\_John.html](http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Eckert_John.html) biografia di John Eckert.  
 [17] <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Mauchly.html> biografia di John William Mauchly.  
 [18] [https://it.wikipedia.org/wiki/Balistica\\_esterna#Balistica\\_nel\\_vuoto](https://it.wikipedia.org/wiki/Balistica_esterna#Balistica_nel_vuoto)  
 [19] J. S. LIGHT. When Computers Were Women. *Technology and Culture*, Jul 1999; 40, 3: Research Library Core.  
 [20] L. MONTAGNINI, *Le armonie del disordine. Norbert Wiener matematico-filosofo del Novecento*, Ist. Veneto di Scienze, 2005.  
 [21] P. NASTASI, *Picone, il calcolo automatico e FINAC: una storia lunga 30 anni*, Pristem/Storia n. 12-13, 2006.  
 [22] H. L. REED, JR., *Firing table computations on the ENIAC*, Proceedings of the 1952 ACM national meeting, 1952.  
 [23] KIM D. TODD, *Jean Jennings Bartik: Computer Pioneer*, Truman State University Press (2015).  
 [24] Top Secret Rosies: The female "Computers" of WW II. (2010) documentario diretto da LeAnn Erickson, PBS Studio.  
 [25] J. VAN DER SPIEGEL, J. F. TAU, T. F. ALA'LIMA and L.P. ANG. *The ENIAC: History, Operation and Reconstruction in VLSI*. In: R. Rojas, U. Hashagen (eds.), *The First Computer-History and Architecture*, MIT Press, Cambridge, 2000.  
 [26] T. ZOPPKE and P. ROJAS. The Virtual Life of ENIAC. Simulating the Operation of the First Electronic Computer. *IEEE Annals of History of Computing*, Vol. 28, N. 2, 2006.



Silvia Benvenuti

*Dopo la laurea e il dottorato di ricerca in Matematica conseguiti presso l'Università di Pisa, rispettivamente nel 1994 e nel 1999, ha frequentato il Master in Comunicazione della scienza della SISSA di Trieste, conseguendo il titolo relativo nel febbraio 2006. Attualmente è ricercatrice in geometria presso l'Università di Camerino.*

*I suoi interessi di ricerca sono: topologia in dimensione bassa; ottimizzazione geometrica; applicazioni all'architettura.*

*Ha un'esperienza didattica pluriennale, sia per quanto riguarda insegnamenti universitari che all'interno del Progetto Lauree Scientifiche. Collabora con diverse case editrici alla stesura di testi per le scuole superiori e l'università. È autrice di un libro sulle geometrie non euclidee edito da Alphatest nella collana Gli Spilli (2008), del libro *Insalate di matematica 3, Sette variazioni su arte, design e architettura* (2010), del libro *Insalate di matematica. Degustazioni guidate per stimolare l'appetito numerico*, con Robert Ghattas e Paolo Gangemi (2016), editi da Sironi e di diversi articoli di comunicazione scientifica per le riviste *Linx Magazine* e *XLaTangente*. Dall'inverno 2010 partecipa alle trasmissioni *Geo&Geo*, *Geo Magazine* e *Geo Scienza* (Rai 3). È membro del *Centro matematita*, Centro Interuniversitario di Ricerca per la Comunicazione e l'Apprendimento Informale della Matematica, ed è redattore della rivista *XLaTangente*. Dal gennaio 2013 è membro del comitato RPA (Raising Public Awareness) della European Mathematical Society.*



Linda Pagli

*Si è laureata in Scienze dell'Informazione a Pisa nel 1973.*

*Nel 1987 è diventata professore ordinario di informatica presso l'Università di Salerno, Dal 1990 è affiliata all'Università di Pisa presso il Dipartimento di Informatica. Insegna corsi *Algoritmica* e *Algoritmi paralleli e Distribuiti*.*

*Ha trascorso periodi di ricerca e insegnamento in diversi paesi come il Canada, gli Stati Uniti, Botswana e altri.*

*Le sue ricerche, iniziate nel campo delle strutture dei dati, si sono rivolte successivamente all'algoritmica e alla complessità computazionale anche per i sistemi distribuiti e per le reti di computer. È autore di numerosi articoli scientifici e di alcuni libri.*

*Ha svolto un'intensa attività didattica di formazione di docenti di informatica, per conto del Ministero degli Affari esteri e dell'Unesco, in paesi in via di sviluppo.*