

## I RAZZI: DAI FUOCHI D'ARTIFICIO AI VIAGGI INTERPLANETARI (2)

di Gianluca Lapini \*

*In questa seconda parte il percorso storico continua con la nascita e lo sviluppo della V-2, il primo missile balistico moderno. L'articolo prosegue poi, come dice l'autore, con l'intento di «fornire alcune informazioni tecniche di base sulle caratteristiche e sui principali tipi di propulsori a razzo attualmente in uso». Nelle conclusioni vengono esaminate le numerose ricadute di innovazione tecnologica della ricerca missilistica.*

\* Ingegnere. Già ricercatore presso CISE e CESI Ricerca S.p.a.

Abbiamo fin qui descritto a grandi linee lo sviluppo dei razzi, fino alla comparsa della V-2 (si veda la [prima parte di questo articolo](#) pubblicata sul n° 56 - Marzo 2015 di Emmeciquadro). Proseguire su questa linea storica seguendo l'enorme lavoro di sviluppo che è stato effettuato, dalla fine della Seconda Guerra Mondiale a oggi, non solo nel campo della propulsione a razzo, ma anche dei sistemi di guida, controllo, comunicazione, navigazione, eccetera, richiederebbe uno spazio che non ci è consentito.

In questa seconda parte riorienteremo pertanto la prospettiva dell'articolo in modo da mantenere anche l'intenzione, espressa nella premessa, di fornire alcune informazioni tecniche di base sulle caratteristiche e sui principali tipi di propulsori a razzo attualmente in uso.

I lettori più interessati troveranno inoltre in un apposito [Approfondimento](#) ulteriori nozioni fondamentali sulla propulsione a razzo.



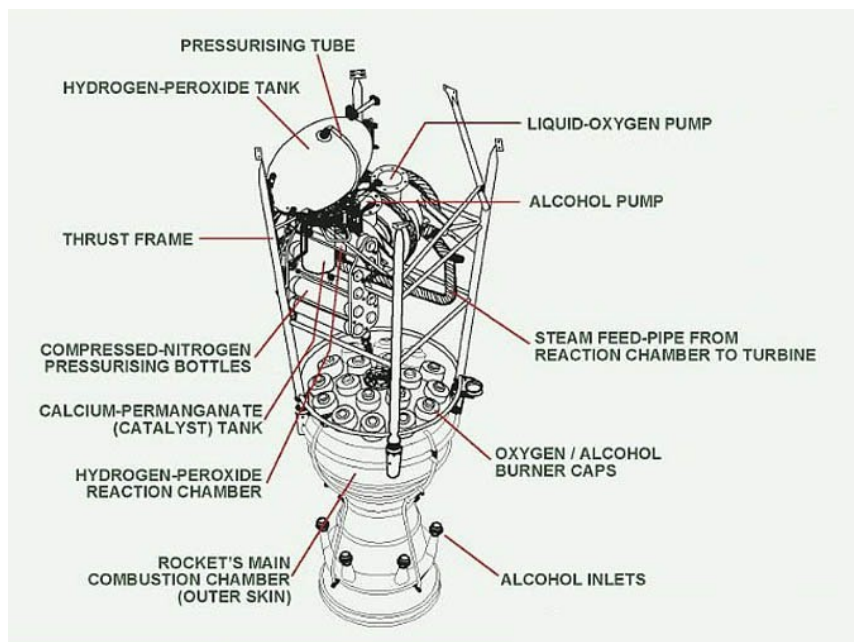
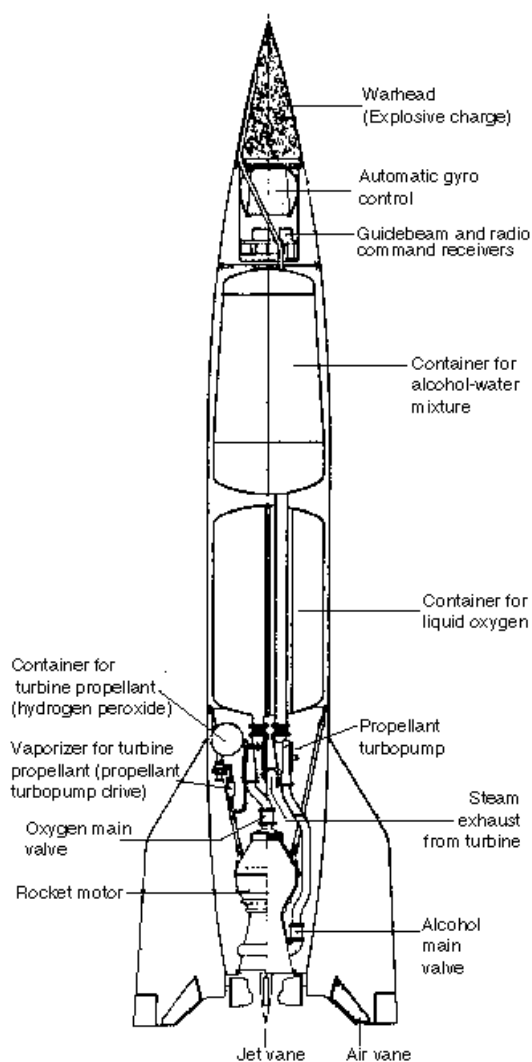
Il missile V2 al Museo di Peenemünde

### Le caratteristiche principali della V-2, primo missile balistico moderno

Poiché il razzo a propellenti liquidi tedesco V-2 può essere considerato il primo missile balistico moderno, costituendo per certi versi la riuscita realizzazione di molte delle idee che pionieri quali Konstantin E. Tsiolkovskii (1857-1935), Herman Oberth (1894-1989) e altri avevano potuto formulare solo a livello teorico, per iniziare vale la pena di descriverne brevemente le caratteristiche principali; infatti nel secondo dopoguerra esso fu ampiamente ripreso, per non dire «copiato»<sup>1</sup>, da americani e russi, che nelle fasi finali del conflitto mondiale si erano impossessati di numerosi esemplari di quest'arma; in seguito ebbero a disposizione, come prigionieri di guerra o come «prigionieri volontari» anche molti dei tecnici tedeschi che ne avevano portato avanti lo sviluppo.

In effetti le sue caratteristiche generali sono in buona parte comuni a quasi tutti i missili costruiti sino alla fine degli anni Cinquanta e a grandi linee si ritrovano anche nei missili tuttora in uso.

La sua descrizione ci ritorna quindi utile anche per fornire un'idea generale di come è fatto un qualsiasi missile a propellenti liquidi. Ci riferiremo, per maggior chiarezza, allo schema generale e a quello del gruppo motore, qui illustrati.



La V-2 era un missile monostadio dalla caratteristica forma affusolata, munito di quattro grosse alette, che funzionavano sia come base di appoggio che come superfici di controllo aerodinamico. La lunghezza massima, pari a 14 m, il diametro massimo di 1,65 m, e l'apertura alare di 3,5 m erano stati opportunamente studiati in modo da consentirne il trasporto anche sulle normali linee ferroviarie. Il peso al decollo era pari a circa 12.700 kg, buona parte dei quali rappresentati dai

propellenti (quasi 4.000 kg di alcool etilico, miscelato col 25% di acqua, e quasi 5.000 kg di ossigeno liquido).

I propellenti erano contenuti in due serbatoi sovrapposti realizzati in alluminio e magnesio, e venivano pompati verso la camera di combustione del motore tramite una potente e sofisticata turbopompa<sup>2</sup> che portava alle estremità di un unico asse le due giranti centrifughe per il combustibile e il comburente. Al centro di tale asse era inoltre calettata la turbina di azionamento, a singolo stadio, la quale riceveva il vapore necessario al suo funzionamento da una camera di vaporizzazione in cui avveniva una violenta reazione chimica fra perossido di idrogeno concentrato (acqua ossigenata), contenuto in un apposito serbatoio pressurizzato, e un catalizzatore (permanganato di sodio).

Prima di entrare nel motore a razzo, il combustibile circolava in una doppia parete della camera di combustione, in modo da raffreddarne le superfici evitando che fondessero a causa dell'altissima temperatura di combustione (circa 2.700 °C). Esso veniva poi iniettato nella camera stessa, finemente nebulizzato da più di 1.200 ugelli, assieme all'ossigeno liquido.

I gas di combustione si espandevano attraverso un ugello convergente-divergente e venivano espulsi all'esterno a velocità ipersonica producendo alla partenza una spinta di circa 25.000 kg. Una parte del combustibile fuoriusciva anche da un gran numero di appositi forellini, in modo da formare uno straterello liquido protettivo sulle

pareti interne, in particolare nella zona della «gola» dell'ugello, dove era necessaria la massima protezione dal calore.

In sostanza erano questa serie di accorgimenti, assieme ai materiali ad alta resistenza utilizzati, che consentirono agli ingegneri tedeschi di sviluppare un motore in grado di resistere alle altissime temperature prodotte, almeno per il tempo (se pur breve, l'accensione del motore durava circa 65 secondi) in cui esso produceva la sua spinta.

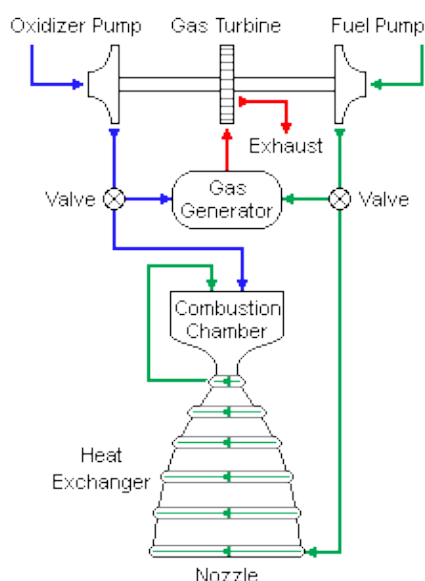
La velocità massima della V-2 era di circa 5.700 km/h. Se veniva lanciato con inclinazione tale da massimizzare la gittata balistica (circa 320 km), il missile raggiungeva un'altitudine massima di un'ottantina di km, mentre se veniva lanciato verticalmente poteva arrivare fino a una quota di circa 200 km. Il sistema di guida e stabilizzazione era automatico, basato su un complesso di giroscopi abbinati a un calcolatore analogico; questo sistema operava le necessarie correzioni agendo sia sull'orientazione del getto, ottenuta mediante quattro alette mobili, costruite in grafite, inserite sullo scarico dei gas del motore, sia sulla parte mobile delle superfici aerodinamiche (in alcune versioni avanzate del missile fu introdotto anche un sistema di controllo e correzione di traiettoria a distanza, mediante segnali radio).

Dopo aver sommariamente descritto la V-2 proseguiamo ora a una rapida descrizione dei vari tipi di motori a razzo chimici, che sono attualmente i più usati sia nelle applicazioni militari, sia in quelle spaziali. Essi sono principalmente di tre tipi: a propellenti liquidi, a propellenti solidi e ibridi.

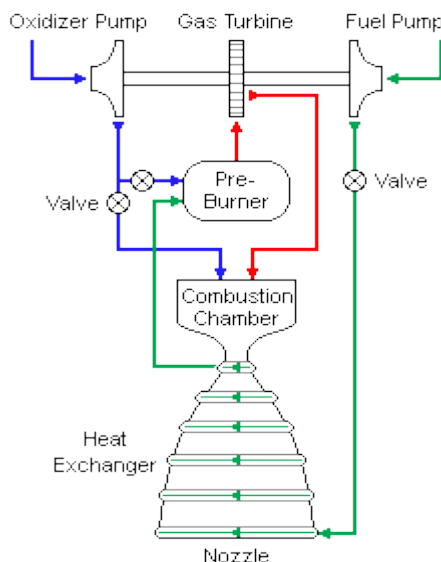
## Motori a razzo a propellenti liquidi

Come si è già accennato nei razzi a propellenti liquidi, il combustibile e il comburente sono contenuti in due serbatoi separati, dai quali vengono pompati, mediante speciali turbopompe ad alta portata e alta pressione, nella camera di combustione, dove vengono finemente nebulizzati in modo che si mescolino intimamente e brucino con la massima efficienza. Ribadiamo che queste pompe sono fondamentali per produrre quegli enormi flussi di propellenti di cui il motore a razzo ha bisogno; si consideri per esempio che ognuno dei cinque motori F-1 del primo stadio del razzo *Saturn V* (quello usato nelle missioni lunari della serie Apollo) necessitava di circa 2,6 tonnellate al secondo di propellenti. Per l'azionamento di queste pompe si utilizzano delle speciali e potenti turbine che funzionano essenzialmente con tre differenti modalità, o cicli.

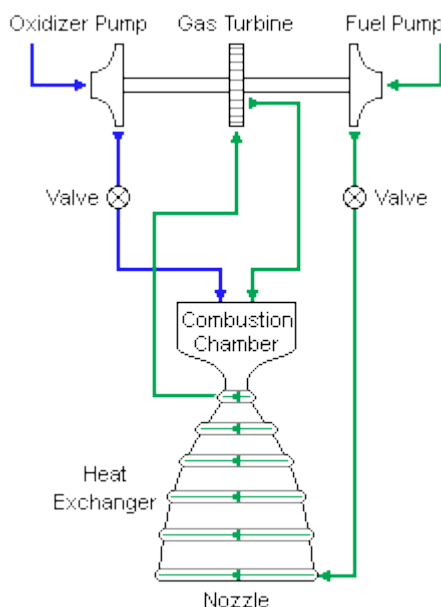
**Ciclo a generazione di gas, detto anche ciclo aperto:** una piccola parte del flusso dei propellenti (tipicamente dal 2 al 7%) viene deviata verso un bruciatore che produce i gas necessari ad azionare la turbina, i quali vengono poi scaricati all'esterno, o reimmessi nel flusso di gas eiettati dall'ugello.



**Ciclo stadiato, detto anche ciclo chiuso:** una parte dei propellenti viene inviata ad un pre-bruciatore dove brucia parzialmente producendo un flusso di gas ricchi di ossidante che vengono usati per azionare la turbina; i gas di scarico di quest'ultima vengono inviati nella camera di combustione del razzo, mescolandosi al flusso principale dei propellenti e finendo così di bruciare.



**Ciclo a espansione:** non esiste pre-bruciatore e il combustibile viene fatto vaporizzare nella camicia di raffreddamento dell'ugello del razzo; il vapore così prodotto va ad azionare la turbina, per essere poi immesso nella camera di combustione assieme al flusso principale dei propellenti.



In tutti e tre i casi il combustibile viene in ogni caso prima fatto circolare attorno all'ugello di scarico, svolgendo il fondamentale compito di raffreddarlo in modo che possa resistere alle elevatissime temperature dei gas di scarico.

Come si può intuire dalla immagine alla pagina seguente la presenza delle pompe e dei circuiti di circolazione dei propellenti per il raffreddamento degli ugelli rendono piuttosto complesso il motore a razzo a propellenti liquidi, il quale gode peraltro del



fondamentale vantaggio di poter regolare la spinta prodotta, variando la portata delle pompe.

Tra i propellenti più usati, specie nei motori di grande potenza, l'ossigeno liquido, come comburente e l'idrogeno liquido come combustibile, forniscono la migliore combinazione in termini di «impulso specifico», cioè di spinta per unità di massa (vedi [Approfondimento](#)).

Un significativo esempio di questo tipo di propulsori, erano i motori dello Shuttle della NASA. Entrambi questi propellenti «criogenici» devono essere mantenuti a temperature molto basse, con notevoli complicazioni per la loro gestione. Non mancano, comunque, gli esempi di utilizzo come combustibile di idrocarburi o di altri composti: il primo stadio del missile americano Saturn V, impiegato nelle missioni lunari, e il missile tristadio russo R-7 tuttora usato nei lanci delle capsule Soyuz utilizzano per esempio un particolare tipo di kerosene.

Infine aggiungiamo che molti dei piccoli razzi a combustibile liquido usati per modificare le traiettorie o controllare l'assetto dei veicoli spaziali utilizzano l'idrazina ( $N_2H_4$ ) o la monometilidrazina (MMH).

I razzi a idrazina vengono più propriamente definiti come «mono-propellenti» in quanto questa sostanza si decompone violentemente, producendo vapori caldi, in presenza di un catalizzatore e non necessita di un ossidante. La metilidrazina necessita invece di un ossidante, il tetrossido di azoto ( $N_2O_4$ ), al contatto del quale si infiamma spontaneamente (le due sostanze vengono definite come «propellenti ipergolici»).



## Motori a razzo a propellente solido

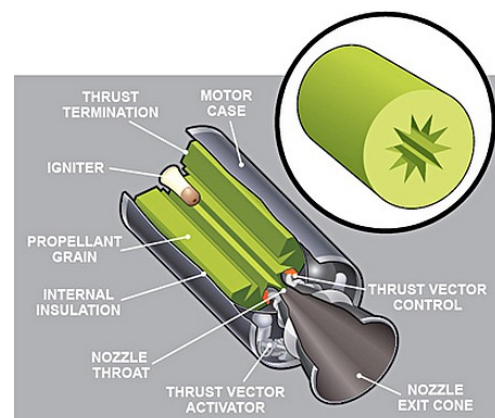
A differenza di quelli a propellenti liquidi, nei «razzi a propellenti solidi», combustibile e comburente sono intimamente mescolati fra di loro, in una miscela pastosa, denominata «grano» che riempie l'interno dell'involucro del missile, lasciando uno spazio cavo centrale di varia forma, dove i gas di combustione si raccolgono per essere poi espulsi da un ugello convergente divergente, costruito di materiale in grado di resistere al calore dei gas di scarico (grafite od altro).

A differenza di quel che succede nei razzi a combustibile liquido, l'involucro dei razzi a combustibile solido deve essere in grado di resistere alla pressione e alla temperatura generata dalla combustione del propellente; a questo scopo la carica di propellente viene mantenuta discosta dall'involucro, che è protetto da uno strato di materiale «sacrificale» in grado di proteggerlo dal calore. I razzi a combustibile solido sono costruttivamente meno complessi di quelli a combustibile liquido, ma la loro tecnologia è altrettanto sofisticata e raffinata. Una volta accesi sono difficilmente spegnibili e la loro spinta è in sostanza costante e non regolabile. Per questo motivo vengono spesso usati come *booster*, cioè come razzi ausiliari, in abbinamento a razzi a combustibile liquido, dei primi stadi dei missili più potenti.

Un esempio significativo di questa tecnica erano i due *booster* dello *Space Shuttle*, che erano appunto razzi a propellente solido, fra i più grandi mai costruiti, oltre ad essere riutilizzabili. Il loro involucro era costituito da segmenti di acciaio che potevano essere separati per la ricarica del propellente e ricollegati fra loro con l'interposizione di apposite guarnizioni di tenuta.

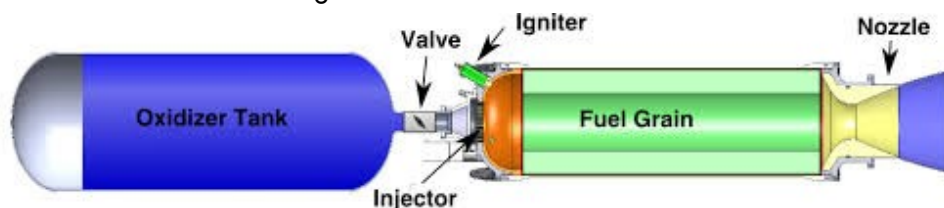
Il propellente era costituito da una miscela di perclorato di ammonio (ossidante), polvere di alluminio (combustibile), ossido di ferro (in funzione di catalizzatore), un polimero di riempimento e un agente aggragante epossidico. La carica di propellente di questi *booster* aveva una sezione interna in parte a stella e in parte a tronco di cono.

Non solo lo Shuttle, ma vari altri modelli di missili a propellenti liquidi, compresi gli *Ariane* dell'Agenzia Spaziale Europea, utilizzano i razzi a propellente solido come *booster* del loro primo stadio.



## Motori a razzo ibridi

Il terzo fondamentale tipo di motore a razzo chimico è quello «ibrido», nel quale una carica di combustibile solido, non contenente l'ossidante, viene bruciata tramite l'iniezione controllata di ossigeno.



Questo tipo di configurazione presenta i vantaggi della semplicità costruttiva tipica dei motori a combustibile solido, assieme a un preciso controllo della spinta, a una maggiore sicurezza ed efficienza propulsiva, e alla possibilità di riaccensioni multiple. Il combustibile di un razzo ibrido è costituito tipicamente da un polimero gommoso o da paraffina, addizionati di polveri di alluminio, litio o idruri metallici; i combustibili possono essere l'ossigeno liquido o gli ossidi di azoto.

Il veicolo americano *Virgin Galactic Spaceship Two*, che porterà turisti spaziali in voli suborbitali, utilizza come propulsore un razzo ibrido.



## Razzi ionici e nucleari

Accenniamo brevemente anche ad alcuni altri tipi di propulsori a razzo, che benché siano molto meno usati, o tuttora in fase di sperimentazione, rappresentano una alternativa interessante ai razzi chimici, specialmente per certi tipi di missioni.

### Razzi ionici

I razzi ionici (o elettrici) utilizzano flussi di ioni (atomi carichi elettricamente) fortemente accelerati con vari metodi; tutti i tipi sfruttano il favorevole rapporto tra carica e massa degli ioni, in particolare degli atomi di alcuni elementi come lo xeno, il bismuto e il mercurio, che permettono con differenze di potenziale relativamente piccole di ottenere velocità di eiezione dei gas di scarico molto più alte di quelle ottenibili nei razzi chimici.

Ciò consente di ottenere impulsi specifici estremamente alti, riducendo nel contempo la quantità di propellente richiesto, quindi il relativo peso da trasportare, ma con lo svantaggio di generare spinte modeste e quindi una scarsa accelerazione, a meno che il veicolo spaziale sia molto leggero. Tali caratteristiche rendono i propulsori ionici inadatti al lancio di veicoli in orbita, ma interessanti per le applicazioni orbitali o per i lunghi viaggi interplanetari.

Esistono diversi tipi di propulsori ionici, tutti quanti classificabili in due categorie: elettrostatici ed elettromagnetici, che differiscono essenzialmente per il modo in cui vengono accelerati gli ioni. Poiché la loro fonte di energia sono in genere le celle fotovoltaiche ad alto rendimento, il loro utilizzo prevalente è nella parte più interna del Sistema Solare, dove l'insolazione è più intensa.

### Razzi nucleari

In un razzo termico nucleare un fluido di lavoro, di solito idrogeno liquido, viene riscaldato ad alta temperatura in un reattore nucleare e fatto espandere attraverso un ugello per generare la spinta. L'energia prodotta nel reattore dalla fissione nucleare sostituisce quella generata dalle reazioni chimiche di un razzo convenzionale. L'alta densità energetica del combustibile nucleare rispetto a quelli chimici permette

di ottenere impulsi specifici almeno doppi rispetto a quella dei propellenti chimici, e a parità di spinta la massa di un razzo nucleare è circa la metà di un razzo convenzionale.

Ad oggi però, nessun razzo a propulsione nucleare ha mai volato, sebbene nel corso del programma americano NERVA (*Nuclear Engine for Rocket Vehicle Applications*), sviluppato ancora negli anni Sessanta e poi abbandonato, fossero stati costruiti e provati al suolo dei prototipi in configurazione di volo.

Completamente diversa è invece l'idea, avanzata qualche anno fa dal noto fisico nucleare Carlo Rubbia, di utilizzare i frammenti di atomi «sparati» ad alta velocità nel processo di fissione, utilizzandoli direttamente, senza passare attraverso una trasformazione termodinamica, per generare un plasma di idrogeno ad alta temperatura che verrebbe eiettato da un ugello per produrre spinte non troppo elevate, ma fortissimi impulsi specifici (si ipotizza di poter ottenere in tal modo velocità dell'ordine dei 40 km/s).

Tale plasma dovrebbe essere mantenuto nelle «camera di fissione» mediante tecniche di confinamento magnetico già note per i plasmi. Il tipo di atomo che meglio si presterebbe a questo processo è l'Americio 242, un raro isotopo dell'omonimo elemento transuranico che andrebbe prodotto nei reattori nucleari terrestri.

Secondo Rubbia i rischi della propulsione nucleare per l'equipaggio e per l'atmosfera nelle fasi di decollo e atterraggio non risulterebbero superiori a quelli delle attuali missioni spaziali. Come nel caso dei razzi termici nucleari, l'utilizzo di simili tecniche risulterebbe in ogni caso accettabile al di fuori dell'atmosfera, quindi dopo la loro eventuale messa in orbita con sistemi convenzionali.

#### Alcune considerazioni finali

Nelle due parti di questo articolo abbiamo a grandi linee ripercorso le tappe principali dello sviluppo dei razzi, e ricordato che nei primi decenni del secolo scorso un deciso impulso al loro sviluppo venne dalle idee, o forse sarebbe meglio dire dai «sogni», di alcuni pionieri/visionari, i quali compresero che i razzi rappresentavano il solo mezzo per uscire dall'atmosfera terrestre e lanciarsi alla conquista dello spazio.

È però difficile negare che sia stata in realtà la follia delle guerre «calde» e «fredde» del Novecento a fornire il decisivo impulso, e le grandi risorse umane ed economiche necessarie al loro decisivo sviluppo. Nonostante ciò, a partire dalla fine degli anni Cinquanta l'idea della conquista dello spazio si è rifatta strada e l'umanità si è con decisione lanciata in quest'avventura, affascinante, ma come è ben noto anche molto costosa<sup>3</sup>, se non più in termini di vite umane e distruzioni di massa, almeno in termini strettamente economici.

È naturale porsi la domanda: ne valeva veramente la pena, l'umanità ha speso bene le sue risorse e fa bene a continuare a impiegarne in gran quantità in questo campo? E poi, con quali obiettivi ulteriori e con quali modalità è meglio proseguire?

È preferibile puntare tutto sulle missioni robotizzate o non si può prescindere dalle missioni con astronauti a bordo, inevitabilmente più costose e rischiose? Ha senso ritornare sulla Luna o progettare missioni su Marte o verso gli asteroidi?

E anche per le missioni robotizzate non è forse meglio sfruttare essenzialmente la loro capacità di «visione dall'alto» per esplorare la Terra e i suoi tanti problemi?

Da cittadini di paesi oberati dal carico fiscale e angustiati dalla disoccupazione possiamo accettare che l'Agenzia Spaziale Europea abbia anche quest'anno un *budget* di 4.100 M€ o che l'Agenzia Spaziale Italiana ne abbia uno da 500 M€ «solamente» per incrementare le conoscenze scientifiche sulle comete o sui pianeti extrasolari?

Le risposte ufficiali a questi quesiti sono abbastanza note e razionali: la ricerca e l'esplorazione spaziale sono l'avanguardia della ricerca scientifica e tecnologica e sono un potente motore di sviluppo per tutti i paesi avanzati; esse creano possibilità non sempre prevedibili, ma che si trasformano prima o poi in vantaggi per tutti.

In effetti, non c'è dubbio che nel giro di pochi decenni le ricerche e le esplorazioni spaziali abbiano dilatato in maniera sorprendente le nostre conoscenze scientifiche sul pianeta che ci ospita, sul nostro sistema solare e più in generale sul cosmo intero. Esse hanno anche dato un potente contributo ad aumentare le capacità tecnologiche umane, creando nel contempo numerose nuove industrie e possibilità di lavoro. Ma quali sono stati i vantaggi per i singoli e per la nostra vita di tutti i giorni?

Tanti vantaggi, tante ricadute ci sono veramente state, e il loro elenco sarebbe così lungo che non basterebbe un altro articolo per descriverle tutte, ma ne possiamo ricordare almeno alcune delle più importanti.

### *Le telecomunicazioni*

Innanzitutto le telecomunicazioni, che per la copertura mondiale delle reti telefoniche, televisive e di trasmissione dati sono ormai completamente dipendenti da una miriade di satelliti artificiali in orbita attorno alla Terra; ricordiamo inoltre che è stata tutta la microelettronica, quella per intendersi che ci consente di avere un cellulare in tasca e un *tablet* nella borsa, che ha preso il là dalle esigenze e dalle ricerche condotte in ambito missilistico e spaziale.

### *La previsione del tempo*

Poi la *previsione del tempo*, che grazie ai dati prodotti in continuazione dai satelliti meteorologici è divenuta una scienza «quasi esatta», permettendoci di svolgere con maggior sicurezza non solo attività un tempo molto rischiose, quali la navigazione marittima e aerea, ma anche di ottimizzare innumerevoli lavori, dall'agricoltura alle costruzioni, o semplicemente i nostri viaggi di piacere.

Aggiungiamo a questo il gran numero di satelliti che tengono sotto controllo l'evoluzione dei territori, dell'atmosfera, del clima, delle risorse agro-alimentari, che hanno dato grandi contributi al miglioramento della prevenzione delle calamità naturali e della qualità della vita di intere nazioni.

Non meno importante è la rete dei satelliti che supportano i nostri apparecchi *GPS*, che sono davvero diventati di uso comune e indispensabili per una miriade di attività, personali, lavorative e sociali.

### *Le celle fotovoltaiche*

Vogliamo anche ricordare che in ambito spaziale sono state sviluppate e perfezionate le celle fotovoltaiche, una delle più riuscite e diffuse tecnologie di utilizzo dell'energia solare, dalle quali è nato un ormai imponente comparto industriale e una significativa produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile.

### *Una miriade di invenzioni e prodotti*

E poi una miriade di invenzioni o prodotti nati o perfezionati per esigenze spaziali, che sono poi divenuti di uso comune: il velcro, le lenti antigraffio per occhiali, i termometri medici non a contatto e nuove tecniche diagnostiche, nuove leghe metalliche di alte caratteristiche (più elastiche delle plastiche e più resistenti del titanio, usate per esempio negli attrezzi sportivi), materiali per l'isolamento termico e per la protezione dal fuoco, schiume a memoria di forma per imbottiture e nuovi tessuti dotati di grande capacità isolante e morbidezza, eccetera.

[Vai al PDF della Prima Parte dell'articolo](#)

Gianluca Lapini

(Ingegnere, già ricercato presso CISE e CESI Ricerca SpA)

### **Note**

<sup>1</sup> Negli Stati Uniti l'esperienza acquisita nel riassembleare e nel riportare in condizioni di lancio numerosi esemplari di missili V-2 (e loro parti) portati in patria come prede di guerra, fu essenziale per dar vita al programma missilistico *Hermes C*, sviluppato verso la fine degli anni Quaranta, che riprese ampiamente, migliorandole, le tecnologie usate dalle V-2. Tale programma fu l'antesignano dello sviluppo del *REDSTONE*, il primo missile americano in grado di portare una testata nucleare.

Il *REDSTONE*, entrato in servizio alla fine degli anni Cinquanta, fu sviluppato dal *team* di Von Braun trasferito negli USA; sebbene notevolmente più grande e pesante della V-2, ne conservava buona parte dell'impostazione generale, specie nella parte del motore e del sistema di controllo della spinta. In Unione Sovietica accadde qualcosa di simile; i tecnici russi, col fondamentale apporto dei tecnici tedeschi fatti prigionieri e poi «assunti», impararono prima a riprodurre le V-2 e a lanciarle con successo, poi svilupparono i loro primi missili balistici, in particolare i tipi R-1 e R-2, la cui tecnologia era un'evoluzione di quella utilizzata dalle V-2 stesse.



<sup>2</sup> Questa turbopompa fu un elemento chiave per il successo della V-2; il suo sviluppo fu possibile grazie anche ai grandi progressi tecnologici verificatisi in Germania e negli altri paesi industrializzati, nei primi decenni del Novecento, nello sviluppo delle turbomacchine (compressori, turbine a vapore e a gas, pompe), progressi che furono essenziali anche per lo sviluppo dei motori a reazione.

<sup>3</sup> La propulsione chimica, che come si è accennato è l'unica al momento disponibile per sfuggire alla gravità terrestre, ha costi dell'ordine di 10.000 \$ - 20.000 \$ per ogni kg di carico utile da immettere in un'orbita bassa, e di 60.000 \$/kg - 120.000 \$/kg per un'orbita geostazionaria.