

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO**  
FACOLTÀ DI SCIENZE STRATEGICHE  
LAUREA MAGISTRALE IN  
SCIENZE STRATEGICHE E DELLE COMUNICAZIONI

---

**TESI DI LAUREA**  
in  
*Chimica generale e inorganica*

**USI CIVILI E MILITARI  
DEI SATELLITI**

**Relatore:**  
*Chiar.mo Prof. Carlo NERVI*

**Correlatore:**  
*Ten. Gen. R.O. Ing. Antonino IARIA*

**Candidato:**  
*Ten. t. (tlm) RN spe Dora di CAMILLO*  
*(Matricola n.295297)*

**ANNO ACCADEMICO 2006 - 2007**

# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>pag. V</b>
<b>CAPITOLO 1 – Cenni storici</b>	<b>pag. 1</b>
1.1 Elementi fondamentali di un satellite artificiale	pag. 2
1.2 Stabilizzazione dei satelliti	pag. 3
1.2.1 Stabilizzazione con volano	pag. 4
1.2.2 Stabilizzazione su tre assi con microrazzi	pag. 5
1.3 Natura delle perturbazioni agenti su un satellite	pag. 6
1.4 Micropropulsori a gas freddo	pag. 8
1.5 Micropropulsione a decomposizione catalitica	pag. 9
1.6 Transitori e vita nei micropropulsori ad idrazina	pag. 10
<b>CAPITOLO 2 – Propulsione</b>	<b>pag. 11</b>
2.1 Classificazione	pag. 13
2.2 Propulsione nucleare	pag. 17
2.3 Propulsione elettrica	pag. 20
2.4 Propulsori elettrotermici	pag. 21
2.5 Utilizzo del perossido di idrogeno	pag. 22
2.6 Concetti propulsivi suscettibili di sviluppo futuro	pag. 24
2.7 Propulsione ad antimateria	pag. 25
<b>CAPITOLO 3 – Endoreattori</b>	<b>pag. 26</b>

3.1 Endoreattori termici	pag. 29
3.2 Endoreattori chimici	pag. 30
3.3 Endoreattori elettrotermici	pag. 32
3.4 Endoreattori nucleari termici	pag. 32
3.5 Endoreattori solari termici	pag. 33
3.6 Endoreattori elettrostatici/elettromagnetici	pag. 33
3.7 Endoreattori a perossido di idrogeno	pag. 34
3.8 Endoreattori a propellenti ibridi	pag. 35
3.9 Endoreattori a propellenti solidi	pag. 39
3.10 Propellenti per endoreattori: propellenti liquidi	pag. 40
3.10.1 Propellenti solidi	pag. 42
3.10.2 Ossidanti utilizzati	pag. 44
3.10.3 Combustibili utilizzati	pag. 46
<b>CAPITOLO 4 – Celle fotovoltaiche</b>	<b>pag. 49</b>
4.1 Prima applicazione dell'energia solare nello spazio	pag. 57
4.2 La cella fotovoltaica	pag. 58
4.3 Pannelli con celle in silicio monocristallino	pag. 59
4.4 Pannelli con celle in silicio multicristallino	pag. 60
4.5 Pannelli FV con film in silicio amorfo (a-Si)	pag. 61
4.5.1 Tecnologia a-Si: H Tandem eTriple Junction	pag. 62
4.5.2 Celle CIS e CIGS	pag. 64
4.5.3 Tecnologia cadmio telluride/cadmiosulfide (CTS)	pag. 65

4.5.4 Arsenurio di Gallio (GaAs)	pag. 65
4.6 Fotovoltaico della terza generazione	pag. 68
4.6.1 Tecnica del beam splitting	pag. 69
4.6.2 Celle a giunzioni multiple sovrapposte o multicolore	pag. 70
4.6.3 La cella di Grätzel	pag. 71
<b>CAPITOLO 5 – Tipologia satelliti</b>	<b>pag. 80</b>
5.1. Satelliti per la ricerca scientifica	pag. 86
5.1.1 La missione Integral ed Envisat	pag. 86
5.2 Satelliti per la comunicazione	pag. 88
5.3 Satelliti per la navigazione	pag. 90
5.3.1 Il sistema di navigazione satellitare europeo Galileo	pag. 91
5.3.2 I servizi offerti da Galileo	pag. 95
5.4 Satelliti per la ricognizione	pag. 97
5.5 Satelliti meteorologici	pag. 97
5.6 Satelliti per l'osservazione della terra e del mare	pag. 99
5.7 Satelliti militari	pag. 100
5.7.1 Il SICRAL	pag. 101
5.8 I primi satelliti militari degli anni 60	pag. 105
5.9 La nascita dei satelliti commerciali	pag. 106
5.10 Il significato della risoluzione	pag. 108
5.11 I migliori satelliti militari	pag. 112
5.12 I migliori satelliti civili	pag. 113

5.13 La fine del monopolio governativo	pag. 116
5.14 Implicazioni e limitazioni operative	pag. 116
5.15 La corsa verso una tecnologia “dual use”	pag. 124
<b>Conclusioni</b>	<b>pag.129</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>pag.131</b>
<b>Risorse</b>	<b>pag.134</b>

# INTRODUZIONE

Cosmodromo di Baikonur (Kazakistan), 4 ottobre 1957. Chi può dimenticare il giorno che segnò l'inizio di un'era nuova, quella della conquista del Quarto Ambiente, lo spazio.

Una data che si può accomunare a tante altre che hanno segnato la storia, come il 12 ottobre 1492, la scoperta dell'America, il 14 luglio 1789 la presa della Bastiglia, evento simbolo della Rivoluzione Francese e della riscossa del mondo intero contro la tirannide, e si potrebbe continuare a lungo.

La decisione di fare una tesi di laurea sui satelliti è stata motivata, oltre che dalla particolare curiosità sull'argomento dal punto di vista chimico e tecnico, per quel che riguarda la propulsione ed i propellenti che permettono la spinta di un satellite nello spazio, anche dal particolare desiderio di conoscere i più interessanti utilizzi dei satelliti dal punto di vista civile e militare, scelta non casuale, ma scaturita dalla consapevolezza che dietro la ricerca sulle tecnologie spaziali c'è sempre una forte carica militare, tattica e strategica.

Il profondo ed affascinante legame che lega la tecnologia satellitare al mondo militare trova una delle sue massime espressioni nel SICRAL (Satellite Italiano Comunicazioni Riservate e Allarme), progettato da Alcatel Alenia Space Spa.

Preme porre, innanzitutto, l'attenzione sul clima in cui debuttò la tecnologia spaziale.

Quando lo Sputnik russo fece udire i suoi segnali dallo spazio, vi fu una grande preoccupazione negli USA che suscitò una crisi di sfiducia. Se nello spazio giravano i satelliti sovietici avrebbero potuto girare anche i missili a testata nucleare.

Da quel momento è iniziata una guerra che potremmo definire "spaziale" e che vede le maggiori potenze del mondo competere sul piano della tecnologia, alla conquista dello spazio.

Al di là di questo i satelliti, in qualunque modo e per qualunque scopo siano usati, da quando sono stati utilizzati hanno dato e continuano a darci un notevole e prezioso aiuto per capire meglio il nostro pianeta sotto tutti i suoi aspetti e a darci spunti per migliorare il nostro comportamento nei suoi confronti.

Ma quale sarà la nuova frontiera?

Non facciamo previsioni, ma intuiamo, quanto meno, che il prossimo balzo sarà oltre il sistema solare.

Dai satelliti meteorologici a quelli per telecomunicazioni, da quelli per ricognizione ed osservazione o per navigazione a quelli per la difesa e la sicurezza, tutti, indistintamente, danno giorno per giorno un contributo al progresso scientifico con il loro grande occhio sempre puntato su di noi e su ogni minimo angolo della Terra.

La tecnologia satellitare si sposa, quindi, coerentemente con la raccolta e l'analisi di dati, soddisfacendo l'esigenza del "sapere" che, sulla base della nuova concezione della guerra, diviene strategica.

Questo significa rivoluzionare il concetto di difesa e di sicurezza, per arrivare alla nuova idea di attacco preventivo.

«Se non conosci nè te stesso nè il nemico, allora ogni battaglia sarà per te fonte di pericolo»<sup>1</sup>.

L'obiettivo, dunque, di questo lavoro di tesi è valutare l'efficienza e l'impiego dei satelliti sia per usi civili che per usi militari e, consapevole del ruolo che ricopro, quale Ufficiale dell' Arma delle Trasmissioni dell'Esercito Italiano, mettere in evidenza il legame che unisce tecnologia satellitare e mondo militare, in ambito generale e delle comunicazioni.

---

<sup>1</sup> Sun Tzu, *L'arte della guerra*, Ubaldini Editore

# **CAPITOLO 1**

## **Cenni storici**

La possibilità teorica di collocare un corpo nello spazio in modo che diventasse un satellite terrestre era stata considerata nel 1687 da Isaac Newton come conseguenza dei suoi studi sulla teoria della gravitazione. Solo all'inizio del sec. XX, tuttavia, il lavoro teorico del russo Konstantin Tsiolkovsky e gli esperimenti dello statunitense Robert Goddard confermarono la possibilità di lanciare un satellite nello spazio per mezzo di un razzo.

Durante il periodo tra il 1943 e il 1946 diversi studi indicarono che i razzi allora disponibili non sarebbero stati in grado di porre in orbita un satellite. Tuttavia, l'attività intorno ai razzi per missili e per ricerche negli strati superiori dell'atmosfera fu così ampia dopo la seconda guerra mondiale che nel 1954 era già fuori discussione la fattibilità del lancio di un satellite. Nell'ottobre del 1954 il Comitato per l'anno geofisico internazionale (IGY) raccomandò ai paesi membri di prendere in considerazione il lancio di piccoli veicoli satelliti per un'esplorazione dello spazio a scopi scientifici. Nell'aprile e nel luglio 1955 l'Unione Sovietica e gli Stati Uniti, rispettivamente, annunciarono dei programmi per il lancio di questi satelliti nell'ambito dell'IGY. Coerentemente, l'Unione Sovietica

lanciò Sputnik 1 il 4 ottobre 1957 e gli Stati Uniti lanciarono Explorer 1 il 31 gennaio 1958.

Questi due satelliti crearono un enorme stimolo per un ulteriore lavoro sui satelliti artificiali, soprattutto con la scoperta delle fasce di radiazione di Van Allen, che fu resa possibile da Explorer 1. Fino dall'inizio fu data grande importanza ai satelliti in vista della possibilità di misurare le caratteristiche del nuovo ambiente spaziale e di creare le premesse per il progetto di satelliti per comunicazioni, navigazionali, per ricognizione fotografica, di tipo scientifico e di tipo meteorologico, nonché, in ultima analisi, per voli spaziali con uomini a bordo. In breve tempo vennero realizzati dei satelliti sperimentali per tutti questi scopi.

Dal 1957 sono stati messi in orbita più di 3000 satelliti, ed essi sono ormai una parte integrante del modo di vivere attuale. La grande maggioranza di questi satelliti sono stati costruiti dagli Stati Uniti e dall'ex Unione Sovietica, ma la European Space Agency che comprende i paesi dell'Europa occidentale, si sta impegnando sempre più attivamente nell'esplorazione dello spazio mediante satelliti. Il Canada, la Cina, l'India, l'Italia e il Giappone sono tra i paesi che hanno costruito satelliti che sono stati poi lanciati.

## **1.1 ELEMENTI FONDAMENTALI DI UN SATELLITE ARTIFICIALE**

Tutti i satelliti artificiali possiedono alcune caratteristiche comuni. Queste comprendono i radar per misure di quota, sensori del tipo degli strumenti

ottici nei satelliti per osservazioni, ricevitori e trasmettitori nei satelliti per comunicazioni e sorgenti stabili di radiosegnali nei satelliti navigazionali. Le celle a energia solare generano l'energia necessaria dal Sole e per gli intervalli di tempo durante i quali il Sole è schermato dalla Terra si impiegano batterie di riserva, che a loro volta vengono ricaricate dalle celle solari. In casi particolari sono state utilizzate fonti di energia nucleare. Un' apparecchiatura per il controllo dell'assetto è necessaria per mantenere il satellite nell'orbita desiderata e, in alcuni casi, per orientare opportunamente le antenne o i sensori. I trasmettitori e i ricevitori radio sono usati per scambiare segnali con la terra, infine i codificatori telemetrici misurano voltaggi, correnti, temperature e altri parametri che descrivono le condizioni di funzionamento delle apparecchiature e ritrasmettono queste informazioni alla Terra.

## **1.2 STABILIZZAZIONE DEI SATELLITI**

La necessità di mantenere orientati i satelliti artificiali in una ben determinata direzione (per esempio i pannelli solari perpendicolarmente ai raggi del sole, le antenne direzionali verso il centro della terra, etc.) obbligano a concepire un sistema di controllo di assetto continuamente in funzione per correggere le variazioni indotte da disturbi esterni o da mutamenti di posizione sull'orbita. Le tecniche di controllo di assetto si possono classificare in due categorie: le prime chiamate tecniche passive, sfruttano tecniche naturali; le seconde invece, forze continue e

pulsanti generate a bordo sono chiamate invece forze attive. Le tecniche attive più usuali sono quelle della stabilizzazione con volano e della stabilizzazione su tre assi con micropropulsori.

### 1.2.1 STABILIZZAZIONE CON VOLANO

Ponendo un volano in rotazione, il suo asse viene ad essere stabilizzato per effetto giroscopico senza che per questo si debba porre in rotazione il satellite stesso come invece avviene per i satelliti con controllo di assetto a "spin".

Volendo far ruotare il satellite attorno all'asse del volano basta variare la velocità di rotazione del volano stesso. Per la conservazione del momento della quantità di moto infatti il satellite inizierà a ruotare in senso opposto alla accelerazione impressa al volano secondo l'espressione:

$$j(\omega_1 - \omega) = J \varpi$$

$j, J$  = momenti d'inerzia del volano e del satellite

$\omega, \omega_1$  = velocità angolari del volano prima e dopo la manovra

$\varpi$  = velocità angolare impressa al satellite.

Accelerando e frenando il volano si può perciò ottenere la rotazione del satellite. Disponendo opportunamente tre volani lungo i tre assi del satellite è perciò possibile governare l'assetto in maniera del tutto completa.

Generalmente la massa del volano varia da 0,5 a 10 kg e la sua velocità assume valori di 1000-100 giri/min.

Quando il volano esce dal campo di velocità di rotazione per cui è previsto e necessario riportarlo alla sua velocità nominale.

Onde non perturbare l'assetto del satellite si provvede alla desaturazione del volano ossia si riporta la velocità al valore nominale creando con un sistema di micropropulsori un momento opposto alla coppia creata dalla variazione di velocità.

### **1.2.2 STABILIZZAZIONE SU TRE ASSI CON MICRORAZZI**

Un sistema di microrazzi posti opportunamente all'esterno del satellite provvede a generare coppie tali sia da contrastare i disturbi esterni, sia da correggere la direzione dei tre assi del satellite.

Quando una coppia di microrazzi entra in azione il satellite accelera angolarmente attorno al suo asse normale al piano in cui giacciono i micropropulsori.

Volendo arrestare questo moto, che praticamente non risente di alcun effetto di smorzamento, si deve intervenire spegnendo la prima coppia di

propulsori ed attivandone un'altra che agisca in senso opposto alla prima.

Il discorso è facilmente estendibile all'intero sistema riassale.

Ordinariamente, poiché non è possibile una modulazione del valore della spinta, i micropropulsori vengono fatti continuare ad intermittenza e variando frequenza e tempi di accensione e spegnimento (il cosiddetto "duty cycle") a seconda delle forze richieste. I microrazzi usati possono essere a gas freddi (azoto, freon o altro gas contenuto sotto pressione in serbatoi) o a monopropellente ad azione diretta o con generatore di gas, oppure ancora con propulsori a ioni.

### **1.3 NATURA DELLE PERTURBAZIONI AGENTI SU DI UN SATELLITE**

Se si tengono in considerazione solo i satelliti geostazionari i quali necessitano di una stabilizzazione di assetto completa, le azioni di disturbo possono essere così riassunte:

1. Attrazione gravitazionale del sole e della luna
2. Difetti di sfericità e di ripartizione di massa sul globo terrestre
3. Pressione di radiazione solare

Esse hanno come effetti, per quanto riguarda l'orbita, una rotazione del piano orbitale del satellite rispetto al piano equatoriale terrestre (deriva NS) ed una deriva in longitudine (deriva EO).

La variazione di velocità annuale per la deriva NS è dell'ordine di 50 m/s, mentre per la deriva EO si ha una variazione annua di circa 1 m/s.

Per le manovre di controllo di orbita e di assetto, sempre maggior interesse ricoprono gli studi di un sistema efficiente di micropropulsione. Sotto alcuni aspetti la vita di un satellite artificiale ne è strettamente legata, in particolar modo per quanto riguarda la quantità di propellente.

La messa in orbita, in questi ultimi anni, di satelliti geostazionari di piccola massa ha richiesto un sistema di controllo di assetto in grado di fornire spinte a basso livello (valori dell'ordine del decimo di N) per durate notevoli (superiori a 5 anni).

L'adozione di un sistema di micropropulsione pulsante, con modulazione della frequenza di accensione e spegnimento dei microrazzi, conduce ad una regolazione che esige il continuato funzionamento del sistema. Il satellite assume una dinamica che lo porta ad un funzionamento in "ciclo limite", ossia la condizione di equilibrio risulta essere una continua oscillazione attorno ad un determinato punto di equilibrio, del resto mai raggiunto.

In questo caso l'adozione di micropropulsori a basso livello di spinta è quanto mai favorevole poiché il consumo medio di propellente è proporzionale al quadrato dell'impulso di un "bit" di correzione.

Se i satelliti geostazionari "spinnati" richiedono un livello di spinta dell'ordine di 2-25 N, quelli dell'ultima generazione richiedono invece livelli assai più bassi (0,5-3 N).

## 1.4 MICROPULSORI A GAS FREDDO

Questo sistema utilizza del gas inerte compresso ad alta pressione in serbatoi; il gas è inviato poi a piccoli ugelli comandati da valvole elettromagnetiche. Un regolatore di pressione provvede a stabilizzarne il valore per un flusso ottimale nell'ugello.

Il gas utilizzato deve avere caratteristiche di inerzia chimica, punto di liquefazione il più basso possibile, impulso specifico elevato.

Usualmente vengono utilizzati gas come l'argon, l'azoto e vari freon.

Vantaggi principali di tale sistema sono la sua estrema semplicità e la possibilità di ottenere bassi livelli di spinta.

Per contro non sono ottenibili impulsi specifici superiore ai 70 s, il che significa imbarcare 1 kg di propellente ogni 700 Ns di impulso totale richiesto. Sono stati utilizzati micropropulsori a gas freddo sui satelliti D-2A, D-2B, TD-1°, SYMPHONIE e in generale su tutti i satelliti della passata generazione con stabilizzazione sui tre assi, per cui sono richiesti bassi livelli di spinta. Attualmente la tendenza è di sostituirli con sistemi a monopropellente (idrazina) onde ottenere maggiori impulsi specifici, per poter allungare la vita del satellite stesso.

## 1.5 MICROPROPULSIONE A DECOMPOSIZIONE CATALITICA

L'utilizzazione dell'idrazina come monopropellente per microrazzi inizialmente è stata legata alla produzione di un catalizzatore in grado di poter controllare la reazione di decomposizione. Il primo catalizzatore utilizzato con notevoli successi ed oggi non ancora obsoleto è lo SHELL 405. Gli studi in Europa, nel campo dell'idrazina decomposta cataliticamente sono da far risalire al 1967 con lo studio di un satellite per telecomunicazioni.

In questa prima fase le ricerche si sono indirizzate al progetto di un propulsore da 5-20 N. La scelta della propulsione ad idrazina è stata fatta soprattutto in ragione della relativa semplicità dell'intero sistema.

In seguito si sono attivate in Europa ricerche su nuovi catalizzatori da utilizzare in alternativa allo SHELL 405; sono così sorti il catalizzatore CNES-ESRO (CNESRO) studiato in Francia ed adottato oggi su parecchi micropropulsori prodotti dalla SEP e la famiglia "KC", prodotti dalla Kalichemie tedesca.

I problemi principali connessi con un tale tipo di micropropulsione risultano essere essenzialmente l'inerzia termica del pacco catalitico (che ritarda i tempi di andata a regime); la contaminazione dello stesso (che condiziona la vita dell'intero micropropulsore) e l'ostruzione dei condotti di iniezione.

## **1.6 TRANSITORI E VITA NEI MICROPROPULSORI AD IDRAZINA**

I micropropulsori ad idrazina vengono sostanzialmente impiegati con funzionamento intermittente onde poter ottenere una modulazione del livello di spinta con sole operazioni di accensione e spegnimento.

La partenza a freddo del reattore chimico impone un ritardo nella stabilizzazione delle temperature nella camera. Ciò comporta che i primi impulsi presentino in genere rendimenti ed efficienze notevolmente più basse dei valori ordinari. Il comportamento si mantiene quindi costante sino al crollo delle caratteristiche fisiche e chimiche del reattore stesso (contaminazione del catalizzatore, ossidazione delle pareti riscaldanti, ostruzione dei condotti di adduzione) dovuto all'invecchiamento del sistema. A tal punto in breve tempo il micropropulsore diventa inutilizzabile.

## **CAPITOLO 2**

### **Propulsione**

Il significato letterale di propulsione è “spinta in avanti”. Questa definizione presuppone l'esistenza di una forza finalizzata ad ottenere un certo atto di moto di un corpo. Per sistema propulsivo si intende l'insieme dei componenti necessari a generare e/o controllare la forza propulsiva in modo da realizzare un prefissato stato di moto di un corpo.

In generale tutti i sistemi propulsivi sono a “reazione” siano essi terrestri, navali, aerei o spaziali. Si perviene, infatti, all'ottenimento della forza propulsiva come ad una forza reazione all'applicazione di una forza uguale e contraria sull'ambiente esterno e/o su sostanze trasportate a bordo ed espulse dal sistema stesso.

La caratteristica comune a quasi tutti i sistemi di propulsione aerospaziale è che la forza propulsiva, detta spinta (thrust), si ottiene come risultato dell'incremento di quantità di moto di un fluido, detto fluido propulsivo, il quale può avvenire o solo all'esterno del motore (eliche) , o all'interno ma con fluido esterno (esoreattori), oppure all'interno con solo fluido originariamente stivato a bordo (endoreattori).

L'incremento della quantità di moto, necessario a generare la spinta, viene ottenuto a spese di energia resa disponibile da diverse fonti. In generale si possono considerare quattro tipi di fonti energetiche nel campo della propulsione aerospaziale, anche se soltanto quella chimica ha trovato larga diffusione e fornisce energia alla quasi totalità dei propulsori. Di queste fonti soltanto le prime tre possono essere considerate primarie, e cioè disponibili a bordo senza trasformazioni in altri tipi di energia. Esse sono:

- **Energia Chimica:** è la principale fonte di energia per la propulsione, derivante dall'energia sviluppata dalle reazioni chimiche di combustione che avvengono tra combustibile e ossidante (o dalla decomposizione di un monopropellente). Il combustibile è un derivato del petrolio negli esoreattori, idrogeno a altre sostanze negli endoreattori. L'ossidante è costituito dall'ossigeno presente nell'aria nel caso di propulsori ad elica ed esoreattori, mentre è ossigeno puro o altre sostanze negli endoreattori.
- **Energia Nucleare:** la fattibilità e la possibile convenienza di propulsori ad endoreazione che sfruttano un reattore nucleare a fissione è stata dimostrata. Tuttavia i rischi nel controllo di tale tipo di energia non ne hanno consentito finora l'impiego pratico.
- **Energia solare.** L'energia solare può essere sfruttata per generare elettricità da utilizzare in propulsori elettrici, o concentrata

mediante specchi per riscaldare un fluido operativo, oppure, in modo più avveniristico, per spingere vele solari. In ogni caso l'impiego è difficile a causa delle enormi superfici di pannelli solari per generare potenze significative. Nonostante queste difficoltà, l'energia solare è effettivamente utilizzata in alcuni satelliti e sonde.

Accanto a queste fonti merita di essere considerata una quarta fonte di energia, secondaria, che può essere prodotta a bordo da sorgenti primarie. Essa è:

- **Energia Elettrica.** L'energia elettrica ha finora trovato impiego molto limitato a causa dei tipicamente bassi rapporti spinta/peso. L'elevato peso di una configurazione in cui l'energia elettrica è immagazzinata esclusivamente in batterie porta ad escludere questa soluzione. L'energia elettrica è prodotta a bordo da altre sorgenti energetiche, che potranno essere considerate primarie.

## 2.1 CLASSIFICAZIONE

I sistemi di propulsione si dividono in due famiglie. La prima è quella dei motori ad elica in cui la spinta è generata dall'incremento della quantità di moto dell'aria attraverso la rotazione di un'elica. La seconda famiglia è quella dei propulsori a getto<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Questi sistemi propulsivi vengono detti anche a reazione, sebbene tale definizione possa generare confusione in quanto anche negli altri casi la spinta è ottenuta per reazione.

Con questo nome si indicano tutti quei propulsori in cui almeno parte della spinta è ottenuta mediante l'espulsione di massa stivata a bordo dal veicolo. Nell'ambito della propulsione a getto bisogna poi subito distinguere tra i motori che sfruttano almeno in parte l'atmosfera come fluido propulsivo (si tratta degli esoreattori o air-breathing engines) e quelli invece in cui tutto il fluido propulsivo è stivato al bordo del veicolo (si tratta degli endoreattori o rockets). Questi ultimi sono i soli motori in grado di fornire una spinta al di fuori dell'atmosfera.

Gli endoreattori rappresentano l'unico sistema propulsivo in grado di portare carico utile al di fuori dell'atmosfera terrestre, grazie alla loro elevata spinta specifica ed alla capacità di fornire una spinta nel vuoto. Anche nel campo degli endoreattori sono stati sviluppati diversi concetti propulsivi, che possono essere divisi nelle famiglie degli endoreattori chimici, nucleari ed elettrici, alcuni finora rimasti sulla carta, ed altri invece di maggior successo. Gran parte della propulsione spaziale è attualmente ottenuta sfruttando lo sviluppo di energia dalla reazione chimica di uno o più propellenti per generare gas a temperature molto elevate. Successivamente questi gas sono espansi in un ugello ed espulsi ad alta velocità.

A seconda dello stato fisico dei propellenti è possibile dividere in varie classi i motori a propulsione chimica; a ciascuna di esse competerà un certo livello di impulso specifico, definito come il rapporto tra la spinta fornita e la portata ponderale del propellente utilizzato:

- **Motori a propellente liquido:** possono essere a loro volta suddivisi in motori monopropellente e bipropellente. I primi sfruttano la decomposizione di un unico propellente, attivata dalla superficie di un catalizzatore, per generare gas ad alta temperatura. I propellenti più utilizzati sono idrazina ( $N_2H_4$ ) e perossido di idrogeno ( $H_2O_2$ ), ottenendo impulsi specifici intorno ai 230-240 s per la prima sostanza, 130-190 s per la seconda (valori influenzati dalla concentrazione iniziale). Nella figura 2.1 abbiamo lo schema di un endoreattore a bipropellenti con il carico trasportato stivato all'interno del cono di cima, i serbatoi di ossigeno e idrazina al centro del razzo e le pompe dei propellenti situate in prossimità dei reattori.



*Figura 2.1 – Schema di endoreattore a bipropellenti*

Negli endoreattori a bipropellenti vengono impiegati come combustibili idrocarburi (petrolio, kerosene, metano liquido), alcoli (etilico, metilico e altri), idrogeno liquido, ammoniaca, ecc.; i comburenti sono costituiti da ossigeno liquido, acido nitrico, composti di azoto, carbonio o fluoro con ossigeno ed altre

sostanze che sviluppano ossigeno. La spinta che può essere fornita da un endoreattore è espressa dal prodotto della portata massica dei gas eiettati per la velocità di eiezione.

I motori bipropellente sfruttano la reazione di combustione ad alta temperatura tra due sostanze liquide (combustibile ed ossidante) per generare gas che possono raggiungere temperature fino a 4000 °C. La pressurizzazione dei propellenti può avvenire mediante gas pressurizzante o tramite una turbopompa. Di seguito si riportano le combinazioni combustibile-ossidante più utilizzate e i valori massimi dell'impulso specifico ottenuto (caso ideale), in realtà dipendente dal rapporto di miscelazione dei due propellenti.

Combustibile	Ossidante	Impulso specifico
Idrazina ( $N_2H_4$ )	Tetrossido di azoto (NTO)	310
Monometilidrazina (MMH)	Tetrossido di azoto (NTO)	342
RP1	Ossigeno ( $LO_2$ )	358
Idrogeno ( $LH_2$ )	Ossigeno ( $LO_2$ )	455
Idrogeno ( $LH_2$ )	Fluoro ( $LF_2$ )	546

*Tabella 2.1 – Impulsi specifici per varie combinazioni di propellenti ( $\mathcal{E} = 40$ ).*

- **Motori a propellente solido:** il propellente solido, o grano, è contenuto nella camera di combustione e contiene tutti gli elementi chimici per una combustione completa . Tali motori consentono di regolare l'andamento della spinta (progressivo, neutro, regressivo), ma non è possibile ottenere un comportamento pulsato. L'impulso specifico ideale di questo tipo di motori è in genere più basso rispetto a quello dei razzi a liquido, non superando i 270 s.
- **Motori a propellente ibrido:** un agente ossidante liquido è iniettato nella camera di combustione dove reagisce chimicamente con un grano solido di combustibile. Consentono il controllo della spinta e forniscono un impulso specifico maggiore rispetto ai razzi al solido, a spese di una maggiore complessità.

## 2.2 PROPULSIONE NUCLEARE

Nella propulsione nucleare una fonte di energia nucleare è utilizzata per riscaldare un gas che è fatto poi espandere attraverso un ugello, in modo analogo a quanto avviene per gli endoreattori chimici.

Tre diverse fonti di energia nucleare possono, almeno in linea di principio, essere considerate:

- energia da decadimento di radioisotopi;
- energia da fissione nucleare;
- energia da fusione nucleare.

Il decadimento di radioisotopi comunque fornisce energia ad un tasso molto basso, per cui può al più essere utilizzato come fonte energetica per motori per compensazione di perturbazioni orbitali o simili, dove sono richieste spinte molto basse. Nei reattori a fissione nucleare il bombardamento tramite neutroni del nucleo di particolari atomi fissili ( $U^{233}$ ,  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$ ,  $Pu^{241}$ ) provoca la fissione di questo in due parti, e l'emissione di due o tre neutroni (utilizzati appunto per mantenere la reazione a catena); la massa complessiva di questi frammenti è lievemente inferiore a quella del nucleo originale più il neutrone incidente, per cui tale differenza di massa si trasforma in energia secondo la relazione:

$$E = \Delta mc^2$$

Dove  $c$  qui indica la velocità della luce. A fini pratici gli isotopi fissili interessanti sono l'uranio 235 ed il plutonio 239, che può essere ottenuto mediante irraggiamento neutronico dell'uranio 238.

L'uranio 233 potrebbe in teoria essere ottenuto mediante irraggiamento neutronico del torio 232, ed il plutonio 241 mediante prolungato irraggiamento neutronico dell'uranio 238, che si trasforma progressivamente in  $Pu^{239}$ ,  $Pu^{240}$ ,  $Pu^{241}$ ; la prima possibilità è stata in effetti considerata, ma non ha mai trovato ancora applicazione pratica, mentre la seconda è evidentemente da scartare grazie alla possibilità di utilizzare direttamente l'isotopo 239 del plutonio. La fissione di un chilogrammo di materiale fissile produce una energia di circa  $9 \cdot 10^{13}$  J;

possiamo confrontare questa energia con quella rilasciata dalla combustione di un chilogrammo di miscela idrogeno-ossigeno in proporzioni stechiometriche, che risulta dell'ordine di  $1.3 \cdot 10^7$  J. Il "combustibile nucleare" ha dunque un potenziale energetico di ben 6-7 ordini di grandezza superiori a quelli chimici, e quindi rappresenta una fonte di energia estremamente attraente. Per contro, la massa del reattore nucleare e degli impianti connessi risulta alquanto elevata; pur tuttavia, la propulsione nucleare rimane a tutt'oggi la sola alternativa potenzialmente praticabile agli endoreattori chimici per propulsori ad alta spinta. Si pensa di poter raggiungere rapporti spinta/peso  $F/W \approx 3$ , quindi alquanto più bassi di quelli degli endoreattori chimici, ma accettabili se compensati da un ridotto consumo di propellente grazie ad un'alta velocità efficace di uscita. Nei reattori a fusione nucleare il processo che si intende utilizzare è invece la fusione di due nuclei di elementi leggeri (idrogeno, deuterio, o tritio) in un nucleo di elemento più pesante (es. tritio, elio); anche in questo caso si ha un difetto di massa che risulta in un rilascio di energia. Tale processo al momento attuale non è ancora controllabile, per cui i propulsori basati su di esso hanno per ora un interesse speculativo.

Le migliori prestazioni dei propulsori nucleari rispetto a quelli chimici consentirebbero di ridurre drasticamente la durata della missione, consentendo così l'esposizione dell'equipaggio alle radiazioni cosmiche, che risulterebbe altrimenti pericolosa.

## 2.3 PROPULSIONE ELETTRICA

### Classificazione

I propulsori elettrici possono essere classificati in tre categorie:

1. **elettrotermici**, in cui una corrente elettrica è utilizzata per riscaldare, per esempio attraverso una resistenza, un gas che è fatto poi espandere attraverso un ugello, in modo analogo a quanto accade per gli endoreattori chimici;
2. **elettrostatici o a ioni**, in cui la spinta è prodotta attraverso l'accelerazione di ioni in campo elettrico;
3. **elettromagnetici o MPD (magneto-plasma-dinamici)**, in cui un plasma è accelerato per azione di un campo magnetico su cariche in moto, quest' ultime dovute al passaggio di una corrente elettrica (motivo per cui si utilizza il plasma, cioè un gas portato a temperature tali da divenire elettricamente conduttivo).

I principali componenti di un sistema propulsivo elettrico sono un'unità di potenza (cioè una fonte di energia elettrica), un'unità di condizionamento della potenza che ha il compito di fornire l'energia elettrica nelle condizioni di tensione e frequenza opportune, un sistema di immagazzinamento ed alimentazione del propellente, un thruster, cioè l'organo che fornisce la spinta , ed infine, radiatori per disperdere l'energia non convertita ai fini propulsivi.

I propulsori elettrici sono caratterizzati da un rapporto spinta/peso estremamente basso, e da velocità efficaci di uscita alte. Non possono

quindi assolutamente essere usati per gli stadi di lanciatori, ma possono essere usati su satelliti già in orbita per correggere le perturbazioni orbitali, o per trasferimenti orbitali, oppure su sonde interplanetarie. A causa della bassa spinta si hanno però lunghi tempi di trasferimento orbitale con conseguenti penalità economiche, e danni ai pannelli solari a causa della lunga permanenza nelle fasce di Allen.

## 2.4 PROPULSORI ELETTROTHERMICI

Si distinguono due tipi di propulsori elettrotermici:

- **Resistogetti**, in cui la corrente elettrica riscalda una resistenza che va quindi a scaldare il propellente. In questi propulsori la  $T_c$  raggiungibile è limitata dalla resistenza dei materiali. La velocità efficace di uscita massima si avrebbe ovviamente utilizzando come propellente l'idrogeno (che ha il più basso peso molecolare); questa scelta comporta però anche serbatoi voluminosi e quindi pesanti. Questo problema è più sentito che non negli endoreattori chimici a propellente criogenico, in quanto in essi la massa del propellente è costituita solo in piccola parte da idrogeno liquido. Incidentalmente tale inconveniente si presenta anche per i propulsori nucleari. Si può pensare di utilizzare, anziché l'idrogeno liquido, l'idrazina, pur con i problemi che comporta, perché essendo anche propellente, contribuisce alla generazione della spinta; in presenza di un catalizzatore infatti essa si decompone

con generazione di calore, preriscaldandosi a circa 1000k. Inoltre l'idrazina presenta il vantaggio di essere circa 15 volte più densa dell'idrogeno liquido, richiedendo quindi serbatoi più leggeri. Le velocità di uscita ottenibili arrivano fino a 2000-3000 m/s nel vuoto. I rapporti spinta/peso, dove per peso qui s'intende quello del solo thruster, sono tipicamente dell'ordine di 0.06, quindi molto più bassi di quelli di propulsori chimici; ed anche nucleari, e tali da rendere ovviamente impossibile l'impiego nei lanciatori.

- **Arcogetti**, in cui il propellente si riscalda passando attraverso un arco elettrico generato tra due elettrodi; in questa maniera si possono raggiungere temperature fino a 2000k.

## **2.5 UTILIZZO DEL PEROSSIDO DI IDROGENO NELLA PROPULSIONE SPAZIALE**

Negli ultimi dieci anni si è assistito ad un rinnovato interesse riguardo all'utilizzo del perossido di idrogeno come propellente per motori a razzo. Questo è da attribuirsi essenzialmente all'intenzione di limitare il più possibile i costi operativi nella fase di preparazione a terra. Nel campo dei monopropellenti, infatti, esistono soluzioni alternative al perossido di idrogeno che offrono prestazioni migliori in termini di impulso specifico. La principale di queste è costituita dall'idrazina, largamente utilizzata a partire dagli anni '50, ma che presenta il grave inconveniente di essere una sostanza cancerogena ed estremamente tossica. Ciò si traduce in

costi operativi molto elevati, volti a garantire assoluta sicurezza nelle fasi di stoccaggio e manipolazione del propellente. Tali costi vengono sensibilmente ridotti nel caso del perossido di idrogeno, che pur essendo una sostanza molto corrosiva (soprattutto alle elevate concentrazioni), è classificata come non cancerogena e poco tossica. Prendendo come missione di riferimento l'inserzione in un'orbita LEO di una costellazione di 10 satelliti, uno studio mostra che, sostituendo l'idrazina con uno dei cosiddetti propellenti verdi (oltre al perossido di idrogeno citiamo l'HFN, l'ADN e l'HAN), si può risparmiare in termini di costi ricorrenti fino a 2.3-2.6 milioni di Euro. La semplificazione della procedura che precede il lancio permetterebbe un ulteriore risparmio in termini di tempo che va dai 7 ai 14 giorni.

L'attuale tendenza a ridurre le dimensioni dei satelliti costituisce un ulteriore motivo di interesse verso il perossido di idrogeno: esso può essere utilizzato sia come monopropellente sia come ossidante in motori bipropellente liquidi o in motori ibridi. Le prestazioni ottenibili nelle diverse configurazioni rendono attraente l'utilizzo del perossido di idrogeno per missioni come controllo di assetto, mantenimento orbitale, controllo di reazione e manovre orbitali.

## 2.6 CONCETTI PROPULSIVI SUSCETTIBILI DI SVILUPPO FUTURO: PROPELLENTI CHIMICI AD ALTE PRESTAZIONI

Questi propellenti, attualmente di difficile immagazzinabilità a causa della loro alta attività chimica, comprendono sia ossidanti che combustibili. Tra i primi annoveriamo:

- **Ozono  $O_3$**  , il quale bruciato con idrogeno potrebbe portare a velocità efficaci d'uscita nel vuoto intorno ai 4850 m/s, contro i circa 4500 m/s delle attuali combinazioni LH/ LOX;
- **Ossigeno atomico  $O$**  , che bruciato ancora con idrogeno porterebbe a velocità d'uscita nel vuoto dell'ordine dei 6750 m/s.

Tra i combustibili segnaliamo in particolare:

- **Idrogeno atomico  $H$**  , che bruciato con ossigeno ( $O_2$ ) potrebbe dare una velocità efficace d'uscita nel vuoto di circa 7650 m/s. Tuttavia, risulta più conveniente semplicemente sfruttare la semplice reazione di ricombinazione di due atomi  $H$  per dare una molecola di  $H_2$  , la quale grazie al bassissimo peso molecolare permetterebbe una velocità efficace d' uscita intorno ai 18000 m/s. Purtroppo, attualmente non si riesce ad ottenere idrogeno atomico ad una concentrazione superiore al 5%, a causa della sua tendenza a ricombinarsi;
- **Idrogeno metallico**, che si forma ad altissime pressioni, e potrebbe dare nel vuoto una velocità efficace d'uscita di circa 15000 m/s. Pur essendo la densità dell'idrogeno metallico ben più

alta di quella di LH, si presume che i serbatoi del propellente risulteranno necessariamente pesanti.

## **2.7 PROPULSIONE AD ANTIMATERIA**

Nella propulsione ad antimateria, l'energia viene liberata dall'"annichilazione" di coppie materia-antimateria (in particolare, protone-antiprotone); tale energia potrebbe essere sfruttata portando un fluido operativo ad altissima temperatura, mediante opportuni sistemi di confinamento. Poiché, secondo la teoria della relatività, esiste una equivalenza tra massa ed energia, nel processo di "annichilazione" le masse delle due particelle possono trasformarsi in energia, completamente o solo parzialmente. Quando la massa si trasforma completamente in energia, questa si manifesta sotto forma di onde elettromagnetiche e l'energia di queste radiazioni è numericamente uguale alla massa annichilata moltiplicato per il quadrato della velocità della luce (legge di Einstein). Una simile fonte di energia consentirebbe per esempio viaggi fino alla stella più vicina, il sistema di  $\alpha$  Centauri, distante 4.29 anni luce dal sistema solare, con un rapporto di carico utile dello 0.15%. Occorrerebbero perciò importanti quantità di antimateria; purtroppo sinora non si è riusciti a produrne più di un nanogrammo.

## **CAPITOLO 3**

### **Endoreattori**

Il volo spaziale è basato su principi completamente diversi da quelli del volo aerodinamico, e presenta problemi altrettanto diversi. Nello spazio interplanetario non esiste l'aria, e questo impedisce l'impiego dei comuni motori d'aeroplano, sia alternativi che a reazione, i quali in tale ambiente non potrebbero funzionare per la mancanza dell'ossigeno, che è il comburente indispensabile perché bruci il carburante. Inoltre, il volo spaziale richiede spinte enormi anche se di breve durata, che i motori tradizionali non sono in grado di offrire. Si rende quindi indispensabile far ricorso ad un diverso tipo di motore a reazione, detto endoreattore o motore a razzo, che non ha bisogno dell'ossigeno dell'aria per funzionare, perché dispone di appositi serbatoi nei quali è contenuto sia il combustibile che il comburente. Esistono diversi tipi di endoreattori, che a seconda dei propellenti dai quali sono alimentati, ma si possono raggruppare in due grandi categorie: quella degli endoreattori a propellenti solidi e quella degli endoreattori a propellenti liquidi. I primi sono semplicemente dei condotti tubolari, nei quali è ricavata una camera di combustione che serve anche da serbatoio per i propellenti, e da un ugello di eiezione.

I propellenti si presentano in questi motori come polveri, paste, o sostanze plastiche, che assorbono la funzione di combustibile e di comburente al contempo, con quest' ultimo che sviluppa ossigeno. Il mezzo spaziale si muove grazie alla fortissima reazione di spinta generata dalla massa di gas prodotta dalla combustione del propellente, così come avviene nel turboreattore. Gli endoreattori a propellenti solidi, però, non possono sviluppare una spinta sufficiente per le esigenze del volo spaziale, e pertanto non vengono impiegati in questo campo.

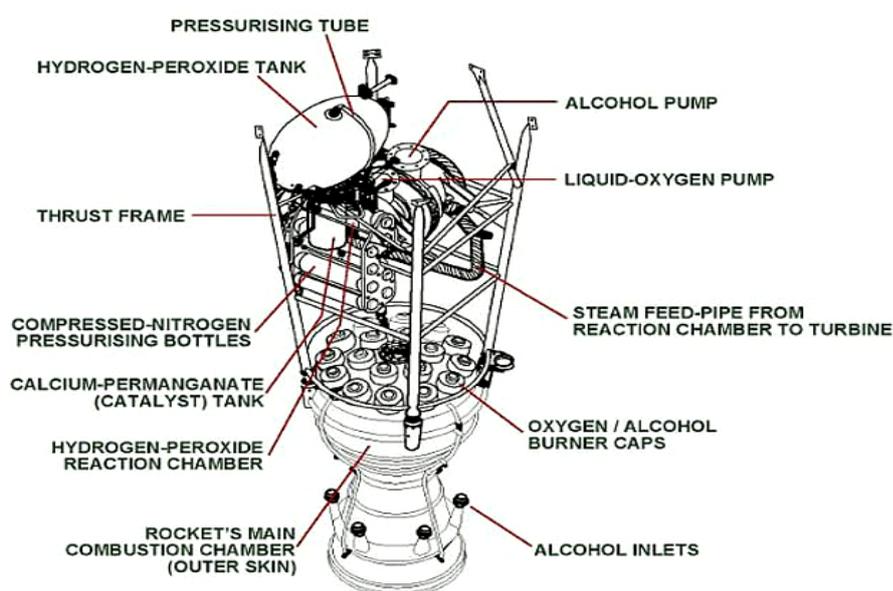


Figura 3.1 - Esempio di Endoreattore

Il volo spaziale richiede altissime velocità; inoltre le corrispondenti variazioni di velocità  $\Delta_v$ , sono tipicamente applicate solo in parte entro l'atmosfera terrestre, e per buona parte invece negli strati più rarefatti dell'atmosfera, o addirittura nel vuoto.

Per avere una prima idea delle velocità in gioco, consideriamo un satellite artificiale in orbita circolare attorno alla Terra, e ricaviamo la velocità di orbitazione circolare  $v_c$  imponendo l'equilibrio tra la forza centrifuga agente su di esso (per effetto del moto circolare uniforme) e la forza di gravitazione universale:

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM_T}{r^2}$$

Dove  $m$  indica la massa del satellite,  $M_T$  la massa della Terra ( $5.977 \cdot 10^{24}$  Kg),  $r$  il raggio dell'orbita, e  $G$  è la costante di attrazione universale  $\left[6.67 \cdot 10^{-11} m^3 / (Kgs^2)\right]$ . Possiamo in particolare definire la costante di potenziale della sorgente della Terra come

$$\mu_T = GM_T = 3.986 \cdot 10^{14} \frac{m^3}{s^2}$$

La velocità di orbitazione circolare sarà perciò

$$v_c = \sqrt{\frac{\mu_T}{r}}$$

Ovviamente essa dipende dal raggio dell'orbita; il valore minimo che possiamo ipotizzare è pari al valore del raggio terrestre  $R_T$ . Assumendo per esempio per  $R_T$  il valore equatoriale (6378 Km), si ha:

$$v_c = \sqrt{\frac{3.986}{6378 \cdot 10^3}} v_c = \sqrt{\frac{3.986 \cdot 10^{14}}{6378 \cdot 10^3}} = 7905 \frac{m}{s}$$

Chiaramente un'orbita di questo tipo non può essere descritta a causa della resistenza atmosferica e degli ostacoli al suolo; tuttavia è utile come riferimento per il valore di  $v_c$ . Per le LEO, il  $\Delta_v$  dipende dall'altezza dell'orbita; per le orbite equatoriali, quindi per la GEO in particolare, il  $\Delta_v$  dipende dalla latitudine della base di lancio. Per le missioni verso altri corpi celesti, il  $\Delta_v$  dipende fortemente dal fatto che si ricorra o meno al frenaggio atmosferico in prossimità di tale corpo, ed al ritorno sulla Terra.

### **3.1 ENDOREATTORI TERMICI**

Tra gli endoreattori termici, cioè quelli in cui l'energia primaria viene utilizzata per fornire energia termica al fluido propulsivo, successivamente trasformata in energia cinetica dal getto nell'ugello, si possono distinguere i propulsori a seconda del tipo di energia primaria impiegata. Nella classificazione si considera come energia primaria anche quella elettrica, in realtà quest'ultima viene prodotta a bordo a spese di una delle sorgenti primarie, tuttavia è opportuno mettere in evidenza il passaggio attraverso l'energia elettrica, che è poi utilizzata per riscaldare il fluido propulsivo. Gli endoreattori termici si dividono in endoreattori:

**CHIMICI** . Il fluido propulsivo viene riscaldato attraverso le reazioni di combustione che avvengono al suo interno.

**NUCLEARI TERMICI** . L'energia generata da una reazione nucleare viene utilizzata per scaldare il fluido propulsivo.

**ELETTROTERMICI** . L'energia elettrica disponibile a bordo (da sorgente nucleare, solare, o chimica), viene utilizzata per riscaldare il fluido propulsivo.

**SOLARI TERMICI** . L'energia solare, captata tramite specchi, viene utilizzata per riscaldare il fluido propulsivo.

### **3.2 ENDOREATTORI CHIMICI**

Gli endoreattori chimici sono quelli comunemente impiegati nei sistemi di lancio e nella gran parte dei motori di manovra orbitale e di controllo dell'assetto di satelliti. L'energia chimica è immagazzinata nei propellenti stivati a bordo, i quali per effetto delle reazioni di combustione si trasformano in un gas ad alta temperatura che costituisce il fluido propulsivo. Come propellente si intende quindi la sostanza che dopo aver subito trasformazioni va a costituire il fluido propulsivo, cioè il gas che viene accelerato dall'endoreattore nell'ugello. Nel caso di un endoreattore chimico il fluido propulsivo è costituito dagli stessi prodotti di combustione derivanti dalla reazione tra il combustibile e l'ossidante utilizzati, i quali definiscono perciò il rilascio di energia e la composizione della miscela di prodotti di reazione.

Il propellente può essere stivato a bordo in diversi modi. Se è immagazzinato allo stato solido e bruciando passa allo stato gassoso, si

parla di propellente solido. Se è immagazzinato allo stato liquido, in serbatoi, si parla di propellente liquido. Se il propellente è immagazzinato in parte allo stato solido e in parte allo stato liquido, si parla di endoreattori a propellenti ibridi.

Nel caso di endoreattori a propellente solido, il propellente contiene al suo interno tanto il combustibile quanto l'ossidante, e la combustione, che consuma il propellente solido generando gas caldi come prodotti di reazione, avviene sulla superficie esposta del propellente. La caratteristica di tali endoreattori, largamente impiegata nei missili balistici e nei lanciatori, è l'estrema semplicità, nonché la particolarità di non richiedere lunghi preparativi per il lancio. Con endoreattori a propellente liquido si possono realizzare sistemi con prestazioni superiori, ma più complessi. In questo caso combustibile e ossidante possono essere immagazzinati nei serbatoi separatamente, oppure si può utilizzare un unico propellente il quale rilascia energia per effetto di una decomposizione. Il sistema di alimentazione, controllato da valvole e pompe, costituisce un importante sottosistema degli endoreattori a propellente liquido. Anche questa famiglia è stata largamente impiegata nei sistemi di lancio e nei propulsori per la manovra ed il controllo di assetto di satelliti; per quest'ultimo caso si preferisce normalmente la soluzione monopropellente.

### **3.3 ENDOREATTORI ELETTROTERMICI**

L'energia elettrica generata a bordo, viene utilizzata in questi endoreattori per riscaldare un fluido propulsivo. Si tratta di propulsori caratterizzati da basso consumo ma anche da basse spinte, e che possono essere di interesse per applicazioni su satelliti. Ad esempio, un arco elettrico scalda il fluido propulsivo a temperature elevate. Il fluido propulsivo può essere stivato come propellente allo stato liquido o gassoso. A causa della differenza di potenziale tra anodo e catodo si crea un arco elettrico che permette alla corrente elettrica di passare attraverso il gas che di conseguenza si scalda a temperature molto elevate. L'energia elettrica può essere generata a bordo a partire da sorgenti chimiche, solari o nucleari.

### **3.4 ENDOREATTORI NUCLEARI TERMICI**

La fattibilità di endoreattori nucleari termici è stata dimostrata con una serie di test svolti negli USA tra la fine degli anni 50 e l'inizio dei 60. Sono caratterizzati da elevate prestazioni, ma sono stati abbandonati per ora a causa del loro elevato impatto ambientale. Reazioni nucleari di fissione, fusione o decadimento radioattivo di un isotopo possono essere usate per trasferire calore al fluido propulsivo. L'idrogeno, stivato allo stato liquido in serbatoio, viene inviato in canali che allo stesso tempo raffreddano le pareti del reattore nucleare a fissione e scaldano l'idrogeno stesso. Il gas propulsivo ad alta temperatura viene poi inviato

nell'ugello propulsivo dove viene accelerato. La temperatura massima del fluido deve essere necessariamente inferiore a quella del reattore, e quindi è limitata dalla massima temperatura ammissibile per i materiali che costituiscono il reattore. Con questo sistema si possono avere spinte elevate come quelle degli endoreattori chimici, ma con minore consumo di propellente. Il rapporto spinta/peso è tuttavia piuttosto basso in confronto ai valori tipici per endoreattori chimici.

### **3.5 ENDOREATTORI SOLARI TERMICI**

In questi endoreattori un grande specchio parabolico concentra l'energia solare su uno scambiatore di calore dove il fluido propulsivo viene riscaldato; esso è poi accelerato nell'ugello propulsivo. I limiti di questo sistema sono: bassa spinta; impossibilità di uso notturno; utilizzo conveniente solo nella parte interna del sistema solare.

### **3.6 ENDOREATTORI ELETTROSTATICI/ELETTROMAGNETICI**

Come per gli endoreattori elettrotermici, l'energia elettrica viene generata a bordo a partire da energia solare, chimica o nucleare. L'accelerazione del fluido propulsivo avviene attraverso il suo passaggio in campi elettrici o elettromagnetici. Perché questo sia ottenibile il fluido propulsivo deve avere la proprietà di essere elettricamente carico. Non si hanno i limiti dovuti alla massima temperatura sopportabile dai materiali che ci sono nel caso degli endoreattori termici. Questi endoreattori sono caratterizzati

da bassi consumi, ma anche da rapporti spinta/peso molto bassi. Si distinguono quindi le due famiglie:

- **Endoreattori Elettrostatici:** un campo elettrostatico accelera il propellente, costituito da ioni positivi di xenon, mercurio o cesio, od ancora da colloidali.
- **Endoreattori Elettromagnetici:** un campo elettromagnetico accelera un plasma per effetto della forza di Lorentz.

### 3.7 ENDOREATTORI A PEROSSIDO DI IDROGENO

Il principio di funzionamento di un motore monopropellente è relativamente semplice: perossido di idrogeno ad elevate concentrazioni (85%-95%), inizialmente tenuto in un serbatoio pressurizzato, viene inviato alla camera di decomposizione tramite un sistema di alimentazione ed un iniettore, che ha il compito di creare una distribuzione uniforme sul letto catalitico. Venendo a contatto con la superficie attiva del catalizzatore, il perossido di idrogeno si decompone esotermicamente. Nella configurazione monopropellente la miscela di vapor d'acqua e di ossigeno gassoso ad alta temperatura così creata viene fatta espandere in un ugello convergente - divergente e quindi espulsa ad alta velocità, producendo la spinta desiderata. Per migliorare l'impulso specifico si può utilizzare la miscela gassosa in un processo di combustione con un combustibile liquido come il kerosene (configurazione bipropellente) oppure in una reazione chimica con del

grano solido (configurazione ibrida). Ad esempio l'introduzione di un idrocarburo come il JP in un ambiente ricco di vapori di ossigeno ad alta temperatura comporta una combustione ipergolica e rilascio di calore, senza il requisito di un sistema di innesco. La maggior parte dei veicoli spaziali in fase di sviluppo o anche solo allo stadio di progetto richiede un sistema di micropropulsione per il controllo di orbita e di assetto. Tra gli svariati sistemi di micropopulsione quelli utilizzando idrazina come monopropellente sono certamente i più usati. Ciò si spiega oltre che alle buone caratteristiche del propellente, anche e soprattutto per la relativa semplicità della tecnologia che tale scelta richiede e che ora ha già raggiunto, sia negli USA sia in Europa, un notevole stadio di avanzamento. La tecnologia è basata sulla decomposizione dell'idrazina in componenti gassosi e può essere ottenuta sia cataliticamente sia tramite la fornitura esterna di calore per mezzo di riscaldatori elettrici. La scelta di una strada rispetto all'altra è basata soprattutto sui livelli di spinta che sono richiesti e quindi indirettamente sull'uso a cui si vogliono adibire i micropropulsori sul satellite.

### **3.8 ENDOREATTORI A PROPELLENTI IBRIDI**

Negli endoreattori a propellenti ibridi uno dei due propellenti (in generale l'ossidante) è allo stato liquido, mentre l'altro (in generale il combustibile) è allo stato solido. Una simile configurazione comporta i seguenti vantaggi (di cui i primi sei devono essere considerati rispetto ad un

endoreattore a propellente solido, ed i rimanenti con riferimento ad un endoreattore a propellenti liquidi):

- possibilità di riaccensione;
- modulabilità della spinta (controllando la portata di ossidante - liquido);
- velocità efficace di uscita più alta;
- maggiore sicurezza (il fattore controllante la combustione è la portata di ossidante, non semplicemente la superficie di combustione, per cui essa non risente di fratture o debonding del grano);
- i gas prodotti di combustione non sono tossici (poiché si utilizza generalmente come ossidante l'ossigeno liquido, anziché il perclorato d'ammonio che genera acido cloridrico tra i prodotti di combustione);
- sicurezza di manipolazione (in quanto il grano di per sé è inerte);
- maggiore affidabilità (rispetto ad un endoreattore a propellenti liquidi, negli ibridi è richiesto un impianto di alimentazione per il solo ossidante, dimezzando così la complessità del sistema ed i conseguenti rischi di malfunzionamento);
- costo più basso;
- maggiore compattezza, grazie alla maggiore densità del combustibile solido rispetto a quelli liquidi.

A questi vantaggi si contrappongono i seguenti svantaggi:

- minore compattezza, a causa della minore densità dell'ossidante liquido rispetto a quelli solidi;
- residuo di combustibile incombusto (sliver) più alto;
- quando si presenta la necessità di modulare la spinta, il rapporto ossidante/combustibile varia sensibilmente, a detrimento della velocità efficace d'uscita;
- l'efficienza di combustione è più bassa (una piccola percentuale di propellente rimane incombusta).

Per dare un'idea delle velocità di uscita raggiungibili con questo tipo di endoreattori, consideriamo a titolo di esempio un propulsore, operante nel vuoto, utilizzante ossigeno liquido (LOX) come ossidante, ed asfalto addizionato con polveri metalliche come combustibile: esso risulta dare una  $c \cong 3000$  m/s, quindi un poco più alta di quella conseguibile dai migliori endoreattori a propellente solido, e di poco inferiore a quella ottenibile da simili liquidi storable o LOX-idrocarburi. Se poi si ipotizza di utilizzare come ossidante l'ossigeno (o addirittura il fluoro) liquido, e come combustibile il berillio, si può arrivare a  $c \cong 3700$  m/s nel vuoto, inferiore solo a quella di combinazione LOX-LH. Tale possibilità è tuttavia più teorica che pratica, a causa dell'elevatissima tossicità del berillio; potrebbe in teoria essere considerata per missioni in spazio profondo (cioè molto lontano dall'atmosfera terrestre), ma resta il rischio legato alla manipolazione a terra di un grano estremamente tossico. La velocità di

regressione del grano è più bassa che non negli endoreattori a propellenti solidi, tipicamente compresa tra 1 e 5 mm/s. Quindi, per assicurare la necessaria quantità di combustibile alla reazione, sono necessarie superfici di combustione più grandi, per cui si adottano tipicamente grani multiperforati. La velocità di regressione del grano è strettamente legata all'aerodinamica del flusso gassoso entro il grano (in particolare alla turbolenza), al comportamento dello strato limite, ed allo scambio termico. Un'espressione della velocità del grano che risulta utilizzabile è del tipo:

$$r = aG_{ox}^m p_c^n$$

dove è  $G_{ox}$  la portata specifica di ossidante (portata per unità di aerea); l'esponente  $m$  assume valori tipicamente compresi tra 0.4 e 0.7, mentre  $n$  assume valori tra 0 e 0.25 ( tali valori dipendono ovviamente dalla combinazione ossidante - combustibile considerata) mentre  $p_c$  rappresenta la pressione.

Per quanto riguarda l'accensione, essa può avvenire o tramite un ignitore, oppure spontaneamente qualora la combinazione ossidante combustibile sia iperbolica (il che è conveniente se il motore deve garantire la riaccendibilità).

Gli endoreattori a propellenti ibridi hanno finora trovato applicazione solo occasionale nei sistemi propulsivi, probabilmente perché quando si

ricercano alte prestazioni si preferisce optare direttamente per gli endoreattori a propellenti liquidi, mentre quando si ricerca la semplicità di sistema si adottano endoreattori a propellenti solidi; i propellenti ibridi costituiscono una soluzione intermedia, che non sempre può risultare interessante. A tutto ciò si aggiunge, ovviamente, la scarsa esperienza maturata in questo campo.

### **3.9 ENDOREATTORI A PROPELLENTI SOLIDI**

Gli endoreattori a propellente solido presentano, rispetto a quelli a propellente liquido, i vantaggi di una grande semplicità (non vi sono impianti di alimentazione, né pertanto parti in moto, né linee di alimentazione, valvole, controlli), quindi di un basso costo, sia di produzione che di gestione; di una grande affidabilità, e di poter essere tenuti in magazzino rimanendo sempre pronti per l'uso. Inoltre, il progetto di un endoreattore a propellente solido, a partire da uno già progettato ma di taglia diversa, è un processo diretto, mentre per un endoreattore a propellenti liquidi occorre riprogettare completamente i differenti componenti. Gli svantaggi invece sono essenzialmente legati al fatto che questi motori non sono riaccendibili, la spinta non è modulabile, il controllo della direzione della spinta (TVC- Thrust Vector Control) è meno agevole, e le prestazioni sono più basse.

I grani<sup>3</sup> degli endoreattori a propellente solido, possono essere classificati a secondo della loro configurazione in grani a combustione ristretta, nel caso che essa avvenga solo su una piccola parte della superficie del grano, oppure non ristretta, quando essa avviene su tutta la superficie del grano.

### **3.10 PROPELLENTI PER ENDOREATTORI: PROPELLENTI LIQUIDI**

I propellenti liquidi possono essere distinti in monopropellenti (una sostanza che rilascia energia attraverso una reazione di decomposizione) e bipropellenti (in cui il rilascio di energia è dovuto alla decomposizione tra un combustibile e un ossidante). Va subito detto che le prestazioni dei monopropellenti sono alquanto inferiori (in termini di velocità efficace di uscita) a quelle dei bipropellenti, per cui i primi sono normalmente usati solo per la propulsione secondaria (per esempio per il controllo d'assetto), dove sono richiesti propulsori molto semplici. Alcuni propellenti possono essere usati tanto come monopropellenti che come bipropellenti.

I monopropellenti possono essere classificati in:

1. **monoergoli**, che si decompongono e rilasciano energia in seguito ad agnizione, come l'idrazina, il nitrometano, la nitroglicerina, l'acido picrico.

---

<sup>3</sup> Con il termine grano si indica la massa del propellente

2. **Katergoli**, in cui la decomposizione avviene grazie ad un catalizzatore, come il perossido d'idrogeno.

I bipropellenti sono invece classificati in:

1. **ipergoli**, in cui si ha ignizione spontanea quando combustibile ed ossidante entrano in contatto, come le combinazioni acido nitrico/anilina, acido nitrico/acido fosforico, e perossido d'idrogeno/idrazina;
2. **diergoli**, in cui invece non si ha ignizione spontanea, ed occorre quindi prevedere una fonte di ignizione.

Le caratteristiche desiderabili dei propellenti liquidi sono dunque:

- basso costo, larga disponibilità;
- alte prestazioni;
- sicurezza nella manipolazione;
- basso rischio di esplosione e/o incendio in caso di spillamento;
- non tossicità;
- non corrosività;
- bassa temperatura di congelamento (per consentire l'impiego in climi freddi);
- alta temperatura di evaporazione (per consentire l'impiego in climi caldi);
- alto  $c_p$ ,  $\lambda$  per i propellenti impiegati come refrigeranti;

- alta densità (per avere serbatoi compatti e leggeri);
- stabilità chimica;
- bassa tensione di vapore (per evitare la cavitazione delle pompe),  
bassa viscosità;
- assenza di fumo, fiamma non brillante (per evitare, in applicazioni militari, la rilevazione da parte del nemico);
- assenza di rischio di contaminazione dello spacecraft (per i loro propulsori dedicati);
- proprietà stabili.

Va detto che non c'è nessun propellente che assommi tutte queste proprietà desiderabili.

### 3.10.1 PROPELLENTI SOLIDI

I propellenti solidi possono essere classificati in :

- **Doppie Basi**, quando la molecola del propellente contiene tanto il combustibile quanto l'ossidante necessari alla combustione. Questo è il caso , per esempio della nitroglicerina, alla quale viene normalmente aggiunta nitrocellulosa come agente gelificante. 003Bcx altri additivi sono introdotti come stabilizzatori. Con questo propellente si ottengono velocità efficaci di uscita  $c \approx 2250$  m/s;
- **Compositi**, in cui ossidante e combustibile sono fisicamente distinti. Si possono utilizzare come ossidanti il perclorato di

ammonio ( $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ , che però genera HCl, tossico, tra i prodotti di combustione) o il nitrato d'ammonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), che contengono circa il 60% di ossigeno; questi Sali vengono macinati ed amalgamati con il combustibile, normalmente asfalto, che ha anche la funzione di legante; sono comunemente adottate per applicazioni spaziali anche polveri metalliche che vengono addizionate all'impasto appena descritto. Una combustione stechiometrica richiederebbe percentuali in massa di ossidante nell'impasto molto alte, dell'ordine del 80-90%, ma in questo caso le caratteristiche meccaniche del grano risulterebbero inaccettabili, per cui ci si limita al 70-80 %. Con questi propellenti si raggiungono velocità efficaci d'uscita, al livello del suolo, fino a  $c = 2550 \text{ m/s}$  e nel vuoto si arriva in prossimità di  $c = 3000 \text{ m/s}$ , quindi sensibilmente superiori a quelli ottenibili con i propellenti a doppia fase.

I grani possono essere ricavati per estrusione, oppure colati entro la cassa del motore; i grani più grossi sono spesso realizzati in segmenti, ognuno dei quali è ricavato per colatura. La tendenza attuale è però i adottare comunque grani monolitici, perché in tal modo si riducono le masse inerti e si migliora la sicurezza (l'incidente dello Space Shuttle Challenger nel 1986 fu causato dal cedimento di un anello di tenuta tra due segmenti).

### 3.10.2 OSSIDANTI UTILIZZATI

- **Ossigeno liquido (LOX)** . L'ossigeno liquido presenta, come tutti i propellenti criogenici, l'inconveniente di una temperatura di ebollizione molto bassa ( $T_{eb} = 90 \text{ K}$ ), che impone il riempimento dei serbatoi solo pochi minuti prima del lancio per evitare che una larga frazione di esso evapori, nonché speciali impianti criogenici a terra, ed adeguati provvedimenti per i serbatoi e le linee di alimentazione. La sua densità è  $\rho = 1140 \text{ kg/m}^3$  . Presenta il vantaggio di non bruciare spontaneamente con i combustibili (quindi minori rischi), di non essere corrosivo né tossico, tuttavia provoca bruciature se in contatto prolungato con la pelle. È largamente impiegato anche se i propellenti criogenici non sono adatti per applicazioni militari perché i preparativi per il lancio richiedono un certo tempo.
- **Fluoro liquido (LF)** . Il fluoro liquido consente prestazioni migliori di quelle ottenibili utilizzando LOX, tuttavia è estremamente tossico, corrosivo, reattivo; inoltre comporta temperature molto alte estremizzando perciò i problemi di scambio termico. Per questo motivo esso non è attualmente usato, anche se occasionalmente se ne è considerato l'uso per sonde spaziali.
- **Perossido d'idrogeno** (acqua ossigenata) . Il perossido d'idrogeno  $\text{H}_2\text{O}_2$  si decompone, a contatto con un catalizzatore, in  $\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2$  ; l'ossigeno liberato viene quindi utilizzato come

ossidante. Nella reazione di decomposizione si ha anche rilascio di calore per cui il perossido d'idrogeno può anche essere utilizzato come monopropellente. È normalmente utilizzato in concentrazioni dal 70 al 99%; devono essere prese speciali precauzioni per evitare che venga in contatto con catalizzatori che attivino la reazione di dissociazione, poichè molte impurità si comportano come catalizzatori. Provoca bruciature a contatto con la pelle e brucia spontaneamente a contatto con materiali organici. È liquido a temperatura ambiente. È attualmente poco usato per via delle prestazioni relativamente modeste, del rischio nella manipolazione e della cattiva immagazzinabilità.

- **Acido nitrico** . Può essere utilizzato sotto diverse forme. Il WFNA (White Fumino Nitric Acid, così chiamato perché emette vapori biancastri) è acido nitrico ( $\text{HNO}_3$  ) concentrato; è relativamente instabile e molto corrosivo. Il RFNA ( Red Fumino Nitric Acid, che quindi emette vapori bruno-rossastri) contiene dal 5 al 20% di  $\text{NO}_2$  disciolto, che ne migliora la stabilità e ne diminuisce la corrosività. I fumi dell'acido nitrico sono in ogni caso velenosi; esso è liquido a temperatura ambiente, e presenta il vantaggio di un'alta densità.
- **Tetrossido d'azoto** . Il tetrossido d'azoto ( $\text{N}_2\text{O}_4$  ) è l'ossidante comunemente impiegato quando si utilizzano propellenti immagazzinabili (storable). È debolmente corrosivo; brucia in contatto con materiali organici. Presenta il vantaggio di un'alta densità ( $\rho = 1450 \text{ Kg/m}^3$  ), ma lo svantaggio di un'alta tensione di

vapore, ed in particolare di una temperatura di ebollizione alquanto bassa,  $T_{eb} = 21 \text{ C} = 294 \text{ K}$ .

### 3.10.3 COMBUSTIBILI UTILIZZATI

- **Idrocarburi (HC)** . Gli idrocarburi liquidi hanno un basso costo e sono sicuri da usare. Sono spesso usati, in lanciatori che utilizzano combinazioni di propellenti ad alte prestazioni (LOX-LH) per gli stadi superiori, come combustibile per il primo stadio. Infatti l'idrogeno liquido, a causa della sua bassissima densità dà luogo a serbatoi molto voluminosi, e poiché il primo stadio è quello che determina normalmente il primo stadio della sezione frontale del lanciatore, perciò la sua resistenza aerodinamica, allora ne consegue che adottando LH per il primo stadio si ha una forte resistenza aerodinamica, la quale riduce il vantaggio associato con una più alta velocità d'uscita. Gli idrocarburi invece, grazie alla loro densità assai più alta, consentono un disegno più compatto e quindi una minore resistenza, pur al prezzo di una velocità efficace d'uscita alquanto più bassa. I prodotti di combustione sono relativamente benigni.
- **Idrogeno liquido (LH)** . L'idrogeno liquido è il combustibile che assicura le migliori prestazioni, ed è per questo utilizzato in molti moderni lanciatori. Presenta tuttavia lo svantaggio di una bassissima densità, per cui richiede serbatoi molto voluminosi

quindi pesanti; inoltre ha una bassissima temperatura di ebollizione, il che esalta tutti i problemi tipici dei propellenti criogenici. Non presenta problemi di tossicità, ed i prodotti di combustione con LOX sono assolutamente innocui; i vapori sono tuttavia infiammabili in aria. Allo scopo di aumentare un poco la densità dell'idrogeno, si è proposto di utilizzare poltiglie di idrogeno liquido e solido, che risultano ancora pompabili; tuttavia ciò richiede temperature ancora più basse, mentre il corrispondente aumento di densità non va oltre il 12%.

- **Metano liquido (LCH<sub>4</sub>)** . Il metano liquido rappresenta una scelta in qualche modo intermedia tra gli idrocarburi liquidi e l'idrogeno liquido. Infatti, grazie al migliore rapporto tra atomi di idrogeno ed atomi di carbonio, questo combustibile assicura prestazioni significativamente migliori di quelle degli HC liquidi, pur se lontane da quelle di LH. Allo stesso tempo, grazie alla densità sostanzialmente più elevata di quella di LH, esso richiede serbatoi molto meno voluminosi, e quindi alquanto più leggeri. Tali serbatoi in particolare offriranno minore resistenza aerodinamica, per cui tale soluzione può risultare particolarmente vantaggiosa per i primi stadi. Inoltre, grazie alla più alta temperatura di ebollizione rispetto a LH, LCH<sub>4</sub> richiede componenti meno costosi;
- **Idrazina e derivati** . L'idrazina (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ) ed i suoi derivati, monometilidrazina (MMH) e dimetilidrazina asimmetrica (UDMH) sono largamente impiegati come combustibili storable, in

combinazione con il tetrossido d'azoto. Può tuttavia essere utilizzata anche come monopropellente, ed in questa forma viene utilizzata in molti razzi per il controllo d'assetto. I vapori formano una miscela esplosiva in aria, sono tossici e cancerogeni; l'idrazina deve quindi essere mantenuta in serbatoi sigillati, entro i quali si mantiene stabile per lunghi periodi. Si decompone però a contatto con il rame, e dà luogo ad ignizione spontanea a contatto con vestiti. I prodotti di combustione dell'idrazina e derivati contengono in ogni caso specie nocive come ammoniaca.

## **CAPITOLO 4**

### **Celle fotovoltaiche**

Fin dall'inizio dell'era spaziale, il Department of Energy (DOE) statunitense, promuove lo sviluppo di generatori termoelettrici a radioisotopi, che convertono in energia elettrica il calore generato dal decadimento di un radioisotopo (il plutonio-238). Questi generatori producono energia in forma autonoma e sono pertanto adatti a missioni spaziali a grande distanza dal Sole e quindi non alimentabili tramite pannelli solari. Il primo generatore termoelettrico è usato nel veicolo spaziale Navy Transit 4A, lanciato nel luglio 1961. Fra il '61 e il '72, il DOE fornisce generatori dello stesso tipo a sei satelliti di navigazione destinati alla marina militare e a due satelliti di comunicazioni per l'aeronautica. Altri generatori a radioisotopi sono usati, dal 1969 al 1972, nelle missioni Apollo, per alimentare le stazioni sismiche sul suolo lunare e, successivamente, nei veicoli spaziali Pioneer, Voyager, Galileo e Ulysses, destinati a missioni di esplorazione entro e fuori dai limiti del sistema solare.

Oltre i generatori a radioisotopi, sono usate anche pile a combustibile e accumulatori.

Nelle celle a combustibile si sfrutta la tendenza degli atomi d'idrogeno e d'ossigeno a combinarsi fra loro per formare molecole d'acqua, liberando elettroni e generando energia elettrica. L'acqua prodotta dalla reazione chimica è assolutamente pura, non è quindi inquinante e può essere tranquillamente bevuta. Inversamente, se si dispone di una sorgente esterna di elettricità (ad esempio un pannello solare), la cella a combustibile può essere usata anche in senso inverso, cioè per dissociare l'acqua nei suoi elementi componenti, così da poterli riutilizzare per produrre di nuovo energia elettrica.

Le celle a combustibile possono essere usate in missioni spaziali nell'ambito del sistema solare perché durano più a lungo degli accumulatori a nichel-cadmio e non richiedono i costosi componenti radioattivi dei generatori termoelettrici: in particolare sono state utilizzate nella prima missione Apollo sul suolo lunare, dove l'acqua prodotta veniva bevuta dagli astronauti.

Ma le celle a combustibile sono di peso notevole e per lunghe distanze si pone l'alternativa fra il costoso trasporto nello spazio di grandi quantità di combustibile e l'uso di sorgenti esterne (ad esempio pannelli solari, se non ci si allontana troppo dal Sole), che permettano di alternare la produzione di energia elettrica e la dissociazione dell'acqua in uscita dalla pila, in modo da poter ricavare da essa l'ossigeno e l'idrogeno necessari per il funzionamento della pila a combustibile come generatore. D'altra parte, la necessità di installare sul satellite, oltre la cella a combustibile, anche i pannelli solari per la sua alimentazione in

funzionamento inverso, può fare preferire soluzioni energetiche più semplici, basate sull'uso dei soli pannelli solari.

Per quanto riguarda infine gli accumulatori (a nichel/cadmio, a nichel/idruri metallici o a ioni di litio), essi possono risolvere, anche se con qualche limitazione, il problema dell'alimentazione elettrica nei satelliti per comunicazioni.

Questi satelliti ricavano generalmente l'energia elettrica per il funzionamento dei loro apparati, da pannelli di celle foto-voltaiche tenuti costantemente orientati verso il Sole da un sistema di puntamento automatico. Vanno anche affrontati i periodi d'ombra prodotti dalle numerose eclissi di Sole a cui sono soggetti i satelliti nella loro rotazione attorno alla Terra. Il numero di eclissi da affrontare, va da un centinaio all'anno (nel caso dei satelliti geostazionari che si muovono lungo l'orbita equatoriale, alla quota di 36000 km e con periodo di 24 h) ad alcune migliaia (nel caso dei satelliti che seguono orbite più basse, con periodi notevolmente più brevi).

Durante ogni eclisse, l'energia elettrica utilizzata a bordo del satellite artificiale deve essere fornita da accumulatori, che naturalmente andranno ricaricati dai pannelli solari durante i periodi di esposizione alla luce solare.

Dato che la durata in servizio prevista, può superare i 15 anni, per un satellite geostazionario, ed i 6 anni, per un satellite a bassa quota, gli accumulatori destinati ai satelliti per comunicazioni, dovrebbero poter

sopportare da 1500 a 40000 cicli di carica e scarica senza guasti e senza bisogno di alcuna manutenzione.

Si tratta quindi di prestazioni notevolmente superiori a quelle richieste usualmente nelle applicazioni terrestri. Questo implica l'uso di accumulatori di tipo avanzato e particolari accorgimenti di progettazione e di uso. Occorre in particolare che questi accumulatori siano sottoposti, durante ogni eclisse, a scariche poco profonde.

Nonostante tutte queste precauzioni, nei satelliti per telecomunicazioni sono stati comunemente usati, fin dall'inizio, accumulatori a nichel-cadmio e a nichel-idrogenuri metallici, con energie specifiche che non superano i 24-36 Wh/kg (se si tiene conto del peso complessivo dell'accumulatore, contenitore compreso).

Dato che gli accumulatori rappresentano il 15% del peso di un tipico satellite per telecomunicazioni e circa la metà del suo carico utile e che il lancio di un satellite geostazionario comporta costi dell'ordine di 50 k dollari/kg, si capisce perché gli accumulatori a nichel-idrogenuri metallici abbiano potuto soppiantare quelli a nichel-cadmio, solo per il fatto di essere del 30% più leggeri.

Più recentemente, i progressi compiuti nei primi anni Novanta, nello sviluppo degli accumulatori a ioni di litio, hanno aperto la strada a prospettive di applicazione anche per questo tipo di accumulatore, che presenta energie specifiche relativamente alte (dell'ordine del centinaio di Wh/kg).

La durata in servizio (1000 - 2000 cicli di carica e scarica) è ancora insufficiente rispetto alle esigenze più spinte dei satelliti per telecomunicazioni; ma vanno considerate anche altre caratteristiche peculiari:

1. un'energia specifica, in Wh/kg, doppia di quella degli accumulatori a nichel-cadmio e a nichel-idruri metallici (senza corrispondenti aumenti di costo);
2. una tensione ai terminali di ogni singolo elemento, pari a oltre 3 V, in luogo delle tensioni poco superiori al volt degli elementi elettrochimici di tipo diverso;
3. l'immunità ai campi magnetici ( a differenza degli accumulatori a nichel-cadmio ed a nichel-idruri metallici, che risentono della presenza di questi campi a causa delle proprietà ferromagnetiche del nichel).

Un tipico esempio di utilizzazione degli accumulatori a ioni di litio è rappresentato dal satellite STENTOR, lanciato in orbita geostazionaria nel 2000. Oltre a svolgere il servizio di telecomunicazioni nella banda Ku (13,8 e 15,0 GHz), il satellite è impegnato nell'esperimento di propagazione EXPRESS diretto a valutare l'influenza negativa delle condizioni atmosferiche sulla propagazione delle onde elettromagnetiche nelle bande dei 20,7 e dei 41,4 GHz e sulla qualità del servizio.

EXPRESS prosegue gli esperimenti di propagazione iniziati con i satelliti OTS, SIRIO, OLYMPUS e ITALSAT in Europa, con i satelliti ATS,

COMSTAR e ACTS negli Stati Uniti, con i satelliti TTS, BS e CS in Giappone e con diverse iniziative INTELSAT in altre parti del mondo.

Il satellite STENTOR utilizza diverse tecnologie innovative che riguardano l'antenna, il controllo termico, il sistema di propulsione a plasma, i pannelli solari (con una potenza generata complessiva di 2,5 kW) e la batteria di accumulatori a ioni di litio, frutto di un progetto speciale, volto a massimizzare l'energia specifica di massa di questo tipo di accumulatori.

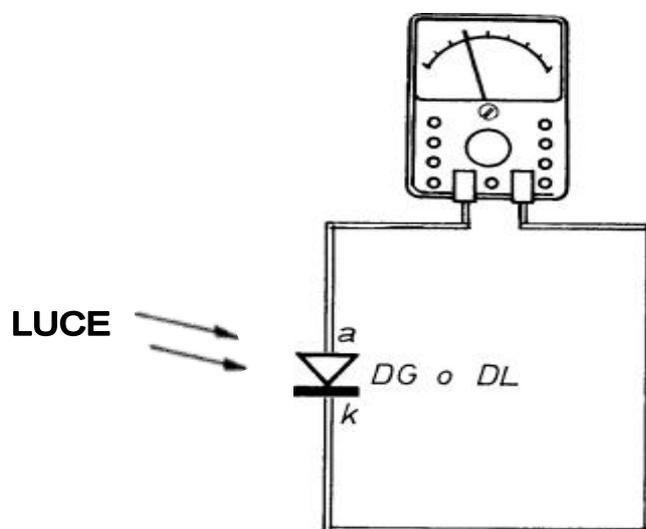
Tale effetto, veramente affascinante, si identifica nella conversione di un tipo di energia in un altro. Ossia nella trasformazione della luce in energia elettrica. Analogamente a quanto individuato da Alessandro Volta attraverso l'effetto termico, per il quale, riscaldando la giunzione di due metalli di natura diversa, sui terminali liberi di questi veniva a generarsi una differenza di potenziale, con l'evidente risultato di una mutazione di energia da termica ad elettrica.

Anche l'effetto fotovoltaico sfrutta una giunzione, quella di due semiconduttori, di cui uno di tipo N, l'altro di tipo P, che è poi la stessa giunzione utilizzata nella realizzazione dei diodi, dei transistor e dei circuiti integrati e che, nel venire colpita dalla luce, dà origine ad una differenza di potenziale, che è proporzionale al numero di fotoni che raggiungono la zona in cui le due superfici dei semiconduttori si congiungono e che viene chiamata "depletion region".

Praticamente, tutti i diodi ed i transistor bipolari, dotati di due giunzioni e che possono essere immaginati come due diodi collegati in "antiserie". Quando sono investiti dalla luce possono generare la tensione fotovoltaica .

Per tale motivo, infatti, allo scopo di impedire che la luce possa raggiungere le giunzioni ed alterare il corretto funzionamento dei semiconduttori, l'industria provvede ad inserirli in custodie opache, assolutamente inaccessibili alla luce artificiale o naturale che sia.

Oggi, il processo fisico è stato ampiamente individuato e sfruttato in numerose, moderne applicazioni elettroniche e ci si può rendersene conto, sperimentando il fenomeno con un diodo al germanio o led nel modo suggerito in figura .

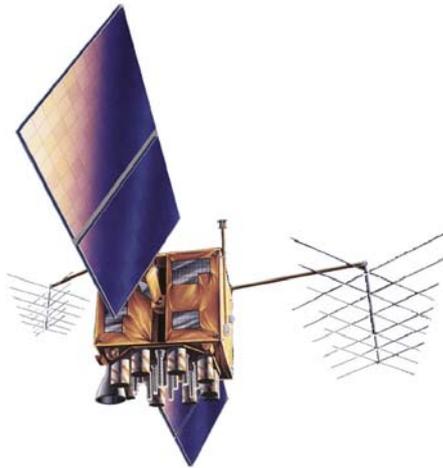


*Figura 4.1 – LED*

Qualsiasi diodo al germanio o LED , purché realizzato in contenitore di materiale trasparente, quando viene colpito dalla luce promuove l'effetto

fotovoltaico, che avvia una debolissima corrente, dell'ordine di alcuni microampere, nel circuito chiuso attraverso un tester commutato nella funzione amperometrica e nella scala dei valori più bassi.

Anche se l'energia prodotta è minima e la corrente segnalata dallo strumento è irrisoria, dell'ordine di alcuni microampere. Ma se la tensione generata dalla giunzione è debole, ciò è da attribuirsi principalmente alla ridottissima area di questa, la cui funzione è diversa da quella della promozione dell'effetto fotovoltaico. Tuttavia, quando una giunzione viene appositamente costruita per un'ampia esposizione alla luce, allora la tensione può raggiungere il valore di 0,5 V ed anche 0,9 V, a seconda dei materiali componenti e della estensione superficiale, che si misura in  $\text{cm}^2$ . Dunque, nel rispetto di queste condizioni, l'industria ha prodotto e produce degli elementi, chiamati appunto cellule fotovoltaiche, dalle quali si possono derivare quantità di energia elettrica sufficienti ad alimentare piccoli apparati elettrici ed elettronici. Se poi questi componenti vengono opportunamente collegati in gran numero fra loro, allora le tensioni e le correnti vengono considerevolmente esaltate, al punto di alimentare apparecchiature di bordo e motori di mezzi mobili, su natanti, autovetture, satelliti spaziali ed astronavi.



*Figura 4.2 – Satellite con pannelli con celle fotovoltaiche*

Le apparecchiature di bordo, dei satelliti artificiali e delle astronavi, vengono alimentate con grandi pannelli, che espongono alla luce del sole un'imponente quantità di cellule fotovoltaiche opportunamente collegate fra loro.

#### **4.1 PRIMA APPLICAZIONE DELL'ENERGIA SOLARE NELLO SPAZIO**

Nel 1839 lo scienziato Edmund Becquerel scoprì l'effetto fotovoltaico: la conversione diretta della luce in elettricità. Ma la vera rivoluzione della ricerca solare non arrivò prima degli anni 60 con lo sviluppo dei viaggi spaziali. La navicella spaziale richiedeva una fornitura d'energia ultra affidabile, autonoma e leggerissima. L'energia solare rappresentava la soluzione ideale. Ciò portò alla costruzione delle navette spaziali tipiche che sono ancora rimaste praticamente uguali. Lo sviluppo di queste celle ad alta efficienza è stata affidata ad alcune aziende, inclusa l'AEG-Telefunken, azienda successivamente assorbita dalla Deutsche

Aerospace (DASA). Il prezioso know-how accumulato da entrambe le aziende è ora stato trasferito alla SCHOTT Solar, fornendo così una solida base dalla quale si cercano soluzioni per un futuro più luminoso.

## **4.2 LA CELLA FOTOVOLTAICA**

La quantità di energia solare che incide globalmente sulla superficie terrestre è 10.000 volte maggiore del fabbisogno totale di energia primaria.

Pertanto non vi è dubbio che sarebbe possibile, nei prossimi 50 - 100 anni, soddisfare quasi integralmente le necessità dei paesi industrializzati con fonti rinnovabili di energia. L'Italia offre condizioni meteorologiche molto favorevoli all'uso dell'energia solare. Il valore di insolazione è compreso tra 1.200 e 1.750 Kwh/m<sup>2</sup> all'anno. In alcuni materiali esposti alla radiazione solare si determina un moto di elettroni e quindi una corrente elettrica.

La cella fotovoltaica è la componente base dei sistemi fotovoltaici, un dispositivo costituito da una sottile fetta (0,3 mm) di materiale semiconduttore (wafer), in genere silicio, opportunamente trattata.

Tale trattamento è caratterizzato da diversi processi chimici, tra i quali si hanno i cosiddetti "drogaggi": inserendo nella struttura cristallina del silicio delle impurità, cioè atomi di boro e fosforo, si genera un campo elettrico e si rendono anche disponibili le cariche necessarie alla formazione della corrente elettrica.

Riassumendo l'energia si ottiene quando i fotoni della luce solare, colpendo una cella, "strappano" gli elettroni più esterni (di valenza) degli atomi di silicio, gli elettroni sono raccolti dal reticolo metallico serigrafato sulla superficie visibile della cella che "incanalano" un flusso di elettroni ottenendo una corrente continua di energia elettrica.

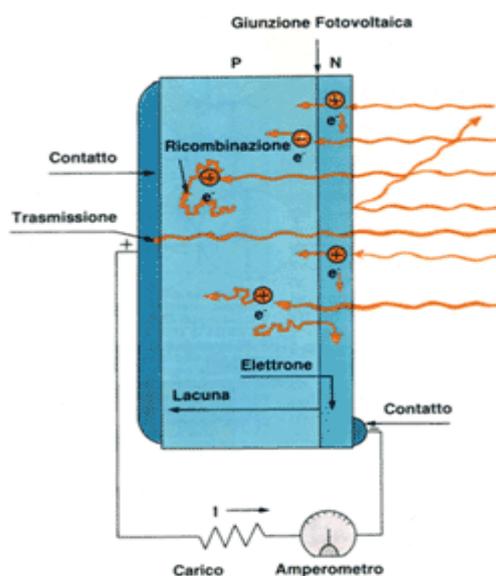


Figura 4.3 – Sistema fotovoltaico

### 4.3 PANNELLI CON CELLE IN SILICIO MONOCRISTALLINO

L'efficienza di queste celle fotovoltaiche in commercio attualmente è nell'ordine del 12-20%.

Per la produzione, l'installazione e la manutenzione in 20 anni di un sistema da 1 kWp occorrono 6-9 MWh di energia.

L'energia prodotta in 20 anni da un sistema FV da 1 kWp è di 18-28 MWh, a seconda della latitudine e della buona manutenzione dell'impianto, possono durare anche più di 30 anni.

Il costo di un impianto con celle in silicio monocristallino è attualmente nell'ordine di 5000-8.000 € al kWp, il costo minore è per impianti di taglia maggiore, il costo di manutenzione è di 50 -100 € all'anno.

Il wafer di monocristallo si produce con il metodo Czochralsky , basato sulla cristallizzazione di un “seme” di materiale molto puro, che viene immerso nel silicio liquido e quindi estratto e raffreddato lentamente per ottenere un “ lingotto ” di monocristallo, che avrà forma cilindrica (da 13 a 30 cm di diametro e 200 cm di lunghezza). Successivamente le celle ottenute affettando questo cilindro vengono squadrate non completamente, lasciando i caratteristici angoli smussati, a volte anche a forme ottagonali, il colore è uniforme.

Con una nuova linea concettuale si procede cristallizzando direttamente su un supporto un film sottile di silicio, ottenendo così qualcosa di simile ad una cella in silicio cristallino ma con i vantaggi delle celle a film sottili, quindi minori costi e maggiori possibilità di industrializzazione della produzione.

#### **4.4 PANNELLI CON CELLE IN SILICIO MULTICRISTALLINO**

L' efficienza di queste celle fotovoltaiche in commercio attualmente è nell'ordine del 10-15%.

Per la produzione, l'installazione e la manutenzione in 20 anni di un sistema da 1 kWp occorrono 4-7 MWh di energia.

L'energia prodotta in 20 anni con questi sistemi FV da 1 kWp è di 16-25 MWh, a seconda della latitudine e della buona manutenzione dell'impianto, possono durare anche più di 30 anni.

Il costo di un impianto con celle in silicio policristallino è attualmente di circa 4.000 -7.000 € al kWp, il costo diminuisce se l'impianto è di taglia maggiore.

Il wafer di multicristallo si origina dalla fusione e successiva ricristallizzazione del silicio di scarto dell'industria elettronica ("scraps" di silicio). Da questa fusione si ottiene un "pane" che viene tagliato verticalmente in lingotti con forma di parallelepipedo, per cui i wafer ottenuti hanno forma squadrata e le caratteristiche striature.

Attualmente più dell'80% dei sistemi fotovoltaici in commercio sono con celle in silicio poli e monocristallo.

#### **4.5 PANNELLI FV CON FILM IN SILICIO AMORFO (A-SI)**

Con l'amorfo, in realtà, non si può parlare di celle, in quanto si tratta di deposizioni di silicio (appunto allo stato amorfo) in film sottili su superfici che possono anche essere ampie, attualmente è la tecnologia che più rappresenta la soluzione "thin film" a livello commerciale, con una quota del 5% circa sul totale mercato fotovoltaico.

I moduli in silicio amorfo possono avere efficienze del 4-6% quelli monogiunzione e 7-10% con le tecnologie a doppia o tripla giunzione che

sfruttano una più larga banda dello spettro solare utile. Per la produzione di un pannello da un kWp occorrono 3-5 MWh di energia.

L'energia prodotta nella vita media (20 anni) da un pannello FV da 1 kWp è 10-18 MWh secondo la tecnologia adottata.

Il costo di un impianto con celle in silicio policristallino è attualmente di circa 6000-9000 € al kWp, il costo diminuisce se l'impianto è di taglia maggiore.

Il maggiore vantaggio dei moduli in silicio amorfo è la potenziale versatilità nell' integrazione architettonica dei moduli FV, sia per quanto concerne la forma che le tonalità cromatiche, fino ad ottenere anche superfici semitrasparenti utilizzabili in facciate vetrate.

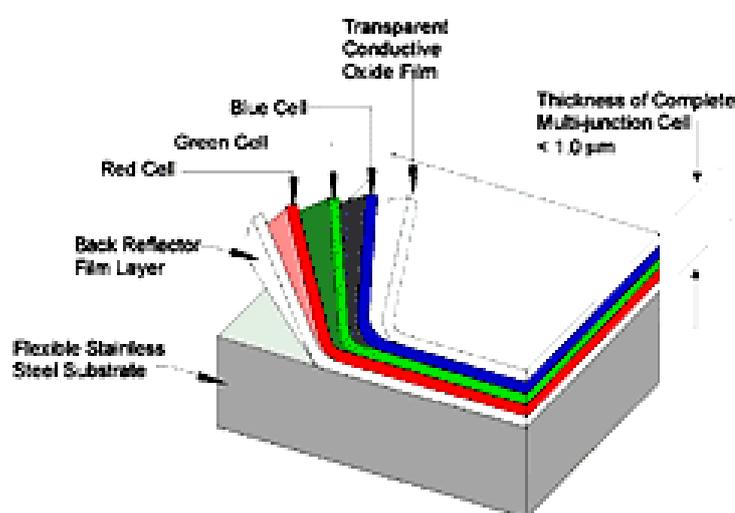
La tecnologia al silicio amorfo è stata in passato e continua ad essere oggetto di numerosi investimenti in ricerca e sviluppo. E' sicuramente la tecnologia meno costosa e più semplice da produrre, ma anche quella che garantisce i rendimenti più bassi: rispetto al 16% del silicio cristallino il silicio amorfo arriva al 6 – 8%. Inoltre solo da poco si è riusciti ad ottenere moduli fotovoltaici in amorfo con garanzie di funzionamento interessanti, 10 anni di garanzia contro i 25 anni del c-Si.

#### **4.5.1 TECNOLOGIA a-Si: H TANDEM & TRIPLE JUNCTION**

Derivata dalla tecnologia precedente (a-Si:H tradizionale) questa tecnologia innovativa permette un maggior rendimento di funzionamento, il quale in alcuni casi arriva al 12% (triple junction). In pratica vengono

aggiunte ulteriori giunzioni , trattate in maniera differente, le quali hanno risposte diverse allo spettro della luce, aumentando quindi la banda di funzionamento nello spettro solare.

Ad esempio: un modulo fotovoltaico costruito con questo tipo di tecnologia, paragonata al silicio cristallino C-Si, anche se di minor efficienza, a parità di potenza riesce a produrre in base annua un 20% in più di energia perché ha una migliore risposta alla radiazione solare diffusa.



*Figura 4.4 – Tecnologia Triple Junction Unisolar*

La tecnologia Triple Junction Unisolar permette di costruire moduli fotovoltaici di tipo flessibile per svariati usi e inoltre permette di incollare le varie celle su substrati in acciaio (tetti in lamiera) e di altro materiale (guaina in PVC , etc.). La tecnologia Unisolar tra l'altro è l'unica a dare 20 anni di garanzia nel settore film sottile.

#### **4.5.2 CELLE CIS (COPPER INDIUM DISELINIDE) E CIGS (COPPER INDIUM GALLIUM DISELINIDE)**

Queste celle utilizzano substrati di basso costo e processi di produzione facilmente automatizzabili e quindi idonei a produzioni di grandi volumi. Questi prodotti hanno dimostrato affidabilità nell'utilizzo in esterno e stabile efficienza nel tempo. Entrambe le tecnologie hanno dimostrato buone caratteristiche elettriche. I moduli CIS sono già presenti commercialmente. Il CIS viene alla ribalta del mondo fotovoltaico quando nel 1988 la prima cella da laboratorio raggiunge l'11% di efficienza. Nei sette anni di ricerca che seguirono, i risultati stentavano ad arrivare e solo alcune soluzioni produttive brillanti a metà degli anni '90 accelerarono lo sviluppo. Il CIGS, e ancora più recentemente il CIGSS (con l'aggiunta di zolfo) è un derivato che consente di aumentare l'efficienza elettrica di conversione. Nonostante la più intuitiva complessità di realizzazione, fortunatamente l'aggiunta di un composto nel mix di produzione ha consentito una maggior flessibilità del processo non gravando sui costi totali. Contrariamente a quanto accade per il silicio amorfo, la stabilità delle prestazioni in esterno del CIS-CIGS è notevole e, prove in campo che durano da ormai 7 anni, provano che non c'è degrado della potenza. Viceversa, lo stato di maturità della tecnologia sul piano della uniformità di produzione (celle o moduli di simili caratteristiche elettriche) è ancora insufficiente. L'ingegneria chimico-fisica dei dispositivi CIS e CIGS è prevista con l'utilizzo di materiali di base piuttosto costosi anche se si ottengono buone prestazioni anche

con materiali di qualità intermedia. La peculiarità di poter essere realizzate su substrati anche flessibili le rendono, in prospettiva, attraenti anche per gli usi architettonici.

#### **4.5.3 TECNOLOGIA CADMIO TELLURIDE/CADMIOSULFIDE (CTS)**

La cella solare CTS è composta da uno strato p (CdTe) e uno strato n (CdS) i quali formano una eterogiunzione p-n. La tecnologia di deposizione dei materiali si rifà a quella già elencata per il Silicio Amorfo.

Differentemente dalla tecnologia a-Si:H la cella CTS riesce a ottenere efficienze maggiori: 8-10% per prodotti industriali (15,8% ottenuto in laboratorio). Uno dei problemi elencati per la produzione in larga scala della tecnologia CTS è il cadmio contenuto nella cella il quale può diventare un problema ambientale se non correttamente riciclato o utilizzato.

#### **4.5.4 ARSENIURO DI GALLIO (GaAS)**

Una lega binaria con proprietà semiconduttive, in grado di assicurare rendimenti elevatissimi, dovuti alla proprietà di avere un gap diretto (a differenza del silicio). Viene impiegata soprattutto per applicazioni militari o scientifiche avanzate (come missioni automatizzate di esplorazione planetaria o fotorivelatori particolarmente sensibili).

La tecnologia GaAs è attualmente la più interessante dal punto di vista dell'efficienza ottenuta, superiore al 25-30%, ma la produzione di queste celle è limitata da costi altissimi e dalla scarsità del materiale, utilizzato prevalentemente nell'industria dei "semiconduttori ad alta velocità di commutazione" e dell'optoelettronica (led e fototransistors). Infatti la tecnologia GaAs viene utilizzata principalmente per applicazioni spaziali, dove sono importanti pesi e dimensioni ridotte. I risultati ottenuti con celle GaAs danno un'efficienza di conversione maggiore del 30%.

Nel 1999 un progetto congiunto tra Spectrolab e il National Renewable Energy Laboratory (NREL) ha raggiunto un record importante nelle conversione fotovoltaica, realizzando una cella solare con efficienza di conversione pari al 32,3%. Questa cella a tripla giunzione è stata costruita utilizzando tre strati di materiali semiconduttori, fosforo di indio/gallio su arseniuro di gallio su germanio (GaInP2/GaAs/Ge). Si ritiene che siano possibili ulteriori progressi in breve tempo tali da permettere il raggiungimento della soglia del 40%.

Il GaAs è uno dei semiconduttori che meglio converte la radiazione dello spettro solare in energia elettrica. Tutta la radiazione viene assorbita in pochi micron sotto la superficie. Rispetto alle celle solari al Silicio quelle al GaAs:

- sono più efficienti (27% contro il 15%)
- resistono meglio alle radiazioni e quindi durano di più

- degradano meno alle temperature cui operano i pannelli solari nello spazio (70° C).

A livello di sistema costo e peso sono completamente compensati da:

- durata maggiore
- riduzione dell'area dei pannelli a pari potenza installata (30-50%)
- maggiore W/Kg e W/m<sup>2</sup>
- riduzione dei costi di lancio
- minore carburante necessario al controllo d'assetto.

Esistono due tipi di celle solari al GaAs per applicazioni spaziali:

- le celle a singola giunzione caratterizzate da efficienza del 19-20%
- le celle a tripla giunzione caratterizzate da efficienza dal 24 al 28%.

Le celle al GaAs sono ottenute depositando i vari strati fisicamente con tecniche di epitassia, cioè ordinando i vari strati superiori con la medesima struttura cristallina del substrato.

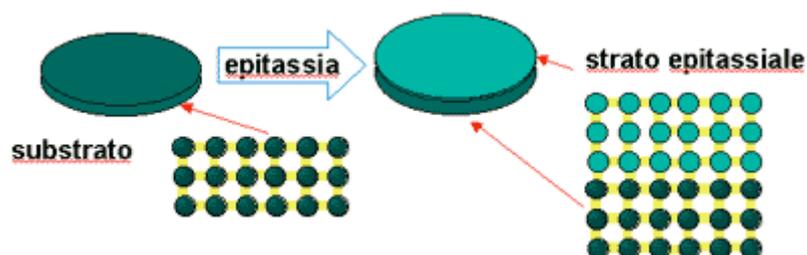


Figura 4.5 – tecnica di epitassia

## **4.6 FOTVOLTAICO DELLA TERZA GENERAZIONE**

La terza generazione si riferisce alle tecnologie basate su concetti innovativi, che, pur avendo avuto conferma sperimentale in laboratorio, ancora non hanno trovato una sufficiente sperimentazione pratica per passare alla fase della produzione industriale. Alla base di questa terza generazione fotovoltaica sta l'osservazione che i dispositivi fotovoltaici realizzati con un singolo materiale semiconduttore riescono sfruttare soltanto una piccola parte dello spettro solare, quella i cui fotoni hanno energia superiore alla banda proibita che caratterizza il materiale. In altre parole i dispositivi sono sensibili, cioè vedono, soltanto alcuni colori che compongono lo spettro. Ad esempio, il silicio è in parte sensibile al blu, molto sensibile al verde e al giallo e poco al rosso, mentre è completamente insensibile all'infrarosso. In questo modo, più della metà dello spettro solare sfugge alla conversione fotovoltaica e l'energia ad esso associata viene persa. Ciò pone un limite superiore all'efficienza dei dispositivi ed il tentativo di rimuovere questo confine costituisce la principale motivazione delle ricerche sulle celle fotovoltaiche della cosiddetta terza generazione.

#### **4.6.1 TECNICA DEL BEAM SPLITTING**

In linea teorica, lo spettro solare può essere fatto passare attraverso un sistema ottico (ad esempio, nel caso più noto, attraverso un prisma di vetro), che possa separare i raggi di diverso colore ed inviare ciascun colore su una cella fotovoltaica fatta con un materiale particolarmente sensibile proprio a quel colore, in modo che la risposta della cella sia al massimo della sua efficienza. Un dispositivo ottico di questo tipo, detto di beam splitting, consentirebbe di sfruttare tutto lo spettro solare ai fini della conversione fotovoltaica. L'efficienza teorica complessiva, calcolata per questa tecnica, può raggiungere un valore superiore al 60%. In linea pratica, sono stati realizzati dispositivi di beam splitting suddividendo lo spettro solare in tre componenti e dimostrando sperimentalmente la possibilità di realizzare in tal modo efficienze intorno al 30% con celle al germanio per la componente rossa, al silicio per quella giallo-verde e all'arseniuro di gallio per quella blu-violetta. Naturalmente si deve associare a tali dispositivi un sistema ottico di cattura e concentrazione della radiazione solare in modo da raggiungere un valore della densità di potenza che sia significativo per la conversione in elettricità.

Gli esperimenti di laboratorio hanno quindi dimostrato la validità del concetto di suddivisione dello spettro e la possibilità di avere efficienze fotovoltaiche molto alte, ma la realizzazione pratica dei dispositivi a beam splitting appare abbastanza complicata da un punto di vista tecnico e

costosa sotto il profilo economico. L'aumento ottenuto nell'efficienza non ripaga dei maggiori costi da sostenere per i sistemi ottici di concentrazione e di beam splitting.

#### **4.6.2 CELLE A GIUNZIONI MULTIPLE SOVRAPPOSTE O MULTICOLORE**

Esiste una tecnica più semplice sul piano logico, anche se più complicata su quello della tecnologia, per il beam splitting. Essa consiste nel realizzare, in un unico dispositivo, celle a giunzioni multiple sovrapposte utilizzando materiali semiconduttori diversi in modo che ciascuna giunzione risponda soltanto ad una parte dello spettro solare. In questo caso, ciascuna giunzione assorbe soltanto una parte dei raggi e la converte in elettroni. La parte restante dello spettro passa oltre e, a sua volta, viene parzialmente assorbita nella giunzione successiva e così via in cascata. Il dispositivo è congegnato in modo tale che gli elettroni prodotti in ogni giunzione vengono raccolti nel circuito elettrico esterno. La potenza totale generata dal dispositivo è quindi la somma di tutti i contributi dovuti alla conversione fotovoltaica nelle diverse giunzioni da parte delle varie componenti dello spettro solare.

In linea teorica, se si avesse a disposizione un grande numero di materiali semiconduttori da accoppiare a tutte le componenti dello spettro, sarebbe possibile sfruttare l'intera energia contenuta nella radiazione solare. In questa ipotesi teorica, l'efficienza di conversione

fotovoltaica è stata quantificata in un valore pari all'86.8% . In linea pratica, sono stati realizzati numerosi dispositivi a celle multigiunzione, limitandone il numero a tre per evidenti ragioni, sia di difficoltà tecnologica, sia di disponibilità di materiali semiconduttori di caratteristiche fotovoltaiche adeguate.

#### **4.6.3 LA CELLA DI GRÄTZEL**

Si immagini di prendere una particella di un semiconduttore cristallino e si assuma che essa abbia forma pressoché sferica. Si supponga poi di poter ridurre le dimensioni di questa sfera, in modo che il suo diametro raggiunga una misura dell'ordine del nanometro, cosicché il suo volume venga a contenere da 10 a 100 atomi. A questo grado microscopico di aggregazione atomica, continuano ad esistere nel cristallo nanoscopico, sia la fascia dei livelli energetici proibiti per gli elettroni (energy gap), sia la banda di conduzione, sia quella di valenza. La differenza rispetto al semiconduttore macroscopico è che i livelli all'interno delle bande sono associati a valori discreti dell'energia e la distanza tra i singoli livelli dipende dal numero di atomi presenti nell'aggregato. Minore è il numero degli atomi e più separati sono i livelli energetici. Ciò in particolare accade per la banda proibita, la cui larghezza in tal modo viene fissata in funzione del numero di atomi, o, ciò che è lo stesso nel caso di atomi di uno stesso materiale, dalle dimensioni del diametro della sferetta. In conclusione, il passaggio dal materiale semiconduttore cristallino esteso

a quello di aggregato atomico di dimensioni nanometriche, chiamato brevemente nanocristallo quantistico o quantum dot, produce un cambiamento delle caratteristiche fisiche ed optoelettroniche tale che diviene possibile l'ingegneria delle bande attraverso la scelta del materiale di partenza ed il controllo delle dimensioni dei nanocristalli. In altri termini, i quantum dots possono essere considerati come se ciascuno di essi fosse un super reticolo tridimensionale. In linea di principio, modulando il diametro dei nanocristalli quantistici, si possono realizzare diversi valori della banda proibita in modo da realizzare con lo stesso materiale diverse possibilità d'accoppiamento fotoelettrico ottimale con le varie frequenze dello spettro solare. In teoria, i nanocristalli possono essere disposti a strati multipli all'interno di un'opportuna giunzione n-i-p, collocandoli al posto della zona intrinseca, i, cosicché la corrente fotoelettrica generata in essi dalla radiazione solare possa passare da uno strato all'altro per effetto tunnel fino a venir convogliata dal campo elettrico della giunzione sugli elettrodi di uscita analogamente a quanto avviene nelle celle fotovoltaiche convenzionali.

Storicamente, la prima realizzazione pratica di un tale dispositivo è costituita dalla cella elettrochimica di Grätzel, detta così dal nome del suo inventore (O'Regan, Grätzel, 1991).

Essa si ispira concettualmente ai principi della fotosintesi, infatti, attraverso una serie di complesse reazioni, gli organismi fotosintetici sono capaci di trasformare l'energia luminosa in energia chimica, in una forma così stabile da poter essere immagazzinata e riutilizzata milioni di

anni dopo (combustibili fossili). Le reazioni che costituiscono il processo di fotosintesi avvengono in piccoli organelli noti come cloroplasti dove vengono generati portatori di carica (elettroni e protoni) che servono alla sintesi di carboidrati a partire da biossido di carbonio. La fotosintesi avviene primariamente grazie alla luce raccolta da molecole di coloranti (pigmenti) disposti attorno a centri di reazione che agiscono essenzialmente da antenne per raccogliere la luce. L'assorbimento di un fotone da parte di una molecola antenna eccita una molecola di colorante che acquisisce in questo l'energia necessaria ad innescare il trasferimento di elettroni dall'acqua al NADP (nicotinammide-adenosin-dinucleotidofosfato) tramite il quale avverrà in seguito la sintesi dei carboidrati. Nella cella di Grätzel, uno strato sottile di particelle nanometriche di ossido di titanio rimpiazza il NADP ed il biossido di carbonio come accettore di elettroni, mentre lo iodio in soluzione sostituisce l'acqua come fonte di elettroni. I nanocristalli utilizzati da Grätzel erano trattati in modo tale da rendere la loro superficie porosa cosicché ciascun poro poteva essere riempito con una particella di materiale luminescente colorato (dye), del tipo dei sali con cui si realizzano le vernici luminescenti. La differenza con il sistema dei nanocristalli quantistici è solo che i pori sono riempiti dalle molecole di dye invece che dai quantum dots. Per tale motivo si diceva che i nanocristalli di  $\text{TiO}_2$  erano stati sensibilizzati dalla dye e le celle realizzate in questo modo venivano dette nanocrystalline dye-sensitized solar cells. Il loro funzionamento può essere brevemente illustrato nel

modo seguente. I nanocristalli di biossido di titanio sensibilizzati vengono compattati per sinterizzazione in forma di strato, spesso una decina di micron. Lo strato è incollato ad una lastra di un conduttore trasparente attraverso cui viene fatta passare la radiazione solare (contatto anteriore della cella). All'altro lato dello strato dei nanocristalli viene appoggiato un secondo elettrodo (contatto posteriore) e i contorni del pacchetto vengono sigillati dopo aver riempito lo spazio interno con una soluzione elettrolitica. I nanocristalli di  $\text{TiO}_2$  nel loro complesso vanno a costituire il primo elettrodo di una cella elettrolitica che ha il contatto posteriore come secondo elettrodo. Sotto condizioni d'illuminazione solare, la molecola della dye assorbe la luce passando dallo stato fondamentale ad uno eccitato. Poi, entro un tempo breve, essa si diseccita emettendo un elettrone, che penetra all'interno del biossido di titanio attraverso la barriera superficiale. L'energia dell'elettrone è tale che esso viene iniettato direttamente nella banda di conduzione del biossido di titanio. Questo materiale è un buon semiconduttore ad alto energy gap con la banda di conduzione contenente pochissimi elettroni (in condizioni termiche normali). Pertanto, gli elettroni iniettati dalla dye direttamente nella banda di conduzione possono attraversare il  $\text{TiO}_2$  essenzialmente per diffusione senza praticamente subire processi di ricombinazione. Il movimento degli elettroni è di tipo diffusivo perché all'interno dei nanocristalli non esiste alcun campo elettrico dato che la soluzione elettrolitica in cui essi sono immersi, essendo un buon conduttore, mantiene lo spazio intorno ai nanocristalli equipotenziale. Gli elettroni

pertanto raggiungono il contatto anteriore per diffusione e, sotto l'azione della differenza di potenziale esistente tra questo contatto e quello posteriore (potenziale di ossido riduzione della cella elettrolitica), circolano nel circuito esterno che collega i due elettrodi attraverso il carico, sviluppando potenza in esso. Una volta raggiunto il contatto posteriore, le cariche vengono neutralizzate dalla reazione elettrochimica. In questo modo si riesce a realizzare la conversione fotoelettrica in due tempi ed in due luoghi separati. L'effetto fotoelettrico avviene all'interno della dye e la raccolta degli elettroni all'interno del semiconduttore. Ciò in linea di principio costituisce un vantaggio perché aumenta i gradi di libertà, consentendo di ottimizzare il processo di fotoconversione indipendentemente da quello della raccolta della carica. La neutralità elettrica della cella viene ristabilita dalla reazione elettrochimica, che, nel caso della cella di Grätzel, avviene in una soluzione elettrolitica non acquosa contenente la coppia redox ioduro/triioduro in acetonitrile cosicché gli elettroni fotogenerati dopo aver attraversato il circuito esterno vengono neutralizzati mediante la riduzione del triioduro a ioduro. Celle fotoelettrochimiche di questo tipo con efficienza certificata pari al 7% sono state realizzate nel 1994 e da allora è iniziato il tentativo di industrializzazione della tecnologia. Nel 1996 la tecnologia delle celle di Grätzel era già migliorata al punto tale che l'efficienza, certificata dal Fraunhofer Institut, si era portata all'11% con una cella da 25 mm<sup>2</sup> a nanocristalli dye-sensitized. Attualmente sono in corso attività di ricerca e sviluppo per estendere la superficie

della cella fino al livello di modulo in modo da verificare la possibilità di interesse del mercato fotovoltaico. La cella fotoelettrochimica di Grätzel ha indubbiamente un valore concettuale (ed anche storico) notevole in quanto essa ha dimostrato sperimentalmente il funzionamento delle nanotecnologie applicate alla fotoconversione elettrica. Essa tuttavia si presta a considerazioni critiche circa la sua reale possibilità di raggiungere il campo di alte efficienze necessario per la competitività del kWh prodotto. Infatti, il processo di elettroluminescenza delle dyes introduce al primo stadio della catena un rendimento basso a causa dell'assorbimento estremamente selettivo e quindi ristretto a piccole bande delle frequenze luminose. Ciò riduce subito il valore limite dell'efficienza di conversione ottenibile. Inoltre le molecole delle dyes hanno tutte la tendenza a decomporsi abbastanza rapidamente nel tempo quando sono esposte alla luce solare cosicché l'efficienza delle celle tende a degradare. Pertanto la validità del concetto mostra un punto debole nell'uso delle dyes per realizzare l'assorbimento luminoso, mentre permane alto il valore del meccanismo d'iniezione e di trasporto delle cariche nei nanocristalli di  $\text{TiO}_2$  e del successivo sistema elettrolitico di neutralizzazione del dispositivo.

Il punto di debolezza delle dyes può essere proficuamente rimosso se al loro posto vengono collocati nei pori del biossido di titanio altrettanti nanocristalli quantistici di semiconduttori fotosensibili. Avviene allora che i quantum dots, hanno una grande capacità di assorbimento della luce in quanto essa è limitata soltanto dal loro energy gap ed inoltre questi

materiali sono estremamente stabili (anche perché possono essere facilmente protetti dall'ambiente elettrolitico in cui operano). Si ha così che uno strato sinterizzato (sottile e compatto) di particelle di  $\text{TiO}_2$  "sensibilizzate" con quantum dots di banda opportuna può essere reso fotosensibile soltanto ad alcune componenti dello spettro solare e completamente trasparente alle altre. Sovrapponendo tra loro diversi strati, ciascuno sensibile ad una delle varie componenti dello spettro solare, si può realizzare un dispositivo fotoelettrochimico ad altissima efficienza simile alle celle fotovoltaiche multigiunzione, ma in linea di principio con una tecnologia molto più semplice (sinterizzazione) e soprattutto più adatta alla industrializzazione su grande scala.

Il modello concettuale fornito dalla cella elettrochimica di Grätzel può servire per immaginare un dispositivo realizzabile nella pratica, anche se il filone di ricerca sui quantum dots sembra attualmente allontanarsi da tale modello. La necessità di ricorrere ad un'alternativa emerge non appena si sottopone il concetto della conversione fotoelettrochimica al vaglio dei criteri d'impatto ambientale. Infatti, le soluzioni elettrolitiche necessarie per il funzionamento delle celle di Grätzel mostrano un alto grado di tossicità per cui l'eventuale uso esteso di tali dispositivi, visto nella prospettiva energetica di grande scala, pone notevoli rischi di rilascio di effluenti chimici, sia durante il funzionamento degli impianti in caso d'incidente, sia a fine vita operativa per la loro disposizione in discarica.

Allo stato attuale della conoscenza, sembra che l'alternativa possa venire dall'uso rinnovato del silicio, sia sotto forma di quantum dots, sia come biossido di silicio. Ciò è quanto risulta, ad esempio, dai programmi d'attività del Centre For Photovoltaic Engineering dell'Università australiana del Nuovo Galles del Sud (UNSW: Centre for Photovoltaic Engineering Annual Report), uno dei principali centri di eccellenza di R&D sul fotovoltaico nel mondo. Qui, nanocristalli quantistici di silicio puro sono stati ottenuti in laboratorio e la possibilità di modulare la banda di energia proibita tra 1.3 eV e 1.7 eV è stata verificata sperimentalmente. Si apre quindi la strada per modulare il coefficiente di assorbimento del silicio in modo da impiegare soltanto questo materiale (stabile e non inquinante) per realizzare i dispositivi fotovoltaici della terza generazione senza far ricorso ad altri tipi di semiconduttori, tutti, più o meno, ambientalmente pericolosi. Strati di quantum dots disposti in modo ordinato in forma di super reticolo sono stati ottenuti all'interno di uno strato più spesso e trasparente di SiO<sub>2</sub>, dimostrando la possibilità della tecnologia di realizzare alcuni dispositivi fotovoltaici di terza generazione finora soltanto teorizzati (ad esempio le celle a elettroni caldi), che potrebbero portare l'efficienza di conversione al limite del valore teorico calcolato. In conclusione, le recenti innovazioni introdotte in campo fotovoltaico dalle nanotecnologie dei materiali e le acquisizioni concettuali e sperimentali relative alle applicazioni quantistiche che divengono oggi possibili lasciano prevedere l'avvento di dispositivi fotovoltaici di terza generazione. Tali prodotti potranno finalmente portare

alla competitività del kWh con un margine tale da permettere di tollerare anche i costi aggiunti dai sistemi di accumulo dell'energia. Solo a questo punto la tecnologia fotovoltaica potrà superare i limiti di sviluppo dovuti all'intermittenza della generazione e divenire una reale opzione energetica alternativa. Il percorso storico della tecnologia fotovoltaica, iniziato nel lontano 1839 con l'osservazione dell'effetto fotoelettrico da parte di Edmond Becquerel, appare oggi tutt'altro che terminato. Piuttosto, tutto lascia presumere che il futuro del fotovoltaico sia appena cominciato.

## CAPITOLO 5

### TIPOLOGIA DI SATELLITI

In astronomia viene chiamato satellite un corpo celeste che ruota attorno ad un pianeta.

Ad esempio è un satellite la luna che, ruotando attorno alla terra, la segue incessantemente nel suo moto attorno al sole. Sarebbe come se, lanciando una pallina (che rappresenta il satellite) in una roulette (il cui centro rappresenta il pianeta), questa pallina si mettesse a girare a velocità costante senza mai fermarsi su nessun numero e rimanendo sempre alla stessa distanza dal centro. Ma sappiamo benissimo per esperienza che tutto ciò non può accadere sulla terra; infatti la pallina per l'attrito con l'aria e con il fondo della roulette, prima o poi perde velocità e cade verso il centro per fermarsi sul numero fortunato.

Allora qual è il motivo della perenne esistenza dei satelliti? La risposta è semplice; allontanandosi dalla superficie di un pianeta l'atmosfera diventa a poco a poco sempre più rarefatta fino a raggiungere densità bassissime (tendenti al vuoto!) e quindi la forza d'attrito, che tende a fermare qualsiasi corpo in movimento, non esiste più, offrendo la possibilità ai corpi celesti di girare sulla stessa orbita senza mai fermarsi.

Ma quale strana e misteriosa forza impone al satellite questo particolare movimento circolare attorno al pianeta? Non potrebbe il satellite andarsene a spasso per lo spazio? E' forse legato tramite una corda?!? E' allora bene chiarire che tutti i satelliti naturali sono frutto di una fortunata e rara combinazione di eventi che, come spesso succede in natura, danno luogo ad un fenomeno che risulta a prima vista inspiegabile. D'altra parte la spiegazione c'è, e viene da alcuni semplici concetti di fisica elementare: prendiamo ad esempio la terra e la luna. Ogni corpo esercita sui corpi vicini una forza attrattiva detta forza di gravità che dipende dalla massa e dalla mutua distanza; la luna, di massa trascurabile rispetto alla terra, viene attratta verso quest' ultima con notevole forza. Quindi immaginiamo che in tempi remoti (milioni e milioni di anni fa) la luna si sia trovata a viaggiare in linea retta nello spazio nelle vicinanze della terra con una certa velocità ; l'attrazione gravitazionale avrebbe così incurvato la traiettoria della luna dalla propria rotta originaria in direzione della terra. E' intuitivo pensare che per valori della velocità di crociera della luna molto alti l'interazione sarebbe stata particolarmente lieve e quindi la luna avrebbe continuato il suo vagabondaggio nello spazio allontanandosi a gran velocità dalla terra. Per valori di velocità molto bassi, invece, questa interazione sarebbe stata molto più efficace, provocando così la caduta della luna sulla terra con le note catastrofiche conseguenze. Esiste però un ben determinato valore della velocità (dipendente dalla distanza terra-luna) in grado di compiere un vero miracolo, cioè di uguagliare la forza di attrazione

terrestre con la forza (centrifuga), dipendente dalla velocità, necessaria alla luna per sfuggire al campo gravitazionale terrestre. Questo equilibrio costringe così la luna a seguire l'orbita circolare attorno alla terra come se fosse condotta da un filo invisibile. In realtà, le orbite dei satelliti non sono perfettamente circolari, ma possiedono una certa eccentricità, per cui si definiscono ellittiche. Anche a grande distanza dall'atmosfera dei pianeti, non esiste il vuoto assoluto, perchè ci sono sempre atomi singoli (creati al momento della nascita dell'universo, il big bang) che vagano per lo spazio con un moto casuale (e quando raramente si combinano danno luogo alla creazione dei corpi celesti). Una ben precisa combinazione di velocità e di distanza tra due corpi interagenti possa portare il corpo di massa minore a diventare un satellite dell'altro, cioè ad assumere un'orbita ellittica (o al limite circolare) attorno ad esso. Questo concetto molto semplice, ma non sempre facile da realizzare in pratica, ha portato ad un eccezionale salto di qualità in un'enorme quantità di servizi, fornendo lo spunto per la costruzione dei satelliti artificiali. Il motivo del successo dei satelliti artificiali sta nel fatto che in primo luogo quando sono in orbita hanno bisogno (a meno di particolari guasti) di pochissima manutenzione, avendo vita molto lunga e, nella maggior parte dei casi, autoalimentandosi mediante lo sfruttamento dell'energia solare. Secondariamente i satelliti artificiali permettono di coprire vaste aree del pianeta (uno solo può coprire in ogni istante anche più di un intero continente!) permettendo affidabili comunicazioni ad alta velocità in ogni parte del pianeta e facendo risparmiare i milioni che servirebbero

per l'installazione sulla terra di scomodi cavi o ripetitori. Come ultima cosa, ma non meno importante, l'occhio del satellite permette di vedere il nostro pianeta da un punto di vista totalmente diverso, procurandoci un enorme flusso di informazioni e dati in un tempo veramente minimo. A seconda della loro altezza sulla superficie terrestre e della inclinazione rispetto alla fascia equatoriale, i satelliti artificiali sono costruiti con caratteristiche comportamentali diverse. Bisogna chiaramente raggiungere un compromesso cercando di combinare la distanza dalla terra con la velocità del moto nell'orbita. Noi ci occupiamo di due grandi classi di satelliti artificiali: quelli geostazionari ( o geosincroni) e quelli polari (a bassa quota).

- **Satelliti artificiali geostazionari:** un satellite di questo tipo percorre un orbita quasi circolare attorno alla terra, ed è posizionato sul piano dell'equatore. La sua caratteristica principale però e' quella di viaggiare alla stessa velocità angolare della terra; questo vuol dire che un satellite geostazionario possiede lo stesso periodo di rotazione della terra, compiendo un'orbita completa in 24 ore e quindi un osservatore solidale con la terra, guardando verso il cielo, lo vedrebbe immobile, come se fosse fissato rigidamente alla terra. Questa precisa condizione si viene a verificare solo se il satellite ha una ben determinata altezza rispetto alla superficie terrestre; abbiamo infatti già visto per un satellite qualsiasi come velocità e distanza dal pianeta siano in stretto rapporto; minore è la distanza, maggiore è la forza di

attrazione esercitata tra i due corpi, maggiore dovrà essere la velocità del satellite per evitare di cadere sul pianeta e per rimanere invece quindi su un'orbita stazionaria. Chiaramente perchè funzioni tutto perfettamente la distanza da terra dovrà essere abbastanza grande da posizionare il satellite nel vuoto (o quasi), cioè dove l'atmosfera terrestre sarà più rarefatta. In caso contrario il satellite perderebbe velocità per effetto dell'attrito con l'aria e collaserebbe verso la Terra ponendo termine a qualsiasi tipo di esperimento. Fortunatamente un semplice calcolo matematico ci fornisce la soluzione del problema e ci permette di constatare facilmente che l'altezza necessaria per posizionare il satellite (circa 36000 km) è di gran lunga superiore al limite dell'atmosfera (circa 2-3000 km).

- **Satelliti artificiali polari** (a bassa quota): questo tipo di satellite, invece che essere posizionato sul piano dell'equatore (come quelli geostazionari), possiede una inclinazione di circa 90 gradi rispetto ad esso, in modo da sorvolare ad istanti precisi i due poli terrestri. L'orbita è poi ellittica invece che circolare. Questi satelliti vengono utilizzati soprattutto quando c'è l'esigenza di coprire in un certo tempo tutti i punti della superficie terrestre. Infatti essendo a bassa quota (900-1000 km), devono avere una velocità elevata per poter resistere all'attrazione terrestre e quindi ci impiegano minor tempo a compiere un giro completo attorno alla terra. Tipicamente ogni orbita completa attorno alla terra richiede 100 minuti e vengono

effettuate 14 orbite al giorno. Di solito un satellite di questa classe è programmato in modo da passare sopra una data area (per esempio una stazione ricevente) a tempi regolari, ad esempio intervalli di 6 o 12 ore, e il tempo di visibilità è soltanto di circa 12-15 minuti. Chiaramente questo sistema comporta una maggiore complessità nella costruzione del satellite ed altri problemi causati dalla alta velocità. Infatti a quote così basse l'azione frenante dell'atmosfera sul satellite non è trascurabile e quindi il satellite stesso deve essere attrezzato con un sistema di stabilizzazione automatico e speciali motori che lo riportino sulla giusta orbita, facendogli recuperare la velocità persa. In più la copertura a terra del satellite è molto limitata, comportando così notevoli costi per installare tanti satelliti di questo tipo su orbite opportune per avere la copertura di regioni più vaste. E siccome variano ogni momento la loro posizione rispetto alla terra, non possono testimoniare le variazioni a breve termine. I vantaggi sono comunque notevoli: tutto ciò comporta un risparmio della potenza di trasmissione dei dati verso terra, perchè il minore tragitto permette di mandare un segnale più debole e fa diminuire anche il ritardo di propagazione del segnale, che seppur viaggiando alla velocità della luce, impiega un certo tempo ad attraversare lo spazio per giungere alla stazione ricevente

## **5.1 SATELLITI PER LA RICERCA SCIENTIFICA**

Numerosi satelliti hanno studiato l'ambiente spaziale attorno alla Terra, il Sole, le stelle e corpi extragalattici in una vasta gamma di lunghezze d'onda. Tra quelli che hanno già concluso la loro attività sono da ricordare: sei Osservatori geofisici orbitanti (1964-69; OGO); otto Osservatori solari orbitanti (1962-75; OSO); due Osservatori astronomici orbitanti (1966-72; OAO); tre Osservatori astronomici per le alte energie (1977-79); l'International Ultraviolet Explorer (1978); i satelliti UHURU (1970-79) ed Exosat (1983) per l'astronomia X; e il satellite a raggi infrarossi IRAS (1983; v. astronomia e astrofisica).

### **5.1.1 LA MISSIONE INTEGRAL ED ENVISAT**

Il satellite astronomico europeo INTEGRAL (acronimo di «international Gamma Ray Astrophysics Laboratory») é un satellite per osservazioni astronomiche nella banda dei raggi gamma. É stato selezionato dal comitato dei programmi scientifici dell'agenzia spaziale europea (ESA, «European Space Agency») il 3 giugno 1993 come missione di media grandezza nel suo programma Horizon 2000.



*Figura 5.1 – Satellite INTEGRAL*

INTEGRAL rappresenta il prossimo passo nell'osservazione spaziale dei raggi gamma, dopo satelliti quali CGRO («Compton Gamma Ray Observatory») lanciato dagli americani, ed il satellite russo-europeo GRANAT.

Il satellite è stato lanciato da un razzo russo PROTON agli inizi di ottobre dell'anno 2002. La sua orbita eccentrica ha un periodo di rivoluzione intorno alla terra di 72 ore. L'orbita selezionata ha un perigeo a 10 000 km ed un apogeo a 153 000 km, con un' inclinazione di 51,6 gradi rispetto al piano dell'equatore. È stata scelta per minimizzare il rumore di fondo causato dai protoni presenti nella cintura di radiazione e per permettere delle osservazioni lunghe ed ininterrotte.

Il tempo di vita "nominale" del satellite é di due anni, con la possibilità di prolungare la missione di altri tre anni supplementari.

Altro satellite che merita di essere considerato è l'Envisat , il più grande satellite europeo in orbita intorno alla terra, è stato lanciato nello spazio nella notte tra il 28 febbraio ed il 1° marzo 2002 con il compito di

effettuare un costante monitoraggio lo stato del nostro pianeta e l'impatto delle attività umane. Inoltre, il satellite fornirà una gran mole di informazioni sull'ambiente.



*Figura 5.2 – Lancio satellite ENVISAT*

Una volta nello spazio, Envisat percorrerà un'orbita polare in 100 minuti a 800 km. di altezza dalla Terra in modo da assicurare una copertura globale ogni tre giorni ed una ripetizione esatta della copertura ogni 35 giorni. Con Envisat sono arrivati a 50 i satelliti costruiti da Astrium ed affidati al lanciatore europeo Ariane 5 che dimostra la sua perfetta operatività confermando il vantaggio sugli altri concorrenti.

## **5.2 SATELLITI PER LE COMUNICAZIONI**

Probabilmente la più importante applicazione tecnologica dei satelliti artificiali è stata la ritrasmissione dei segnali radio da un punto all'altro della Terra per rendere più agevoli le comunicazioni. I satelliti

sperimentali per comunicazioni SCORE, Escho, Telstar, Relay e Syncom vennero lanciati dagli Stati Uniti tra il 1958 e il 1963. Il sistema Intelsat attualmente copre il globo intero e i satelliti locali, come i Molniya russi, i Westar dei paesi occidentali e gli Anik del Canada, servono singoli paesi. Usando una combinazione di radio ricevitori, amplificatori e trasmettitori e le tecniche elettroniche di multiplexazione (trasmissione contemporanea sulla stessa onda, multiplexer) questi satelliti per comunicazioni possono ritrasmettere contemporaneamente molti segnali telefonici e televisivi.

Alla fine degli anni '50 e all'inizio degli anni '60 gli scienziati tentarono di creare sistemi di comunicazione cercando di far rimbalzare segnali radio su palloni aerostatici meteorologici metallizzati ma con scarsi risultati; successivamente la Marina degli Stati Uniti constatò la presenza di un "pallone aerostatico permanente" qual è la luna, riuscendo ad implementare un sistema di comunicazione tra le navi sfruttando il satellite (naturale) della Terra. I progressi susseguenti nel campo delle telecomunicazioni culminarono nel 1962 con il lancio, tramite razzo vettore, del primo satellite artificiale (Telstar).

A differenza della luna, un satellite artificiale è in grado di ricevere, amplificare e ritrasmettere il segnale di ritorno verso le stazioni a terra.

Le sempre maggiori richieste di banda da parte degli utenti interconnessi in rete hanno evidenziato i problemi della realizzazione di un cablaggio a banda larga in grado di collegare tutti i possibili utenti. Le principali

problematiche connesse ad una larga diffusione della rete wired a banda larga risultano essere:

- costo proibitivo
- impossibilità di una totale copertura su base geografica
- disagi per la popolazione se effettuato in zone densamente popolate
- costo elevato se effettuato in aree scarsamente popolate (zone rurali)
- capacità di banda praticamente fissata all'atto del cablaggio
- complessità eccessiva per realizzare trasmissioni broadcast
- impossibilità di coprire le esigenze dei clienti mobili.

Per ovviare a queste problematiche è stata concepita l'idea dell'integrazione fra cablaggio e uso di reti wireless, in particolare con utilizzo della tecnologia satellitare. I satelliti rappresentano un esempio di comunicazione wireless e sono mezzi di diffusione broadcast per natura.

Riguardo alla protezione delle comunicazioni però i satelliti presentano carenze che devono essere colmate da algoritmi di crittografia.

### **5.3 SATELLITI PER LA NAVIGAZIONE**

I satelliti per la navigazione forniscono i mezzi per stabilire con grande precisione dei punti di riferimento al suolo in ogni località della Terra

utilizzando l'effetto Doppler. Poiché l'orbita del satellite è già nota, una posizione incognita può essere determinata accuratamente mediante misure Doppler, effettuate da quella posizione, dell'aumento o della diminuzione della radiofrequenza emessa dal satellite mentre gira attorno alla Terra.

Il sistema americano Transit è in funzione permanente su tutto il globo dal 1964 ed è utilizzato regolarmente da più di un migliaio di stazioni, la maggior parte delle quali serve alle navi mercantili. Il NAVSTAR, invece è un sistema più avanzato che consiste in 18 satelliti, posti alla quota di 20.000 Km ed entrato in servizio negli anni Novanta.

### **5.3.1 IL SISTEMA DI NAVIGAZIONE SATELLITARE EUROPEO GALILEO COME PONTE TRA TECNOLOGIA E MERCATO**

Il 28 Dicembre 2005 alle 06:19 (ora centrale europea) dalla base di Baikonor (Kazakistan) è avvenuto il lancio del primo satellite: GSTB-V2/A, chiamato anche GIOVE-A dal nome attribuito al programma di prova GIOVE (Galileo In-Orbit Validation Element). È previsto il lancio di due satelliti di prova, GSTB-V2/A e GSTB-V2/B (Galileo Satellite Test Beds), per effettuare prove sulle frequenze radio e sulla stabilità in orbita degli orologi e verranno successivamente affiancati da altri due satelliti che completeranno il sistema di verifica e convalida in orbita di Galileo. Rispetto a GSTB-V2/A, GSTB-V2/B trasporta in più un ulteriore orologio atomico all'idrogeno oltre a quello in rubidio degli amplificatori di potenza

del segnale. La sua entrata in servizio, che prevede il lancio in orbita di una costellazione di 30 satelliti, è prevista per il 2008 ma è molto probabile uno slittamento al 2010 e conterà su 30 satelliti orbitanti su 3 piani inclinati sull'equatore ad una quota di 24000 km.

Il sistema di posizionamento Galileo (Galileo positioning system) è un sistema di navigazione satellitare civile sviluppato in Europa come alternativa al Global positioning system (GPS) statunitense, controllato dall'esercito americano. Si tratta di un sistema di posizionamento satellitare indipendente da quello GPS del Dipartimento della Difesa degli USA e, al contrario di questo, prevalentemente dedicato ad usi civili. Porterà una sana competizione nel mondo della radionavigazione, oggi monopolizzato e controllato dalle autorità militari USA. La creazione di una rete europea di localizzazione satellitare, darà impulso ad una serie di servizi georeferenziati che andranno a riflettere positivamente in tutti i settori della vita quotidiana, e non solo in quello della mobilità. Quest'ultimo sarà però senza dubbio il mercato più importante, in particolare il settore delle applicazioni per il settore automobilistico, ricordando che nei prossimi anni in Europa almeno il 10% dei veicoli, potrà essere on-line, con enormi vantaggi non solo per gli automobilisti ma anche per i singoli stati, che disporranno così di efficaci strumenti di gestione e monitoraggio della mobilità, tali da sopperire alle carenze infrastrutturali. Con Galileo, l'Europa mira ad incrementare la sicurezza e l'efficienza dei trasporti nei settori aeronautico, marittimo e terrestre, grazie alla distribuzione di un segnale certificato per l'aviazione civile e

all'integrazione con i futuri sistemi di comunicazione mobile di uso pubblico. Accanto a questo, il "GPS all'europea" potrà essere utilizzato per i sistemi antifurto, i mezzi di soccorso e molti altri servizi, pubblici e privati, che oggi devono fare completo affidamento sul servizio gestito dal Dipartimento della Difesa degli USA. Nonostante gli americani abbiano infatti reso il sistema GPS una risorsa liberamente disponibile in tutto il mondo, molti paesi, fra cui la stessa Europa, non stimano positivamente il fatto che il Governo americano controlli, lui solo, la rete GPS mondiale: nulla impedirebbe infatti agli USA, in caso di necessità, di far "restare al buio" alcune aree geografiche o, addirittura, fornire dati completamente falsati. Il fatto che gli USA considerino il sistema GPS un servizio ancora prevalentemente militare, porta con sé alcune conseguenze non trascurabili, fra cui una copertura del servizio limitata alle nazioni militarmente allineate e la degradazione del segnale destinato ad usi civili. Dal loro canto gli USA considerano invece Galileo solo un servizio ridondante di cui l'Europa potrebbe fare benissimo a meno. Molti membri della UE sostengono che gli USA hanno il timore di perdere il monopolio in un settore che non solo gli garantisce un non trascurabile vantaggio militare, ma gli sta fruttando sempre più denaro per i molteplici usi del GPS. Galileo rappresenta per l'Europa l'opportunità di raccogliere, nei prossimi anni, profitti importanti nei settori dei servizi e dei dispositivi legati ai sistemi di posizionamento satellitare. Se Galileo, come oggi il GPS, trasmetterà infatti un segnale in chiaro e gratuito destinato a scopi

generici, i suoi satelliti verranno utilizzati anche per trasmettere un segnale criptato, e più preciso del precedente, a pagamento.

A differenza del GPS, con cui è comunque compatibile e interoperabile, Galileo trasmetterà i segnali ad almeno due diverse frequenze: in questo modo, secondo gli esperti, i ricevitori terrestri possono correggere con più accuratezza i disturbi atmosferici e calcolare la posizione con una precisione di circa 1 metro, contro i 10-20 metri del GPS.



*Figura 5.3 – Rappresentazione del satellite GSTB-V2/A di Galileo*

I principali scopi di Galileo sono:

- Una maggior precisione a tutti gli utenti rispetto a quella attuale;
- Una migliorata copertura dei segnali dai satelliti, soprattutto per le regioni a più alte latitudini;
- Un sistema di posizionamento globale che possa sempre funzionare anche in tempi di guerra.

### **5.3.2 I SERVIZI OFFERTI DA GALILEO**

Il sistema Galileo è stato concepito come una applicazione nucleo sopra alla quale ogni altra applicazione deve essere implementata. L'impiego di Galileo riguarda una serie di servizi integrati: può spaziare dall'utilizzo nel campo dei trasporti (aerei, su rotaia, marittimi, stradali, pedonali), al sincronismo, alla sorveglianza, come supporto alla legge, per applicazioni ingegneristiche, scientifiche, ambientali ed anche ricreative. Il suo influsso condizionerà anche aziende nel settore bancario, energetico, assicurativo, delle telecomunicazioni, del turismo e agricolo. Galileo nasce per essere un sistema di navigazione da applicare nel campo dei trasporti ed è stato progettato per soddisfare le molteplici necessità dei vari segmenti di utenza presenti nel mercato; in campo avionico l'avvento del GNSS (Global Navigation Satellite System) porterà alla possibilità di effettuare senza nessun rischio manovre critiche quali atterraggi e decolli anche in condizioni di scarsissima visibilità, portando ad una progressiva riduzione dei sistemi di controllo terrestri. In campo marittimo porterà allo sviluppo dell' AIS (Automated Identification System) il quale aumenterà la sicurezza nella navigazione. Le applicazioni per quanto riguarda il traffico su strada sono tantissime ma la più interessante riguarda gli Advanced Driver Assistance Systems, sistemi ad alta automazione integrati in autoveicoli per permettere il controllo delle collisioni, aumentare la visibilità e consentire delle manovre automatizzate a basse velocità. Grazie alle sue caratteristiche certificate,

ed ai servizi garantiti (dalla sua natura per usi civili) è adatto a tutte le applicazioni safety-of-life, dedicate cioè a servizi che devono assicurare un'elevata affidabilità per evitare possibili danni a cose o persone. Per quanto riguarda il settore energetico, l'uso di orologi atomici può facilitare la sincronizzazione delle linee elettriche facilitando la trasmissione di energia elettrica, può inoltre monitorare le linee e quindi velocizzare il processo di manutenzione delle stesse. Esistono dei benefici anche per il settore del petrolio e del gas. Sempre grazie agli orologi atomici i satelliti possono rilasciare dei data-stamps in modo tale da rendere autentiche transazioni finanziarie effettuate via web. Per le agenzie di assicurazioni, Galileo diventa un modo per monitorare e controllare lo stato di beni introducendo un prezzo dinamico basato sul rischio associato per ogni singola polizza. Le banche invece possono monitorare il trasporto di oro, banconote e preziosi in genere, aumentando i propri standard di sicurezza. Gli agricoltori non potranno più utilizzare indiscriminatamente fertilizzanti e pesticidi se monitorati dal sistema. Per quanto riguarda la sicurezza dei cittadini, è in atto un progetto per la realizzazione di un numero di emergenza europeo l' E-112, questo potrà contare su Galileo per tracciare la posizione di persone in difficoltà. Durante situazioni di crisi, dove la velocità di azione è fondamentale, avere la possibilità di conoscere esattamente la posizione precisa del luogo in cui intervenire è di vitale importanza, basti pensare ad incendi, inondazioni, terremoti. Galileo sarà un valido alleato della comunità scientifica dato che si occuperà anche di creare accurate mappe oceaniche e dei territori

ghiacciati, analizzerà il tasso di inquinamento dell'atmosfera e fornirà dettagliati valori dei livelli delle maree e dei 19 livelli dei fiumi, effettuerà il tracking di iceberg e molti altri compiti di grandissima importanza. Non si può di certo escludere il suo utilizzo per tele-sorveglianza nè tanto meno quello ricreativo.

I satelliti Galileo sono stati studiati per supportare la trasmissione fino a quattro portanti in banda L. Il sistema è capace di funzionare gestendo una vasta gamma di velocità di trasmissione dati (che trasmettendo data messages), da un minimo di 250 bit/s fino a 1500 bit/s. Le possibilità di impiego dei messaggi trasmessi diventano quindi molteplici ed offrono una nuova serie di servizi sconosciuti al sistema GPS.

#### **5.4 SATELLITI PER RICOGNIZIONE**

Sia gli Stati Uniti che l'ex Unione Sovietica (e in misura minore, forse, la Repubblica Popolare Cinese) hanno messo in orbita un considerevole numero di satelliti da ricognizione per scopi quali la sorveglianza con mezzi fotografici, lo spionaggio con sistemi elettronici, la rivelazione di esplosioni nucleari e l'individuazione di lanci di missili strategici .

#### **5.5 SATELLITI METEOROLOGICI**

A partire dal lancio (aprile 1960) del primo satellite meteorologico Tiros 1 la quantità delle immagini di formazioni nuvolose riprese dai satelliti è gradualmente aumentata fino a che, all'inizio del 1966 l'intera Terra è

stata fotografata al giorno almeno una volta in maniera continuativa. I dati dei satelliti forniscono informazioni sugli oceani, i deserti e le zone polari della Terra, per i quali i tradizionali sistemi di rilevamento meteorologico forniscono dati molto limitati o non ne forniscono affatto.



*Figura 5.4 – Immagine satellitare dell'Uragano Katrina*

Le foto dei satelliti individuano le caratteristiche importanti per il tempo (come i sistemi di perturbazioni, i loro fronti e le espansioni di alta pressione degli strati superiori, le correnti a getto, la nebbia, la formazione di ghiaccio sui mari, i manti nevosi e, in qualche misura, la direzione e la velocità dei venti degli strati superiori) che sono individuate da certe formazioni nuvolose. Le stazioni costiere e delle isole possono utilizzare tali dati per localizzare e inseguire gli uragani, i tifoni e le tempeste tropicali. Vengono usate dai satelliti sia le macchine fotografiche ottiche che quelle a raggi infrarossi, queste ultime per registrare la distribuzione della temperatura alla superficie del mare con

maggior frequenza e su aree più vaste di quanto sia ottenibile con altri mezzi. Questi dati sono utili per la navigazione e per la pesca e sono importanti per le previsioni meteorologiche. Gli Stati Uniti hanno usato satelliti meteorologici a bassa quota (700-1700 Km), geostazionari e sincroni con il Sole .

## **5.6 SATELLITI PER OSSERVAZIONI DELLA TERRA E DEL MARE**

Usando sui satelliti dei sensori per lunghezze d'onda nel campo delle microonde dei raggi X e dell'infrarosso, si possono ottenere dati interessanti sulle risorse esistenti sulla terra e nel mare. Questi sensori possono distinguere tra la terra e l'acqua, le città e i campi, il frumento e il granturco, così come tra frumento vigoroso oppure in cattive condizioni.

I tre satelliti dedicati allo sviluppo della serie Landsat lanciati a partire dal 1978 sono già stati usati per poter stimare la produzione mondiale di frumento, per la raccolta di dati sull'estensione delle foreste e dei terreni da pascolo, per la costruzione di mappe utili per scopi geologici o per la localizzazione di giacimenti minerali e petroliferi, nonché per la registrazione di dati sull'ambiente e sull'inquinamento.

Il satellite Spot-1, lanciato nel 1986 dall'agenzia spaziale francese e dotato di camere ad alta risoluzione sta effettuando rilevamenti delle risorse terrestri per conto di varie nazioni . Anche l'ex Unione Sovietica ha venduto immagini a distanza attraverso una agenzia internazionale, la ContiTrade Service Corporation. La strumentazione del Seasat (1978)

comprendeva un radar che misurava la quota con una precisione che raggiungeva i 10 cm e l'altezza delle onde da 1 a 20 m. Il satellite rivelò le correnti oceaniche, le maree e le onde di tempesta. Venne misurata anche la velocità del vento alla superficie degli oceani nel campo tra 4 e 26 m/sec, con la precisione di 2 m/sec. Inoltre furono misurati la temperatura in superficie, il contenuto di vapor d'acqua dell'aria, la velocità della pioggia e l'età, la concentrazione, l'estensione e i movimenti dei ghiacci marini.

## **5.7 SATELLITI MILITARI**

Le attività militari costituiscono la parte più rilevante dei programmi spaziali di USA ed ex URSS. I satelliti per uso militare sono pertanto molto numerosi. Al sistema civile di telecomunicazioni si sovrappone negli Stati Uniti un sistema militare di 6 satelliti permanentemente in orbita, quattro operativi e due di riserva, tutti in orbita geosincrona e sotto la responsabilità dell'aviazione militare (Defense Satellite Communication System, DSCS). Una seconda rete di 4 satelliti geostazionari è sotto la responsabilità della marina militare (Fleetsatcom). Una terza rete di 3 satelliti con orbita polare (Satellite Data System, SDS) viene utilizzata per mantenere i contatti con i bombardieri del comando strategico quando sorvolano il Polo Nord. Nell'ex Unione Sovietica non si fa distinzione tra satelliti per telecomunicazioni civili e militari. Oltre alle telecomunicazioni, i satelliti militari sono adibiti ad altre funzioni per cui si può distinguere tra

satelliti per ricognizione elettronica e fotografica (satelliti spia), satelliti di intervento bellico e satelliti antisatellite. I primi sono attualmente di gran lunga i più importanti. I dati degli altri tipi sono completamente coperti da segreto militare.

### **5.7.1 II SICRAL**

SICRAL (Satellite Italiano Comunicazioni Riservate e Allarme) è il primo sistema italiano per Comunicazioni Militari via satellite nato nell'ambito del consorzio Sitab, costituito da Alcatel Alenia Space Italia, che con una quota del 70% è contraente principale e responsabile per il sistema e la realizzazione del satellite, FiatAvio (20%) e Telespazio (10%). Le soluzioni architettoniche, ingegneristiche e tecnologiche adottate per la realizzazione di SICRAL ne fanno un programma di indiscutibile valore strategico, competitivo per livello di prestazioni ed efficacia di soluzioni adottate capace di soddisfare tutte le esigenze attuali e future delle telecomunicazioni militari.

Le finalità del sistema hanno richiesto la progettazione e la realizzazione di un apparato di trasmissione, in grado di operare su tre bande di frequenza (multipay-load e multi-transmission), e di un ripetitore per ciascuna banda: EHF (20-44 GHz), dedicata principalmente a comunicazioni infrastrutturali e supportata da un'antenna ricevente sagomata in grado di coprire principalmente l'Italia; UHF (260-300 MHz), utilizzata soprattutto per comunicazioni mobili tattiche e con copertura

sull'intero emisfero visibile dal satellite; SHF (7/8 GHz), la banda principale per le comunicazioni ad alto/medio volume, complementare a quella EHF, ma con un'antenna a copertura multifascio riconfigurabile elettronicamente.

SICRAL è un sistema complesso, di cui fanno parte il satellite, il centro di gestione e controllo a Vigna di Valle e più di 100 terminali utente per piattaforme terrestri, navali e aeree.

Il satellite è stato progettato ed integrato in tutte le sue componenti negli stabilimenti di Alcatel Alenia Space Italia a Roma e messo in orbita dal poligono di lancio di Kourou (Guyana Francese) con il vettore Ariane IV.

Dalla sua orbita geostazionaria a 36.000 km da Terra, SICRAL assicura i collegamenti video, fonia e fac-simile nell'ambito dell'area di copertura comprendente Europa, Mediterraneo e Mare del Nord.



La gestione e il controllo del satellite in orbita, oltre al monitoraggio e al controllo costante dei sottosistemi elettronici ed informatici, sono effettuati dal Centro di Vigna di Valle. Il Centro di Gestione e Controllo è composto da avanzate e complesse tecnologie elettroniche, informatiche e telematiche ed ha il compito di assicurare il controllo del satellite,

oltre a curare la pianificazione e la gestione delle connessioni satellitari, secondo le esigenze dei differenti utenti.

Il controllo del satellite e della rete di comunicazione sono integrati. Ciò permette di realizzare, con un unico intervento, sia le operazioni di pianificazione delle missioni operative che quelle di configurazione dei ripetitori del satellite e dei terminali utente.

È proprio nel Centro di Vigna di Valle che sono stati sviluppati i progetti di collegamento con le principali reti di telecomunicazioni delle Forze Armate e con la Rete Numerica Interforze, in modo da integrare le risorse satellitari militari con quelle tradizionali.

I terminali terrestri, installati a bordo di piattaforme mobili, trasportabili, fissi o manpack (portati a spalla), rendono possibili i collegamenti via satellite per le varie tipologie di utenza. I terminali mobili si differenziano, a loro volta, secondo l'impiego a cui sono destinati: terminali navali, terminali aerei e terminali installati a bordo di veicoli terrestri. In quest'ultimo caso, ad esempio, le dimensioni sono ridotte e il terminale è equipaggiato con antenne omnidirezionali. Le particolari caratteristiche di questi terminali conferiscono al sistema Sicral la mobilità e la flessibilità richieste dalle particolari esigenze operative.



*Figura 5.5 – Immagine satellitare effettuata dal SICRAL*

Realizzati nel rispetto dei protocolli internazionali, i terminali utente garantiscono l'interoperabilità con le altre nazioni, in particolare con quelle della NATO. L'eccellente livello di prestazioni offerte da SICRAL pone l'Italia in una posizione di assoluta leadership spaziale in Europa, consentendo telecomunicazioni efficaci e tempestive in tutte le situazioni operative, comprese quelle di crisi, missioni umanitarie o di mantenimento della pace. Anche in presenza di catastrofi naturali, SICRAL può far fronte alla carenza delle reti terrestri fisse e mobili e assicurare comunicazioni per meglio pianificare e coordinare gli interventi di soccorso. La messa in orbita di SICRAL ha dunque coronato con successo la sfida lanciata nel 1996 dall'Amministrazione Difesa all'industria spaziale italiana chiamata ad un forte impegno sotto l'aspetto tecnologico, progettuale, organizzativo e realizzativo.

Grazie a SICRAL, infatti, il nostro paese ricopre un ruolo di primo piano nel settore delle comunicazioni militari ed è in grado di gestire un notevole flusso di traffico di vario tipo, con collegamenti sicuri per i

contingenti e le forze operanti a distanza dal territorio nazionale. Tutto ciò lo rende elemento essenziale della catena di comando e controllo nazionale e canale privilegiato per la trasmissione di informazioni riservate.

SICRAL è stato selezionato dalla NATO nell'ambito della gara internazionale Satcom Post 2000 (NSP2K), per la fornitura di capacità satellitare per telecomunicazioni nelle bande "protette" SHF e UHF.

Rese possibili dai satelliti commerciali moderni, le immagini ad alta risoluzione della terra cambiano il paradigma strategico.

Attualmente l'azienda è impegnata nel programma SICRAL 1B, che estenderà la capacità operativa del primo SICRAL fino al 2019.

La messa in rete di immagini estremamente precise delle installazioni nucleari pachistane sul sito della Federation of American Scientists (FAS), è stato un vero e proprio choc: per la prima volta un sistema satellitare civile ha permesso di ottenere delle immagini di una precisione paragonabile quella dei sistemi militari.

Le implicazioni di questa innovazione sono multiple, specialmente a causa delle molte applicazioni civili della presa di immagini dallo spazio ad alta risoluzione. Tuttavia esiste la possibilità per ogni stato o media di ottenere delle immagini di valore strategico.

**5.8 I PRIMI SATELLITI MILITARI DEGLI ANNI 60** Da molti decenni, l'ottenimento di immagini della totalità del globo terrestre è un privilegio

ristretto alle nazioni impegnate nella corsa allo spazio, ed ai loro alleati. Nel 1960, solo due anni dopo il lancio dell'Explorer, gli Stati Uniti mettono in servizio il loro primo satellite di osservazione militare, che sarà rapidamente seguito da un omologo russo. A causa dei loro bisogno di raccolta di informazioni, le due superpotenze si lanciarono, ancora una volta, in una corsa allo spazio, mettendo a punto satelliti sempre più precisi, pesanti e costosi.

A livello della definizione delle immagini sono stati investiti decine di miliardi di dollari per passare da immagini di scarsa risoluzione (alcune centinaia di metri) a sistemi in grado di fornire immagini in tempo reali con risoluzioni che si avvicinano alle decine di centinaia di metri.

L'importanza delle immagini satellitari nella gestione delle crisi e il bisogno di indipendenza, hanno spinto altre nazioni a lanciare propri satelliti d'osservazione: la Cina, l'Europa (con la serie Hélios) e ancora l'India. Recentemente, nell'aprile del 1999, il Giappone ha annunciato l'intenzione di lanciare un sistema di satelliti spia per meglio controllare la minaccia nord coreana. Un programma che potrebbe soffrire della concorrenza commerciale.

## **5.9 LA NASCITA DEI SATELLITI COMMERCIALI**

I primi satelliti commerciali d'osservazione sono stati messi in orbita agli inizi degli anni 70: la serie Landsat, lanciata dalla NASA, forniva delle immagini con una risoluzione di 100 metri, che raggiunse i 30 metri,

prima che il Dipartimento della Difesa non ne vietasse ulteriori sviluppi per ragioni di sicurezza nazionale.



*Figura 5.6 – Lancio di SPOT- 1*

Con il lancio di SPOT-1 (Satellite Pour l'Observation de la Terra) il 22 febbraio 1986, la Francia fa cadere i tabù in materia di sicurezza: per la prima volta delle immagini di una risoluzione di 10 metri sono liberamente disponibili. Nel 1987 l'URRS mette sul mercato immagini satellitari di una risoluzione di 5 metri; anche se datate e limitate geograficamente, queste immagini costituiscono un'innovazione notevole. Nel 1992 Mosca mette in vendita delle immagini con risoluzione 2 metri.

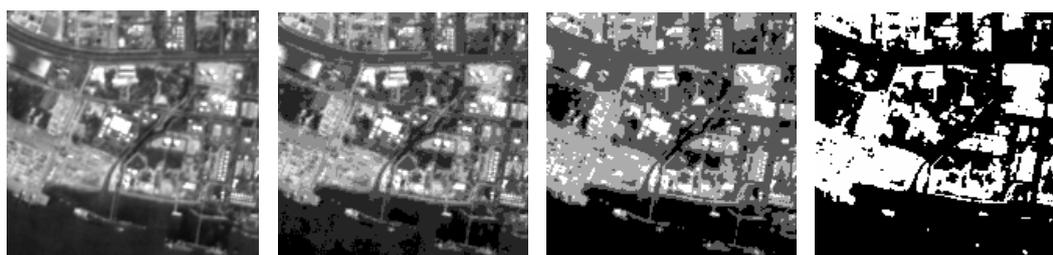
Di fronte a questa concorrenza sia commerciale che diplomatica, gli Stati Uniti reagiscono in maniera energica: nel 1993 l'amministrazione Bush autorizza la commercializzazione di immagini a risoluzione 3 metri ottenute con satelliti civili; poi nel 1994 l'amministrazione Clinton

autorizza la messa in commercio di immagini con risoluzione pari a 1 metro.

## 5.10 IL SIGNIFICATO DELLA RISOLUZIONE

L'aumento drastico della risoluzione, in meno di trent'anni, ha aumentato il numero di informazioni disponibili per ogni immagine. Distinguiamo cinque tipi di risoluzioni utili:

- **Spettrale:** indica il numero di bande di acquisizione e la loro ampiezza.
- **Radiometrica:** sensibilità del rivelatore di un certo sensore nel percepire e codificare in segnale le differenze di flusso radiante riflesso o emesso dalle superfici analizzate. In pratica la risoluzione radiometrica rappresenta il numero di livelli in cui può essere scomposto il segnale originario.



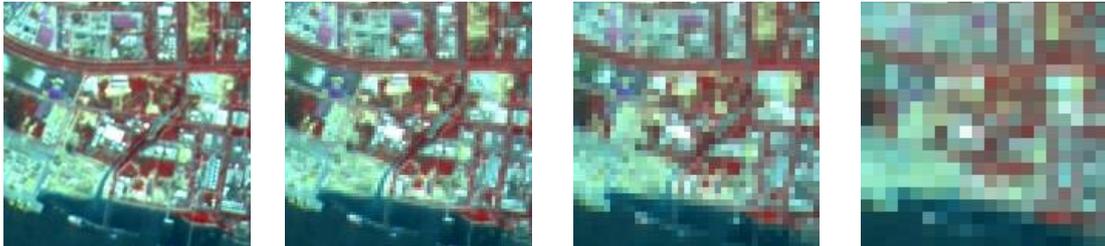
8 bit  
(256 livelli)

3 bit  
(8 livelli)

2 bit  
(4 livelli)

1 bit  
(2 livelli)

- **Temporale:** periodo di tempo che intercorre tra due riprese successive di una stessa area.
- **Geometrica:** dimensioni dell'area elementare al suolo di cui si rileva l'energia elettromagnetica (pixel).



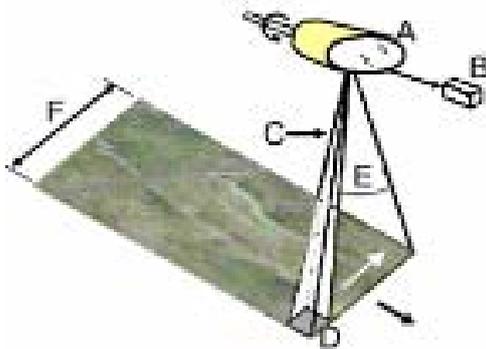
Pixel: 10m  
160 x 160

Pixel: 20m  
80 x 80

Pixel: 40m  
40 x 40

Pixel: 80m  
20 x 20

Il tutto dipende essenzialmente dalla qualità dei sensori, del loro ingrandimento e della quota del satellite.



- A. spectrometers
- B. detectors
- C. IFOV (instantaneous field of view)
- D. risoluzione a terra
- E. FOV (field of view)
- F. swath (larghezza immagine)

Figura 5.7 - Esempio di sensore satellitare

## SCHEMA RIASSUNTIVO DEI SENSORI ESISTENTI

Sensore	N° Bande	Ris. Geometrica	Ris. Temporale	Dim. Immagine
IKONOS	5	1 – 4 m	3 g.	11 km
QUICKBIRD	5	0.61 – 2.88 m	1 – 5 g.	16.5 km
JERS - 1	4	18 m	44 g.	75 km
SPOT HRVIR	4	20 m	26 g.	117 km
LANDSAT ETM+	8	15 – 30 m	16 g.	185 km
RESURS 01	5	170 – 600 m	1 – 4 g.	600 km
MODIS	36	250 – 1000 m	0.5 g.	2320 km
SPOT VEGETATION	4	1000 m	0.5 g.	2250 km
NOAA AVHRR 2	5	1100 m	0.25 – 0.5 g.	3000 km

In generale possiamo descrivere l'evoluzione dei satelliti in funzione della risoluzione:

- 10 metri permettono la scoperta parziale di grandi edifici ma non di veicoli.
- 5 metri di risoluzione permettono di riconoscere ma non d'identificare edifici e veicoli.
- 2,5 metri permettono di identificare in parte edifici e di riconoscere i veicoli, ma non di identificarli.
- 1 metro di risoluzione permette di identificare edifici, di riconoscere veicoli ma non di identificarli.

- 50 centimetri di risoluzione permettono di identificare in parte veicoli.
- 25 centimetri di risoluzione permettono di identificare veicoli
- 10 centimetri di risoluzione permettono di descrivere un veicolo.

In rapporto a obiettivi strettamente militari, le risoluzioni ottimali sono circa le seguenti:

	<b>Scoperta</b>	<b>Riconoscimento</b>	<b>Identificazione</b>	<b>Descrizione</b>
<b>Sottomarini</b>	?	5 m	1,5 m	0,9 m
<b>Aerei</b>	5 m	1,5 m	0,9 m	0,15 m
<b>Posti di Comando</b>	2 m	1,5 m	0,9 m	0,15 m
<b>Postazioni Missilistiche</b>	2 m	1,5 m	0,6 m	0,3 m
<b>Postazioni Radar</b>	2 m	0,9 m	0,3 m	0,15 m
<b>Veicoli</b>	1,5 m	0,6 m	0,3 m	0,1 m

## 5.11 I MIGLIORI SATELLITI MILITARI

In materia di precisione gli Stati Uniti conservano un notevole vantaggio: i più recenti modelli che lavorano nella campo delle immagini visibili, designati KH12 (Key Hole), dispongono di una risoluzione che si approssima ai 10 cm; si tratta infatti di veri e propri telescopi spaziali, paragonabili a Hubble, che pesano 18 t e sono in grado di fornire immagini su una banda di molte centinaia di km in rapporto all'orbita. Malgrado il prezzo unitario di 1,5 miliardi di dollari, il KH12 non è in grado di leggere il giornale che tenete sotto braccio. Tuttavia è equipaggiato di ricettori infrarossi e a intensificazione di luce residua per catturare immagini notturne.

In campo meteorologico, gli USA dispongono di satelliti che utilizzano radar ad apertura sintetica, i Lacrosse, capaci di trasmettere immagini a risoluzione 1 m. Un altro programma basato sull'utilizzo del radar, il Discovery II, sta per essere concretizzato, parallelamente ad una serie di satelliti più piccoli, meno performanti ma anche meno cari (Warfighter).

Le prestazioni dei circa 60 satelliti russi attualmente in orbita sono poco conosciute, e anche se le risoluzioni devono essere inferiori ai 2m, i tre quarti dell'organico orbitante ha superato il suo ciclo vitale.

Nel campo delle immagini visibili, i satelliti europei Hélios raggiungono risoluzioni di 1 m, anche se prestazioni migliori sono possibili. I Giapponesi hanno pianificato di dotarsi di 4 satelliti, due dei quali radar, tutti dotati di risoluzione 1 m.

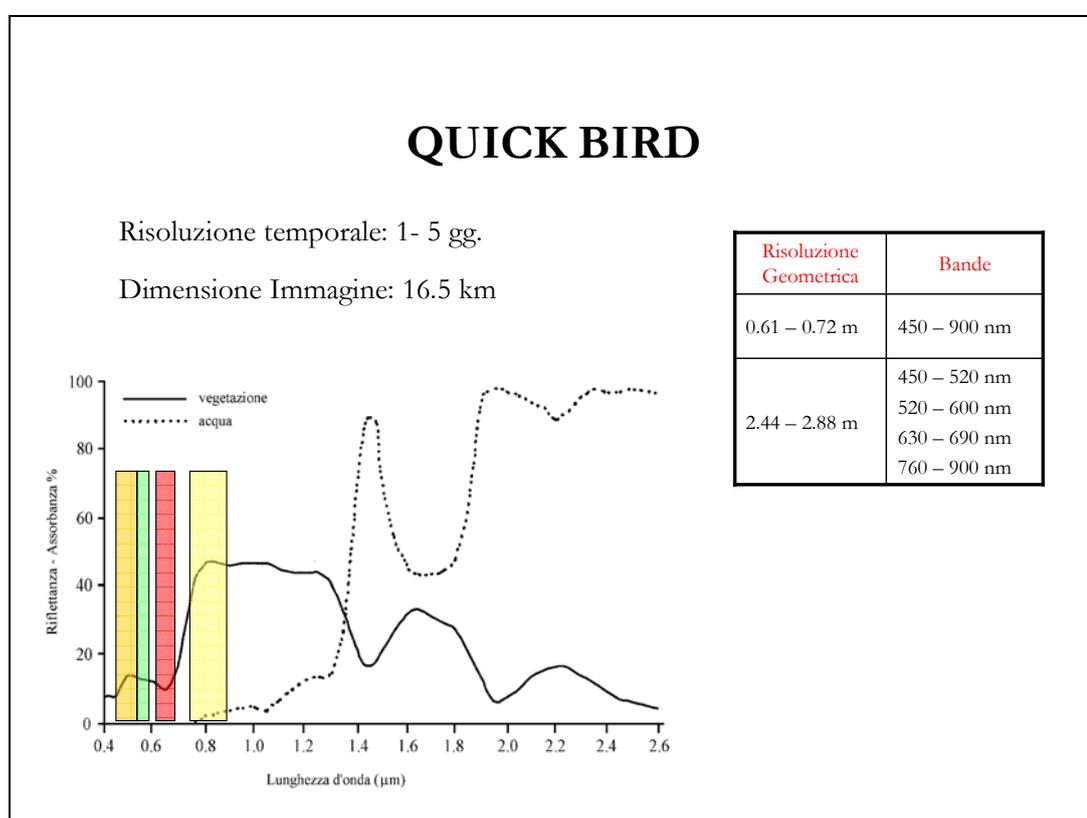
## 5.12 I MIGLIORI SATELLITI CIVILI

Dopo il 1994 non meno di 9 compagnie americane hanno siglato un accordo con il Dipartimento delle Difesa, per la messa in servizio di 11 satelliti ad alta risoluzione. Attualmente il più performante tra di essi è il satellite Ikonos, lanciato il 24 settembre 1999 da un vettore Athena dalla base americana di Vandenberg, ed è il primo satellite civile in grado di ottenere immagini monocrome con risoluzione pari a 1 m, e immagini policrome con risoluzione pari a 5 m. L'aggettivo civile dovrebbe essere tuttavia rimpiazzato dal più adatto militare-industriale, visto che il consorzio che gestisce il programma – Space Imaging Inc., con base a Thornton nel Colorado – è una joint venture del Lockheed Martin, Raytheon e Kodak, tutti partecipanti ai programmi Keyholes. Si tratta dunque di una commercializzazione di know how militare, e non di pura innovazione tecnologica. Le prestazioni di Ikonos sono comunque notevoli: orbitante a bassa quota (un'orbita ogni 98 minuti), ha una frequenza di rivoluzione di 1,5 giorni e fornisce immagini di 13 x 13 km, che possono essere trasmesse ai destinatari in qualche ora. Il prezzo di un'immagine, che "pesa" 50 "megapixel" senza compressione, è di meno di 1000 dollari.

Altri satelliti ad alta risoluzione, il QuickBird della società americana Earthwatch, operativo dal 18 ottobre 2001, è in fase operativa dalla

primavera del 2002, su un'orbita polare eliosincrona, con 97,2 gradi di inclinazione, e con una velocità al suolo di 7.1 Km/sec..

E' in grado di acquisire sia in modalità multispettrale (tre bande del visibile + una infrarosso vicino) che pancromatica, con risoluzione tra 61 e 66 centimetri per angoli di acquisizione standard, cioè compresi tra 0 e 15 gradi.



I dati del satellite Quickbird sono usati in molti campi applicativi come l'aggiornamento veloce di mappe come 1:5000, l'identificazione dettagliata di fenomeni naturali (incendi, frane, alluvioni), la creazione di mappe interpretative di dettaglio, nonché prodotti e applicazioni dedicati

al turismo e alla rivalutazione di aree protette e di agricoltura (monitoraggio mappe etc...).



*Figura 5.8 - QuickBird*

Bisogna comunque segnalare che dopo il 1994 il consorzio russo-americano SPIN-2 commercializza delle immagini ottenute da più satelliti russi Cosmos. Con una risoluzione pari a 2 m, queste immagini in bianco e nero sono disponibili al prezzo di 25 dollari/km<sup>2</sup>, che equivale a 4225 dollari per un immagine di 13 x 13 km. Il ritardo di trasmissione raggiunge i trenta giorni: i satelliti di classe Cosmos, l'ultimo dei quali lanciati nel 1998, non trasmette le proprie immagini, ma le spedisce sulla terra in capsule.

### **5.13 LA FINE DEL MONOPOLIO GOVERNATIVO**

I campi di applicazione civile delle immagini satellitari sono molteplici: dal controllo delle risorse naturali, alla cartografia, o alla pianificazione urbana, raggiungendo cifre d'affari annuali di molti miliardi di dollari. Ma le implicazioni strategiche sono più grandi ancora: con la diffusione di immagini di un complesso missilistico nord coreano, seguite da quelle di un'infrastruttura nucleare pachistana, Space Imaging ha messo fine al monopolio governativo americano sulle ricognizioni satellitari.

Dopo la decisione dell'amministrazione Clinton nel 1994, questa conseguenza è stata presa seriamente in considerazione. Due sono state le precauzioni prese dagli Stati Uniti: Washington si riserva il diritto di proibire a certe nazioni o individui sospetti l'accesso a immagini satellitari commerciali e di limitarne l'accesso a certe zone in caso di crisi.

La perdita di influenza e di confidenzialità a livello diplomatico militare (delle richieste di immagini della famosa Area 51 sono già state ricevute da Space Imaging), sono largamente compensate dai vantaggi economici di questa liberalizzazione: lo sviluppo del know how militare industriale non dipenderà più interamente da crediti federali.

### **5.14 IMPLICAZIONI STRATEGICHE E LIMITAZIONI OPERATIVE**

Non meno considerevoli sono le implicazioni strategiche dell'uso di satelliti "spia" civili. Permettendo ad ogni stato, industria, media o

individuo di osservare la situazione di una determinata zona, la libertà di informazione è senza dubbio accresciuta, e con essa anche il grado di democratizzazione. È anche ipotizzabile che, per i media, l'analisi di immagini satellitari diventi una pratica corrente, come la lettura dei dispacci d'agenzia.

È d'altra parte certo che la capacità di identificare certi preparativi militari concentrazioni di mezzi, impiego di missili, offre delle possibilità accresciute di prevenire le crisi, anche per stati che non dispongono di nessuna infrastruttura di ricognizione strategica. In questo caso la rapidità di trasmissione e la qualità delle immagini sono caratteristiche fondamentali.

Disporre di immagini satellitari precise non garantisce che l'analisi dei loro contenuti sia corretta: l'efficacia del trattamento dei dati ricevuti è la contropartita necessaria al miglioramento della tecnologia dei sensori. Inoltre la libertà di informazione passa anche dalla conoscenza delle orbite dei satelliti, permettendo quindi alla parte avversa di nascondere o mimetizzare le proprie azioni.

Infine non bisogna dimenticare tutti gli elementi di frizione che possono impedire l'acquisizione di immagini satellitari: durante l'operazione Allied Force, il satellite europeo Hélios ha potuto funzionare solo un giorno su due a causa della persistente nuvolosità abbattutasi sul territorio serbo. Anche se non è da escludere la commercializzazione di immagini radar, le limitazioni dei satelliti civili restando pesanti.

L'aspetto strategico-militare del dominio nello spazio si interseca con l'importanza economica legata alla commercializzazione di prodotti basati sulla tecnologia spaziale. La società moderna già dipende, e dipenderà sempre più nel futuro, dalle tecnologie spaziali e in questo sta la valenza strategica della capacità di operare nello spazio.

Il dominio nello spazio ha avuto un ruolo di primo piano durante la guerra fredda ed ha continuato ad avere una importanza notevole anche nelle operazioni militari più recenti. Per esempio, nella ex-Jugoslavia le immagini satellitari multispettrali sono state un utile ausilio alle forze armate statunitensi. Nel 1994, ad Haiti, i satelliti militari per le comunicazioni UHF (Ultra High Frequency) Follow-On e Milstar I hanno fornito un supporto nelle operazioni di comando e controllo delle forze armate USA. Le implicazioni militari del dominio nello spazio sono notevoli e vanno dalla capacità di identificare in tempo utile un attacco nemico all'incremento di informazioni da utilizzare poi nella pianificazione ed esecuzione delle operazioni militari nelle aree di crisi. Il prossimo futuro, o forse si potrebbe già dire il presente, vede uno scenario di conflitto in cui i mezzi di comunicazione e le informazioni forniti dai sistemi spaziali non sono più visti come supporto alla capacità militare di un esercito, ma come armi, strumenti di battaglia esse stesse. Non sorprende, quindi, sentire il segretario alla Difesa statunitense Donald Rumsfeld parlare del valore strategico rivestito oggi dallo spazio pari a quello della deterrenza nucleare durante la guerra fredda. La forza nello spazio rappresenta una componente importante della capacità di dominio

dell'informazione di uno Stato. Essere completamente informati, ad ogni istante e prima di qualunque altro, fornisce la capacità di decidere e agire per primo. Ciò riassume il concetto di Information Superiority statunitense dipendente essenzialmente dal dominio nello spazio. Oltre alla possibilità di controllare aree molto vaste, il valore strategico dello spazio dipende anche dal fatto che esso non appartiene a nessuno e quindi è il posto ideale dal quale osservare e raccogliere informazioni senza violare lo spazio aereo di nessuno Stato. Le informazioni da satellite sono divenute uno strumento insostituibile nelle decisioni politiche, sia durante le operazioni militari, sia per la sicurezza di civili in caso di disastri naturali.

Esempi del valore strategico dell'informazione, sia in tempo di guerra, sia nei periodi di pace, sono presenti lungo tutta la storia. Il dispositivo Enigma, una macchina per la traduzione in codice dei messaggi che permetteva delle comunicazioni rapide e sicure, apparentemente inviolabili, era alla base della strategia Hitleriana della guerra lampo. La decifrazione di Enigma da parte dei critto-analisti britannici volse a favore degli alleati anglo-americani le sorti della Seconda Guerra Mondiale. Più recentemente, gli Stati Uniti sembrano essere stati i primi ad accorgersi del valore strategico dello spazio nel controllo dell'informazione. Nel 1973 il Dipartimento della Difesa americano lanciò il programma di navigazione satellitare GPS. Nei vent'anni successivi il Pentagono sviluppò e lanciò i 28 satelliti della costellazione GPS e la guerra in Iraq del 1991 segnò il battesimo di questa tecnologia. Era possibile conoscere la posizione e i movimenti dei soldati americani nel deserto

iracheno. Risale agli anni 70 anche lo sviluppo da parte della National Security Agency (NSA) del sistema di spionaggio noto come Echelon basato sull'uso di satelliti per telecomunicazioni del tipo Intelsat e Immarsat per l'intercettazione delle comunicazioni radio e telefoniche. Nel 1996, il Pentagono affianca alla NSA una nuova agenzia, la National Imagery and Mapping Agency (NIMA) per centralizzare l'archiviazione di tutte le immagini acquisite da satelliti militari e civili. Questa agenzia finanzia le società, sia americane sia straniere, che rendono interoperativi i loro sistemi di trattamento dei dati e si impegnano a fornire le immagini satellitari rispettando scadenze brevissime. In seguito, la NIMA ritrasmette questi documenti ai militari americani ma anche a clienti civili o stranieri che ne fanno richiesta. In questo modo l'agenzia NIMA è diventata un punto di transito obbligato, e quindi di controllo, delle immagini satellitari acquisite da satelliti commerciali.

Fin dal 1997, la NIMA partecipa al programma statunitense Global Information Dominance il cui obiettivo è controllare lo sfruttamento del flusso delle immagini satellitari commerciali nel mondo. Il Corpo di Stato Maggiore della US Air Force dichiarò nel 1997 davanti alla Camera dei rappresentanti a Washington: "Nel primo trimestre del XXI secolo, saremo in grado di trovare, seguire e inquadrare quasi in tempo reale qualsiasi elemento importante che si muove sulla superficie della Terra.". La guerra in Iraq del 1991 mostrò la schiacciante superiorità tecnologica degli Stati Uniti. Durante questo conflitto e ancor più in occasione della guerra in Kosovo, l'Europa percepì se stessa come totalmente

impotente ed irrimediabilmente dipendente dagli Stati Uniti per quanto riguarda i sistemi di intelligence spaziali ad alta tecnologia. E' proprio questa superiorità militare e tecnologica a rendere, fra l'altro, gli Stati Uniti insofferenti ai condizionamenti che possono venire da una alleanza militare quale la NATO i cui membri sono lontani anni luce da questo livello di efficienze militare.

Questa percepita impotenza alle porte dell'Europa indusse i paesi membri dell'UE ad approvare nel giugno del 1998 il programma di navigazione satellitare Galileo alternativo ed in competizione con il GPS statunitense. Il summit Franco-Britannico di Saint Malo nel dicembre del 1998 segna il primo passo verso la definizione di una politica estera europea di sicurezza comune sulla scia della dichiarazione di Petersberg, avvenuta durante il Consiglio dei Ministri dell'Unione dell'Europa Occidentale del 19 Giugno 1992, che fissa gli obiettivi dell'attività umanitarie, di ricostruzione, mantenimento della pace e in genere delle attività militari dei paesi europei nelle aree di crisi. In seguito, prima il Consiglio Europeo di Colonia del giugno 1999, poi il Consiglio di Helsinki del dicembre 1999 costituiscono passi importanti verso la definizione di una politica europea di difesa e sicurezza. Viene deciso che entro il 2003 gli Stati membri dell'Unione Europea potranno su base volontaria dar luogo a una forza di reazione rapida, da 50000 a 660000 uomini, da impiegare nelle aree di crisi secondo quanto previsto nella dichiarazione di Petersberg. Il Consiglio di Nizza nel dicembre 2000 individua nella Unione dell'Europa Occidentale (UEO) l'organizzazione

europea a cui affidare lo sviluppo di una capacità strategica europea autonoma nello spazio. Nel discorso del 5 dicembre 2000 all'Assemblea plenaria della UEO Javier Solana riconobbe negli sforzi compiuti nell'ambito UEO per la cooperazione europea nel settore della spazio e la creazione di un Centro per la gestione dei dati acquisiti da satellite un fattore importante per la creazione di una autonoma capacità europea di intelligence dallo spazio. Il 30 Ottobre 2003 è stato segnato un accordo tra la Cina e l'Unione Europea che prevede la cooperazione per il programma europeo di navigazione satellitare Galileo. Questo atto costituisce un'ulteriore passo nella tentativo di infrangere l'attuale indiscussa superiorità militare ed economica degli Stati Uniti nella spazio. Infatti, negli ultimi anni l'Europa ha incrementato, sia pure tra titubanze e indecisioni, gli sforzi per una propria politica dello spazio, sia a livello comunitario, sia a livello di accordi tra singoli stati. A spingere in questa direzione è stata negli anni passati soprattutto la Francia, anche se in chiave nazionalistica, che già da decenni ha sfidato la supremazia statunitense nel campo dell'industria aerospaziale grazie all'Airbus e al programma di lanciatori Ariane. La prossima sfida europea alla supremazia statunitense è proprio il programma Galileo, il progetto di sistema di navigazione satellitare europeo che infrangerà l'attuale monopolio del GPS americano con notevoli ripercussioni sia militari sia economiche. Ciò ha suscitato ovviamente interesse e preoccupazioni sull'altra sponda dell'atlantico. Gli Stati Uniti hanno reso chiaro in questi anni il ruolo strategico importante dei sistemi spaziali nelle funzioni di

comando, controllo e in quelle di intelligence durante le operazioni militari. Questa importanza della capacità spaziale come strumento di interesse militare, politico ed economico è così evidente che il Presidente francese Jacques Chirac ha affermato che “il fallimento europeo nello sviluppare una propria indipendente capacità spaziale manterrà l’Europa vassalla degli Stati Uniti”. Un sentimento simile pervade anche altre grandi nazioni come appunto la Cina.

Ma oltre all’aspetto strategico-militare c’è anche quello economico. Il settore spaziale avrà un peso sempre maggiore nell’economia mondiale. Una stima effettuata qualche anno fa dall’ “Annual Report to the President and the Congress” degli Stati Uniti ha stimato un peso nell’economia statunitense del settore spaziale dell’ordine delle centinaia di miliardi di dollari nei prossimi anni. Questo trend riguarderà la stessa Unione Europea e molto probabilmente anche altre nazioni testimoniando così il passaggio da un’economia industriale a un’economia basata sulla conoscenza e l’informazione le quali sempre più appaiono motore di prosperità. Nel futuro si avrà maggiore interesse nel proteggere l’informazione o garantirne l’accesso così come nel passato ha assunto un ruolo strategico l’assicurare la disponibilità di petrolio. Per questo motivo lo spazio, unico mezzo per assicurare un flusso ininterrotto di informazione, ha assunto un ruolo strategico non solo sul piano militare ma anche per quanto riguarda l’economia mondiale.

Come conseguenza dell'aumentata consapevolezza dell'importanza strategica dello spazio, molte nazioni stanno acquisendo capacità di operare nello spazio con prevedibili ricadute sia in campo militare sia in campo civile. E' recente l'annuncio da parte delle autorità cinesi del successo della missione spaziale Shenzhou V con a bordo un equipaggio umano. Inoltre, anche l'India ha varato un sontuoso piano di sviluppo delle attività spaziali.

#### **5.15 LA CORSA VERSO UNA TECNOLOGIA SPAZIALE “DUAL USE”**

Questa diffusione di nuovi sistemi spaziali, sia con obiettivi militari sia caratterizzati da un uso essenzialmente civile e commerciale, sta ponendo una sfida importante agli Stati Uniti che si trovano di fronte alla necessità da una parte di assicurare e proteggere le proprie capacità di operare nello spazio da attacchi nemici, dall'altra di impedire che altre nazioni possano avere capacità simili alle proprie il che vorrebbe dire perdere l'attuale vantaggio competitivo. A testimoniare la sensibilità dell'argomento si può osservare come il tema della navigazione satellitare si sia aggiunto alla lista dei punti di attrito tra Stati Uniti ed Europa comprendente le divergenze sulla guerra in Iraq, l'applicazione della Convenzione di Kyoto sull'ambiente, la Corte Internazionale.

L'Europa è dotata di una realtà industriale e di una vasta comunità tecnico-scientifica con le necessarie conoscenze per munirsi di una autonoma capacità di operare nello spazio. Al momento, le attività

spaziali a livello comunitario sono molto poche se si eccettua il progetto di navigazione satellitare europeo Galileo dove è più evidente una iniziativa comune europea. Sinora le attività spaziali europee si sono sviluppate essenzialmente a livello dei singoli Stati con in prima linea la Francia, l'unica nazione europea dotata di un'autonoma capacità di arrivare nello spazio grazie al programma di lanciatori Ariane. Il budget della sola Francia è maggiore di quelli di Germania, Italia e Gran Bretagna messi insieme. Tuttavia, le risorse europee sono di gran lunga inferiori a quelle statunitensi. Lodevoli eccezioni in senso contrario sono fornite dalle attività pacifiche dell'Agenzia Spaziale Europea e da quelle dell'Unione dell'Europa Occidentale che con il suo Centro per l'analisi dei dati satellitari presso Torrejón, vicino Madrid, è in grado di fornire informazioni estratte da immagini satellitari. Esso è in un certo senso il Centro Europeo per l'imagery intelligence, l'equivalente della agenzia statunitense NIMA. Le immagini sono acquistate direttamente sul mercato da fornitori di dati satellitari commerciali tipo SPOT (Francia), Landsat o Ikonos (Stati Uniti), IRS (India) e dal satellite militare Helios I.

Oltre al satellite militare Helios I, sviluppato nell'ambito di una collaborazione tra Francia, Italia e Spagna e capace di fornire immagini ottiche di alta risoluzione, altre future missioni satellitari saranno a livello dei singoli Stati. Le più importanti, anche per la complementarità tra le informazioni fornite, sono il satellite per immagini ottiche di alta risoluzione Helios II (Francia) e la costellazione Cosmo SkyMed (Italia) di satelliti per l'acquisizione di immagini radar di alta risoluzione. Ad

evidenziare l'importanza di questi dati e la loro complementarità, nel gennaio del 2001 è stato firmato un accordo di cooperazione tra Francia e Italia per lo sviluppo delle due missioni. Anche i satelliti per comunicazione vedono un'attività per il momento a livello dei singoli Stati. Anche l'Europa, proprio come gli Stati Uniti, ha ben evidente la necessità di una tecnologia spaziale con un carattere dual-use. E' sempre più difficile trovare risorse per il bilancio della difesa. Questo è soprattutto vero per i paesi dell'Unione Europea. L'Agenzia Spaziale Europea dichiara che le tasse dei cittadini investite nel settore aerospaziale hanno prodotto un utile che è tre o quattro volte maggiore del denaro investito. E' in questa ottica che può anche esser letto l'impegno europeo nel programma Galileo. Però, mentre per la radionavigazione c'è un mercato ben sviluppato grazie anche all'uso ormai consolidato del sistema GPS il cui segmento spaziale è stato totalmente finanziato dal governo, per quanto riguarda le immagini da satellite il mercato è ancora agli albori e pertanto il costo del lancio di un satellite e l'acquisizione di immagini deve essere quasi esclusivamente sostenuto dai fondi pubblici. Da ciò si capisce come il favorire l'uso commerciale delle immagini satellitari, oltre che rendere più competitive le industrie nazionali, costituisce un modo per ridurre un costo altrimenti esclusivamente militare. Ora preme capire qual è il futuro delle attività spaziali. Fino ad oggi queste attività sono state "military driven" nel senso che inizialmente esse sono state finalizzate a comporre una superiorità di tipo militare ed, in seguito, sono state orientate alle applicazioni civili. Gli

sviluppi che ha avuto il GPS in campo civile, tuttavia, ha creato una situazione inedita in cui l'innovazione tecnologica civile ha sopravanzato di gran lunga quella militare fino a definire prodotti qualitativamente migliori di quelli ottenibili per impieghi militari. Il lancio del sontuoso programma spaziale della NASA di esplorazione di Marte e di colonizzazione dello spazio ha rimesso al centro degli obiettivi delle politiche spaziali l'esplorazione del cosmo con una valenza prevalentemente di carattere civile e scientifico. Inoltre, la creazione di sistemi satellitari di osservazione della Terra in grado di monitorare i parametri ambientali del nostro pianeta fornendo osservazioni di tipo globale sarà sicuramente una delle risorse chiave per vincere la sfida del degrado ambientale. Così oggi siamo ad un crocevia nel quale si potrebbe ribaltare il rapporto che c'è stato fino ad ora fra lo sviluppo delle applicazioni militari, ritenuto prioritario, ed i trasferimenti tecnologici al sistema civile, ritenuti consequenziali. I grandi avanzamenti delle tecnologie spaziali permetterebbero di considerare prioritari gli obiettivi civili dell'esplorazione planetaria e del monitoraggio del sistema Terra (civilian-driven) e consequenziali le applicazioni militari. Il cambio drastico di rotta delle politiche spaziali degli USA va proprio in questa direzione e potrebbe non essere frutto di manovre propagandistiche. A ben vedere, in uno scenario politico mondiale nel quale è venuta meno la contrapposizione della guerra fredda, rispetto al quale risulta priva di senso oliare indefinitamente la macchina bellica, questo capovolgimento fa gioco paradossalmente proprio a favore degli USA. Infatti se questo

scenario non fosse implementato, l'unica superpotenza rimasta in campo, per tenere ben oliata la sua spaventosa macchina bellica, sarebbe costretta ad "inventarsi" inediti scenari di guerra sulla base del principio discutibile quanto esecrabile della guerra preventiva con delle conseguenze devastanti in campo socio-economico, della giustizia, e di ostacolo alla costruzione di un diritto su scala planetaria. In questo modo, lo spazio rappresenta, insieme all'emergenza energetica, una possibile direzione verso la quale orientare gli sviluppi tecnologici, in grado di essere alternativa a quella militare. Così l'unica residua preoccupazione per la superpotenza, come di altri paesi, rimarrebbe solo quella di poter convertire immediatamente le tecnologie spaziali in supremazia bellica qualora si riaprissero conflittualità su scala planetaria.

## CONCLUSIONI

La messa in orbita dei satelliti ha comportato un radicale cambiamento in tutti i servizi che utilizziamo quotidianamente. Non serve guardare molto lontano per capire quanto la tecnologia satellitare sia entrata, quasi di prepotenza, nella vita di ciascuno di noi, basti pensare che ormai sembra essere diventata una necessità muoversi con un navigatore satellitare, anche solo per spostarsi di qualche chilometro, o ancora, avere in casa una parabola satellitare, che permette di seguire i programmi di tutte le emittenti televisive del mondo, dalla poltrona di casa.

Lo si potrebbe definire un “cordone ombelicale”, partorito dall'intelligenza umana con tutti gli innumerevoli vantaggi e svantaggi che può comportare una nascita così importante e rivoluzionaria.

I satelliti artificiali come abbiamo visto, vengono utilizzati nelle telecomunicazioni, nel telerilevamento e nella meteorologia; per la navigazione; per scopi militari.

Il successo dei satelliti consiste, in primo luogo, nel fatto che quando sono in orbita hanno bisogno (a meno di particolari guasti) di pochissima manutenzione, avendo vita molto lunga e, nella maggior parte dei casi, autoalimentandosi mediante lo sfruttamento dell'energia solare.

Inoltre, coprono vaste aree del pianeta permettendo affidabili comunicazioni ad alta velocità in ogni parte del pianeta, apportando un contenuta spesa di risorse economiche che al contrario, sarebbero richieste in misura maggiore, per l'installazione a terra di cavi o ripetitori. Infine, l'occhio del satellite permette di avere una visione del nostro pianeta da un punto di vista totalmente diverso, offrendo un enorme flusso di informazioni in tempo reale, ed è proprio questo il train d'union tra i satelliti e le esigenze militari.

Infatti, la vittoria appartiene al comandante che riceve le giuste informazioni nel più breve tempo possibile:

«La velocità è l'essenza della guerra, ciò da cui dipende ogni azione di un esercito»<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Sun Tzu ,*L' arte della guerra*, Ubaldini editore

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Sutton G.P., *Rocket Propulsion Elements*, Wiley, New York, 1992.
- [2] Glassman, I., *Combustion*, Academic Press, Orlando, 1987.
- [3] P. Alan Jones & Brian R. Spence, *Spacecraft Solar Array Technology Trends*
- [4] Vittorio Marchis, *La micropropulsione ad idrazina per controllo di assetto di satelliti*, Istituto di macchine e motori per aeromobili, pubblicazione
- [5] Humble, R.W., Henry, G.N. e Larson, W. J.; *Space Propulsion Analysis and design* , McGrawHill, New York, 1995.
- [6] Green M. A., " *Efficiency Limits for Photovoltaic Solar Energy Conversion*", Proceedings of Conference PV in Europe – PV Technology to Energy Solutions, Rome, 7-11 October 2002
- [7] Grätzel M., *Perspectives for Dye-sensitised nanocrystalline solar cells*, Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2000.
- [8] V. Yang and W.E. Anderson. *Liquid Rocket Engine Combustion Instability*, volume 169 of AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics. AIAA, Washington, DC, USA, 1995.

- [9] D.T. Harrje. *Liquid Propellant Rocket Combustion Instability*, volume NASA SP-194. National Aeronautics and Space Administration, 1972.
- [10] L.T. De Luca, E.W. Price, and M. Summer. *No steady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants*, volume 143 of AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics. AIAA, Washington, DC, USA, 1992.
- [11] K.K. Kuo and M. Summer. *Fundamentals of Solid Propellant Combustion*, volume 90 of AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics. AIAA, Washington, DC, USA, 1984.
- [12] F.A. Williams, M. Barrère, and N.C. Huang. *Fundamentals Aspects of Solid Propellant Rockets*. Technivision Services, Slough, UK, 1969. AGARDograph 116.
- [13] R.G. Jahn. *Physics of Electric Propulsion*. McGraw-Hill Book Company, New York, NY, USA, 1968.
- [14] W.H. Heiser and D.T. Pratt. *Hypersonic Airbreathing Propulsion*. AIAA Education Series. AIAA, Washington, DC, USA, second printing edition, 1994.
- [15] G.C. Oates. *Aerothermodynamics of Gas Turbine and Rocket Propulsion*. AIAA Education Series. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, DC, USA, 1984.
- [16] A.N. Hosny. *Propulsion Systems*. University of South Carolina Press, Columbia, SC, USA, 2nd edition, 1974.

- [17] Glassman and R.F. Sawyer. *The Performance of Chemical Propellants*. Technivision Services, Slough, UK, 1970.
- [18] S.F. Sarner. *Propellant Chemistry*. Reinhold Publishing Corporation, New York, NY, USA, 1966.
- [19] A.G. Robotti. *Endoreattori*. Levrotto & Bella, Torino, Italia, 1961.
- [20] C. Huggett, C.E. Bartley, and M.M. Mills. *Solid Propellant Rockets*. Number 2 in Princeton Aeronautical Paperbacks. Princeton University, Princeton, NJ, USA, 1960.

## RISORSE

- [1] [www.csgsolar.com/index.php?lang=en](http://www.csgsolar.com/index.php?lang=en)
- [2] [www.checkpoint-online.ch/CheckPoint/Monde/Mon0013-SatellitesEspions-I.html](http://www.checkpoint-online.ch/CheckPoint/Monde/Mon0013-SatellitesEspions-I.html)
- [3] [www.scientificambitalia.org/bulletin/assets/f109.pdf](http://www.scientificambitalia.org/bulletin/assets/f109.pdf)
- [4] [www.ses.ch/download/sesamo/sesamo.4\\_4.pdf](http://www.ses.ch/download/sesamo/sesamo.4_4.pdf)
- [5] [www.phy6.org/stargaze/lintro.htm](http://www.phy6.org/stargaze/lintro.htm)
- [6] [www.ses.ch/download/sesamo/sesamo.4\\_4.pdf](http://www.ses.ch/download/sesamo/sesamo.4_4.pdf)

## **RINGRAZIAMENTI**

*I miei ringraziamenti vanno ad Alcatel Alenia Space Spa, per il supporto fornito a questo lavoro di tesi e per la professionalità che da sempre la contraddistingue; al relatore, Prof. Nervi, che con la sua competenza ed esperienza ha saputo indicarmi la giusta strutturazione della tesi.*

*Un ultimo ringraziamento al correlatore, Ten. Gen. R.O. Iaria Ing. Antonino, del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito, oltre che per la sua grande disponibilità, anche, per l'esempio, la passione e la professionalità che ha dimostrato e che lo rendono un grande Uomo ed un eccellente Ufficiale.*