io roma

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

N 1/2018

Quaderno

Quaderno

In copertina:
Palazzo della Regione Lombardia
Pei Cobb Freed & Partners, Caputo Partnership,
Sistema Duemila,
copyright © Moreno Maggi

Il saluto del Presidente

Dott. Ing. Carla Cappiello

Il manto stradale romano

In questo periodo l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma è stato contattato da diversi organi di stampa, per chiedere un parere tecnico sulla situazione "buche" nella Capitale, che tanto scalpore ha suscitato in tutto il Paese. Nel 2017 per i quasi 6 mila km in cui si snodano le strade di Roma si contavano circa 10 mila buche, voragini, avvallamenti, che a volte superano il diametro di 35 cm, e crepe di ogni dimensioni. La situazione nelle ultime settimane con l'arrivo di un freddo intenso, che ha portato neve e piogge, è peggiorata notevolmente. Infatti, l'acqua penetra nell'asfalto e il manto va in frantumi. Il passaggio di auto e bus sgretola la già disfatta rete viaria. In queste condizioni, si generano giornalmente decine di incidenti automobilistici, apportando gravi danni a persone e a cose. Il costo sociale sta diventando altissimo tra spese mediche e riparazione di veicoli. I "rattoppi" fatti in emergenza, a volte anche con materiali di bassa qualità, servono a poco, poiché non sanano realmente la situazione caratterizzata da seri danni strutturali. Il problema logicamente non sorge oggi, ma rappresenta la mancanza decennale di pianificazione nel settore dei lavori pubblici. Dobbiamo a tal punto ricordare che, quando bisogna intervenire sulla manutenzione stradale, a volte è complesso anche comprendere chi sia il responsabile. Infatti, alcune strade, quelle della cosiddetta grande viabilità, sono a cura del Comune, altre invece dei Municipi e altre infine, sia pure in numero ridotto, sono private anche se aperte al transito e è ad essi che fa capo la manutenzione.

In generale, come sappiamo, la pavimentazione stradale flessibile è costituita da tre componenti principali: il manto (strato di usura e binder), la struttura (base) e il sottofondo (fondazione). Quando il manto perde la propria capacità strutturale, la pavimentazione si deteriora. Gli interventi di manutenzione consistono solitamente nell'evitare che l'acqua piovana penetri all'interno della struttura della strada. Pertanto, è fondamentale che il manto sia sempre impermeabile e che gli elementi di drenaggio siano efficaci, per impedire che l'acqua non si depositi lungo il ciglio stradale. Le crepe devono essere sigillate non appena compaiono e i margini devono essere rifilati per consentire lo scolo dell'acqua. Affrontati con un certo anticipo, gli effetti dell'invecchiamento possono essere trattati efficacemente mediante la nebulizzazione d'emulsione bituminosa oppure con un sottile rivestimento tradizionale d'asfalto miscelato a caldo. Tali azioni, risolvono soltanto il deterioramento dovuto alle condizioni ambientali. Le deformazioni derivate dal carico del traffico richiedono, invece, interventi di risanamento più profondo, che possono riguardare interventi di consolidamento strutturale. Questo tipo di provvedimenti sono soluzioni a lungo termine. Il risanamento strutturale dovrebbe mirare a massimizzare il valore di recupero della pavimentazione preesistente. Alcune possibilità sono: il rifacimento totale, la costruzione di strati supplementari (di

materiale granulare e/o asfalto) sulla parte alta del manto preesistente; il riciclaggio nella profondità della pavimentazione nella quale si verifica il problema.

Certamente la tipologia di azione è collegata al budget a disposizione. Sicuramente Roma richiederebbe interventi molto onerosi. Ma sicuramente la non pianificazione e le operazioni spot e superficiali richiederanno in futuro spese ancora più superiori a discapito della città e dei cittadini.

Sono tre gli elementi fondamentali per assicurare una buona manutenzione:

- il monitoraggio della rete stradale per avere una continua conoscenza dello stato della pavimentazione e dei volumi di traffico e consentire interventi preventivi e tempestivi relativamente economici ed evitare invece danni sempre più gravi con costi esponenzialmente crescenti;
- una direzione lavori qualificata e presente per garantire un efficace controllo sulla qualità degli interventi;
- la qualità delle imprese che effettuano la manutenzione ottenibile con capitolati di gara severi e premianti le aziende più qualificate.

Infine una particolare attenzione deve essere fatta quando si indirizzano flussi di traffico importanti su strade precedentemente scariche, un tipo esempio è la costituzione delle corsie preferenziali. Infatti in questa situazione il ripetuto passaggio degli autobus in una situazione in cui si concentrano le traiettorie stressa la pavimentazione creando rapidamente il fenomeno delle ormaie. Prima di impegnare una strada con traffici pesanti è indispensabile verificare lo stato della pavimentazione e se necessario intervenire per evitare il rapido decadimento dell'infrastruttura.

L'Ordine mette a disposizione le sue competenze tecniche per collaborare con le Istituzioni per trovare le soluzioni più adeguate per la città.

Ing. Carla Cappiello
Presidente
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

L'Editoriale

Ing. Francesco Marinuzzi Ph.D.

Per una Sanità 4.0

La popolazione italiana sta velocemente invecchiando anche a seguito della recente crisi che ha contribuito alla contrazione delle nascite. Inoltre, assistiamo all'allungamento delle aspettative di vita media grazie alle nuove cure e metodiche frutto dei notevoli progressi della medicina. Nel panorama europeo siamo sicuramente fra i paesi più longevi e pertanto abbiamo e maturiamo sempre più specifiche esigenze di assistenza sanitaria che possano rispondere *oltre* a quanto già previsto dal sistema sanitario di base ad esempio con la *Long Term Care*.

Nel recente report ISTAT sulla spesa sanitaria complessiva emerge una cifra crescente e rilevante di quasi 34 miliardi di euro di spesa diretta delle famiglie per lo più non intermediata. In Italia, in ambito pubblico, abbiamo molte Sanità, una per ogni ragione, visti gli spazi di autonomia differenziata concessi attualmente in materia dalla Carta Costituzionale. Alcune virtuose altre che stanno proprio in questi mesi rientrando nella normalità da deficit di miliardi di euro soggetti a piani di rientro e a commissariamenti.

Queste dinamiche temporali e questa eterogeneità di approcci, organizzazioni, strutture e servizi genera forti differenze sui costi e sulla qualità del servizio percepito dai cittadini testimoniata dai flussi migratori di pazienti da alcune regioni verso altre. Ad esempio, le lunghe code di attesa per la diagnostica o per alcune prestazioni e la percezione di non qualità della sanità sono tipiche di alcune regioni.

Per contrastare e rispondere alle suddette dinamiche sempre più si inizia a parlare di *Sanità 4.0* ed è sicuramente interessante poter ripensare l'offerta delle prestazioni e la prevenzione delle malattie con questo nuovo approccio che sta rivoluzionando i processi di produzione e di servizio delle principali aziende ed organizzazioni mondiali.

La forte digitalizzazione dei processi e dei servizi con un aumento esponenziale dei dati trattati permette di sintetizzare, con le nuove tecniche di *Intelligenza artificiale*, quali siano gli specifici controlli preventivi necessari per quella specifica persona con quella specifica storia, profilo genetico e contesto lavorativo. Le tecniche di sequenziamento del genoma stanno subendo crolli drastici dei costi ed è verosimile fra pochi anni pensare che si possa avere la mappatura del proprio DNA a meno di 100 euro. Questa, ad esempio, potrebbe essere una informazione preziosa e futura da memorizzare nella propria banca dati ai fini della prevenzione e della gestione del rischio. Anche e soprattutto nell'obiettivo di indurre, in modo mirato, comportamenti "virtuosi" e salutari in grado di permettere ai più di essere in salute fino al termine. Si consideri al proposito che da statistiche pubbliche una percentuale importante della spesa sanitaria di un soggetto è erogata negli ultimi anni e una cifra ancora più importante negli ultimi 20 giorni.

La rivoluzione digitale 4.0 abilita e permette nuovi approcci fortemente innovativi che possano indurre migliori stili di vita, una migliore alimentazione per una riprogrammazione del proprio microbiota che tanto incide nella effettiva libertà di nuove scelte, maggiore movimento ed una vita più armonica nelle relazioni umane. I progressi della telemedicina sono notevoli e già attualmente ci sono moltissimi progetti di ricerca che coinvolgono centinaia di migliaia di persone grazie ai sensori già presenti negli smartwatch (sensori di temperatura, battito cardiaco, movimento,

accelerazione, etc..) o a tutti quelli collegabili. Questi devices già oggi memorizzano e raccolgono molte delle informazioni necessarie spesso utilizzate e visualizzate anche tramite le tante *App* di *health*.

La Sanità 4.0 può abilitare a costi bassi specifiche coperture assicurative soggette al rispetto di alcuni stili di vita e scelte comportamentali grazie ai tracciamenti autonomi dei suddetti *devices* nella ottica della "spinta gentile" del Premio Nobel Richard H. Thaler. Risulterebbe immediato, ad esempio, recepire la raccomandazione dell'ultimo congresso internazionale di cardiologia per prevenire gravi ed improvvisi episodi acuti al cuore dove è stata promossa la regola del "tre": 3 volte a settimana fare a piedi 3 chilometri in 33 minuti.

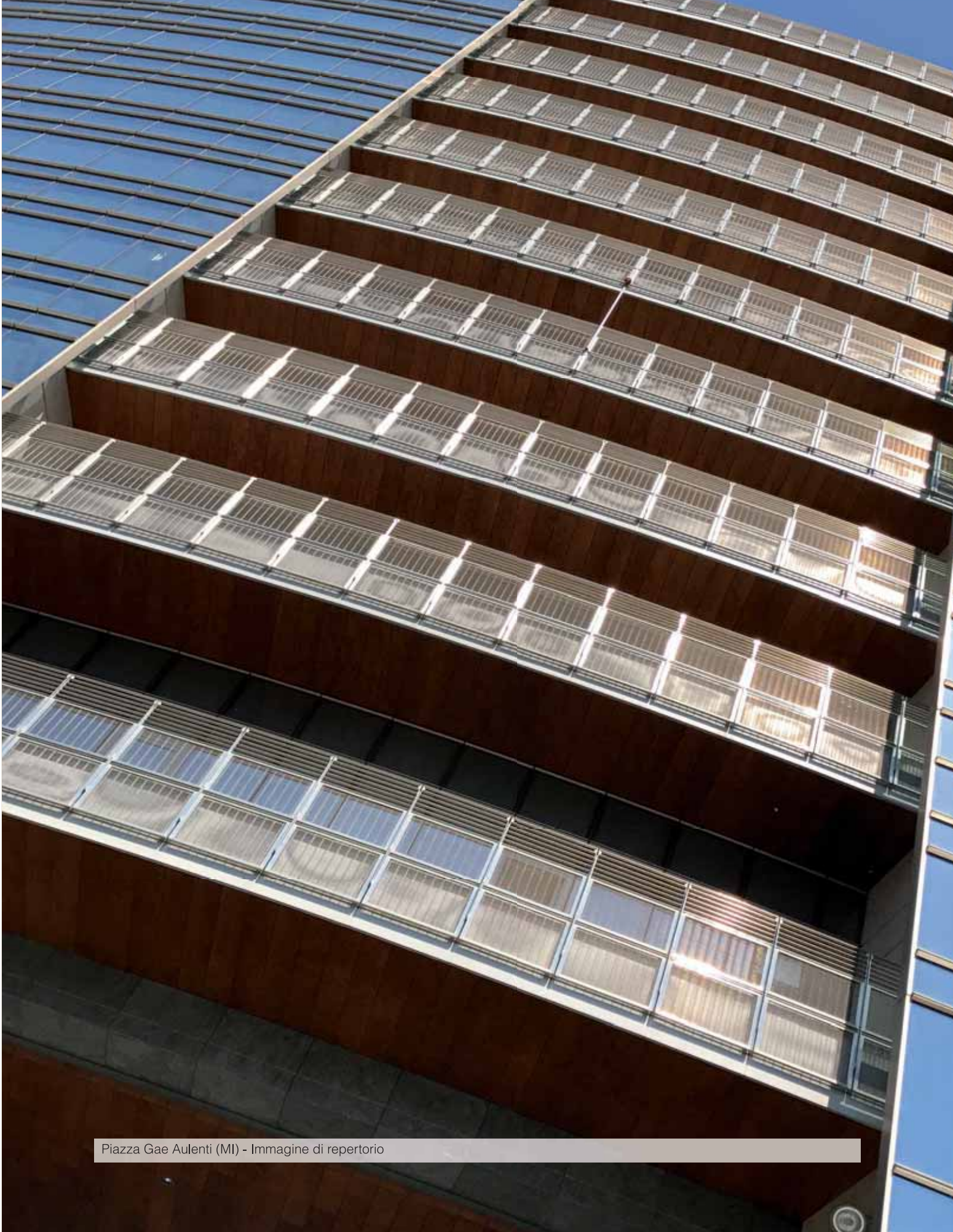
Dall'analisi di molti portali web americani focalizzati sulla salute si può percepire nettamente una forte promozione di corretti stili di vita, di una corretta alimentazione per arrivare allo sviluppo dell'intelligenza finanziaria, emotiva, dell'importanza della armonia nella cerchia affettiva come indiretto elemento di stabilizzazione e di armonizzazione e dunque di benessere generale e di prevenzione. Talvolta viene dato anche molto spazio alle campagne ed investimenti sulla cura e il salvataggio degli animali domestici probabilmente considerati, indirettamente, elemento di stabilizzazione e di armonizzazione e dunque di benessere generale e di prevenzione.

La rete internet e la disponibilità dell'informazione sta abbattendo la tradizionale asimmetria informativa fra medico e paziente e sempre più spesso i pazienti approcciano le proposte di prevenzione, le cure ed i medici dopo molteplici ricerche, consulti e verifiche in rete di reputazione e di soddisfazione. Questo approccio critico e di non totale affidamento alla autorità e figura del medico può minare l'efficacia stessa di molte delle cure e prescrizioni. La stessa divisione storica fra gli approcci riduzionisti occidentali e quelli olistici orientali sta venendo meno con una contaminazione reciproca.

Sempre in rete si assiste alla proliferazione di nuove scuole di pensiero che tendono a pensare alla malattia e all'incidente non come un semplice e sfortunato accadimento ma come una forma sofisticata e criptica di *guarigione* di un conflitto dell'animo. Questo se non viene colto e decodificato con un opportuno codice di interpretazione nel suo senso profondo può andare in facile *escalation* producendo a ruota tutta una serie di ulteriori malattie progressivamente sempre più gravi, costose nelle cure ed invalidanti fino a diventare croniche e perfino letali. Alcuni esperti francesi hanno addirittura identificato dei tipici "pattern" e sequenze di patologie ed incidenti in sé indipendenti ma spesso fra loro in sequenza ricorrenti tali da rendere la previsione della problematica successiva quasi immediata. Se fosse mai convalidata questa ipotesi, magari con *algoritmi di apprendimento*, la prevenzione e la garanzia della buona salute anche nelle fasi di vecchiaia più avanzate sarebbe tutta da riscrivere. Intanto sempre più anziani e meno anziani si avvicinano a questi approcci di sapore olistico ed orientale tramite canali non ortodossi e non istituzionali, privi di effettivo controllo e regolamentazione e vanno a moltiplicare le offerte di corsi quali ad esempio lo Yoga e la *bioenergetica* soprattutto dopo aver provato ripetitivamente e senza beneficio le *soluzioni istituzionali* oppure impossibilitati dai costi rilevanti delle stesse.

Tanti segnali che sembrano indicare che, grazie alle nuove tecnologie digitali e alla *rivoluzione 4.0*, siamo alla vigilia di una profonda trasformazione e di un forte cambiamento del modo di pensare ed approcciare il problema *salute* per una necessaria sostenibilità economica che non crei disuguaglianze e promuovi una maggiore capacità di ascolto olistico del proprio corpo.

Francesco Marinuzzi
Direttore Editoriale



Piazza Gae Aulenti (MI) - Immagine di repertorio

Quaderno

Direttore responsabile
Stefano Giovenali

Direttore editoriale
Francesco Marinuzzi

Comitato di redazione

Sezione A
Carla Cappiello
Gioacchino Giomi
Lucia Coticoni
Giuseppe Carluccio
Carlo Fascinelli
Lorenzo Quaresima
Manuel Casalboni
Filippo Cascone
Alessandro Caffarelli
Massimo Cerri
Francesco Fulvi
Tullio Russo

Sezione B
Giorgio Mancurti

Amministrazione e redazione
Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma
Tel. 06 4879311 - Fax 06 487931223

Direttore creativo e progettazione grafica
Tiziana Primavera

Stampa
Press Up

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma
www.ording.roma.it
segreteria@ording.roma.it
editoriale@ording.roma.it

Finito di stampare: maggio 2018

Il Quaderno IOROMA è una estensione alla rivista IOROMA

La Direzione rende noto che i contenuti, i pareri e le opinioni espresse negli articoli pubblicati rappresentano l'esclusivo pensiero degli autori, senza per questo aderire ad esse.
La Direzione declina ogni qualsiasi responsabilità derivante dalle affermazioni o dai contenuti forniti dagli autori, presenti nei suddetti articoli.

Sommario

N. **1**/2018

GLI EDITORIALI

Il saluto del Presidente **1**
di Carla Cappiello

L'Editoriale **3**
di Francesco Marinuzzi

GLI ARTICOLI

Mobilità ciclabile - Analisi sull'incidentalità dei ciclisti **8**
R. Gigli, F. Santarsia

La mobilità stradale sostenibile: dati e prospettive **18**
G. Stella, F. Carmignani, T. Suppa, R. Trillini

Approfondimenti e incertezze sugli elementi tecnici di pubblico dominio circa i criteri di localizzazone di un Deposito Nazonale per Rifiuti Radioattivi **34**
G. Pino

Elementi di fisica e di ingegneria del reattore a fusione **48**
P. Allievi, A. De Blasiis, A. Compagno, G. Chiocchia, M. Sepielli, A. Tonti
A. Taglioni, E. Vocaturo

GLI APPROFONDIMENTI

Shuttle, l'aereo cosmico **72**
G. Lucarelli, C. Di Leo

DALL'EVENTO

Industry 4.0 - Come la Digital Transformation incide nella rivoluzione industriale **104**
G. Gasbarrone, G. P. Balboni

L'AREA WEB DEL QUADERNO E DELLA RIVISTA

a cura di
Ing. R. Gigli,

supporto tecnico:
Arch. F. Santarsia

commissione
Ciclabilità
in collaborazione con la commissione
Sicurezza Stradale

visto da:
Ing. M. Contadini
Ing. A. Fuschiotto

MOBILITÀ CICLABILE

Analisi sull'incidentalità dei ciclisti

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI ROMA

Dimensione e criticità della mobilità ciclistica a Roma

Il presente articolo è stato sviluppato dalla commissione tematica ciclabilità in collaborazione con la commissione sicurezza stradale. I dati di base ed alcune elaborazioni sono state svolte nell'ambito del Centro di Competenza della sicurezza stradale dell'Agenzia della Mobilità del Comune di Roma.

Caratteri generali della incidentalità stradale

Dalle indagini campionarie sulla mobilità effettuate nel 2013, è emerso come la mobilità ciclabile incida in misura molto modesta (inferiore all'1%) sul totale della mobilità totale generata nell'ambito del territorio del comune di Roma[1]. Anche se, risulta oggi ragionevole ipotizzare quote modali su bicicletta lievemente superiori ma ancora decisamente lontane dalle quote modali delle altre componenti di mobilità, i relativi livelli di incidentalità denotano una situazione su cui porre particolare attenzione.

Secondo i dati forniti da ISTAT, nel corso del 2014 a Roma, sono stati registrati 264 incidenti stradali che hanno coinvolto ciclisti. In particolare 42 incidenti hanno visto come protagonista un solo veicolo (solo la bicicletta del ciclista infortunato), mentre i restanti hanno coinvolto più veicoli ed in alcuni casi una o più biciclette. In totale, nei 264 incidenti sono rimaste coinvolte 271 biciclette e sono stati registrati 5 deceduti e 252 feriti.

Mettendo in relazione i morti e i feriti causati da incidenti stradali con i veicoli coinvolti è stato riscontrato che, per le sole biciclette, il tasso dei decessi è di 18 ogni **mille** biciclette, il tasso delle persone rimaste ferite è di 926 feriti ogni **mille** bici. Questi valori denotano una situazione di estrema pericolosità, soprattutto grave se si effettua un confronto con gli omologhi valori relativi alle altre modalità di trasporto. Il confronto con l'incidentalità nel suo complesso, rivela come l'incidentalità su bicicletta risulti più di quattro volte superiore per quel che riguarda i decessi/veicolo (4,3 morti ogni mille veicoli) e maggiore di quasi il 50% per quel che riguarda i feriti (622 feriti ogni mille veicoli).

Analizzando la componente ciclabile attraverso l'indice di gravità, inteso come il rapporto tra il numero di decessi e il totale di infortunati (somma dei decessi e dei feriti), si scopre che per le bici l'indice è di 19,5 morti ogni 1000 infortunati, più del doppio di quello relativo all'incidentalità generale (che si attesta su quota 7,00 ogni 1000 infortunati); la situazione risulta, quindi, a più alto rischio anche per quel che riguarda la gravità dell'incidente.

Se l'analisi si sposta sul dettaglio di confronto tra la componente "bicicletta" e le altre due componenti del traffico privato (autoveicoli e due ruote a motore), la bicicletta si colloca in un situazione ancora più critica. Nel caso delle *quattro ruote*, il rapporto tra i tassi raggiunge addirittura le sei volte (per le auto il tasso è pari a 3,3 morti ogni mille auto); nel caso dei veicoli

a due ruote a motore il rapporto dei tassi è di 2.5 volte (7,2 morti ogni mille veicoli a due ruote). Il rapporto *feriti ogni mille veicoli* fa registrare scostamenti inferiori ma non meno preoccupanti, in particolare per le autovetture tale indice è di 510 feriti ogni 1.000 autovetture, valore pari a circa la metà di quello delle bici. Per le *due ruote a motore,* invece, i tassi sono comparabili: 987 feriti ogni mille veicoli per le due ruote a motore (contro i 926 della bicicletta) e ciò è spiegabile probabilmente dalla maggiore attitudine dei motociclisti, rispetto agli automobilisti, a commettere infrazioni lievi cui fa seguito un incidente non grave.

Prendendo in esame gli indici di gravità (rapporto tra decessi e totale di infortunati) delle due componenti di traffico privato (autoveicoli e due ruote a motore), la bicicletta guadagna nuovamente il primato di pericolosità: per le auto il tasso di gravità si attesta su un valore pari ad un terzo di quello delle bici (6,4 morti ogni 1000 infortunati), per le *due ruote a motore* il tasso si attesta su un valore di poco superiore, 7,2 morti ogni 1000 infortunati, pari a poco più di un terzo rispetto alle bici.

Gli indici evidenziano, per l'anno 2014, un'esposizione al rischio delle persone che utilizzano la bici enormemente più alto rispetto alle altre due componenti *a motore*. La pericolosità più alta della bicicletta deriva presumibilmente da una serie di fattori quali: la scarsa attenzione che l'utente del veicolo a motore (quattro o due ruote che sia) presta durante la marcia, sottovalutazione del pericolo durante le eventuali inevitabili interferenze con il ciclista, errata percezione – e considerazione - dell'automobilista che, ancor oggi, considera la bicicletta come mezzo di trasporto destinato ad un uso più che altro di tipo ludico ricreativo.

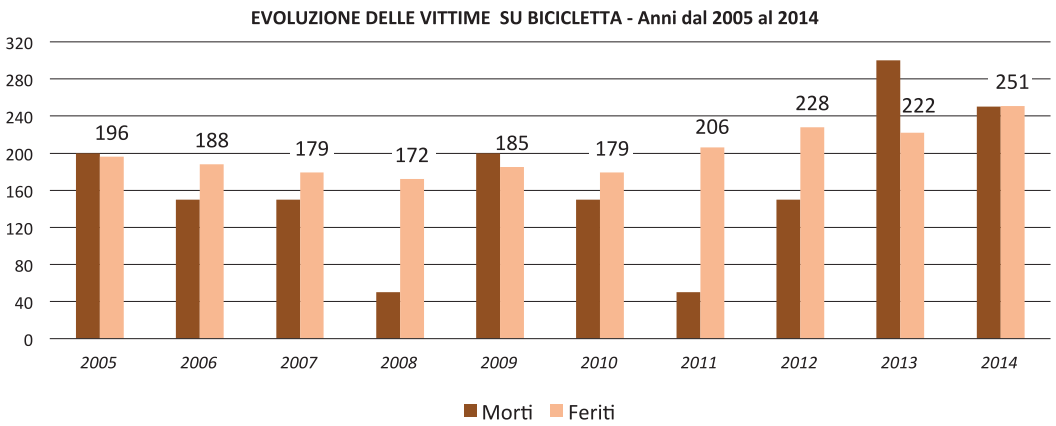
D'altra parte non è da sottovalutare il fatto che, in taluni casi, sembra che gli stessi ciclisti non considerino la bicicletta come un veicolo che, a tutti gli effetti, è obbligato a rispettare le regole del codice della strada. Purtroppo si riscontra talvolta, un atteggiamento di presunzione derivante dalla convinzione del ciclista di utilizzare un veicolo meno impattante da un punto di vista sociale, ambientale e di traffico; tale convinzione è sicuramente corretta, ciò però non esclude che un atteggiamento di questo tipo possa moltiplicare le occasioni di rischio nell'interazione con gli altri veicoli.

Le considerazione fatte, avvalorano il significato delle statistiche pubblicate dall'ISTAT in questi ultimi anni sulla crescita della incidentalità ciclabile. Emerge nell'analisi degli ultimi due anni (2013 – 2014) un aumento generalizzato della gravità degli incidenti fondamentalmente legato ad un inaspettato incremento dei decessi - 154 decessi totali nel 2014 - il 10% in più rispetto al 2013. In particolare per la componente ciclabile si è registrato un evidente aumento, in termini percentuali, del numero delle vittime (decessi + feriti), in controtendenza rispetto al totale di tutte le componenti di mobilità. Se in totale le vittime sono diminuite di un 8% (attestandosi sulle 17.821 al 2014), per la componente ciclabile le vittime sono aumentate, sempre rispetto al 2013, di un 13% portandosi a 256 unità. (Figura 1)

Scendendo nel dettaglio, a fronte di tassi di mortalità sostanzialmente stabili negli anni, è cresciuto invece il numero di feriti in bicicletta. Si è passati, nel decennio che va dal 2005 al 2014, dai 196 feriti ai 251 del 2014, con un incremento pari al 28%.

Disaggregando il dato per fascia di età si scopre che la fascia di età più coinvolta negli incidenti è quella degli adulti di età compresa tra i 25 e 44 anni che assorbe un terzo di tutti i feriti, con un incremento rispetto al 2010 del 39%. Gli incrementi più rilevanti si riscontrano invece

Figura 1



nelle fasce più giovani, tra i 15 e 24 anni e nelle fasce degli anziani di età superiore ai 65 anni; tra il 2010 e il 2014 la prima registra un incremento, a dir poco abnorme, del 74% per i feriti, la seconda, invece, registra un incremento del 54%, sempre dei feriti.

Evoluzione dell'incidentalità ciclabile in rapporto alle altre componenti modali

Nell'Ambito delle attività svolte dal Centro di Competenza sulla Sicurezza Stradale, le analisi sono effettuate con dati relativi all'incidentalità provenienti da diverse fonti, sia di natura tematica, che di contesto (ad esempio i carichi di traffico sulla rete). Per gli incidenti, le fonti di riferimento sono sostanzialmente due: la prima è costituita dalle banche dati ISTAT, comprendenti i dati riguardanti tutti gli incidenti che hanno provocato vittime sull'intero territorio comunale, la seconda è costituita dalla PLRC (Polizia Locale di Roma Capitale) che attraverso un collegamento diretto con il Centro di Competenza fornisce, pressoché in continuo, tutti i dati rilevati comprendenti, a differenza di quelli di fonte ISTAT, sia gli incidenti con vittime, sia quelli con solo danni a cose, sia quelli in cui sono rimaste coinvolte persone decedute a causa del sinistro dopo il 30° giorno. Con questi dati è possibile studiare il fenomeno nella sua interezza.

Grazie alla collaborazione offerta dalla *PLRC* è stato possibile mettere a punto una base dati decennale georeferenziata che comprende gli incidenti dal 2006 al 2015, tale banca dati ha consentito di mettere a punto un sistema informativo atto ad analizzare il fenomeno secondo le due dimensioni principali: quella geografica e quella temporale.

Considerando la dimensione temporale ed esaminando l'evoluzione nell'ultimo decennio, si osserva in generale un trend di crescita nel quale l'incremento 2015 su 2006 è, in valore assoluto, pari a un centinaio di incidenti, ovvero poco più del 45% del valore iniziale della serie. Se la serie viene esaminata nel suo dettaglio si scopre come la stessa sia contraddistinta da un andamento ciclico con periodiche flessioni, senza però che queste incidano significativamente sul trend generale di crescita. La serie mostra tre flessioni di entità modesta avvenute negli anni 2010, 2013 e 2015 considerabili come naturali oscillazioni del fenomeno la cui entità non può purtroppo, essere considerata un'inversione permanente di segno del trend.

Occorre, sottolineare che alle ultime due flessioni (2015 e 2013), corrispondono incrementi, nei rispettivi bienni precedenti, ben più rilevanti: ad una prima riduzione nel 2014 di sei incidenti corrisponde un incremento nel biennio precedente di 24 incidenti (sei volte), ad una seconda flessione nel 2015 di 7 incidenti, corrisponde un incremento, nel biennio 2013-2014 di 29 incidenti (4 volte).

Sempre rimanendo nel dominio temporale l'analisi del rischio di andare in bicicletta svela dei risultati interessanti. Occorre però ricordare che, non disponendo dei dati di norma considerati più attendibili per descrivere l'esposizione al rischio (percorrenze e veicoli in circolazione), si è fatto riferimento al numero dei veicoli coinvolti in incidenti, quale unica variabile a disposizione. (Figura 2)

Ponendo a confronto i veicoli coinvolti in incidenti stradali e analizzando la loro evoluzione in serie storica (dal 2006 al 2015) emergono profili temporali caratteristici; le differenze sono esaltate considerando le serie dei rispettivi numeri indice, avendo posto i rispettivi valori di inizio serie (2005) pari a 100.

Come si vede in figura le biciclette coinvolte in incidenti hanno mostrato un andamento stazionario nei primi quattro anni della serie, per poi

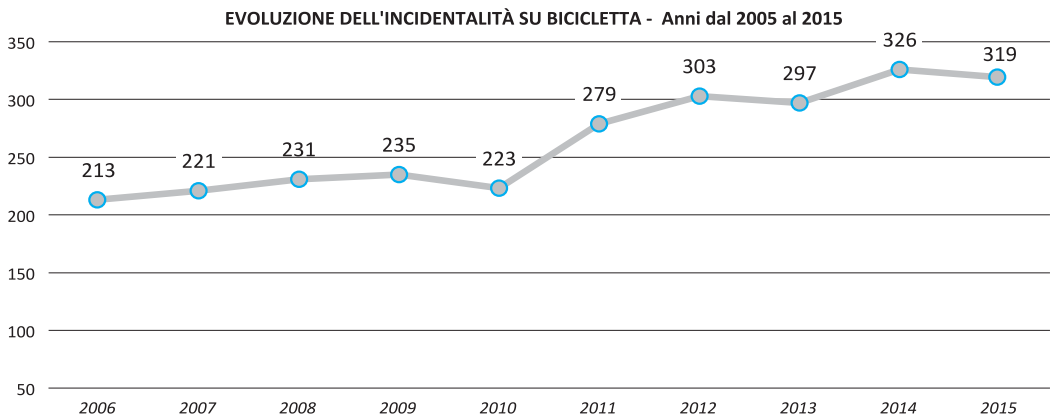
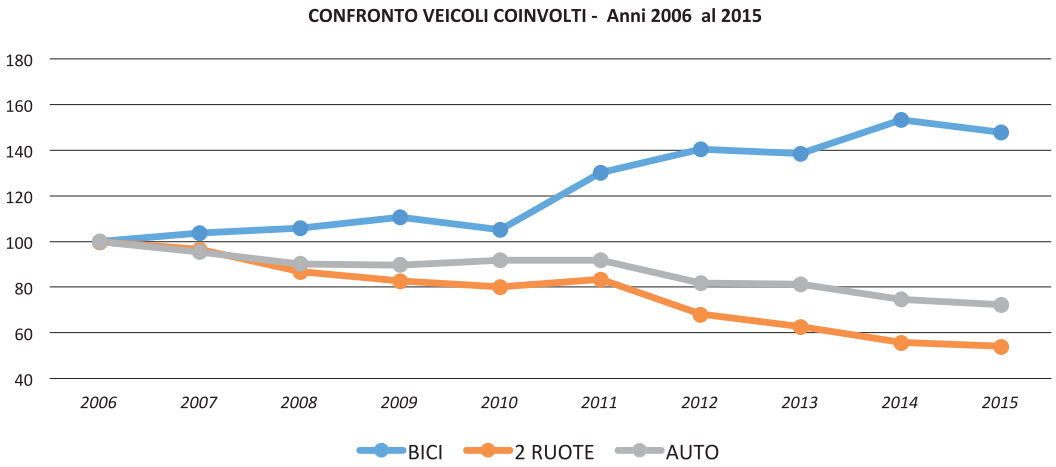


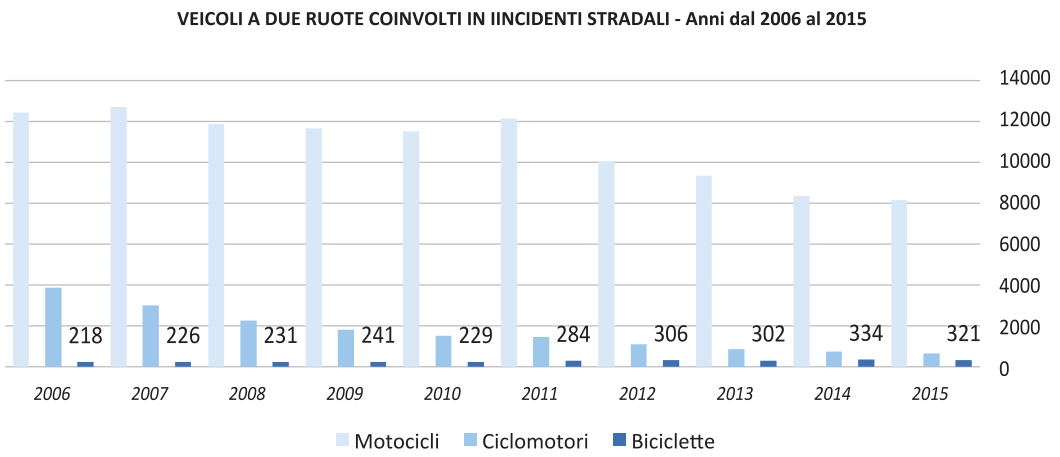
Figura 2

Figura 3



iniziare una crescita repentina che si è mantenuta fino a fine serie. Dalle 218 bici del 2006 si è passati alle 319 del 2015, con un incremento del +48%. Viceversa le altre due componenti di mobilità *motorizzate* (autovetture e motocicli) mostrano un andamento discendente, pressoché costante. (Figura 3)
Le autovetture in circolazione si sono ridotte del 28% passando dai 57.530 veicoli del 2006 ai 41.604 nel 2015. Ancora più accentuata è la riduzione dei veicoli motorizzati a due ruote, per i quali si registra una riduzione del 46%, passando dai 15.998 veicoli del 2006 agli 8.649 del 2015. Se poi si analizza nel dettaglio il gruppo dei veicoli a due ruote a motore, si evince che i motocicli, diminuiscono di più di un terzo -34%, passando dai 12.003 del 2006 agli 8.000 del 2015, mentre per i ciclomotori si registra una diminuzione del 84%, e si passa dalle 2.935 unità del 2006 alle 634 del 2015.
Il confronto tra le due componenti a due ruote (ciclomotori e biciclette) consente di evidenziare come in questi ultimi 10 anni la forbice tra i trend relativi ai veicoli coinvolti si sia progressi-

Figura 4



vamente ampliata, generando un divario tra i due numeri indice di circa 100 punti. In effetti i ciclomotori coinvolti sono progressivamente diminuiti, al contempo, le bici coinvolte sono aumentate; basti pensare che ad inizio serie i ciclomotori coinvolti erano 17 volte le bici, a fine serie tale rapporto scendeva a due, sintomo questo di un presumibile minor uso del ciclomotore negli spostamenti urbani e molto probabilmente anche di una maggiore consapevolezza dei rischi acquisita dai motociclisti. (Figura 4)

Al fine di svolgere una valutazione più specifica del rischio di andare in bicicletta, si è fatto riferimento anche alla gravità degli incidenti stradali, grandezza che viene definita attraverso tre indici:

1 il numero totale di infortunati (il totale dei decessi e dei feriti) rimasti coinvolti nell'incidente;
2 il rapporto tra i decessi e il totale degli infortunati, espresso come numero di decessi ogni 100 persone infortunate;
3 il rapporto tra infortunati e il numero di veicoli coinvolti (infortunati ogni 1000 veicoli).

Per quel che riguarda il primo indice, si evidenzia una progressiva diminuzione degli infortunati a bordo sia degli autoveicoli che delle due ruote a motore, in controtendenza rispetto alla bicicletta che fa registrare, nei dieci anni presi in esame, un aumento del numero di infortunati (morti + feriti). Questo andamento è del tutto simile a quello visto nella precedente statistica (veicoli coinvolti); qui però la forbice è lievemente inferiore, attestandosi sui 70 punti. Gli infortunati in auto si riducono del -34%, quelli delle due ruote a motore registrano addirittura un dimezzamento degli infortunati, per quel che riguarda le bici, gli infortunati sono invece aumentati di quasi il 30%.

In realtà il picco di incidentalità per la componente di mobilità ciclabile è stato raggiunto nel 2014, quando sono state registrate, nel complesso, 253 vittime (delle quali 5 sono decessi), con un incremento, rispetto all'anno base, che sfiora il +39%. C'è da osservare, poi, che gli andamenti rimangono pressoché stazionari fino al 2010/2011 per poi prendere direzioni diverse

Figura 5

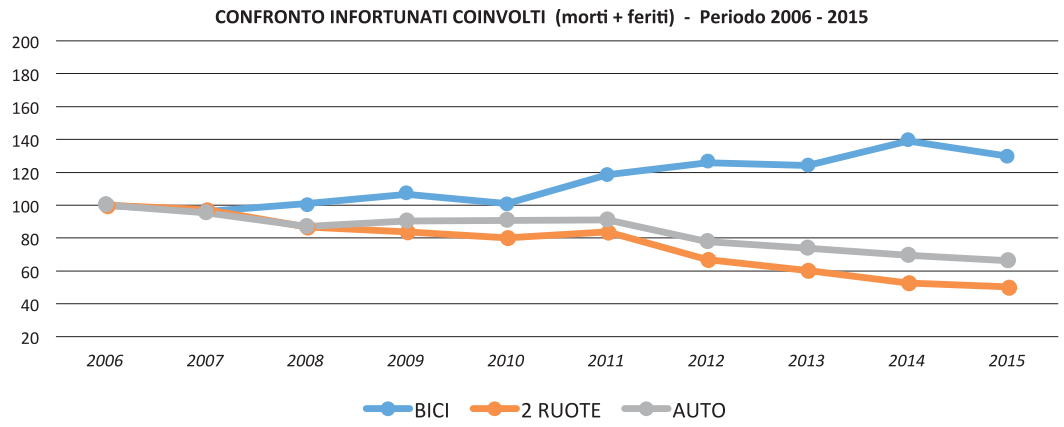


Figura 6

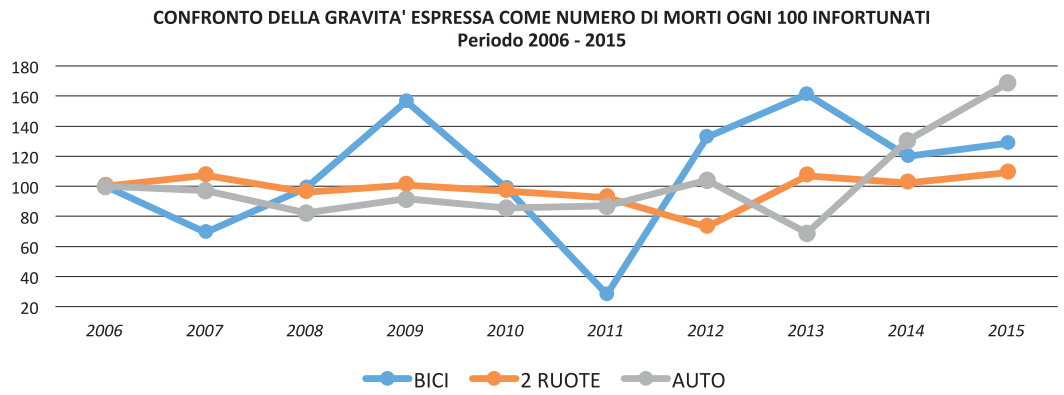
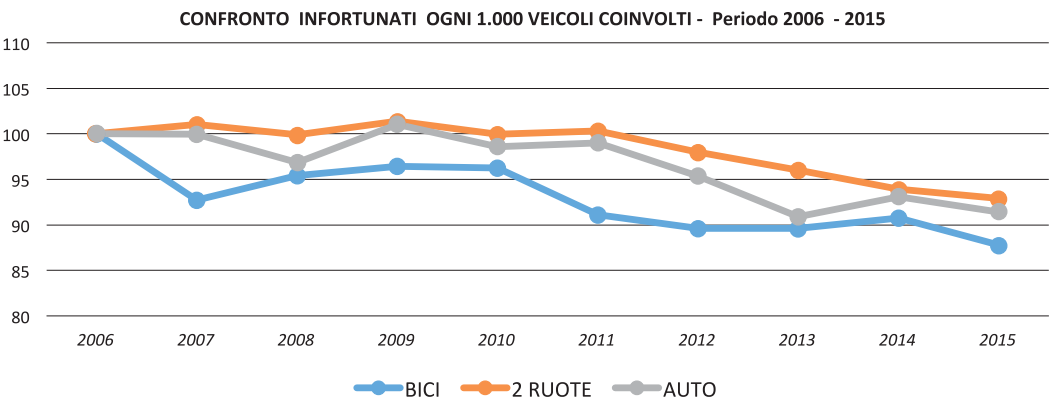


Figura 7



nel quadriennio successivo: le componenti motorizzate in discesa, quella su bicicletta in salita. (Figura 5)
Se si prende in considerazione l'indice di gravità espresso come rapporto tra decessi e infortunati totali, si osserva che l'andamento relativo alla componente di mobilità ciclabile appare dispiegarsi in maniera più casuale, a differenza delle altre due componenti che disegnano un trend sostanzialmente più regolare. L'evoluzione temporale è espressa sempre in termini di numeri indice; si osserva che nel caso della mobilità ciclabile la gravità è caduta, nel 2011, su valori relativi molto modesti, per poi riallinearsi nell'anno successivo su valori superiori al 100. Da notare che nel caso delle altre due componenti motorizzate l'andamento appare più stazionario. Solo per le auto nell'ulti-

mo biennio è stata registrata un'impennata della gravità che ha determinato uno scostamento evidente (fino a 170 punti) nel 2015. (Figura 6)
Per il terzo indice di gravità, (rapporto tra infortunati e numero di veicoli coinvolti), l'andamento temporale è, in ogni caso, decrescente. Ciò significa che a parità di infortunati, una discesa del trend al di sotto del valore di riferimento determina un aumento dei veicoli coinvolti, ossia in sostanza un aumento dei livelli d'uso dei veicoli.
In riferimento all'indice preso ora in considerazione la componente delle biciclette ha il valore in assoluto più alto: nel periodo 2006-2015 il valor medio è di 766 infortunati ogni mille biciclette, con punte di 835 infortunati ogni mille bici nel 2006. A seguire ci sono le due ruote a motore, con una media di 711 e un picco di 733 nel 2009 e per finire ci sono le auto con un valore medio di quattro volte inferiore delle bici, pari a 181 infortunati ogni 1.000 auto e con un valore massimo di 189 registrato nel 2009.
Occorre dire poi che per le tre componenti il valor medio non si discosta di molto dal valore massimo, sintomo di variazioni che negli anni sono tutto sommato modeste.
Analizzando più in dettaglio gli andamenti emerge una generale diminuzione degli infortunati rispetto ai veicoli che si mantiene sostanzialmente stabile (regolare) per tutta la durata del periodo in considerazione.
Per le biciclette, si passa in dieci anni dagli 835 infortunati ogni mille bici del 2006 ai 733 del 2015, con una diminuzione del -12%. A seguire ci sono le auto con una diminuzione del -9% e, infine, le due ruote a motore con una diminuzione pari al -7%, ovvero una diminuzione paria quasi alla metà di quella riscontrata per le bici. (Figura 7)
L'analisi degli infortunati in rapporto ai veicoli fa emergere una sostanziale diminuzione del rischio, se quale fattore di esposizione si assume il totale dei veicoli coinvolti. In generale, se il rischio viene misurato con il numero di infortunati, la bicicletta è diventata in questi dieci anni più pericolosa (in termini relativi); se invece, si considerano i decessi in rapporto agli infortunati, la bicicletta appare confondersi nel gruppo delle tre componenti, anche se nel tempo mostra un andamento dell'indice ben più casuale. Per ultimo se il rischio viene misurato in rapporto ai veicoli coinvolti il rischio tende, nella generalità dei casi, a ridursi, segno del fatto che aumentano i veicoli in circolazione sulla rete. Poiché nel caso delle biciclette gli infortunati aumentano (in valore assoluto) e l'in-

dice specifico riferito ai veicoli coinvolti diminuisce, si conclude che la circolazione su bicicletta è andata aumentando più che proporzionalmente rispetto alle altre due componenti considerate. In altre parole, non tenendo conto ovviamente del numero totale di veicoli in circolazione (il dato sulle biciclette non è disponibile, quello sui veicoli a due ruote motorizzate è stimato) e quindi anche di quelli che non hanno subito incidenti, ma basandoci solamente sui veicoli censiti nelle statistiche di incidentalità, emerge comunque un innalzamento dei livelli d'uso della bicicletta che ovviamente non fa che aumentare il rischio e quindi le occorrenze di incidenti su bicicletta.

Le caratteristiche dell'incidentalità su bicicletta

La struttura dell'incidentalità su bicicletta si basa sull'analisi delle circostanze presunte degli incidenti in cui rimangono coinvolte le biciclette. Il 75% degli incidenti con bici avvengono tra veicoli in marcia. In particolare più della metà degli incidenti (53%) sono scontri frontali-laterali e scontri laterali tra veicoli. Questi incidenti si verificano, in generale, in prossimità delle intersezioni e sono attribuibili al mancato rispetto delle regole o da comportamenti alla guida non idonei.

Tra le tipologie di incidenti che provocano il maggior numero di vittime (morti + feriti), troviamo gli scontri frontali-laterali (il 33%), gli scontri laterali (21%) ed, infine, i tamponamenti (13%). In termini di gravità (espressa come rapporto tra decessi e infortunati) gli incidenti più gravi sono le fuoriuscite dalla sede stradale, con 15 decessi ogni 100 vittime, a seguire i tamponamenti con circa 4 morti ogni 100 vittime e, in terza posizione, lo scontro laterale tra veicoli in marcia e lo scontro tra veicolo in marcia e veicolo fermo con circa 1,5 morti ogni 100 vittime.

L'incidentalità ciclabile in definitiva è generata dallo scontro tra veicoli e la pericolosità deriva, in generale, dalla vulnerabilità dei ciclisti nelle interferenze con le altre componenti di traffico. Aspetto da non trascurare è la pericolosità di alcuni incidenti generati per lo più da veicoli isolati che investono i ciclisti, a seguito di comportamenti alla guida scorretti (disattenzione, velocità elevate, non rispetto della segnaletica).

Le prime venti direttrici per numero di incidenti che hanno coinvolto delle bici, nel periodo che va dal 2006 al 2015 fanno parte integrante della viabilità principale. La prima in graduatoria è via Cristoforo Colombo con 110 incidenti, in media 11 incidenti ogni anno, l'ultima è il lungomare Paolo Toscanelli con una media di più di un incidente l'anno.

Le prime strade in graduatoria sono strade consolari che per lo più si caratterizzano per carreggiate molto ampie e, in alcuni casi, anche separate per senso di marcia. La morfologia di queste strade determina, soprattutto nelle ore di minor traffico, situazioni pericolose per i ciclisti dovute alle velocità sostenute dei veicoli a motore.

Direttrici Stradali	*N° Incidenti**
Via Cristoforo Colombo	110
Via Tiburtina	64
Via Prenestina	46
Via Casilina	44
Via Tuscolana	34
Via Litoranea	33
Via Aurelia	32
Via Flaminia	24
Viale Palmiro Togliatti	24
Via Appia Nuova	23
Via Salaria	22
Via Ostiense	19
Via Nomentana	18
Via della Magliana	16
Via Laurentina	16
Via del Corso	15
Via Trionfale	15
Viale Guglielmo Marconi	15
Via Portuense	14
Lungomare Paolo Toscanelli	13

Conclusioni

A conclusione di questo breve studio dell'incidentalità in cui rimangono coinvolti i ciclisti, emerge un significativo aumento del rischio per chi va in bicicletta da ascriversi, presumibilmente, ad un incremento della circolazione ciclabile e ad un cambiamento di percezione che, complice anche la crisi economica, ha stravolto modi, tempi e motivazioni che sono a base degli spostamenti effettuati da coloro che usano la bicicletta.

La bicicletta si trasforma progressivamente da un mezzo utilizzato per lo più nel tempo libero, nei giorni di riposo e in spazi protetti, ad un mezzo, economico nel suo mantenimento, che sempre più viene utilizzato per la mobilità di tipo casa-lavoro.

Il maggior uso in questi ultimi anni della bicicletta, anche in contesti non sempre protetti, aumenta, come è stato dimostrato in questa nota, il rischio di incorrere in incidenti. La componente ciclabile ha conosciuto un incremento dell'incidentalità che appare, per certi versi, in controtendenza, con quanto si è registrato per le altre componenti "motorizzate" del trasporto privato.

Ciò accresce la convinzione, anche se scarsamente supportata da dati specifici, che in questi ultimi anni la circolazione su bicicletta sia significativamente cresciuta, soprattutto la com-

ponente formata da chi usa la bicicletta sistematicamente sui tragitti casa-lavoro.
Non sempre però questa crescita della domanda è stata accompagnata da un adeguamento dell'offerta – piste o corsie dedicate, dispositivi di protezione su strada, moderazione del traffico, moderazione della velocità dei veicoli motorizzati o, ancor più, realizzazione di zone trenta ed isole ambientali; in sintesi ad un presumibile incremento della domanda di uso della bicicletta non è seguita una forte adozione di tutte quelle misure definibili con la comune dizione "città *bike friendly"* che concorrono a rendere più sicura la circolazione per le componenti più vulnerabili del traffico.
Spesso il ciclista si muove in un ambiente ostile in cui l'interazione con le altre categorie veicolari può, talvolta, rivelarsi fatale. Ciò però non vuol dire che chi usa la bicicletta debba porsi, pregiudizialmente, al di fuori di un sistema di regole che armonizzino la coesistenza e l'uso della strada delle diverse componenti veicolari.
E' stato evidenziato che le strade più pericolose, dove si riscontra la maggior frequenza degli incidenti, sono le strade principali – le consolari, strade anche di scorrimento – dove i volumi di traffico sono rilevanti.
Si ritiene fondamentale, non solo agire sul fronte infrastrutturale, ma occorre intervenire anche con azioni trasversali di formazione e sensibilizzazione (dirette a tutte le categorie di utenti, ciclisti e anche automobilisti/scooteristi), che mirino ad accrescere la consapevolezza dei reali rischi che si generano qualora si assumano, in strada, comportamenti sbagliati. Solo in questo modo, attraverso l'attuazione di politiche integrate di adeguamento delle strade e di informazione dei cittadini a partire dalle nuove generazioni nelle scuole, sarà possibile frenare l'inevitabile crescita dell'incidentalità su bicicletta tutelando questo mezzo che, nelle principali metropoli europee, sta assumendo sempre maggior rilievo nelle politiche per la mobilità urbana.

Note
1. Con il nuovo PGTU, l'Amministrazione Capitolina si è prefissata l'obiettivo di portare l'attuale share, nei prossimi 5 anni, al 4% sull'intero territorio e fino al 10% nel centro storico, e di promuovere prioritariamente l'uso della bicicletta per gli spostamenti sistematici di breve distanza (entro 5 Km), per l'accesso al sistema dei servizi di trasporto pubblico per gli spostamenti intermodali di più lungo raggio o più impegnativi. Tale strumento recepisce ed aggiorna il "Piano Quadro della Ciclabilità", approvato con Del. A.C. n. 87 del 2012 che prevede, a regime, una rete ciclabile "principale" di 245 Km e una rete ciclabile "locale" di 564 Km, la realizzazione di 2700 posti-bici nei nodi di scambio con il TPL e 9000 posti-bici nelle scuole.

LA MOBILITÀ STRADALE SOSTENIBILE: DATI E PROSPETTIVE

a cura di
Ing. G. Stella
Dott. F. Carmignani
Ing. T. Suppa
Ing. R. Trillini

commissione
Motorismo

visto da
Ing. S. Sciuto

Premessa

La sostenibilità ambientale rappresenta uno dei temi di maggiore attualità. A seguito dei danni prodotti sul pianeta si è universalmente radicata la necessità di un nuovo modo di rapportarsi con l'ambiente che ci ospita e di utilizzare le risorse naturali. In questo senso la problematica riguarda direttamente il settore della mobilità in quanto per la maggior parte dei trasporti vengono utilizzati combustibili fossili, con le note conseguenze sull'ambiente e sulla vita della collettività. Peraltro il settore dei trasporti stradali, per quanto contribuisca in maniera significativa, non è il principale responsabile dell'inquinamento ambientale ed è per questo motivo che è necessario collocare la problematica in un contesto più ampio.
Secondo *l'European Environment Agency* il settore dei trasporti sarebbe responsabile, nel suo complesso, di circa un terzo del consumo complessivo di energia nei Paesi europei e di più di un quinto delle emissioni di gas climalteranti[1]. Tra questi la CO_2, come noto, è una delle cause principali del riscaldamento del pianeta e dei cambiamenti climatici.
I dati nazionali[2] (cfr figure 1 e 2) rivelano che il trasporto su gomma rappresenta l'85% del totale dei consumi energetici del settore trasporti e contribuisce per il 28% alle emissioni totali di CO_2. E' interessante evidenziare, inoltre, che in Italia il 29% delle emissioni totali di CO_2 deriva

Figura 1: *Ripartizione % dei Consumi Energetici nel Settore Trasporti in Italia – (fonte dati cfr nota1)*

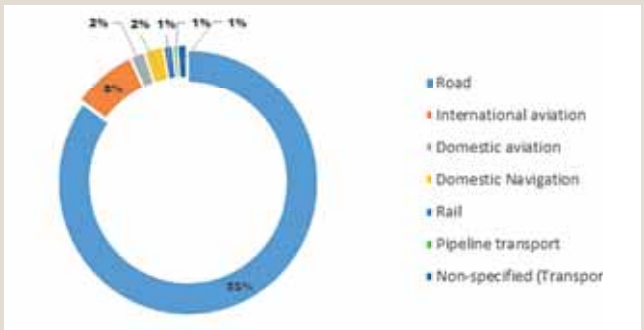
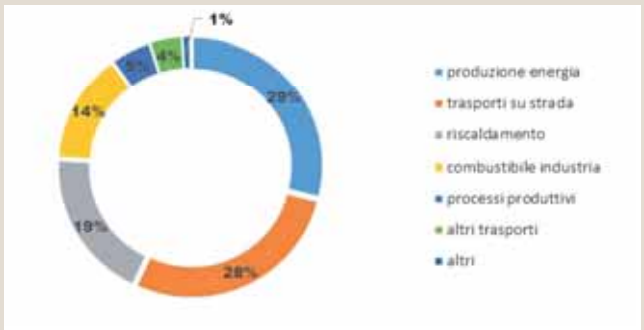


Figura 2: *Distribuzione % delle Emissioni di CO2 in Italia (fonte dati cfr nota1)*



dalla produzione di energia, la stessa energia necessaria per la ricarica delle batterie dei veicoli elettrici.
Considerando i consumi unitari in grammi equivalenti di petrolio per persona e per chilometro la figura 3[3] mostra i dati degli anni 2005 e 2014 per i diversi mezzi di trasporto. L'autovettura nell'uso urbano risulta il mezzo più sfavorito, per ovvi motivi di efficienza complessiva del mezzo, in particolare per lo sfavorevole rapporto tra la capacità di carico ed il peso del veicolo.
Analizzando le emissioni di CO_2 per le diverse tecnologie di trazione in termini dell'intero processo (dall'estrazione delle materie prime all'utilizzo del veicolo, *well to wheel*), figura 4[4], si rileva che i mezzi ibridi o elettrici, pur garantendo una sostanziale riduzione delle emissioni di CO_2, ne mantengono un livello significativo connesso con le modalità di produzione dell'energia elettrica.
Un boom delle auto elettriche, al di là dei prezzi ancora elevati, richiederebbe dunque una nuova configurazione ed una diversa gestione dell'intero sistema energetico e delle reti di alimentazione, soprattutto nei paesi con una maggiore produzione da fonti rinnovabili. Ad oggi, infatti, la maggior parte delle reti nazionali non sarebbe adeguata per far fronte alle necessità di un gran numero di veicoli elettrici e

Figura 3: *Consumi Unitari per Modalità (grammi equivalenti di petrolio a persona) – (fonte dati cfr nota1)*

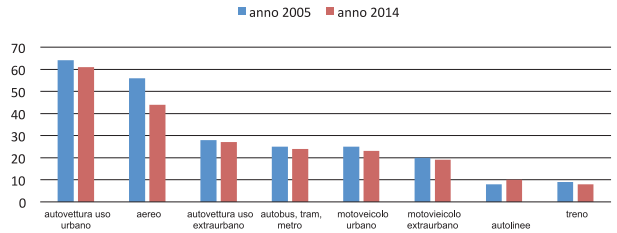
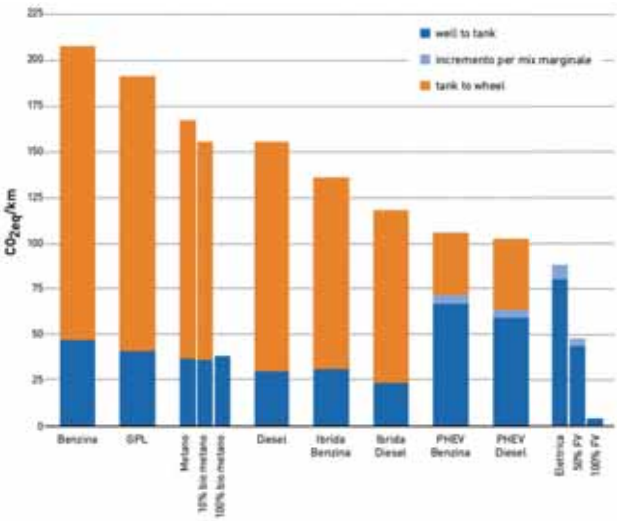


Figura 4: *Emissioni Climateranti well to wheel, suddivise per tecnologia (Fonte: Elaborazioni RSE per veicoli Euro 5 su dati ISPRA, MiSE, EEA e DOE)*



molti Paesi non dispongono delle infrastrutture adeguate per la ricarica. Il problema si aggraverebbe se si considera che l'orientamento è verso lo sviluppo di punti di ricarica rapida, che richiedono una più elevata potenza installata.
Nel Regno Unito, nell'ambito di un progetto di ricerca che si avvale di un sistema *vehicle to grid*, la rete nazionale prevede di acquisire energia dalle batterie delle auto negli orari di punta, in modo da bilanciare l'offerta e la domanda garantendo al contempo che le auto vengano ricaricate completamente entro il mattino seguente.
Non solo per i suddetti motivi, ma anche in relazione allo sviluppo delle tecnologie di propulsione e, soprattutto di capacità delle batterie e dei relativi sistemi di smaltimento, risulta evidente che il percorso verso la sostenibilità dei trasporti risulta ancora non semplice e non immediato.
Nella sostanza, sul tema della mobilità sostenibile sono in corso ricerche, studi, dibattiti, emanazioni di nuove norme e leggi, valutazioni di marketing a conferma che il mercato nel suo complesso è ancora alla ricerca di un suo equilibrio sia sul piano delle tecnologie dei veicoli e delle infrastrutture sia dal punto vista dell'impatto ambientale sia dal punto di vista commerciale.
Considerando il mercato dei veicoli, negli ultimi anni si è assistito ad un notevole ampliamento dell'offerta commerciale sia di quelli elettrici sia di quelli ibridi, ma i dati nazionali di vendita delle auto elettriche non sono incoraggianti: il parco circolante complessivo al 2016 era di 5743 autoveicoli elettrici, 117433 autoveicoli ibridi benzina/elettrico e 3332 autoveicoli ibridi gasolio/elettrico (fonte dati ACI[5]), con una buona quota rappresentata dai taxi, la cui utenza è stata tra le prime a rendersi conto dei vantaggi nel traffico urbano. Le immatricolazioni del 2016 (fonte dati ACI[6]) ammontano a 1374 autoveicoli elettrici (nel 2015 erano 1451, fonte dati MIT[7]), 37668 autoveicoli ibridi benzina/elettrico (nel 2015 erano 25527, fonte dati MIT[8]) e 436 autoveicoli ibridi gasolio/elettrico (nel 2015 erano 640, fonte dati MIT[9]).

Le origini delle auto a trazione elettrica[10]

L'attuale situazione del mercato dei veicoli con trazione elettrica o ibrida ricorda la storia di più di un secolo fa, quando la diffusione delle auto elettriche sembrava preludere ad un futuro ben più roseo di quanto non sia stato. Le auto elettriche non sono, infatti, una novità ma affondano le loro radici in tempi ormai molto lontani, tanto che il primo esempio risale al periodo tra il 1832 ed il 1839, ben prima dell'invenzione del motore a combustione interna.
Nel periodo a cavallo tra la fine dell'ottocento e gli anni venti in Francia, Germania Gran Bretagna, Stati Uniti ma anche in Italia, le auto elettriche trovarono una notevole diffusione, essenzialmente in quanto il motore elettrico rappresentava una soluzione più semplice e matura del motore a combustione interna.
In quel periodo il numero di auto elettriche vendute, pur essendo molto costose, superava quello dei veicoli con motore termico.
Nel 1897 le compagnie di taxi Bersey a Londra e Samuel's Electric Carriage and Wagon Company a New York (la prima compagnia di taxi della città) avevano flotte di veicoli esclusivamente elettrici (figura 5).
In quegli anni era elettrica l'auto da record, la Jamais Contente guidata da Camille Jenatzy (figure 6 e 7), che nel 1899 superò la soglia dei

100 km/h raggiungendo la velocità 105,88 km/h utilizzando due motori elettrici di potenza complessiva di circa 68 CV che agivano sulle ruote posteriori.
Anche Ferdinand Porsche, molto prima della costituzione della nota casa automobilistica, progettò nel 1898 per il costruttore viennese di carrozze Lohner un'auto elettrica, la **elettromobile Egger-Lohner C.2 Phaeton**, che può essere considerato il suo primo progetto di automobile. Nella figura 8 la pubblicità del veicolo con le specifiche di costruzione e prestazionali che indicano un'autonomia in piano di 3-6 ore, un peso delle batterie di 550 kg sul totale di 1350 kg, un tempo di consegna di tre mesi ed un prezzo di 9300 Franchi.
Nel 1899 la vettura debuttò a Berlino al Salone Internazionale dei veicoli a motore e prese parte ad una corsa per veicoli elettrici vincendo sia la gara sia il premio per la vettura più efficiente (figura 8).
A Ferdinand Porsche dobbiamo anche la prima auto ibrida della storia, la **Semper Vivus**, equipaggiata con due motori elettrici sui mozzi delle ruote anteriori alimentati da due generatori azionati da due motori termici a benzina De Dion Bouton raffreddati ad acqua. L'elettricità prodotta veniva utilizzata direttamente dai motori di trazione mentre il surplus serviva per la ricarica delle batterie. I generatori venivano, inoltre, utilizzati come motorini di avviamento dei due motori termici (figura 9).
Con lo scopo di destinarla al mercato, Ferdinand Porsche realizzò successivamente una versione migliorata, la **Lohner-Porsche Mixte**, con un unico motore termico Daimler da 5,5 litri e 25 CV, montato davanti all'asse anteriore, ed un unico generatore posizionato sotto il sedile del conducente. La produzione continuò fino al 1915, ma senza ottenere grandi successi commerciali, anche per l'elevato prezzo di vendita (figure 10 e 11).
Per quanto riguarda l'Italia, nel 1905 la marca francese Krieger, specializzata nella costruzione di autoveicoli elettrici e benzo-elettrici (così veniva chiamato l'attuale ibrido), impiantò a Torino una succursale, che due anni più tardi assunse il nome di Società Torinese Automobili Elettriche (STAE). La fabbrica non ebbe eccessiva fortuna e nel 1913 cessò ogni attività, dopo aver prodotto una vettura dotata di motore elettrico in posizione centrale, con trasmissione ad albero cardanico ed alimentazione con batteria alloggiata nel falso cofano motore. Il veicolo aveva una potenza di 10 CV, consentiva una velocità di 30 km/h ed assicurava un'autonomia di 80/90 km.
Nei primi anni del novecento la popolarità delle auto elettriche aumentò con l'arrivo dell'elettri-

LONDON ELECTRICAL CAB COMPANY, LTD.
From a Photograph taken outside the Company's premises, Jason Street, Lambeth.

Figura 5

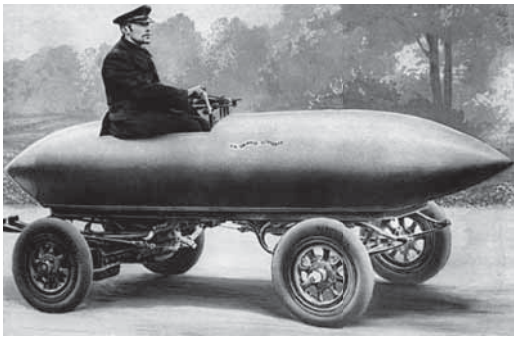


Figura 6:
La Jamais Contente

Figura 7:
La Jamais Contente

Figura 8

Figura 9

Figura 10

Figura 11

Figura 12:
Motori di trazione della Lohner Porsche (Museo Porsche)

città nelle case, rendendo più semplice la ricarica delle batterie, ed in quel periodo in America le vendite raggiunsero il loro picco (Figure 13 e 14). Per superare la mancanza di infrastrutture di ricarica, fu anche proposto sul mercato un servizio di sostituzione delle batterie (l'attuale battery swapping) già nel 1896.

All'epoca, come oggi, l'ostacolo principale allo sviluppo dei veicoli elettrici era rappresentato dalla ridotta capacità delle batterie; e solo l'invenzione di quelle al piombo avviò un suo concreto sviluppo ed un notevole successo dal punto di vista commerciale.

In quel periodo, però, rispetto alle auto a benzina, i veicoli elettrici godevano di diversi vantaggi. Infatti, pur considerando i limiti legati alla bassa velocità e alla limitata autonomia potevano contare sull'assenza di vibrazioni, di odori sgradevoli e di rumore; non richiedevano il cambio, l'avviamento manuale con la manovella o una lunga fase di avviamento come le vetture a vapore.

Al contrario, lo sviluppo delle auto elettriche fu ostacolato oltre che dalla scarsa capacità delle batterie dalle complicazioni costruttive dei sistemi elettrici di regolazione e da un prezzo quasi doppio di quelle con motore a combustione interna ma anche, si dice, da cartelli industriali.

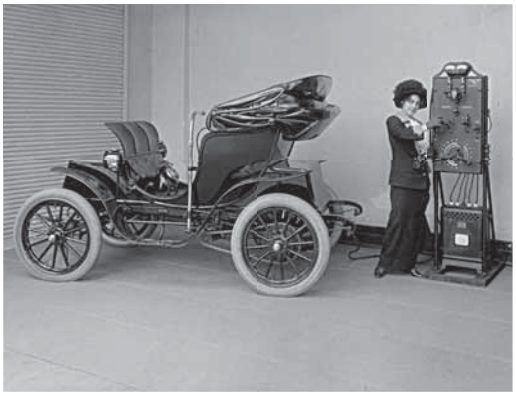
Negli anni '20 la vettura elettrica cominciò a perdere posizioni nel mercato automobilistico anche a causa di una serie di altre circostanze ed innovazioni: un'infrastruttura stradale migliore richiedeva veicoli con un'autonomia maggiore di quella offerta dalle vetture elettriche; l'abbassamento del prezzo del carburante a seguito della scoperte di grandi giacimenti di petrolio in Texas; l'invenzione del motorino d'avviamento da parte di Charles Kettering nel 1912 rendeva più semplice l'avviamento dei motori a combustione interna; la riduzione del rumore grazie all'utilizzo del silenziatore, inventato da Hiram Percy Maxim; la riduzione del prezzo grazie alla produzione di massa avviata da Henry Ford.

Per questi motivi, la maggior parte dei produttori di auto elettriche rallentarono le loro produzioni e negli anni '30 l'industria automobilistica elettrica era sostanzialmente scomparsa, e solo in circostanze eccezionali, come la guerra, si è cercato di rilanciarla, più per necessità che altro. Tra il 1940 e il 1941 Peugeot realizza la VLV (*Voiture Légère de Ville*), ovvero piccola vettura per città, una due posti lunga 2,67 metri, in alluminio che consente di limitare il peso a 365 kg, comprese le batterie, posizionate anteriormente. Il motore elettrico posteriore sviluppa una potenza di 2CV. La VLV ha un'autonomia di 80 km con una velocità massima di 32

km/h. Ne verranno prodotte 377 unità, prima dello stop nel 1943, e verrà utilizzata soprattutto dai medici.
Dopo decenni di oblio, le crisi energetiche degli anni '70 e '80 hanno provocato un rinnovato interesse per le automobili elettriche.
Negli ultimi anni una crescente attenzione verso le problematiche ambientali, l'aumento del livello di emissioni inquinanti e dei prezzi dei carburanti hanno ridestato l'attenzione dei governi e dell'industria verso un nuovo concetto di mobilità e una maggiore sensibilità verso un futuro più pulito. Molti paesi hanno promosso nuovi programmi di ricerca e sviluppo per la realizzazione di veicoli ecologici ibridi o elettrici oltre ad offrire agevolazioni per il loro acquisto e la loro gestione.
Ad oggi, dal punto di vista tecnico sono state ampiamente superate le problematiche di regolazione sia per i veicoli ibridi sia per i veicoli elettrici; permangono, per i veicoli elettrici, i problemi di autonomia connessi con la capacità delle batterie e, in alcuni Paesi come il nostro, la disponibilità di adeguate infrastrutture di ricarica.

Figura 13

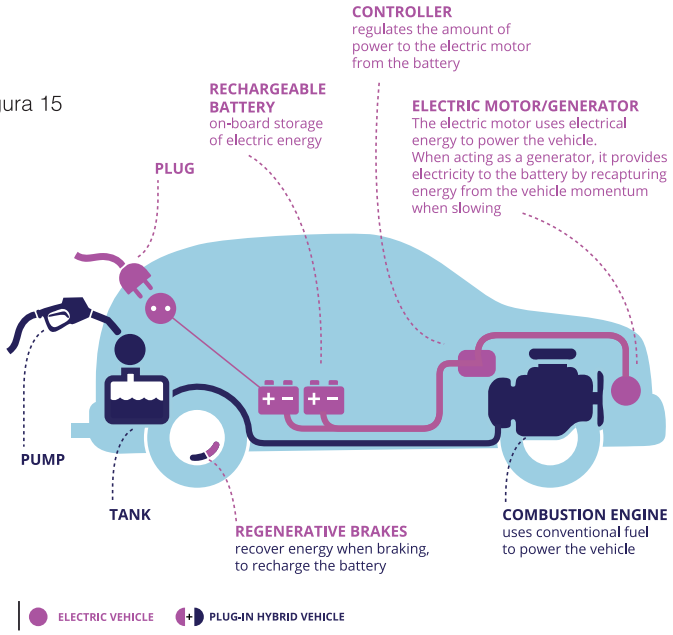
Figura 14



Le architetture più diffuse nella trazione elettrica

Attualmente il mercato offre una vasta gamma di veicoli che utilizzano un sistema di trazione elettrico in senso esclusivo o associato a motori a combustione interna. Le diverse architetture spaziano dalla trazione esclusivamente elettrica, ***All-Battery Electric Vehicle*** **(BEV)**, che ad oggi rappresentano solo una piccola parte del parco dei veicoli circolanti sia in Italia sia in Europa, ai più diffusi veicoli ibridi.
Queste tipologie di trazione sono declinate dai costruttori con soluzioni molto diverse, a conferma del fatto che sia per la trazione elettrica sia per la trazione ibrida la tecnologia non hanno raggiunto ancora la loro piena maturità.
Nella sostanza, la motorizzazione ibrida è caratterizzata dalla presenza di una o più macchine elettriche che supportano il funzionamento di un motore a combustione interna, il cui utilizzo è ottimizzato rispetto alle migliori condizioni in termini di efficienza.
Nella tecnologia ***Hybrid Electric Vehicle*** **(HEV)** il motore termico è associato a un motore elettrico che può funzionare tanto in combinazione con il motore a combustione che autonomamente (in modalità puro elettrico). Il sistema non necessita di ricarica elettrica esterna ed è in grado di provvedere al recupero di energia e al suo riutilizzo per massimizzare l'efficienza complessiva. Parte dell'energia per la ricarica delle batterie proviene dalle ruote con il recupero in fase di frenatura. La tecnologia ibrida presenta, pertanto, particolari vantaggi dal punto di vista dei consumi e delle emissioni nell'utilizzo urbano, ove la trazione elettrica supporta quella termica nelle condizioni di più bassa efficienza e per il considerevole recupero dell'energia nella frenata.
La tecnologia ***Plug-in Hybrid Electric Vehicle*** **(PHEV)** è un ibrido in cui il veicolo può avere una significativa autonomia in puro elettrico (da poche a diverse decine di km in base al dimensionamento scelto) grazie ad un pacco batterie di opportuno contenuto energetico, che può essere ricaricato dalla rete. Questi veicoli offrono, di fatto, la possibilità di godere dei vantaggi della trazione elettrica mantenendo la libertà (in termini di autonomia e facilita di rifornimento) offerta dalla trazione con motore termico. La possibilità di marciare in puro elettrico per percorrenze non trascurabili e le emissioni di CO_2 molto ridotte, fanno si che i PHEV godano, in diversi Paesi, di benefici e incentivazioni quasi paragonabili a quelli dei veicoli puramente elettrici.
Le auto ibride plug-in (figura 15[11]) rappresentano, di fatto, una soluzione intermedia tra quelle a trazione elettrica e quelle ibride. Nella so-

Figura 15



stanza, infatti, le auto plug-in hanno la stessa architettura delle ibride (un motore termico ed un motore elettrico), ma declinata con proporzioni diverse per quanto riguarda la potenza del motore elettrico e la capacità delle batterie. Inoltre, da qui il nome, a differenza delle ibride consentono la ricarica delle batterie attraverso prese esterne, compresa la rete domestica.
A cavallo tra il plug-in e il veicolo elettrico puro, troviamo i veicoli elettrici ***Range Extended Electric Vehicle*** **(REEV),** ad autonomia estesa o ibridoserie. In questo caso la percorrenza in puro elettrico è generalmente superiore a 100 km e il motore termico non è mai utilizzato per la trazione, ma esclusivamente per ricaricare le batterie quando lo stato di carica scende al di sotto di un livello predefinito.
I veicoli a idrogeno o ***Fuel Cell Electric Vehicle*** **(FCEV)** sono essenzialmente veicoli a trazione elettrica che utilizzano l'idrogeno immagazzinato in un serbatoio pressurizzato e una cella a combustibile per la produzione di energia a bordo. I veicoli FCEV hanno di norma anche un sistema di accumulo a batterie che permette di recuperare l'energia di frenatura e semplificare/velocizzare il warm-up della cella a combustibile. Sono usualmente riforniti con idrogeno gassoso a pressioni tra 35 MPa e 70 MPa. Attualmente, per le autovetture, l'efficienza su strada è di circa 1 kg di idrogeno ogni 100 km percorsi, con autonomie da circa 500 km a 750 km. I tempi di ricarica possono essere inferiori ai 5 minuti se il rifornimento avviene con pressione di 70 MPa, fino a oggi non permessa in Italia per i limiti imposti dal Decreto del Ministero dell'Interno del 31 agosto 2006, n. 213 (*Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione*). La complessità della catena energetica dell'idrogeno, caratterizzata da più fasi di conversione, può essere però causa di una minor efficienza globale e di un conseguente maggior consumo di risorse primarie rispetto ad altre soluzioni di trazione alternativa. Molte case costruttrici comprendono questo sistema di trazione all'interno dei propri piani strategici e Honda, Hyundai e Toyota propongono attualmente a listino un modello con celle a combustibile. Il numero di veicoli circolanti in Europa è ancora inferiore a 200 (autovetture e autobus), il costo di acquisto si mantiene piuttosto alto e l'infrastruttura di rifornimento è oggi ferma a qualche esperienza pilota (circa 300 stazioni nel mondo).

Il parco dei veicoli elettrici ed ibridi

Il parco nazionale delle autovetture ibride ed elettriche riportato nelle figure 16 e 17 (fonte dati UNRAE[12]) rappresenta in Italia valori marginali, pur considerando un trend in sostanziale crescita negli ultimi anni.
Per quanto riguarda il dato complessivo dell'Europa, i veicoli elettrici per passeggeri rap-

Figura 16: *Immatricolazioni autoveicoli ibridi ed elettrici in Italia*

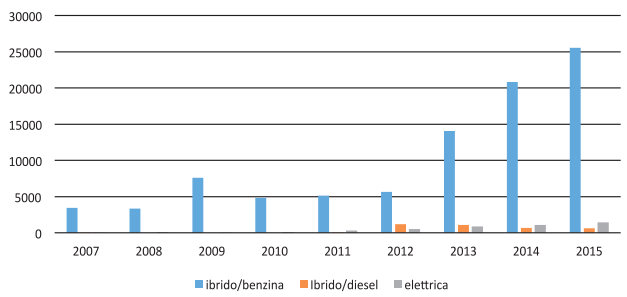
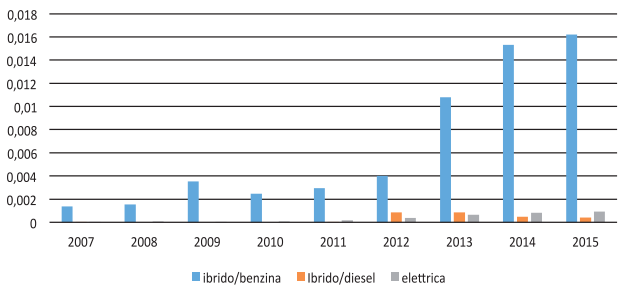
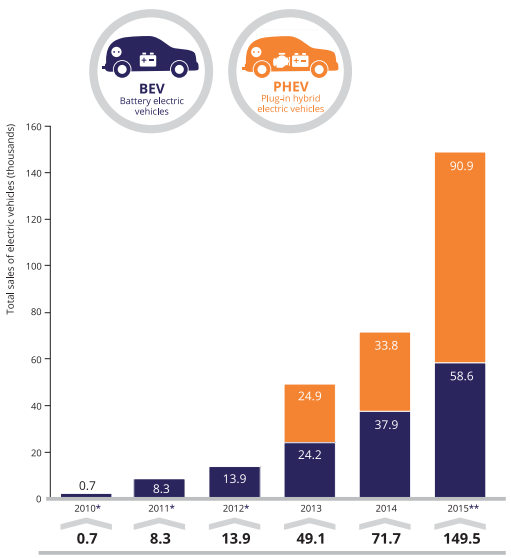


Figura 17: *Quote di mercato autoveicoli ibridi ed elettrici in Italia*



presentano solo il 1,2 % di tutte le automobili nuove vendute nel 2015 mentre il parco veicoli elettrici è lo 0,15 % (dati della European Environment Agency, *Electric vehicles in Europe*, 2016).
Pur mantenendo volumi assoluti piuttosto modesti ma molto superiori a quelli elettrici, le vendite dei modelli ibridi a benzina sono aumentate notevolmente a partire dal 2013, sia per l'aumento della gamma dei modelli disponibili sia per gli incentivi previsti da vari Paesi.
I dati del 2015 indicano (cfr figura 18[13]) vendite per circa 150.000 nuovi veicoli ibridi e elettrici plug-in, dei quali circa il 40% BEV. La distribuzione delle vendite è concentrata in sei Stati membri, che rappresentano quasi il 90% di tutte le vendite di veicoli elettrici: i Paesi Bassi, il Regno Unito, la Germania, la Francia, la Svezia e la Danimarca.
Il maggior numero di vendite di BEV all'interno dell'UE-28 è stato registrato in Francia (circa 17.650), in Germania (circa 12.350 veicoli) e nel Regno Unito (circa 9900 veicoli). Il maggior numero di vendite di PHEV è stato registrato nei Paesi Bassi (circa 41.000 veicoli) e nel Regno Unito (circa 18.800 veicoli)[14].
La crescita del mercato delle auto elettriche sarà probabilmente sostenuta, nel prossimo futuro, dall'annuncio da parte di alcune nazioni di limitare la vendita di nuove autovetture con alimentazione tradizionale.
Ad esempio, esponenti dei governi di Francia e Gran Bretagna hanno annunciato che nel 2040 sarà vietata la vendita di nuove auto a benzina o diesel. Il governo norvegese ha annunciato (anche se i dettagli non sono ancora chiari) che vieterà la vendita di mezzi con motori tradizionali a partire dal 2025. A questo proposito è interessante notare che nel mese di gennaio 2017 le vendite di auto ibride e elettriche sono state il 51,4% del totale delle auto immatricolate in Norvegia.
Anche l'India ha annunciato che vieterà la vendita di auto non elettriche già dal 2030.

Figura 18



Le infrastrutture per la ricarica

Uno dei motivi dei ridotti volumi di vendita delle auto elettriche è, come noto, il limitato numero delle stazioni di ricarica.
Attualmente in Europa sono disponibili circa 92.000 postazioni di ricarica pubbliche[15]. Alle postazioni pubbliche vanno aggiunti i punti di ricarica privati installati all'interno delle abitazioni o in aree private accessibili da utenti esterni, presenti nei parcheggi a pagamento, nei centri commerciali o presso le strutture per il tempo libero.
Ma qual è il numero ideale dei punti di ricarica e come dovrebbero essere distribuiti e con quali tempi di realizzazione?
Le risposte a queste domande dipendono molto da come si svilupperà in futuro la tecnologia dei veicoli elettrici e delle relative vendite. Le vendite probabilmente non aumenteranno se l'infrastruttura dei punti di ricarica rimarrà la stessa. Tuttavia ha anche poco senso estendere in modo significativo l'infrastruttura senza tener conto di come la mobilità individuale e soprattutto il mercato dei veicoli elettrici si svilupperanno in futuro. Idealmente il mercato dei veicoli e l'infrastruttura dovrebbero crescere contemporaneamente.
La direttiva europea *L'infrastruttura dei combustibili alternativi del 2014* fornisce una stima del rapporto ideale dei punti di ricarica rispetto al numero dei veicoli elettrici: almeno un punto di ricarica pubblico ogni 10 veicoli, tenendo conto dei nuovi sviluppi dei veicoli, delle batterie e della tecnologia delle infrastrutture di ricarica e supponendo che la maggior parte dei proprietari dei veicoli elettrici dispongano di propri punti di ricarica.
Anche il documento della Commissione Europea del 2016 *La strategia europea per la mobilità a basse emissioni* evidenzia l'importanza di disporre di punti di ricarica pubblici al fine di consentire la diffusione dei veicoli elettrici.
Nella maggior parte dei paesi europei esistono solo poche migliaia punti di ricarica pubblici, prevalentemente lenta. I Paesi Bassi conducono la classifica con una rete di oltre 23.000 postazioni pubbliche nel 2016; seguono la Germania (circa 14.000), la Francia (circa 13.000),

il Regno Unito (circa 11.500), la Norvegia (circa di 7.600). In fondo alla classifica, con meno di 40 stazioni di ricarica troviamo Bulgaria, Cipro, Islanda e Lituania[16]. Alcuni Paesi stanno rallentando l'installazione di nuovi punti pubblici di ricarica lenta, riversando una maggiore attenzione verso l'espansione di infrastrutture di ricarica rapida.
All'interno della Rete transeuropea dei trasporti (TEN-T), programma per sostenere la costruzione e il miglioramento delle infrastrutture del trasporto tra le Regioni, è prevista la distribuzione pilota di 115 punti di ricarica ad alta potenza sulle strade europee centrali, per consentire di coprire lunghe distanze dei veicoli elettrici e promuovere il trasporto sostenibile (TEN-T, 2016[17]).
La direttiva europea 2014/94/UE prevede la definizione di specifici piani d'azione nazionali sull'infrastruttura dei punti di ricarica e per l'installazione di un numero appropriato di punti di ricarica elettrica accessibili al pubblico entro la fine di 2020.
La prevista diffusione dei veicoli elettrici e le relative necessità di ricarica comporteranno una diretta e più significativa interazione tra il mondo della mobilità e quello dei sistemi elettrici nazionali e richiederà una diversa gestione dei flussi energetici in termini generali. Ciò anche in considerazione del maggiore rilievo assunto dall'incidenza delle fonti rinnovabili, per cui potranno assumere una certa importanza gli accumuli diffusi, incluse le batterie dei veicoli elettrici messe a disposizione quando i veicoli sono parcheggiati.
La ricarica dei veicoli elettrici in ambiente privato potrà, inoltre, essere impiegata dai possessori di impianti di produzione di media e piccola dimensione, prevalentemente fotovoltaici, per incrementare l'autoconsumo dell'energia generata in loco.
Ad oggi in Italia si contano circa 2.750 punti di ricarica per veicoli elettrici, distribuiti su circa 1.400 colonnine (fonte dati CEI-CIVES). A questi si aggiungono i punti di ricarica privati e circa 70 punti ad alta potenza (13 a Milano) e installati tra il 2013 e il 2016.

Il quadro normativo

Il quadro normativo europeo e nazionale riguardante lo sviluppo sostenibile della mobilità è alquanto articolato e, soprattutto, in continua evoluzione. Ci limitiamo, pertanto, a indicare di seguito i principali contenuti del più recente riferimento normativo che disciplina anche lo sviluppo delle infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici.
Il Decreto Legislativo 16 dicembre 2016 n. 257: ***Disciplina di attuazione della direttiva 2014/94/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 22 ottobre 2014, sulla realizzazione di una infrastruttura per i combustibili alternativi*** (GU n.10 del 13/01/2017 - Suppl. Ordinario n. 3).
Il Decreto recepisce una specifica direttiva comunitaria, la ***2014/94/UE***, ed ha la finalità di ridurre la dipendenza dai combustibili di origine fossile e attenuare l'impatto ambientale dell'intero settore dei trasporti attraverso l'incremento dell'utilizzo di combustibili alternativi.
Il Decreto riguarda tutti i combustibili alternativi, intesi come *i combustibili o le fonti di energia che fungono, almeno in parte, da sostituti delle fonti fossili di petrolio nella fornitura di energia per il trasporto e che possono contri-*

buire alla sua decarbonizzazione e migliorare le prestazioni ambientali del settore trasporti. In concreto, sono l'elettricità, l'idrogeno, i biocarburanti, i combustibili sintetici e paraffinici, il gas naturale, il gas di petrolio liquefatto.
Il Decreto è attuato mediante il Quadro Strategico Nazionale (cfr articolo 3 e allegato III del Decreto) che stabilisce, tra l'altro, i tempi di realizzazione di un numero adeguato di infrastrutture per le diverse modalità di trasporto ed è articolato in quattro sezioni dedicate alla fornitura di: elettricità per il trasporto; idrogeno per il trasporto stradale; gas naturale per il trasporto e per altri usi; gas di petrolio liquefatto per il trasporto.
Per il trasporto stradale, le infrastrutture consistono in punti di ricarica per i veicoli elettrici e di rifornimento di idrogeno, biocarburanti, combustibili sintetici e paraffinici, gas naturale, compresi il biometano in forma gassosa (GNC) e liquefatta (GNL) e il gas di petrolio liquefatto (GPL).
Le principali scadenze temporali fissate dal Decreto sono:

- il 2020 per i punti di ricarica per i veicoli elettrici;
- il 2025 per i punti di rifornimento dell'idrogeno e del gas naturale.

Il Decreto definisce, inoltre, le modalità e le informazioni da fornire agli utenti riguardo i veicoli e la dislocazione dei punti di ricarica e di rifornimento dei combustibili alternativi.

Per quanto riguarda i punti di ricarica, è previsto che i comuni adeguino entro il 31 dicembre 2017 i loro regolamenti in modo da prevedere che ai fini del conseguimento del titolo abilitativo edilizio gli edifici di nuova costruzione obbligatoriamente prevedano la predisposizione all'allaccio per l'installazione di punti di ricarica per veicoli elettrici.

Ai fini della diffusione dell'utilizzo del GNC, del GNL e dell'elettricità nel trasporto stradale, l'art. 18 prevede che *le pubbliche amministrazioni, gli enti e le istituzioni da esse dipendenti o controllate, le regioni, gli enti locali e i gestori di servizi di pubblica utilità per le attività svolte nelle province ad alto inquinamento di particolato PM10 di cui all'allegato IV, al momento della sostituzione del rispettivo parco autovetture, autobus e mezzi di servizio di pubblica utilità, ivi compresi quelli per la raccolta dei rifiuti urbani, sono obbligati all'acquisto di almeno il 25 per cento di veicoli a GNC, GNL e veicoli elettrici e veicoli a funzionamento ibrido bimodale e a funzionamento ibrido multimodale entrambi con ricarica esterna, nonché' ibridi nel caso degli autobus.*

La percentuale è calcolata sugli acquisti programmati su base triennale a partire dalla data di entrata n vigore del Decreto (14/01/2017). Le gare pubbliche che non ottemperano a tale previsione sono nulle. Sono fatte salve le gare già bandite alla data di entrata in vigore del Decreto.

In sede di aggiornamento del quadro strategico, di cui all'allegato III del Decreto in questione, la quota di rinnovo flotte del 25 % potrà essere aumentata e potrà comprendere anche l'acquisto di veicoli a idrogeno.

L'allegato III del Decreto è costituito dal Quadro Strategico Nazionale, un corposo documento nel quale vengono illustrate, per le diverse modalità di trasporto, le politiche europee e nazionali, lo stato tecnologico, gli scenari, le misure di sostegno, l'interoperabilità a livello Europeo.

Per quanto riguarda i veicoli elettrici, il Quadro Strategico Nazionale rimanda al Piano Nazionale Infrastrutturale per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica (PNire),di cui all'articolo 17 septies della legge n. 134 del 7 agosto 2012.

Sempre riguardo il trasporto stradale, nell'allegato riferito ai veicoli alimentati con l'idrogeno (Fuel Cell Electric Vehicle) è interessante rilevare che gli scenari tra il 2020 ed il 2050 in Europa prevedono condizioni molto favorevoli per i BEV (veicoli elettrici a batteria) e per i FCEV (veicoli elettrici alimentati da celle a combustibile di idrogeno). Queste previsioni si basano:

- sulla convergenza del Costo Totale di Proprietà (Total Cost of Ownership, TCO, che comprende i costi per la manutenzione e per il carburante) verso quello delle vetture dotate di motorizzazioni tradizionali ICE (Internal Combustion Engine);
- sulla valutazione delle emissioni specifiche di CO2 tra i sistemi di trazione alternativi nell'accezione WTW (Well to Wheel, dal pozzo alle ruote) comprensivi, pertanto, di tutte le emissioni generate per la produzione a partire dalla fonte energetica primaria;
- sull'aumento dell'autonomia di ambedue le tecnologie di veicoli elettrici.

Come detto, per le infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici, il DL 257 fa riferimento al **Piano Nazionale Infrastrutturale per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica** (PNire). Aggiornato l'ultima volta nell'estate 2016, il Piano ha come oggetto la realizzazione di reti infrastrutturali per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica ed i relativi interventi di recupero del patrimonio edilizio. Esso fornisce specifiche linee guida finalizzate a garantire lo sviluppo unitario del servizio di ricarica a livello nazionale, tenendo conto dell'effettivo fabbisogno presente nelle diverse realtà territoriali. Fabbisogno valutato sulla base dei profili della congestione di traffico veicolare privato, dei livelli d'inquinamento atmosferico e dello sviluppo della rete stradale urbana ed extraurbana.

Il testo prevede l'introduzione di procedure di gestione del servizio e di agevolazioni per l'ammodernamento degli impianti, la promozione della ricerca tecnologica e la realizzazione di programmi integrati a sostegno dell'adeguamento tecnologico degli edifici esistenti. Il valore economico complessivo del progetto infrastrutturale ammonta a 72,2 milioni di euro, di cui il Ministero dei Trasporti finanzierà parte degli interventi con un apposito Fondo.

Altra interessante norma riferita in modo specifico alla trazione elettrica è il regolamento emanato con il Decreto Ministeriale n° 219 del 1 dicembre 2015, pubblicato sulla GU Serie Generale n.7 del 11/01/2016: ***Sistema di riqualificazione elettrica destinato ad equipaggiare autovetture M ed N1*** e disciplina le procedure tecniche ed amministrative necessarie per poter sostituire il motore termico di alcune categorie di veicoli (autovetture, autobus e autocarri) con un sistema di propulsione elettrica.

Per il regolamento un sistema di riqualificazione elettrica è costituito da un motopropulsore, un pacco batterie, un'interfaccia con la rete per la ricarica del pacco batterie nonché dagli eventuali sottosistemi necessari al corretto funzionamento del veicolo trasformato.

Gli autoveicoli interessati sono quelli delle categorie M ed N1 del codice della strada:

- M, i veicoli a motore per il trasporto di persone con almeno quattro ruote (autovetture ed autobus);
- N1, i veicoli a motore per il trasporto merci con almeno quattro ruote e massa massima non superiore a 3.5 tonnellate (autocarri).

In concreto, il regolamento prevede:

- che il sistema di riqualificazione elettrica sia omologato da parte della Motorizzazione;
- che il Sistema sia installato da parte di un'impresa esercente l'attività di autoriparazione (installatore);
- che il Sistema non alteri le originarie caratteristiche del veicolo in termini di prestazioni e sicurezza;
- il preventivo nulla osta da parte del costruttore del veicolo o, in alternativa, il superamento di specifiche verifiche e prove da parte della Motorizzazione necessarie ad accertare il mantenimento del livello di sicurezza e delle prestazioni del veicolo originario nel caso in cui il Sistema richieda sostituzioni o modifiche di parti del veicolo al di fuori del sistema di propulsione stesso, ovvero di software per la gestione dei sistemi anti-bloccaggio, controllo della trazione e della stabilità del veicolo, con altri di caratteristiche diverse da quelli previsti dal costruttore.

La norma stabilisce che sui veicoli che siano stati oggetto di riqualificazione elettrica non è possibile ripristinare l'uso del motore termico.

Nell'ambito del quadro normativo nazionale è utile segnalare, inoltre, il documento del maggio 2017 redatto dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, dal Ministero dello Sviluppo Economico, dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e da Ricerca sul Sistema Energetico *Elementi per una roadmap della mobilità sostenibile: inquadramento generale e focus sul trasporto stradale.* Il corposo documento delinea lo stato dell'arte e le prospettive della mobilità sostenibile, con particolare riferimento al trasporto stradale.

La formula E ed il gran premio di Roma[18]

La trazione elettrica è presente nel motorismo sportivo da diversi anni. La tecnica ibrida è applicata in Formula 1 dal 2014 e nello stesso anno è nato il campionato mondiale di Formula E.
Il prossimo 14 aprile si svolgerà a Roma su una pista di 2,8 km al quartiere dell' Eur il primo Gran Premio per vetture elettriche ospitato in Italia, valevole per la serie FIA (Federazione Internazionale dell'Automobile).
Giunto alla sua quarta edizione, il Campionato FIA FE prevede quest'anno quattordici corse, tutte su circuiti cittadini, nelle più importanti capitali: New York, Londra, Parigi, Santiago del Cile, Città del Messico, Montreal, e ancora Honk Kong, Marrakesch. In calendario anche Zurigo, ed è un altro avvenimento epocale, visto che in Svizzera dal 1954 c'era il divieto di correre in circuito.
La Formula E sta ribaltando perplessità e paletti. A Roma, dove l'ultimo Circuito di Caracalla risale al 1951, ci sono stati diversi tentativi di organizzare un Gran Premio in città, seguendo l'esempio di Montecarlo, e quello recente di Baku. Di tutti questi progetti non se ne è fatto nulla.
Invece l'e-prix del 14 aprile sembra aver messo tutti d'accordo. Il forte messaggio che ne deriva in termini di elettrificazione al 100% e di impatto zero sono gli elementi vincenti di uno spettacolo unico, capace di interessare anche il pubblico meno appassionato.
Le macchine, che derivano dall'iniziale monoposto Dallara, simile a quelle della Formula Indy, con strutture che impediscono eventuali agganci, sono belle e sicure, il livello di piloti alto. Lucas Di Grassi e Sébastien Buemi, che hanno vinto le prime tre stagioni, arrivano dalla F1, dove è difficile rimanere anche a dispetto dei risultati, se non si dispone di adeguati sponsor. Pure in F1 hanno corso Jean-Eric Vergne, Nick Heidfeld, Nelson Piquet jr, Jerome D'Ambrosio, Esteban Gutierrez. Il gruppo è completato dal tre volte campione del mondo del WTCC José Maria Lopez, Nicolas Prost e altri ancora.
Di monoposto spinte da un motore elettrico si è cominciato a parlare concretamente nel 2010. In realtà quest'ultima non è una novità assoluta per il motorsport.
Nell'ambito dei Gran Premi "dimostrativi" destinati alle vetture elettriche e solari tra fine anni

ottanta e inizio novanta, dove si misuravano prototipi abbastanza particolari o vetture "normali" come le Panda, con cui girò lo stesso Alain Prost all'epoca della sua militanza in Ferrari, Renault aveva presentato la Electro Campus, in pratica l'omonima monoposto addestrativa, dotata di un motore Siemens asincrono a comando vettoriale, capace di 170 km/h. Si trattava per la verità di un veicolo puramente sperimentale, che poi non ha avuto ulteriori sviluppi, e la Formula Campus ha percorso tutta la sua carriera internazionale con il solo motore benzina.
Stesso destino anche per la FORMULEC la EF01, nata da un progetto di SEGULA Matra Technologies, branca automobilistica del gruppo francese. Si trattava di una monoposto a trazione interamente elettrica, equipaggiata con due motori Siemens, cambio Hewland a due marce, e batterie agli ioni di litio della SAFT, con prestazioni simili a una F3 (vettura monoposto con motore due litri con circa 250 CV), a partire da una velocità di 250 km/h e un'accelerazione da 0 a 100 km/h in 3 secondi. Ma dopo una serie di test e presentazioni anche Formulec non va in porto.

A questo punto, nel 2012 interviene la FIA. Il concetto di monoposto elettrica viene promosso dal Presidente Jean Todt per dimostrare il potenziale della mobilità sostenibile. Su queste basi nasce una struttura guidata da Alejandro Agag, un industriale spagnolo, genero del Primo Ministro Aznar, già impegnato nelle corse come team-owner.
Un lungo lavoro di messa a punto, che coinvolge il meglio a livello tecnologico, come Williams, McLaren, Michelin e Dallara, e nel mese di settembre del 2014 si corre il primo e-prix a Beijing. In griglia ci sono 20 vetture schierate dai team Andretti, Audi Sport ABT, Renault, Virgin, e tra i piloti Bruno Senna, Nelson Piquet Jr e Nicolas Prost, che vincerà la gara.
Per la prima stagione tutti i team impiegano lo stesso tipo di vettura e di motore prodotto dalla McLaren Electronic Systems, che fornisce anche l'elettronica e il cambio. La stagione seguente diviene libera la tecnologia del motore. Sette costruttori realizzano nuove soluzioni per i motori elettrici, inverter e cambio, e la Formula E comincia a ispirare lo sviluppo delle automobili di serie.
Il cambio dal 2015 è libero e la scelta dei team

è molto varia, dal 5 marce al due marce. Il regolamento prevede un massimo di 2 MGU (Motor Generator Unit), collegate con l'asse posteriore. Per quanto riguarda le prestazioni l'accelerazione 0-100 km/h è circa 3 secondi e la velocità massima 230-240 km/h.
Il telaio in carbonio e kevlar è fornito dall'italiana Dallara, le batterie al litio dalla Williams. Il peso è fissato in 880 kg per l'intera vettura e 230 kg per le batterie.
Il format di gara prevede la formazione della griglia senza giro di formazione e la partenza da fermo. La durata è di circa 50 minuti, con una sosta obbligatoria per il cambio vettura. In configurazione gara la potenza è limitata a 170 kW, ma i primi tre piloti votati dal pubblico hanno a disposizione tre fan-boost di 100 kJ extra di energia in una finestra compresa tra 180 e 200 kW. A Roma vedremo tuttavia delle Formula E un po' diverse da quelle iniziali, con una potenza in qualifica di 220 kW e potenza massima disponibile in gara 180 kW, i telai Spark Racing Technology, che s'è aggiudicata la fornitura per un biennio.
Ma siamo ancora all'inizio!
Come è noto sono già presenti Renault che appoggia il team DAMS, campione nei primi due campionati con Sébastien Buemi, Audi Motorsport rappresentata da ABT, Citroën-DS con il team Virgin, Mahindra, ed ora pronto al debutto Jaguar Racing, mentre hanno confermato il loro interesse BMW e Porsche. Insomma arrivano i grandi costruttori e la Formula E diventerà un vero campionato.

Note
1 European Environment Agency. www.eea.europa.eu/themes/transport.
2 Fonte dati Elementi per una roadmap della mobilità sostenibile. Inquadramento generale e focus sul trasporto stradale. Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare; Ministero dello Sviluppo Economico; Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti; RSE Ricerca Sistemo Energetico. Maggio 2017.
3 Cfr nota 1.
4 Cfr nota 1.
5 Annuario Statistico 2017, Consistenza parco autovetture secondo l'alimentazione e la cilindrata al 31/12/2016.
6 Cfr nota 5.
7 Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Centro Elaborazione dati, Mercato del Nuovo anno 2015.
8 Cfr nota 7.
9 Cfr nota 7.
10 Parte delle informazioni sono tratte da Nigel Burton: A history of electric cars, 2013.
11 Figura tratta da Electric Vehicles in Europe, European Environment Agency. Report No 20/2016.
12 L'auto 2016. Sintesi statistica. UNRAE (Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri).
13 Figura tratta da Electric Vehicles in Europe, European Environment Agency. Report No 20/2016.
14 Fonte dati EAFO (European Alternative Fuels Observatory).
15 Fonte dati EAFO (European Alternative Fuels Observatory), 2016.
16 Fonte dati EAFO (European Alternative Fuels Observatory), 2016.
17 Infrastructure TEN-T Connecting Europe. //ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure_en.
18 Le foto sono tratte da AUDI MEDIA CENTER -MEDIA DS PERFORMANCE - RENAULT PRESSE.

a cura di
Ing. G. Pino

commissione
Gestione Impianti Nucleari

visto da
Ing. G. Bava
Ing. A. Taglioni

APPROFONDIMENTI E INCERTEZZE SUGLI ELEMENTI TECNICI DI PUBBLICO DOMINIO CIRCA I CRITERI DI LOCALIZZAZIONE DI UN DEPOSITO NAZIONALE PER RIFIUTI RADIOATTIVI

La Commissione Gestione Impianti Nucleari dell'Ordine degli ingegneri della Provincia di Roma sta seguendo con attenzione le attività che ormai da diversi anni le amministrazioni e gli enti pubblici competenti hanno avviato per realizzare il deposito nazionale dei rifiuti radioattivi, opera essenziale in prospettiva per gestire in sicurezza nel medio lungo termine detti rifiuti, sia quelli già prodotti negli impianti nucleari nel corso del loro pregresso esercizio, sia quelli che si produrranno con lo smantellamento degli impianti medesimi, sia, infine, quelli che continuano ad essere generati negli impieghi industriali e, soprattutto, medici delle materie radioattive.

Nell'ambito della Commissione è stato a tal fine istituito un apposito Gruppo di Progetto[1], che, tenendo conto dei documenti ad oggi resi pubblici, ha esaminato i diversi aspetti tecnici connessi alle attività sin qui svolte dai soggetti competenti e a quelle che, prevedibilmente, saranno immediatamente successive. L'autore, coordinatore di detto Gruppo di Progetto, in questa nota riporta le risultanze dell'attività, evidenziando come egli si sia avvalso dei contributi di colleghi componenti della Commissione ed, in particolare, del rilevante apporto dell'ing. Roberto Mezzanotte che coglie l'occasione per ricordare con affetto.

Il Gruppo di Progetto ha terminato i suoi lavori a fine 2015.

È bene comunque sottolineare che l'interesse della Commissione e del Gruppo non è in alcun modo rivolto alla verifica della correttezza delle attività effettuate, compito per il quale esistono soggetti a ciò deputati, ma solo ad offrire a chi è chiamato ad operare per la realizzazione più importante che, nel settore, è attesa nel nostro Paese il supporto di idee che può derivare dalle professionalità specifiche presenti al loro interno.

Le disposizioni di legge per la localizzazione

Come è noto, il deposito nazionale dei rifiuti radioattivi è espressamente previsto dal decreto legislativo 15 febbraio 2010, n. 31, modificato da alcuni atti successivi, che stabilisce che il deposito sia inserito in un più ampio "parco tecnologico" e sia composto da un impianto per lo smaltimento a titolo definitivo dei rifiuti a bassa e media attività e da un'installazione per l'immagazzinamento, a titolo provvisorio di lunga durata, dei rifiuti ad alta attività e del combustibile irraggiato provenienti dalla pregressa gestione di impianti nucleari.

Il decreto legislativo non dà indicazioni esplicite in merito al tipo di impianto che deve essere realizzato per lo smaltimento dei rifiuti a bassa e media attività, se cioè superficiale/sub-superficiale o geologico profondo, soluzioni entrambe valide per quelle categorie di rifiuti. Tuttavia, anche in relazione alla scelta della soluzione dell'*interim storage* per l'alta attività e in base ad altre considerazioni, si è unanimemente ritenuto che la scelta implicita fosse per lo smaltimento di tipo superficiale, opzione poi infatti sancita dall'ente di controllo con la Guida tecnica n. 29, della quale si dirà nel seguito.

Il decreto legislativo definisce invece con precisione la procedura da seguire per la definizione del sito e l'autorizzazione delle installazioni. Si tratta di una procedura articolata, basata sulla possibile manifestazione di interesse da parte delle regioni e degli enti locali a ospitare il deposito in una delle aree del proprio territorio preventivamente individuate dalla SOGIN quali aree idonee alla localizzazione, tenendo conto degli appositi criteri indicati dall'ISPRA, l'Autorità di regolamentazione competente. Sono previsti in ogni caso iter alternativi in mancanza dell'intesa da parte delle regioni. Nella procedura il soggetto promotore è la SOGIN, a cui è attribuita la responsabilità della realizzazione e dell'esercizio del deposito nazionale. Nella prima fase della procedura è prevista l'approvazione di una carta nazionale delle aree idonee (CNAI), predisposta dalla SOGIN, con un'indicazione di priorità sulla base delle caratteristiche tecniche e socio-ambientali delle aree stesse; vi è poi la ricerca dell'intesa con le regioni e gli enti locali interessati, attraverso una trattativa diretta con tali soggetti, su alcune delle aree idonee incluse nella carta; segue la definizione del sito, in base alle indagini tecniche puntuali, che verranno svolte dalla SOGIN, e quindi l'autorizzazione alla costruzione e all'esercizio del deposito.

Ad oggi sono stati effettuati i passaggi iniziali della prima fase procedurale: l'emanazione da parte dell'ISPRA, nel giugno 2014, dei criteri per la localizzazione del deposito, per mezzo della Guida tecnica n. 29, e, dopo alcune interlocuzioni con i ministeri interessati (Sviluppo economico e Ambiente), la trasmissione ai ministeri medesimi della proposta di carta nazionale delle aree potenzialmente idonee (CNAPI) da parte della SOGIN e la successiva relazione dell'ISPRA, trasmessa ai ministeri il 20 luglio 2015, che certifica la rispondenza della CNAPI ai criteri dall'ISPRA stesso definiti. I passi successivi sono l'autorizzazione alla pubblicazione della CNAPI, che dovrà essere rilasciata congiuntamente dai due ministeri suddetti e attesa ormai da tempo, e l'organizzazione, da parte della SOGIN, di un seminario nazionale da tenere entro 120 giorni dalla pubblicazione della CNAPI stessa.

La legge contiene un elenco non esaustivo (l'espressione impiegata è "tra gli altri") di quanti saranno invitati al seminario nazionale: oltre ai Ministeri interessati e all'autorità di controllo, le Regioni, le Province ed i Comuni sul cui territorio ricadono le aree interessate dalla proposta di CNAPI, nonché l'UPI, l'ANCI, le Associazioni degli Industriali delle Province interessate, le Associazioni sindacali maggiormente rappresentative sul territorio, le Università e gli Enti di ricerca presenti nei territori coinvolti. Sono pure indicati i temi che dovranno essere discussi: tutti gli aspetti tecnici relativi al Parco Tecnologico, con particolare riferimento alla piena e puntuale rispondenza delle aree individuate ai criteri stabiliti dall'ISPRA ed agli aspetti connessi alla sicurezza dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente, e sono illustrati i possibili benefici economici e di sviluppo territoriale connessi alla realizzazione di tali opere ed alle misure compensative dirette che la legge stessa prevede.

La legge prevede altresì che, entro il medesimo termine, le Regioni, gli Enti locali, nonché i soggetti portatori di interessi qualificati, possano formulare osservazioni e proposte tecniche, trasmettendole alla SOGIN.

Contestualmente alla CNAPI, deve essere pubblicato un progetto preliminare, contenente, o corredato, dalle seguenti informazioni:

a) documentazione relativa alla tipologia di materiali radioattivi destinati al Deposito nazionale (criteri di accettabilità a deposito; modalità di confezionamento accettabili; in-

ventario radiologico; ecc.);
b) dimensionamento preliminare della capacità totale del Deposito nazionale, anche in funzione di uno sviluppo modulare del medesimo, e determinazione del fattore di riempimento;
c) identificazione dei criteri di sicurezza posti alla base del progetto del deposito;
d) indicazione delle infrastrutture di pertinenza del Deposito nazionale;
e) criteri e contenuti per la definizione del programma delle indagini per la qualificazione del sito;
f) indicazione del personale da impiegare nelle varie fasi di vita del Deposito nazionale, con la previsione dell'impiego di personale residente nei territori interessati, compatibilmente con le professionalità richieste e con la previsione di specifici corsi di formazione;
g) indicazione delle modalità di trasporto del materiale radioattivo al Deposito nazionale e criteri per la valutazione della idoneità delle vie di accesso al sito;
h) indicazioni di massima delle strutture del Parco Tecnologico e dei potenziali benefici per il territorio, anche in termini occupazionali;
i) ipotesi di benefici diretti alle persone residenti, alle imprese operanti nel territorio circostante il sito ed agli enti locali interessati e loro quantificazione, modalità e tempi del trasferimento.

La genesi dei criteri di localizzazione e le prime osservazioni

Come sopra ricordato, nel giugno 2014 l'ISPRA ha pubblicato la Guida tecnica n. 29, *Criteri per la localizzazione di un impianto di smaltimento superficiale di rifiuti radioattivi a bassa e media attività.*

In precedenza, nel febbraio 2014, in una lettera al Direttore Generale dell'ISPRA, il Presidente dell'Ordine degli ingegneri della provincia di Roma aveva manifestato la disponibilità delle professionalità presenti nella Commissione a contribuire all'elaborazione dei criteri: "*i membri della Commissione hanno seguito con grande interesse la Sua audizione presso le Commissioni permanenti 10 e 13 del Senato il giorno 9/01/2014, apprezzando l'accuratezza della descrizione delle problematiche e delle attività svolte dall'Ente da Lei diretto, e poiché ritengono di fondamentale importanza la Guida Tecnica n. 29 ivi presentata desiderano offrire il proprio contributo in termini di commenti e suggerimenti con la totale garanzia di riservatezza sia per la documentazione ricevuta che per i contributi inviati.*"

Nella sua risposta, il Direttore Generale dell'ISPRA fece presente che la fase di consultazione degli organismi tecnici interessati prevista dalla legge si era conclusa, prospettando tuttavia la possibilità, per l'Ordine, di fornire il proprio contributo nell'ambito del seminario nazionale che si dovrà tenere a seguito della pubblicazione della CNAPI.

È proprio in previsione di tale prospettata partecipazione che, nel marzo 2014, è stato costituito il Gruppo di Progetto, prevedendo che, per garantire l'assenza di eventuali condizionamenti dovuti alla conoscenza pregressa delle elaborazioni della SOGIN e delle valutazioni dell'ISPRA, di esso non facessero parte dipendenti di detti enti, pure presenti nella Commissione.

Ad oggi, i criteri per la localizzazione indicati dall'ISPRA nella Guida tecnica n. 29 rappresentano l'unico elemento noto, mentre sui contenuti della CNAPI è stato mantenuto un livello di riservatezza particolarmente elevato, tanto che le voci che si sono inevitabilmente rincorse a seguito di presunte indiscrezioni si sono rivelate spesso del tutto inattendibili, in quanto palesemente contrastanti con qualche preciso criterio dell'ISPRA o con altri dati prestabiliti.

Va anche osservato che da parte della SOGIN non è stata fatta alcuna menzione dell'attività svolta in preparazione del progetto preliminare che dovrà essere pubblicato congiuntamente alla CNAPI, con tutta la documentazione indicata dalla legge, sopra ricordata, anche se è ovvio supporre che una prima versione di tale documentazione sia stata già elaborata e sia pronta per essere resa pubblica non appena l'autorizzazione dei ministeri competenti verrà rilasciata. È stato peraltro reso noto, per quanto attiene all'impianto di smaltimento dei rifiuti a bassa e media attività, il tipo di opera al quale il progetto si ispira: una struttura a barriere multiple nella quale un certo numero (indicativamente tra una e due decine) di contenitori di rifiuti condizionati sono posti all'interno di moduli cubici in calcestruzzo armato, a loro volta disposti entro celle, anch'esse in calcestruzzo armato, capaci di contenere alcune centinaia di moduli. Una volta riempite, le celle vengono chiuse superiormente con una piastra e ricoperte con diverse strati di materiali impermeabili[2]. Un impianto concettualmente del tutto simile è in esercizio da oltre venti anni in Spagna (El Cabril).

I criteri di localizzazione dell'ISPRA sono suddivisi in due serie, dette rispettivamente "di esclusione" e "di approfondimento".

Nei mesi successivi alla loro pubblicazione, i criteri sono stati oggetto da più parti di diverse osservazioni.

È stato rilevato che, nell'indicare i criteri, la Guida tecnica 29 menziona esclusivamente l'impianto di smaltimento dei rifiuti a bassa e media attività e non anche il deposito temporaneo di lungo periodo per l'alta attività, che pure il decreto legislativo 31/2010 include nella definizione di deposito nazionale, prevedendo che quest'ultimo sorga interamente all'interno di un parco tecnologico, e quindi in un unico sito. A questo rilievo ISPRA e Ministero dello Sviluppo economico hanno replicato che, nella sostanza, un sito rispondente ai criteri di localizzazione di un impianto di smaltimento per la bassa e media attività può ospitare anche il deposito temporaneo per l'alta attività.

Altre osservazioni riguardano il diverso livello di definizione con il quale i differenti criteri di esclusione sono indicati nella Guida: a criteri precisi, come ad esempio quelli che stabiliscono una distanza minima dalla costa o dalle autostrade e strade extraurbane principali o da linee ferroviarie fondamentali e complementari, o quelli che indicano l'altitudine minima e massima alle quali le aree possono essere ubicate o la pendenza massima dei versanti, fanno riscontro criteri formulati in modo piuttosto generico, come quello relativo alle zone vulcaniche e quello demografico, formulazioni più adatte a criteri di approfondimento che a criteri di esclusione e che per risultare operative richiedono

definizioni aggiuntive da parte della SOGIN.
Vi sono state poi osservazioni più specifiche che riguardano nel merito singoli criteri, come nel caso del criterio di esclusione per sismicità elevata, da alcuni considerato eccessivamente severo.

Le attività del Gruppo di Progetto

Analogamente a quanto è stato fatto da esperti in altre sedi, nel corso dei lavori diversi membri del Gruppo di Progetto hanno espresso valutazioni in merito ai criteri di localizzazione contenuti nella Guida tecnica 29, sia per aspetti puntuali, sia sul loro complesso e sulla loro impostazione.
Tuttavia, il Gruppo non ha ritenuto ormai utile proporre qui tutte quelle valutazioni, non essendo prevista una procedura di revisione della Guida ove ogni commento potrebbe essere preso in esame. Ci si limita quindi a presentare, di seguito, le valutazioni e le osservazioni, condivise dall'intero Gruppo, suscettibili di tradursi in indicazioni su argomenti che dovrebbero essere discussi nel corso del Seminario nazionale e su questioni alle quali in quella sede la SOGIN dovrebbe dare risposta.
Appare ovvio attendersi che la SOGIN dia preliminarmente dimostrazione della rispondenza della CNAPI ai criteri della Guida tecnica n. 29, indicando tra l'altro la cartografia e i *database* utilizzati nell'elaborazione della Carta. Si tratterebbe peraltro, sostanzialmente, di rendere pubblici gli elementi della verifica di tale rispondenza già fatta - con esito positivo - dall'ISPRA. L'Istituto, infatti, nel trasmettere ai ministeri competenti la propria relazione sulla proposta di CNAPI, il 20 luglio 2015 ha reso noto di non avere rilievi da evidenziare e anche successivamente a quella data i documenti sono

stati considerati "riservati". In questo ambito, ci si aspetta che la SOGIN illustri l'interpretazione data ai diversi criteri e, in particolare, indichi come siano stati quantificati, e quindi resi operativi, quelli per i quali la Guida tecnica n.29 dà solo una definizione qualitativa.
Nell'elencare qui tali criteri, ci si limita – salvo due casi specifici - a quelli di esclusione, più rilevanti ai fini dell'elaborazione della CNAPI e per i quali è più strettamente necessaria una definizione quantitativa, fermo restando che il decreto legislativo 31/2010 richiede che la Carta nazionale delle aree potenzialmente idonee alla localizzazione del deposito sia contestualmente accompagnata, oltre che da un progetto preliminare del deposito stesso, da *un ordine di idoneità sulla base di caratteristiche tecniche e socio-ambientali delle suddette aree*, per la cui definizione sono determinanti anche i criteri di approfondimento.

Osservazioni specifiche
I criteri di esclusione

- **Criterio di esclusione CE1**

Esclude le aree vulcaniche attive o quiescenti. *Sono quelle aree che presentano apparati vulcanici attivi o quiescenti, quali: Etna, Stromboli, Colli Albani, Campi Flegrei, Ischia, Vesuvio, Lipari, Vulcano, Panarea, Isola Ferdinandea e Pantelleria*.
Il criterio elenca le aree tradizionalmente considerate vulcaniche, includendo anche quelle che ben difficilmente potrebbero avere una qualche attinenza con il processo di localizzazione in questione, ma la formulazione (in particolare la parola *quali*) è tale da far considerare l'elenco alla stregua di un'esemplificazione non esaustiva. Inoltre, non è precisata l'estensione delle aree stesse che deve essere tenuta in conto. Da qui la necessità delle indicazioni da

parte della SOGIN su come il criterio è stato applicato.

- **Criterio di esclusione CE3**

Il criterio esclude le aree interessate da fenomeni di fagliazione. *Questi lineamenti tettonici sono evidenziati nel catalogo ITHACA (ITaly HAzard from CApable faults) e nel database DISS (Database of Individual Seismogenic Sources).* Il criterio fa riferimento a database precisi, ITHACA dell'ISPRA per le faglie capaci e DISS dell'INGV per le sorgenti sismiche attive, peraltro in continuo aggiornamento a seguito di nuovi eventi o studi (al riguardo, pur se al criterio di esclusione non è associato un corrispondente livello di approfondimento, saranno importanti, nella fase finale, le indagini sull'area intorno al sito per verificare la presenza di faglie locali non già rilevate). Si comprende che le aree non debbano essere attraversate da queste strutture tettoniche, ma è tuttavia opportuno che la SOGIN indichi l'eventuale considerazione di fasce di rispetto.

- **Criterio di esclusione CE5**

Sono escluse da questo criterio le aree contraddistinte dalla presenza di depositi alluvionali di età olocenica. *Queste zone sono caratterizzate dalla presenza di depositi alluvionali messi in posto dalla dinamica fluviale durante l'Olocene. L'esclusione di tali aree è un ulteriore elemento precauzionale per la minimizzazione del rischio idraulico.* In questo caso la SOGIN deve essere necessariamente intervenuta con una lettura interpretativa del criterio. Infatti, essendo questo formulato senza alcuna considerazione di possibili configurazioni stratigrafiche con spessori del deposito alluvionale olocenico ammessi, la sua applicazione letterale condurrebbe in pratica all'esclusione di gran parte delle pianure e delle valli. È pertanto necessario che la SOGIN illustri le modalità applicative di questo criterio che potrebbe condurre a un notevole restringimento delle possibilità di scelta delle aree con siti idonei.

- **Criterio di esclusione CE12**

Il criterio esclude le aree che *non siano ad adeguata distanza dai centri abitati. La distanza dai centri abitati deve essere tale da prevenire possibili interferenze durante le fasi di esercizio del deposito, chiusura e di controllo istituzionale e nel periodo ad esse successivo, tenuto conto dell'estensione dei centri medesimi.* La formulazione del criterio, decisamente qualitativa, ha lasciato alla SOGIN l'indicazione delle distanze dai centri abitati che possano essere considerate adeguate in funzione delle dimensioni dei centri stessi. Va anche indicato dalla SOGIN come abbia tenuto conto del riferimento al periodo di controllo istituzionale e a quello successivo.

- **Criterio di esclusione CE15**

Sono da escludere in base a questo criterio le *aree caratterizzate dalla presenza di attività industriali a rischio di incidente rilevante, dighe e sbarramenti idraulici artificiali, aeroporti o poligoni di tiro militari operativi. In presenza di dighe e sbarramenti idraulici artificiali devono essere escluse le aree potenzialmente inondabili in caso di rottura dello sbarramento*. Il riferimento alle aree inondabili può essere considerato sufficiente per l'individuazione delle aree da escludere per la presenza di dighe e sbarramenti idraulici, ma per gli altri casi non c'è un'istruzione precisa e vi saranno quindi state interpretazioni integrative da parte della SOGIN.

I criteri di approfondimento

- **Criterio di approfondimento CA2**

Il criterio fa riferimento alle aree ove si registri la *presenza di movimenti verticali significativi del suolo in conseguenza di fenomeni di subsidenza e di sollevamento (tettonico e/o isostatico). Questi fenomeni sono legati a cause naturali di tipo geologico e/o di natura antropica*. Le aree interessate da questi fenomeni sono in generale note e non sembrano proponibili per la localizzazione del deposito (non c'è da eseguire alcuna valutazione sulla possibile entità del fenomeno). La subsidenza e il sollevamento dovrebbero essere più opportunamente considerati quali motivi di esclusione. La SOGIN dovrebbe indicare come ne abbia eventualmente tenuto conto.

- **Criterio di approfondimento CA11**

L'approfondimento va condotto su aree caratterizzate *da produzioni agricole di particolare qualità e tipicità e luoghi di interesse archeologico e storico*. Soprattutto la presenza di luoghi di interesse archeologico e storico di particolare rilievo e ampiamente noti dovrebbe essere stata considerata, come nel caso precedente, alla stregua di un criterio di esclusione già in fase di elaborazione della CNAPI e sarebbe pertanto opportuno che la SOGIN illustri come ne abbia tenuto eventualmente conto.

Aver considerato alla stessa stregua in questo criterio l'interferenza con produzioni agricole speciali e luoghi archeologici/storici, lascia supporre che il riferimento sia all'estensione fisica del territorio occupato dal parco tecnologico e, quindi, a cautele che riguardano esclusivamente le dimensioni di territorio necessario per la sua realizzazione, e non a prudenza per ragioni di radioprotezione. E' opportuno che questo aspetto sia discusso e chiarito nelle sue modalità applicative fin dall'inizio del processo di localizzazione.

Eventistica sismica

Merita qualche considerazione la progettazione del deposito, ed in particolare dell'impianto di smaltimento, contro gli eventi sismici.

La Guida tecnica 29 ha escluso le aree contrassegnate da un valore previsto di picco di accelerazione (PGA) al substrato rigido, per un tempo di ritorno di 2475 anni, pari o superiore a 0,25 g, secondo le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni. A quel periodo di ritorno corrisponde una probabilità di superamento di quel valore di PGA di $4*10^{-4}$ in un anno e del 2% in 50 anni.

Il criterio è stato oggetto di riserve, poiché ha escluso, già in fase di prima selezione, gran parte del territorio nazionale a fronte di eventi contro i quali possono essere invece adottati affidabili provvedimenti di progetto delle strutture e senza aver tenuto conto che il criterio agisce di fatto in modo disomogeneo su aree diverse. Infatti, a seconda della copertura di suoli, il medesimo picco di accelerazione al substrato rigido può tradursi in valori del tutto differenti in superficie, dove si potrebbero avere, in aree rispondenti al criterio, picchi di accelerazione superiori a quelli di aree escluse.

Non si tratta di eventualità teoriche, se si considera che le zone caratterizzate da un PGA minore di 0.25 g al substrato rigido sono tipicamente quelle costiere, dove le caratteristiche dei terreni sono potenzialmente associabili a fenomeni di amplificazione significativi.

Pertanto l'approccio previsto per l'esclusione delle zone ad elevata sismicità, pur avendo tagliato larga parte del territorio nazionale, lascia comunque come possibili siti caratterizzati da una sismicità che può rivestire un'importanza non trascurabile nella progettazione del deposito.

Andrà quindi definito con attenzione, una volta individuato il sito, l'evento sismico di progetto. Già nell'ambito del seminario nazionale, la SOGIN potrà indicare l'approccio che intenderà adottare al riguardo, in termini di livelli probabilistici o di eventi massimi potenzialmente associabili al sito, ed eventualmente la normativa di riferimento.

Si può ricordare che l'approccio consolidato nella progettazione dei reattori nucleari prevede la definizione di due eventi di progetto: il primo, potenzialmente più frequente e di minore entità, a fronte del quale il reattore deve poter mantenere la condizione di esercizio sicuro; il secondo, di intensità molto elevata, per il quale deve essere garantita la funzionalità dei sistemi essenziali di sicurezza (spegnimento, asportazione del calore di decadimento, contenimento). Tale approccio è codificato nella Safety Guide della IAEA NS-G-1.6 *Seismic design*

and qualification for nuclear Power Plants.
Pur se le caratteristiche strutturali di un deposito di rifiuti radioattivi, la sua vulnerabilità a fronte degli eventi sismici e le potenzialità e modalità di rilascio in caso di incidente sono evidentemente ben diverse da quelle di un reattore nucleare, l'approccio per la progettazione sismica di questi ultimi potrebbe essere un utile riferimento.
L'individuazione dei due livelli di scuotimento è chiaramente legata al sito specifico, salvo l'eventuale predefinizione delle rispettive probabilità.
Ciò che andrebbe comunque preventivamente definito sono le prestazioni richieste all'impianto a fronte degli eventi, che si tradurranno in requisiti progettuali specifici per garantire il loro raggiungimento.
Tenendo conto degli obiettivi radioprotezionistici ai quali si è sopra accennato, si potrebbe ad esempio ipotizzare che per il terremoto di esercizio, quello cioè di minore intensità, rapportabile, sempre in ipotesi, ad un evento con periodo di ritorno comunque non inferiore al periodo di controllo istituzionale, la prestazione richiesta sia il contenimento dei rilasci entro livelli tali da non causare il superamento del vincolo di dose stabilito dalla legge per le condizioni di normale esercizio. Il requisito conseguente potrebbe essere il mantenimento delle deformazioni nel campo elastico.
Per l'evento di progetto di intensità maggiore, il requisito potrebbe essere, nella stessa logica, la limitazione delle esposizioni entro l'obiettivo fissato per le condizioni incidentali, tenendo anche conto di quanto detto riguardo alla verifica della praticabilità di interventi di recovery. Si potrebbe trattare, in questo caso, di stabilire parametri quali la massima fessurazione ammessa, in relazione alla durabilità del manufatto che garantisce la permanenza della funzionalità delle barriere.

Altre osservazioni

Come già ricordato, la legge richiede che, contestualmente alla CNAPI, venga pubblicato un progetto preliminare del deposito nazionale e pertanto gli elementi di tale progetto e la documentazione afferente rientreranno tra gli argomenti da approfondire nel corso del seminario nazionale. Tra questi, come si è visto, è espressamente richiamato il dimensionamento, ancorché preliminare, del deposito stesso.
Al riguardo, in più occasioni e in diverse sedi,

la SOGIN ha indicato in 90 mila metri cubi il volume complessivo dei rifiuti che verranno ospitati nel deposito nazionale, dei quali 75 mila a bassa e media attività, destinati all'impianto di smaltimento superficiale, e 15 mila a alta attività, compreso il combustibile irraggiato non riprocessato, che verranno posti nel deposito temporaneo di lungo periodo.
Questa ripartizione - certamente di per sé comunque preliminare a causa della mancanza di una completa caratterizzazione dei rifiuti destinati al deposito nazionale e del fatto che la stima finale dovrà essere compiuta sui rifiuti una volta effettuato il loro condizionamento, operazione condotta ad oggi solo molto parzialmente – era verosimilmente basata sulla classificazione indicata dalla Guida tecnica n. 26, nella quale la soglia tra la bassa e media attività (II categoria) e l'alta attività (III categoria) era indicata con precisione (Tabella 1 della suddetta guida).
Con la nuova classificazione dei rifiuti radioattivi, stabilita con il decreto interministeriale 7 agosto 2015, la ripartizione tra i rifiuti destinati rispettivamente all'impianto di smaltimento o all'*interim storage* non è definita con la medesima precisione, ma, per i rifiuti a media attività beta-gamma emettitori, potrà essere nota solo dopo che saranno stati indicati i criteri di accettazione all'impianto di smaltimento sulla base degli obiettivi di radioprotezione stabiliti per esso.
È senz'altro possibile che i margini di approssimazione con i quali, implicitamente, sono stati indicati i volumi di rifiuti destinati allo smaltimento o al deposito temporaneo siano tali da risultare compatibili con le variazioni indotte dal nuovo sistema di classificazione, ma, tra i temi del seminario nazionale, ciò andrebbe comunque confermato, almeno con valutazioni a campione.
Senza qui entrare in una disamina del decreto ministeriale 7 agosto 2015, quale quella contenuta nella *Relazione sulla gestione dei rifiuti radioattivi in Italia e sulle attività connesse*, pubblicata il 1° ottobre 2015 dalla Commissione parlamentare di inchiesta sul ciclo dei rifiuti, si rileva inoltre che le valutazioni da fare per stabilire i criteri di accettazione all'impianto di smaltimento, e quindi i volumi destinabili ad esso, presentano questioni di ordine concettuale che attengono agli obiettivi di radioprotezione e alle modalità di verifica della rispondenza ad essi.
L'obiettivo di radioprotezione della popolazione nelle condizioni di normale esercizio del deposito è di fatto indicato dalla legge. Il decreto legislativo 230/1995 stabilisce infatti che tutte le immissioni di radioattività nell'ambiente debbano essere autorizzate e che l'autorizzazione possa essere rilasciata solo se la conseguente dose annua per l'individuo più esposto della popolazione non superi 10 microSv.
Tale obiettivo, che in realtà costituisce un vero e proprio "vincolo" secondo la definizione contenuta nello stesso D.lgs. 230, caratterizza la legislazione italiana, rendendola per questo aspetto la più stringente a livello internazionale, e si applica a qualsiasi pratica, ivi incluso quindi il deposito nazionale.
Va peraltro osservato che, nell'esperienza di altri paesi dove pure la legge non stabilisce vincoli di dose altrettanto stringenti, l'impatto radiologico sugli individui della popolazione di impianti di smaltimento del tutto simili a quello da realizzare in Italia è stato in pratica largamente inferiore, anche di ordini di grandezza, ai 10 microSv/anno fissati come norma generale dal suddetto decreto legislativo.
La questione che si pone è quale debba essere l'arco temporale sul quale la verifica dell'obiettivo radioprotezionistico va effettuata, tenendo conto della durata delle barriere ingegneristiche alle quali, nella soluzione di smaltimento superficiale, viene dato un ruolo determinante nell'isolamento della radioattività dall'ambiente.
La legge non dà indicazioni al riguardo, non essendovi alcun altro caso, se non quello dell'impianto di smaltimento, per il quale la domanda sia significativa. Tuttavia sembra ovvio supporre che la valutazione debba essere fatta, a fronte del medesimo suddetto obiettivo, almeno con riferimento all'intero periodo di controllo istituzionale. Questo, nella definizione data dal decreto legislativo 45/2014, per gli impianti di smaltimento superficiali di rifiuti radioattivi di bassa e media attività *varia da 50 anni ad alcune centinaia di anni*. Nelle illustrazioni che vengono spesso fatte, si assume generalmente un riferimento a 300 anni, anche se si tratta di un parametro che dovrà essere indicato ufficialmente.
Fermo restando che ogni assunzione di durabilità delle barriere ingegneristiche dovrà essere adeguatamente supportata nello specifico, prospettare una loro capacità di isolamento per un periodo di 300 anni non appare certamente azzardato. Si può tenere presente, al riguardo, che l'NRC, ente di controllo degli Stati Uniti, raccomanda di non assumere una capacità di isolamento superiore a 500 anni, per evitare di dover dare difficili dimostrazioni e di avviare inutili e complicate controversie (NUREG 1573).
Una durabilità delle barriere di 300 anni, opportunamente supportata, è in pratica sufficiente per il decadimento pressoché completo della

maggior parte dei radionuclidi emettitori beta-gamma. Restano tuttavia i radionuclidi a vita più lunga, per i quali le centinaia di anni di qualsivoglia periodo di controllo istituzionale sono comunque insufficienti a consentirne un decadimento significativo: C-14, Cl-36, Ni-59, I-129 sono esempi in tal senso.
Una chiara risposta su questi temi sembra necessaria, sia ai fini del dimensionamento delle due parti di cui il deposito nazionale è composto, sia, più in generale, per definire le modalità e il campo stesso della verifica degli obiettivi radioprotezionistici oggi stabiliti, anche, eventualmente, solo per delimitare in modo esplicito l'ambito nel quale tali temi vengono tenuti in considerazione o il periodo per il quale si assume la stabilità degli obiettivi attuali.
A tal proposito possono essere citate, a titolo di esempio, le già ricordate raccomandazioni dell'NRC, che assumono che un arco temporale di diecimila anni sia sufficiente per intercettare tutti i picchi di dose connessi ai diversi radionuclidi. Nel valutare tale esempio, oltre alle differenze strutturali tra le tipiche realizzazioni degli Stati Uniti e i depositi nazionali europei, va tenuto presente che il vincolo di dose posto dalla regolamentazione americana, in questo caso specifico per gli impianti di smaltimento superficiali, è di 250 microSv/anno.
Per quanto attiene alle condizioni di incidente, non vi è nella legge un riferimento analogo a quello per le condizioni di esercizio. Vi sono tuttavia precedenti, nella prassi autorizzativa, di obiettivi di radioprotezione posti a 1 mSv per evento, corrispondenti ai livelli di esposizione della popolazione per i quali la legislazione attuale non prevede interventi di emergenza.
Data la specificità di un deposito di rifiuti radioattivi, dove un evento incidentale causerebbe un rilascio comunque progressivo di radioattività, nell'assumere questo obiettivo di radioprotezione, come pure qualsiasi altro possa essere individuato, va tenuto presente che esso non potrebbe in ogni caso costituire un riferimento per un'esposizione prolungata, e dovrebbe quindi essere associato alla verifica, in sede di progetto, della possibilità di intervenire con provvedimenti di *recovery*, capaci di ripristinare una barriera efficace in tempi compatibili con una valida radioprotezione della popolazione.
Una considerazione infine sulla difesa contro gli tsunami. La guida dell'AIEA "*Survey and Site Selection for Nuclear Installations*", pubblicata nel 2015, suggerisce, come criterio di selezione dei siti, una distanza di 10 km dalle coste marine o oceaniche o di 1 km da laghi o da fiordi, o un'altitudine di almeno 50 metri sul livello del mare.
Nella Guida tecnica 29, l'Ispra non riferisce esplicitamente alcun criterio a tale evento. Tuttavia vengono escluse le aree poste entro una fascia di 5 km dalla costa o comunque a un altitudine inferiore a 20 metri, con riferimento a possibili ingressioni marine. Tenendo conto del grado di esposizione delle coste italiane a questo tipo di eventi, detto criterio di esclusione, pur non espressamente mirato per far fronte ad essi, sembra sufficiente ad assicurare una protezione adeguata. Può risultare in ogni caso opportuno che, individuato il sito, venga fatta una valutazione specifica, che tenga conto tra l'altro degli studi effettuati su questi fenomeni [es.: 3, 4], ai fini dell'adozione dei provvedimenti di progetto eventualmente necessari.
Per questi aspetti e per tutti i parametri afferenti alla progettazione del deposito, non essendoci una normativa nazionale specifica, dovranno essere fatte delle scelte, facendo anche riferimento alle normative internazionali e a quelle estere ove con successo sono state realizzate opere analoghe, come è avvenuto in passato, quando per gli impianti nucleari si è fatto riferimento a quella degli Stati Uniti.

Conclusioni

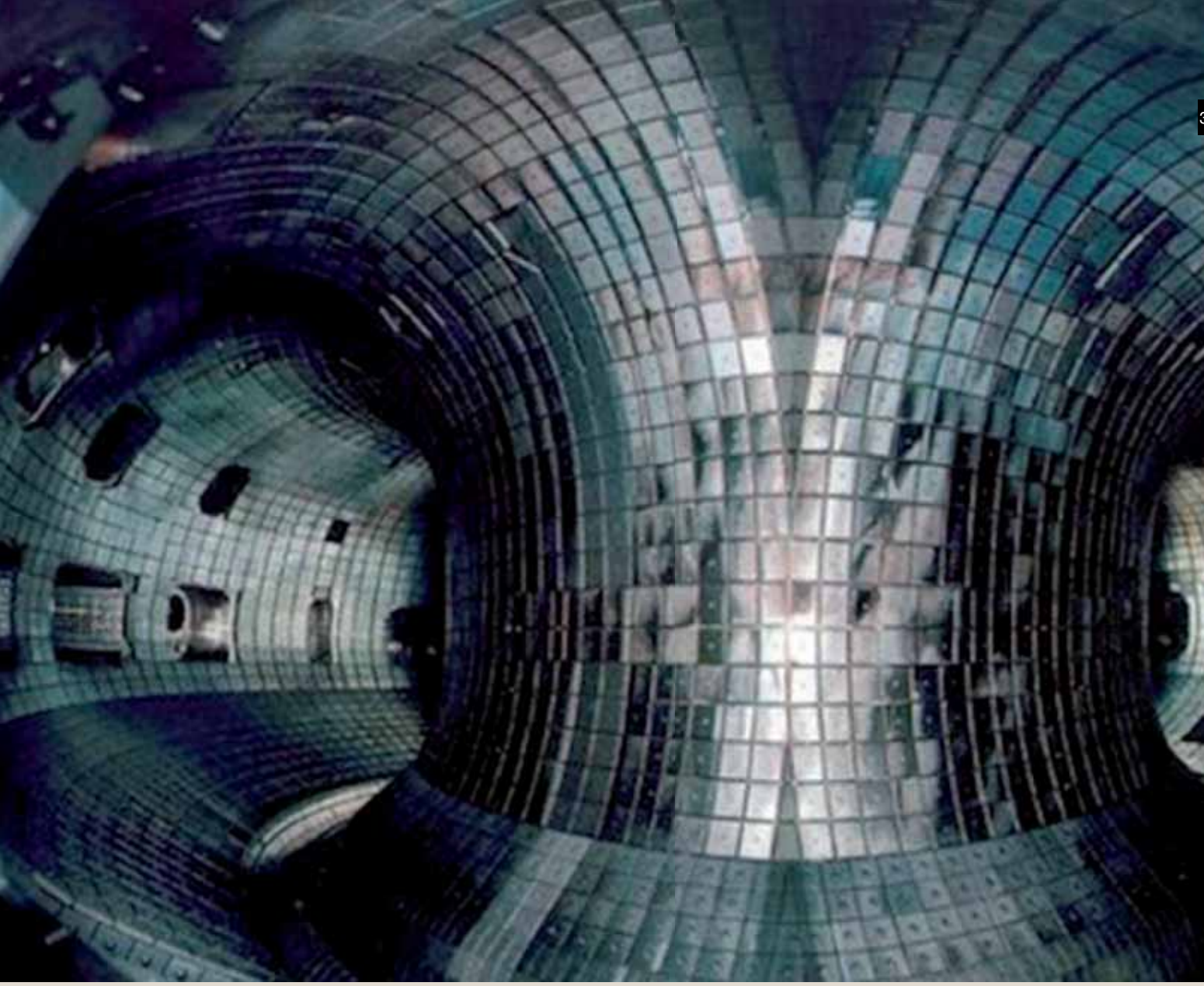
L'Ordine degli ingegneri della Provincia di Roma segue con interesse l'evoluzione della materia ed è disponibile a continuare a offrire il proprio contributo nell'ottica della chiarificazione del quadro tecnico normativo nel quale vengono svolte le attività in oggetto.

Riferimenti
- ISPRA - Guida tecnica n. 29, *Criteri per la localizzazione di un impianto di smaltimento superficiale di rifiuti radioattivi a bassa e media attività*
- IAEA - NS-G-1.6 *Seismic design and qualification for nuclear Power Plants*.
- Maria Teresa Pareschi, Enzo Boschi, Massimiliano Favalli - *Lost tsunami* - GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 33, 2006.
- Alessandra Maramai*, Beatriz Brizuela, Laura Graziani - *The Euro-Mediterranean Tsunami Catalogue* - ANNALS OF GEOPHYSICS, 57, 4, 2014

Note
[1] Il Gruppo di Progetto è stato costituito, prima della riorganizzazione delle Commissioni, avvenuta nel 2015, nell'ambito della precedente Commissione Ingegneria Nucleare.
[2] Vedere il video illustrativo al seguente link http://www.depositonazionale.it/ambiente-e-sicurezza/pagine/perche-il-deposito-nazionale-e-sicuro.aspx#perche

Palazzo della regione Lombardia- arch. Henry Cobb e Paolo Caputo

Copyright © Moreno Maggi



ELEMENTI DI FISICA E DI INGEGNERIA DEL REATTORE A FUSIONE

Confronto parametrico con reattore a fissione

Introduzione

di Ing. A. Taglioni, Ing. E. Vocaturo

L'Ordine degli Ingegneri di Roma è l'unico Ordine Professionale italiano ad aver istituito al proprio interno delle Commissioni Tematiche che si occupano di materia nucleare e, conseguentemente, di tutte le tematiche ingegneristiche negli aspetti ad essa connessi; queste sono le Commissioni

a cura di
Ing. P. Allievi
Ing. A. De Blasiis
Ing. A. Compagno
Ing. G. Chiocchia
Ing. M. Sepielli
Ing. A. Tonti

commissione
Ricerca e Reattori Innovativi

visto da:
Ing. A. Taglioni
Ing. E. Vocaturo

Gestione Impianti e Decommissioning, Radioprotezione ed Emergenze, Ricerca nucleare e Reattori Innovativi.
Le Commissioni sono raggruppate in una specifica Area (Area Nucleare) per un finalizzato coordinamento, e raccolgono iscritti che a vario titolo sono o sono stati coinvolti in attività nucleari, sia in Italia che all'estero. Queste attività riguardano lo smantellamento degli impianti esistenti, il trattamento e gestione dei rifiuti radioattivi da essi provenienti, la raccolta di rifiuti nucleari di origine industriale e medica, il loro trasporto, la localizzazione e realizzazione del deposito nazionale per il loro smaltimento, la gestione delle emergenze pur essendo, nel territorio nazionale, progettazioni e realizzazioni drasticamente ridotte dopo referendum e Fukushima.
Per questo, non vanno dimenticati tecnici e imprese impegnati nella realizzazione di centrali elettronucleari all'estero, per la loro progettazione, costruzione e gestione o per fornitura di componentistica, unitamente ad una più generale attività di consulting in paesi in via di sviluppo; un doveroso cenno va fatto anche allo sviluppo dei progetti di dissalatori dell'acqua marina.
I compiti istituzionali delle Commissioni Tematiche dell'Ordine sono volti al sostegno dei professionisti impegnati nello specifico settore, attraverso l'approfondimento di leggi e norme; la produzione di memorie e contributi tecnici; l'organizzazione di visite tecniche, seminari, convegni di aggiornamento professionale; e varie forme di collaborazione di tipo consultivo, interpretativo o di indirizzamento.
L'attività formativa, che si esplica nell'organizzazione di eventi, è divenuta ancor più importante, stante la necessità di accumulo di "crediti formativi" annuali, a partire dal 2014.
L'operato delle Commissioni dell'Area Nucleare ha sino ad oggi stimolato un utile confronto tra le professionalità ingegneristiche, evidenziando lo stato attuale delle attività, le possibili prospettive per il professionista, le criticità che possono limitarne la progettualità, e considerando anche le interfacce con l'ingegneria convenzionale, per quel che concerne principalmente: gli aspetti strutturali e geotecnici, la sismologia e l'idrogeologia, la componentistica meccanica ed elettronica, l'ingegneria gestionale e dei trasporti, lo studio e il monitoraggio ambintale, la security, ecc.
In particolare la commissione Ricerca e Reattori innovativi, della quale il presidente è l'ing. Ernesto Vocaturo e l'ing. Massimo Sepielli ne è il vice presidente, ha Il compito di promuovere le iniziative necessarie alla pubblicizzazione dello stato dell'arte delle seguenti tematiche:

1) Reattori di ricerca, con illustrazione del funzionamento e del loro utilizzo per lo studio degli effetti dell'irraggiamento sui materiali, per la caratterizzazione e diagnostica di processi industriali e per la produzione di radio-farmaci per applicazioni in ambito sanitario;
2) Reattori di potenza di 3° e 4° generazione illustrandone le caratteristiche, i requisiti ed i criteri di progettazione;
3) Stato dell'arte della ricerca sulla fusione nucleare.

Su tali tematiche la Commissione promuove Seminari e Convegni e provvede alla redazioni di articoli che vengono pubblicati sulle riviste e sui quaderni dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma allo scopo di divulgare e rendere disponibili le informazioni per incontri e discussioni aventi come argomento l'evoluzione dello stato dell'arte della ricerca e delle sue applicazioni.
Scopo del presente rapporto è quello di illustrare i criteri di progettazione e le caratteristiche di un impianto a fusione nucleare al fine di studiarne le grandezze fisiche in gioco ed i limiti tecnologici ingegneristici e dei materiali per determinarne i requisiti di fattibilità.
Inoltre vi è contenuto un confronto fra un reattore nucleare a fusione ed uno a fissione per quanto riguarda sia gli aspetti ingegneristici sia di sicurezza.
A tale scopo si è scelto di prendere ad esame le caratteristiche di progetto di un reattore a fusione nucleare tipo TOKAMAK da 1000 MWe ed un reattore nucleare a fissione di pari potenza. Il confronto è fatto con un reattore termico tipo evolutivo LWR e con un reattore innovativo di IV generazione refrigerato a piombo quale il reattore russo BREST300, che è stato già oggetto di una specifica pubblicazione della Commissione Ricerca [9].
Lo scopo della pubblicazione è, come si potrà leggere, eminentemente didascalico e destinato a fornire al lettore le nozioni di base, senza rinunciare al corretto formalismo matematico relativo al confinamento magnetico e ad alcuni parametri ed equazioni che regolano il processo di fusione nucleare, che sono più estesamente ed approfonditamente trattate in lavori specifici degli autori.
Il rapporto, cui hanno contribuito diversi membri della Commissione Ricerca e Reattori Innovativi, si rivolge agli Ingegneri nucleari e non nucleari. La pubblicazione è stata oggetto di una consultazione e di una review tecnica da parte di ENEA – Dipartimento FSN.

Stato dell'arte del reattore a fusione

In questa sezione viene introdotto il concetto di fusione nucleare e descritto lo stato dell'arte, con particolare riferimento al reattore internazionale ITER ed al reattore prototipo dimostrativo di test di futura costruzione in Italia, il DTT (Divertor Tokamak Test).
Nei paragrafi successivi vengono affrontati uno ad uno gli aspetti principali del reattore a fusione a confinamento magnetico per arrivare quindi ad un confronto con un reattore a fissione nucleare di tipo innovativo.
Nelle conclusioni verrà proposto il possibile contributo che la Commissione nucleare potrà fornire al progetto DTT portato avanti da ENEA in collaborazione con gli altri Istituti internazionali.

La fusione nucleare

La fusione nucleare è considerata come il "Santo Gral" della ricerca in campo energetico. Rappresenta una sorgente di energia illimitata, pulita e sicura ed auto-sostenente. La sua esistenza fu teorizzata negli anni '20 da diversi fisici ed ha catturato la fantasia di scienziati e cineasti.
I più recenti avanzamenti arrivati dalla Germania, con il reattore Wendelstein 7-X, un reattore del tipo *"stellarator"* in grado di raggiungere recentemente un positive test con quasi 180 milioni di gra-

Figura 1
Il primo plasma ottenuto al reattore di Wendelstein 7-X. Le temperature hanno raggiunto i 100 milioni di gradi Celsius.

Figura 2 - *Un esempio di confinamento magnetico, the Wendelstein 7-X, in costruzione*

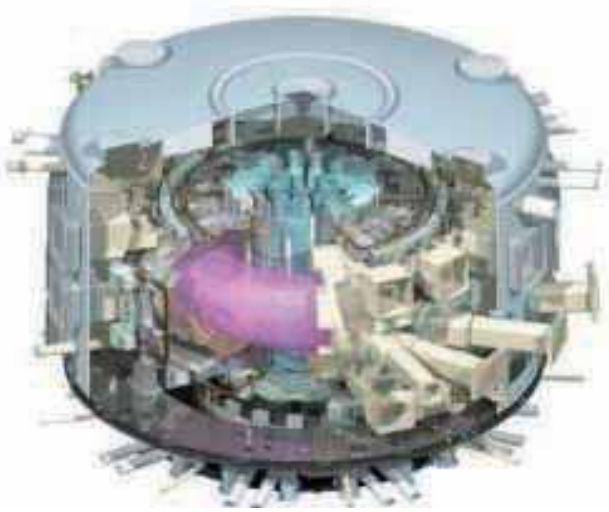


Figura 3 - *Il reattore Joint European Torus Tokamak (JET), vista interna.*

di, ed in Cina, dove il reattore EAST ha mantenuto la fusione del plasma per 102 secondi, sebbene a temperature inferiori.
Questi due esperimenti hanno rappresentato dei breakthrough, cioè dei passi in avanti fondamentali nel cammino della fusione, ma da considerarsi ancora "piccoli" rispetto al cammino generale verso i parametri attesi di funzionamento. Avremo certamente le idee più chiare quando nella prossima decade sarà entrato in funzionamento il reattore internazionale ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), che implementerà tutto quanto sinora conosciuto e sviluppato in un unico prototipo.
ITER dovrebbe infatti raggiungere e sostenere la reazione di fusione con la temperatura e densità necessarie per generare più energia di quanto viene fornita e sostenere a lungo la reazione attraverso i neutroni generati dalla reazione in un ciclo che si autosostiene. ITER però ha vissuto e vive diverse questioni che hanno rallentato la sua costruzione e le esitazioni di alcuni Paesi del consorzio, come gli USA che hanno spesso pensato di tagliarne i finanziamenti. Queste esitazioni fanno slittare il target sempre più in avanti.
Il punto di break-even si raggiunge con l'ignizione della reazione ed il suo mantenimento ad un rateo significativo, senza generare instabilità nel plasma che spegnerebbero la reazione.
Per risolvere la questione del contenimento, si generano potentissimi campi magnetici che tengono sospeso a mezz'aria il plasma senza che questo tocchi le pareti con fusion immediate delle stesse.
Si usa allora una forma del plasma toroidale ideata dagli scienziati russi nel 1950 e che prende il nome di TOKAMAK (fig. 2).
Per creare un plasma stabile sono in realtà necessari due campi magnetici, uno che avvolge il plasma e l'altro che radialmente segue la direzione dell'anello.
Esistono due geometrie di confinamento magnetico, il TOKAMAK e lo STELLARATOR, la cui differenza risiede nella modalità di generazione del campo poloidale, quello che avvolge il plasma. Nel TOKAMAK il campo è generato da una corrente che attraversa il plasma, nello stellarator si usano magneti esterni alla macchina che creano un campo a forma di ellisse attorno al plasma. Lo stellarator è teoricamente più stabile del TOKAMAK ma meno sperimentato. Al momento entrambi i reattori sono candidati.
Attualmente, il più grande reattore a fusion del mondo è il Joint European Torus (JET), un Tokamak realizzato in UK e finanziato dall'Unione Europea. Il JET fu commissionato negli anni '70s e divenne operative nel 1983 producendo con successo il plasma, il primo gradino verso la fusione.
Con una serie di modifiche, il JET raggiunse il record di massima generazione di energia dal plasma pari a 16 MW. Ma non ha raggiunto il punto di svolta (fig. 3).

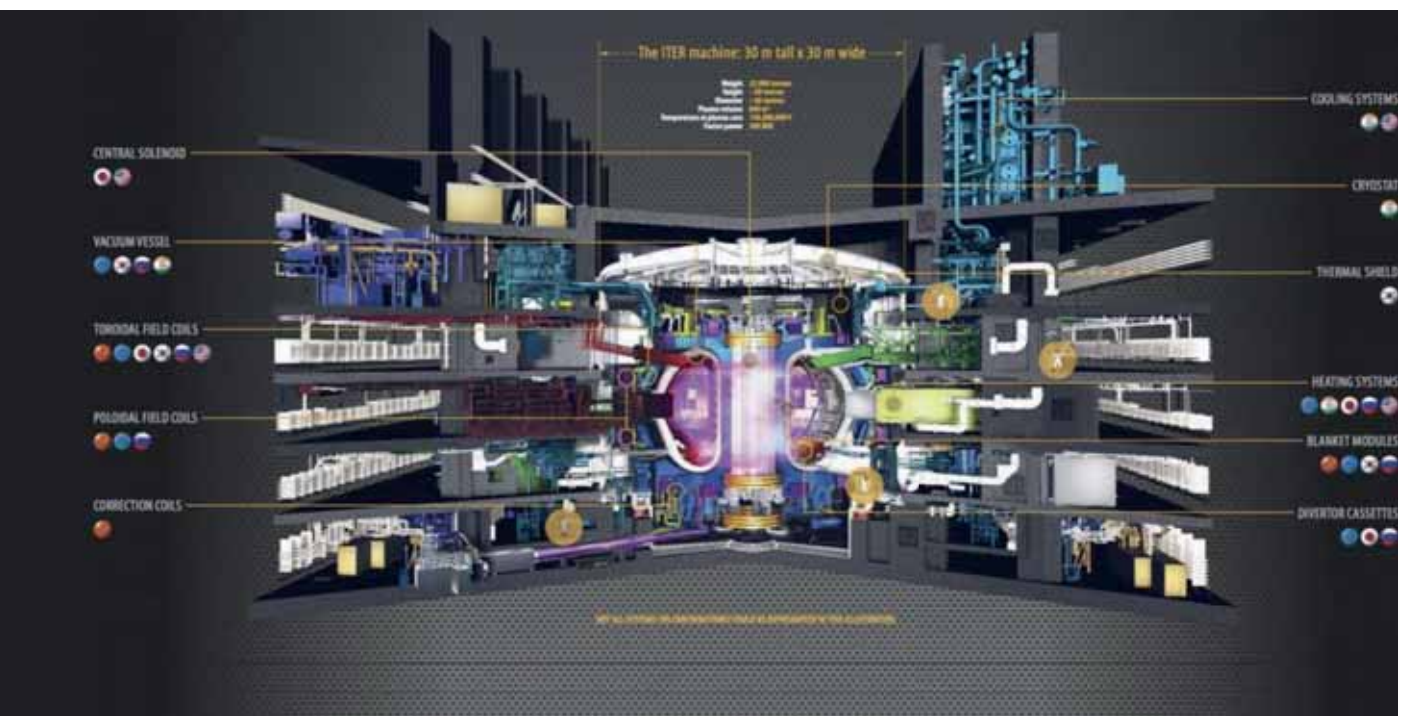
■ *Il reattore ITER*

Per raggiungere questo importante obiettivo, attendiamo ITER, cioè in latino la via, che sarà il più grande reattore a fusione del mondo, della potenza di 500 MW a fronte di un input di 50 MW, e capace di mantenere il plasma per almeno mezz'ora, una potenza che potrebbe alimentare 50.000 abitazioni.

Figura 4
Uno dei cavi usati per creare il campo magnetico toroidale di ITER

E' basato su un design TOKAMAK, e portato avanti in collaborazione fra Unione Europea e sei Paesi fra cui gli USA (fig. 4).
Una delle principali questioni che ITER deve dimostrare è che il fattore di scala effettivamente permette, come aumentano potenza e dimensioni, di rendere più stabile il plasma e raggiungere temperature superiori. ITER è il successore del JET, e trasporterà quella tecnologia su scala più grande. Ad esempio, i divertori al tungsteno e berillio del JET che catturano l'energia del reattore, ed anche il controllo in remoto del sistema. Ancora i magneti superconduttori che creano il campo magnetico in opposizione a quelli precedenti in rame, e che ridurranno notevolmente la potenza necessaria per produrre il plasma. Infine il JET lavora a spari singoli mentre ITER lavorerà in continuo.
Inoltre il JET, un progetto sostenuto da molte nazioni, ha creato il frame organizzativo per un progetto di grande scala internazionale come ITER.
Con un prezzo previsto di circa 15 miliardi di Euro, ed una spesa di complessi componenti, ITER può esistere oggi solo grazie ad un grande sforzo collaborativo. Ogni nazione partecipante contribuisce con ricercatori, infrastrutture, componenti, ed i risultati e i benefici saranno condivisi da tutti.
ITER a sua volta preparerà il cammino ad un altro reattore, chiamato DEMO, che espanderà le tecnologie di ITER su scala industriale e dimostrerà la fattibilità di un reattore a fusion commerciale, mentre le altre infrastrutture di ricerca continueranno a superare altri problemi ancora esistenti sotto diversi aspetti.
Così, mentre in Germania, il reattore Wendelstein 7-X sta provando i confini dello STELLARATOR, altri Paesi come U.S., Germania, UK, India, Francia, Giappone stanno portando avanti altri esperimenti operativi.
Ovviamente I fondi economici costituiscono un aspetto chiave per permettere gli avanzamenti della ricerca, che è di scala generazionale.
Ma ITER rimane uno step imprescindibile nel cammino per realizzare il sogno del sole sulla terra, il

Figura 5 - *Illustrazione dei Paesi responsabili della realizzazione delle diverse parti di ITER*



sogno degli scienziati di tutto il mondo di generare il quarto stato della materia in modo gestibile e controllato per piegarlo ad uso pacifico per le necessità umane.
Ma non è solo un problema di produzione energetica. C'è ben altro dentro l'obiettivo della realizzazione della reazione di fusione con generazione di plasma in modo controllato e gestibile.
C'è la grande curiosità scientifica della conoscenza della Materia, del suo quarto stato, del fenomeno di disruption del plasma che solo un impianto come ITER può esplorare fino in fondo.
È pur vero che l'idea di generare energia a basso costo e senza più problema di disponibilità delle materie prime è un sogno industriale per regalare ricchezza anche ai Paesi più sfortunati. Ma è altrettanto vero che, anche senza il sogno-desiderio di generare energia infinita ed a basso costo attraverso il più naturale dei fenomeni nucleari, la ricerca sulla fusione nucleare sarebbe comunque andata avanti, forse magari senza strappi e a ritmi più blandi, ma sarebbe inesorabilmente andata avanti.
L'obiettivo di riuscire a produrre energia pulita ed a basso costo utilizzando fonti disponibili in natura (come ad esempio l'acqua del mare) è di certo la forza guida che muove la ricerca nella fusione nucleare e di fatto spinge alla realizzazione del progetto ITER.
E i tempi di realizzazione di ITER, se pure non trascurabili, non sono di certo ciclopici rispetto ai tempi di costruzione dei più consolidati reattori a fissione (vedi EPR in Olkiluoto).
ITER prevede il completamento della Macchina con chiusura del criostato nel Novembre 2024, il primo plasma un anno dopo e la reazione di fusione DT negli anni 2032–2035 a stadi successivi fino alla simulazione della reazione deuterio – trizio.
Per un progetto partito nel 2007 con tante tecnologie tutte di avanguardia, un tempo di 18 anni per il primo plasma con reazione ad idrogeno non rappresenta poi un tempo esagerato: per rimanere ad Olkiluoto, i tempi di commissioning e realizzazione sono confrontabili. Diverrebbe poi energia a basso costo o energia per tutti perché deuterio e trizio sono prodotti disponibili in natura e l'acqua di mare ne è la principale sorgente.
Il costo capitale, seppure significativo, è il costo associato a macchine ancora prototipiche. Lo sforzo che dovrà essere fatto in futuro mirerà ad ingegnerizzare ed industrializzare progressivamente tale macchina per implementare soluzioni efficaci nelle prestazioni, ma importanti anche per la riduzione dei costi di investimento.

Figura 6 - *Il reattore JET, visto dall'alto*

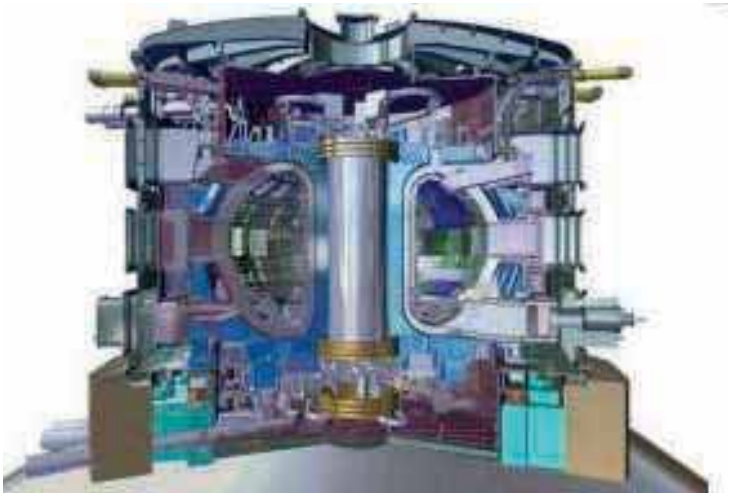


Figura 7 - *Il Tokamak del reattore a fusione a confinamento magnetico*

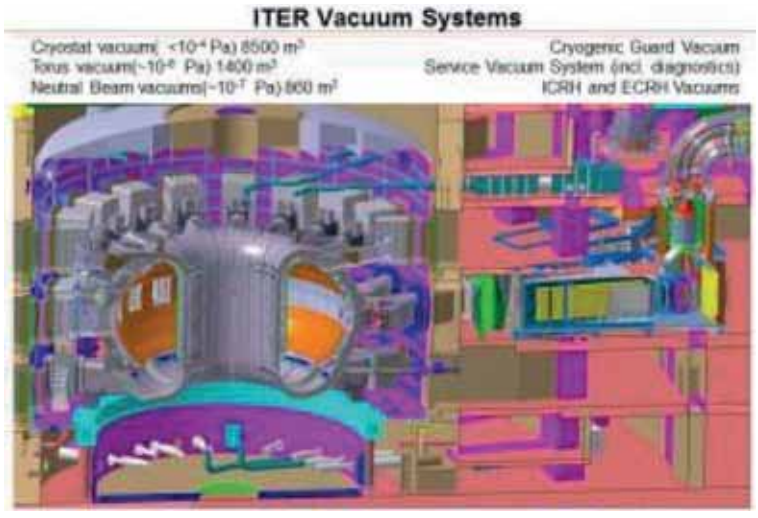


Figura 8 - *Il sistema a vuoto di ITER*

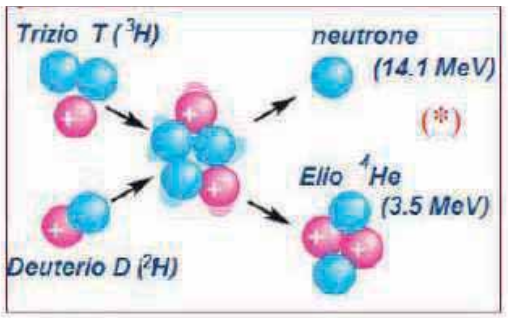
La reazione emozionale in tempi critici per la vita quotidiana giustifica affermazioni critiche di tale tipo. Il costo dell'Impianto ITER è ora effettivamente intorno a 18–20 miliardi, ma la simulazione di un fenomeno gigantesco quale la reazione di fusione che avviene nel sole fra le pareti di un vacuum vessel, val bene tale investimento.
ITER è un investimento ripartito fra sette colossi mondiali che rappresentano l'80% del PIL mondiale. Con L'Europa che finanzia il 45% del valore dell'impresa e i restanti sei Paesi (India , Corea del Sud, USA, Cina, Giappone e Russia) che finanziano il 9.9% ciascuno, il costo è distribuito attraverso un "in kind contribution" che protegge e valorizza l'industria locale di ogni specifico Paese.
ITER non produce esclusivamente la reazione di fusione, ma ha sviluppato tecnologie del futuro come il sistema criogenico a 25 KW o il vuoto in volumi da 10000 mc fino a valori di 10-7 Pa o i magneti superconduttori con generazione di campi magnetici fino a valori intorno a 10–15 Tesla. Sono tecnologie che già ripagano lo sforzo economico e sono trasferibili immediatamente in altri campi della scienza e della tecnologia come l'aeronautica o l'aerospaziale.

Il dimostratore DTT
Al fine di preparare il futuro per non disperdere un patrimonio di know-how unico di Experimental Physics e di assicurare la continuità tra ITER e DEMO destinando risorse su imprese ad alto valore aggiunto e per dare razionalizzazione, collaborazione e concretezza nelle scelte, il Progetto ITER sta investendo su infrastrutture strategiche di interesse pan-europeo, come ad esempio la Divertor Test Tokamak (DTT) facility. Vi è la necessità di cambiare paradigma: spesso fondi usati a pioggia per colmare esigenze particolari senza possibilità di ritorni oppure senza visione strategica per il Paese ormai non sono più accettabili mentre occorrono Infrastrutture di ricerca che fungano da volano di competitività e sviluppo economico. E' stato dimostrato un fattore 4 sugli investimenti che rimangono comunque nella misura di 500 M€ in 7 anni, da finanziare come Progetto nella lista del piano di sviluppo "Juncker". Fondi strutturali e fondi per la competitività da utilizzare meglio nel Divertor Tokamak Test facility. La tecnologia del DTT made in Italy sarebbe la stessa utilizzata per ITER, ma con in più la possibilità di effettuare test con materiali avanzati, utilizzando una tecnica brevettata dall'ENEA. L'obiettivo è di sperimentare soluzioni innovative, destinate a risolvere una della maggiori criticità del processo di fusione, ovvero lo smaltimento dell'energia nei reattori a fusione.
Nei prossimi paragrafi saranno presi in considerazione la fisica, matematica ed ingegneria del reattore a fusione.

La reazione di fusione, il plasma, modalità di riscaldamento, confinamento magnetico e stabilità

La reazione di fusione
La fusione, come osservato, è in definitiva concettualmente semplice. Due isotopi dell'idrogeno collidono con una forza capace di superare la repulsione coulombiana dei loro nuclei positivi e fondono, producendo una reazione con enorme quantità di energia. Ma per ottenerla, richiedono a loro volta un grande investimento e per decadi si è affrontato il problema di energizzare e mantenere questa energia nel combustibile idrogeno in modo che raggiunga temperature di 100 milioni di gradi. Ad oggi si è riusciti a scaldare il plasma a diverse centinaia di milioni di gradi, tenerlo ad alta temperatura per qualche minuto, ma non contemporaneamente e con diversi reattori.

Fusione



Il Plasma

Un Plasma è costituito da particelle cariche (atomi leggeri ionizzati ed elettroni) ad alta temperatura che possono quindi essere confinate da un appropriato campo magnetico.
In questo articolo viene considerata la geometria a toro magnetico per confinare il plasma da fusione nucleare.
Il riscaldamento del plasma, di cui si parlerà estesamente nel seguito del paragrafo, in particolare riguardo alla descrizione del Neutral Beam, avviene per:

- riscaldamento ohmico per induzione magnetica,
- riscaldamenti addizionali con radiofrequenza e con iniezione di fasci neutri (NBI-Neutral Beam Injectors, per esempio iniezione di atomi di deuterio veloci).

L'Ignizione

Si considerano *H* (idrogeno), *D* (Deuterio) e *T* (Trizio) come combustibile per la fusione nucleare all'interno di un Reattore tipo Tokamak.

Indichiamo con ρ, N, $v = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ e T rispettivamente la densità di combustibile nucleare, il numero di nuclei per m^3, la velocità termica dei nuclei del combustibile (ciascuno di raggio r e massa m) e la temperatura del Plasma (nuclei del combustibile ed elettroni), essendo $k=1{,}38\cdot10^{-23}$ *J/K* la costante di Boltzmann.

Si ricorda che nel Sole di massa $M=2\cdot10^{30}$ *kg*, raggio $R=7\cdot10^{8}$ *m*, potenza luminosa $P=3{,}78\cdot10^{26}$ *W*, la temperatura interna è di circa $T=15\cdot10^{6}$ *°K* e la potenza media specifica w di circa *0,3 W/m³* (vedi Tab.2).

Criterio di Lawson

Dalla relazione $\lambda \leq v\tau$ dove $\lambda=1/\Sigma=1/N\sigma$ è il libero cammino medio dei nuclei prima di reagire tra di loro, σ la sezione d'urto (H-H, D-T) microscopica e τ il tempo di confinamento del plasma, abbiamo che deve essere soddisfatto il seguente criterio:

$$N\tau \geq \frac{1}{v\sigma} = \frac{1}{\sigma}\sqrt{\frac{m}{3kT}}$$

Per l'idrogeno, con $T=10^8$ K (9 keV) e $\sigma=100$ barn ($=10^{-26}$ m²), abbiamo:

$$N\tau \geq \frac{1}{\sigma}\sqrt{\frac{m}{3kT}} = \frac{1}{3\cdot10^{-27}}\sqrt{\frac{1{,}67\cdot10^{-27}}{3\cdot1{,}38\cdot10^{-23}\cdot10^{8}}} = 2\cdot10^{20}\, s/m^3 \qquad (2\text{-}1)$$

ed anche:

$$N\tau T \cong 2\cdot10^{21}\ s\,keV/m^3 \qquad (2\text{-}2)$$

per ITER a Caradache è:
B=5 Tesla

$$N\tau T \geq 10^{21}\ s\,keV/m^3 \qquad (2\text{-}3)$$

Barriera di potenziale

La barriera di potenziale (vedi figura 9) tra due protoni si supera con una temperatura di circa 10^5 eV corrispondente a circa 10^9 °K.

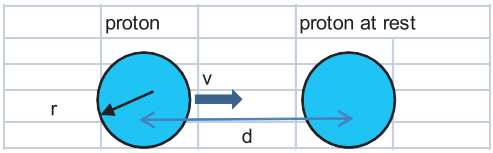


Figura 9 – *Barriera di potenziale tra due protoni*

Infatti, uguagliando l'energia cinetica E_k all'energia elettrica potenziale E_p acquisita dal sistema, ricaviamo:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{3kT}{2} = E_p = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{2r} \tag{2-4}$$

si ha:

$$T = \frac{1}{6\pi k\varepsilon_0}\frac{e^2}{2r} = T_f = T_{fusion} \cong 10^9 K$$
$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \cong \sqrt{\frac{3\cdot 1{,}38\cdot 10^{-23}\cdot 10^9}{1{,}67\cdot 10^{-27}}} = 5\cdot 10^6 \frac{m}{s} = 5000\frac{km}{s} \tag{2-5}$$

essendo e=1,6·10^{-19} °C la carica dell'elettrone, ε_0=8,85·10^{-12} H/m la costante dielettrica nel vuoto, 2r=10^{-14} m ed m=1.67·10^{-27} kg rispettivamente il diametro e la massa del protone.

Distribuzione energetica di N molecole in un gas a temperatiura media

La distribuzione energetica di N molecole in un gas a temperatura media T_0 è:

$$\frac{dn}{N} = \frac{2\pi}{(\pi kT_0)^{3/2}} E^{1/2} e^{-E/kT_0} dE \tag{2-6}$$

dove dn è il numero di molecole aventi Energia tra E ed E+dE e k=1,38·10^{-23} J/K la costante di Boltzmann.

Ponendo nella (2-6) E=kT ed x = T/T_0 la distribuzione diviene, per qualsiasi T_0, (vedi grafico in figura 10):

$$\frac{dn}{N} = \frac{2}{(\pi)^{1/2}} x^{1/2} e^{-x} dx \tag{2-7}$$

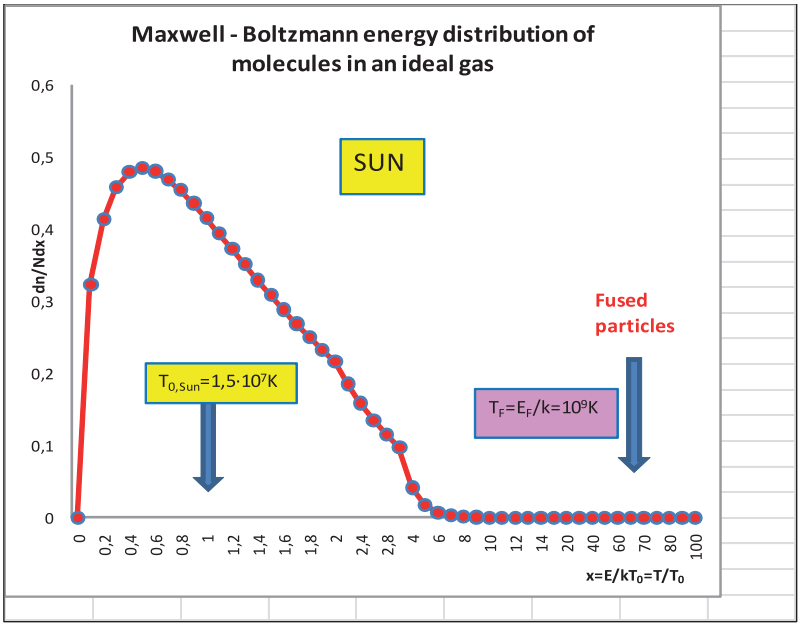


Figura 10 – *Distribuzione energetica di N molecole in un gas a temperatura T_0 (Sole)*

Nel Tokamak, nonostante si abbia una temperatura di circa 100 milioni di gradi Kelvin (circa 10 volte superiore a quella del Sole), non si è avuta una fusione nucleare continua nel tempo.
Ciò a dispetto, come evidenziato nel grafico successivo in Tab.1 del fatto che il Tokamak ha una frazione di particelle (H, D e T), pari a 10^{-4} (vedi calcoli nel foglio Excel che conduce alla Tab.1), con temperatura uguale o superiore a quella della fusione nucleare (1 miliardo di gradi Kelvin).

Tavola1 – *Maxwell-Boltzmann Energy distribution of molecules in an ideal gas.*

$$\frac{dn}{N} = \frac{2}{(\pi)^{1/2}}\left(\frac{E}{kT_0}\right)^{1/2} e^{-E/kT_0} d\left(\frac{E}{kT_0}\right) = \frac{2}{(\pi)^{1/2}} x^{1/2} e^{-x} dx$$

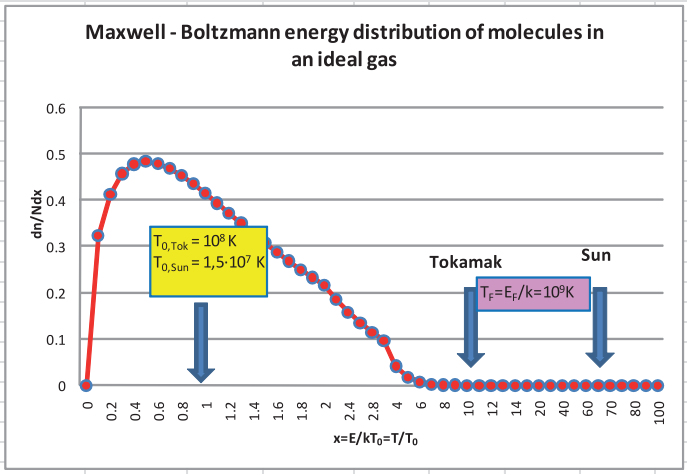
$$\frac{dn}{N} = \frac{2}{(\pi)^{1/2}}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/2} e^{-\frac{T}{T_0}} d\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

$T_{o,Sun}$=	1.5E+07 °K
$T_{0,Tok}$=	1E+08 °K
$T_F = T_{Fusion}$ =	1E+09 °K

$$T_{0,Sun} = 1{,}5 \cdot 10^7\ °K \qquad T_{o.Tok} = 10^8\ °K \qquad T = \frac{E}{k}$$

$$\frac{N_{x\geq 1}}{N} = \int_1^\infty \frac{dn}{N} = \int_1^\infty \frac{2}{\sqrt{\pi}} x^{1/2} e^{-x} dx \qquad x = \frac{E}{kT} \geq 1 \qquad T_F = \frac{E_F}{k} = 10^{9}\,°K$$

$x = T/T_0$	dx	dn/Ndx	$N_{x>1}/N$	$N_{x>10}/N$	$N_{x>64}/N$
0	0.1	0	0		
0.1	0.1	0.322868	0.032287		
0.2	0.1	0.413153	0.041315		
0.3	0.1	0.457854	0.045785		
0.4	0.1	0.478374	0.047837		
0.5	0.1	0.483941	0.048394		
0.6	0.1	0.479683	0.047968		
0.7	0.1	0.468811	0.046881		
0.8	0.1	0.453487	0.045349		
0.9	0.1	0.435222	0.043522		
1	0.1	0.415107	0.041511		
1.1	0.1	0.393938	0.039394		
1.2	0.1	0.372299	0.03723		
1.3	0.1	0.350626	0.035063		
1.4	0.1	0.329236	0.032924		
1.5	0.1	0.308361	0.030836		
1.6	0.1	0.288167	0.028817		
1.7	0.1	0.268769	0.026877		
1.8	0.1	0.250243	0.025024		
1.9	0.1	0.232634	0.023263		
2	0.2	0.215964	0.043193		
2.2	0.2	0.185446	0.037089		
2.4	0.2	0.158582	0.031716		
2.6	0.2	0.135138	0.027028		
2.8	0.2	0.114818	0.022964		
3	1	0.097304	0.097304		
4	1	0.041334	0.041334		
5	1	0.017001	0.017001		
6	1	0.006851	0.006851		
7	1	0.002722	0.002722		
8	1	0.001071	0.001071		
9	1	0.000418	0.000418		
10	1	0.000162	0.000162	0.000162	
11	1	6.25E-05	6.25E-05	6E-05	
12	1	2.4E-05	2.4E-05	2E-05	
13	1	9.2E-06	9.2E-06	9E-06	
14	1	3.51E-06	3.51E-06	4E-06	
15	5	1.34E-06	6.68E-06	7E-06	
20	10	1.04E-08	1.04E-07	1E-07	
30	10	5.78E-13	5.78E-12	6E-12	
40	10	3.03E-17	3.03E-16	3E-16	
50	10	1.54E-21	1.54E-20	2E-20	
60	10	7.65E-26	7.65E-25	8E-25	
64	6	1.45E-27	8.69E-27	9E-27	9E-27
70	5	3.75E-30	1.88E-29	2E-29	2E-29
75	15	2.62E-32	3.93E-31	4E-31	4E-31
80	10	1.82E-34	1.82E-33	2E-33	2E-33
90	10	8.77E-39	8.77E-38	9E-38	9E-38
100	1	4.2E-43	4.2E-43	4E-43	4E-43
101			0.65	0.0003	9E-27



$$x = \frac{T}{T_0} = \frac{T_F}{T_{0,Tok}} = \frac{10^9}{10^8} = 10$$

$$x = \frac{T}{T_0} = \frac{T_F}{T_{0,Sun}} = \frac{10^9}{1{,}5 \cdot 10^7} = 64$$

La Stabilità

Cosa si intende per stabilità del processo di fusione nucleare?
Nella fusione nucleare siamo in presenza di un plasma, cioè una massa gassosa le cui particelle (idrogeno, deuterio o trizio ionizzati) si muovono ad alta velocità (1000 km/s) urtandosi tra di loro dopo aver percorso, tra due urti successivi, una distanza media λ chiamata libero cammino medio.
E' intuitivo pensare che, lungo una direzione, quanto più λ è piccolo rispetto alla dimensione D del contenitore del plasma tanto più il processo di fusione sia stabile.
Quanto sopra trova esplicitazione nella formula sottostante:

$$(Stability)_{linear} = \frac{D}{2\,\lambda} \tag{2-8}$$

Nel SOLE la formula della stabilità lineare assume il valore (vedi Tab.2):

$$(Stability)_{Sun,linear} = \frac{D_{Sun}}{2\,\lambda_{Sun}} \cong \frac{1{,}4\cdot 10^{9}\,m}{2\cdot 10^{-2}\,m} \cong 10^{11} \tag{2-9}$$

Nel Tokamak (vedi figura 11 e Tab.3) la formula della stabilità lineare assume il valore:

$$(Stability)_{Tok,linear} = \frac{D_{Tok}}{2\,r_{Tok}} \cdot \frac{D_{Tok}}{2\,\lambda_{Tok}} = \frac{3m}{2\cdot 0.01m} \cdot \frac{3m}{2\cdot 4\cdot 10^{4}\,m} \cong 10^{-2} \tag{2-10}$$

dove r è il raggio del percorso elicoidale delle particelle nel Tokamak.
Da quanto sopra si deduce che la stabilità lineare del Tokamak è molto bassa, circa 10^{13} volte inferiore a quella del SOLE, tanto da non permettere una fusione nucleare continua.

Figura 11
Rappresentazione schematica del Tokamak

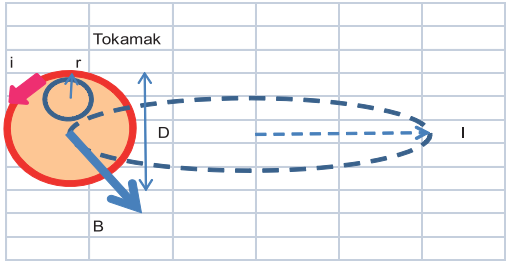


Tavola 2
Pressioni nella Terra e nel Sole e stabilità lineare nel Sole

Stefan-Boltzmann constant σ =	5.67E-08	W/m^2K^4						
a=4σ/c =	7.56E-16	$J/(m^3K^4)$						
Speed of light c =	3E+08	m/s						
Boltzmann constant k =	1.38E-23	J/K						
Gas constant R = k N_A =	8.31	J/K-mol						
Gravitational constant G =	6.67E-11	Nm^2/kg^2						
EARTH M_{Earth} =	6E+24	kg						
Earth Radius R =	6.38E+06	m	6.38E+03	km				
p_{Earth} =	1.2E+11	Pa	**1.E+06**	bar				
Sun: M =	2E+30	kg						
R =	7E+08	m						
V =	1E+27	m^3						
ρ =	1392	Kg/m^3						
numero di moli n =	2E+33							
p_{Sun} =	2E+14	Pa	**2.E+09**	bar				
$p_{Sun,rad}$ =	1E+13	Pa	**1.E+08**	bar				
P =	3.78E+26	W						
w =	3E-01	W/m^3						
	2E-04	W/kg						
T =	1.50E+07	K						
Avogadro number N_A =	6.02E+23							
N =	8E+29	nuclei/m^3						
α = **N*/N** = **N**($T>10^9K$)/**N** =	**9E-27**							
N* = N($T>10^9K$) =	**7295**	nuclei/m^3			2.E+11	4.E+11	reaz/(sm^3)	2.E-08 s
v =	6E+05	m/s						
σ =	1E-28	m^2	1	barns				
Σ=Nσ=	8.38E+01	m^{-1}						
λ=1/Σ=	0.01	m						
t =λ/v=	2E-08	s						
N ($T>10^8K$) che si scontrano al sec	4E+11	nuclei/s m^3	w =	0.4	W/m^3	0.0003	W/kg	
E'_{fusion}=	3.67E+07	eV/kg	σ_f =	1E-29	m^2	1E-29	m^2	
	5.87E-12	J/kg						
w = P' =E'/t=	**3E-04**	W/kg						
$(Stability)_{Sun,linear}$ = R/λs =	**6E+10**							

$$P_{Earth} \cong \frac{G}{4\pi}\frac{M_E^2}{R^4}$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{3kT}{2} \qquad v = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

$$p_{Sun} = nRT/V$$

$$p_{Sun,rad} = aT^4/3 = (4/3)\,\sigma T^4/c$$

$$\frac{1}{2}E_k = E_p = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r} \qquad T = \frac{4}{3k}E_p \qquad T = \frac{1}{6\pi\,k\varepsilon_0}\frac{e^2}{R}$$

conservaz .p̄

$$\sigma_f = \frac{N^*/t}{\alpha\,N^2 v^*}$$

$$(Stability)_{Sun,linear} = \frac{D}{2\lambda_s}$$

Peraltro per un confronto della stabilità tra SOLE e Tokamak si considera il Sole come un Tokamak di sezione semicircolare e pertanto si può considerare una stabilità globale riferendoci alle due dimensioni trasversali.

Pertanto il Rapporto tra la stabilità globale del SOLE e quella del Tokamak è pari a:

$$\frac{(Stability)_{Sun}}{(Stability)_{Tok}} = \left(\frac{Stability_{Sun,linear}}{Stability_{Tok,linear}}\right)^2 = \left(\frac{10^{11}}{10^{-2}}\right)^2 = 10^{26} \tag{2-11}$$

Il precedente risultato è confermato dalla formula successiva, ricordando l'equazione dei gas perfetti $p=NkT$:

$$= \left(\frac{p_{Sun}T_{Tok}}{p_{Tok}T_{Sun}} \cdot \frac{p_{Sun}}{p_{Tok}}\right)^2 = \frac{p_{Sun}^4}{p_{Tok}^4} \cdot \frac{T_{Tok}^2}{T_{Sun}^2} = \left(\frac{10^9\,bar}{10^3\,bar}\right)^4 \cdot \left(\frac{10^8\,K}{10^7\,K}\right)^2 = 10^{26} \tag{2-12}$$

dove, sia per il Sole che per il Tokamak, N, σ, p e T sono rispettivamente il numero di particelle per unità di volume, la sezione d'urto delle particelle, la pressione e la Temperatura media.

Il Confinamento magnetico

Il concetto di confinamento non è esposto mediante il criterio di Larmor ma è derivato dalle caratteristiche proprie del campo magnetico e dal concetto, più comune, di pressione di radiazione. Ciò consente anche, in modo molto naturale, di giungere alla definizione del coefficiente β di equilibrio di un plasma, la cui espressione consente di trovarne la densità massima e quindi, insieme al criterio di Lawson, il tempo minimo di confinamento.
Il criterio di Lawson:

$n\tau > 10^{14}$ (per la reazione D – T) (2-13)

con n: ioni / cm^3
τ: tempo di confinamento del plasma

che stabilisce le condizioni affinché la potenza prodotta dalle reazioni termonucleari superi la potenza dispersa, non fissa un limite per n e τ separatamente ma per il loro prodotto il che suggerisce due vie differenti per tentare di soddisfare il suddetto criterio.
La prima cerca di ottenere la reazione di fusione in tempi molto brevi ($\tau \approx 10^{-11}$ s) cosa che comporta la necessità di ottenere un plasma di densità elevatissima ($n \approx 10^{25}$ ioni/cm^3): tali parametri sono adottati nel metodo di confinamento inerziale.
La seconda invece prevede tempi di confinamento più alti con densità minori ma ciò comporta la necessità di evitare che il plasma, date le elevatissime temperature in cui si deve operare, venga a contatto con le pareti del recipiente in cui è contenuto. Ciò conduce a realizzare i sistemi a confinamento magnetico nei quali l'effetto di un campo magnetico sufficientemente forte è quello di costringere le particelle cariche a percorrere delle traiettorie elicoidali attorno alle linee di forza.
Nel seguito saranno discussi in dettaglio il comportamento delle particelle ionizzate in un campo magnetico e le condizioni di equilibrio del plasma.

1. *effetto del confinamento magnetico su particelle ionizzate.*
   Mediante opportune configurazioni è possibile confinare le particelle del plasma in una regione separata da ogni parete materiale. La configurazione di partenza, che è stata ottimizzata nel tempo e che viene qui utilizzata per semplicità espositiva, è costituita da un toro, dentro il quale è presente il plasma, avvolto dalle spire di un solenoide dentro cui circola una corrente che crea il campo magnetico all'interno del toro. Le linee di forza del campo sono cerchi coassiali con il toro e su esse è applicata la forza magnetica che impone alle particelle cariche del plasma un moto elicoidale attorno alle linee di forza del campo essendo inibiti i moti con componente radiale diversa da 0.
2. *pressione magnetica ed equilibrio del plasma: limite superiore sulla densità e limite inferiore sul tempo di confinamento.*
   Al campo magnetico è associata una pressione di radiazione di intensità pari a $P_m = B^2/2\mu_0$ [N/m^2] essendo B l'intensità del vettore induzione magnetica e μ_0 la permeabilità magnetica del vuoto. L'espressione della pressione di radiazione è ricavabile dalle seguenti considerazioni.

Si supponga di considerare un tronco del toro sufficientemente corto da potersi considerare rettilineo, si fissi l'attenzione su un punto P di coordinate x,y,z definite in un sistema di riferimento cartesiano, come illustrato in figura 12, in cui è rappresentata una sezione trasversale del tronco di toro:

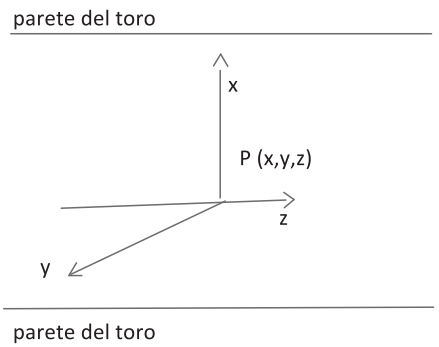


Figura12
Sezione trasversale del tronco del toro

se nel punto P(x,y,z) transita una carica q (elettrone, D^+ o T^+) con velocità $\vec{v}$ su di essa agisce la forza di induzione magnetica:

$$\vec{F} = q\vec{v}x\vec{B}. \qquad (2\text{-}14)$$

Passando alla densità di corrente $\vec{J}$ nel punto P del plasma, l'espressione dell'induzione magnetica diviene:

$$\vec{F} = \vec{j}x\vec{B}. \qquad (2\text{-}15)$$

poiché il campo magnetico ha direzione tangente all'asse longitudinale del toro, il suo modulo coincide con la componente B_z e considerando solo la componente radiale della densità di corrente, che per comodità si supporrà orientata lungo l'asse x, si ha:

$$|\vec{F}| = J_x B_z \qquad (2\text{-}16)$$

con $\vec{F}$ vettore ortogonale al piano formato da $\vec{v}_x$ e $\vec{B}_z$ e tale da imprimere alle particelle del plasma un moto elicoidale intorno le linee del campo magnetico, opponendosi alla fuga delle particelle dal plasma stesso e realizzando così l'effetto di confinamento.
Considerando un elemento di volume infinitesimo del plasma dxdydz attraversato dalla corrente $\vec{J}$ di particelle cariche, la forza magnetica esercitata sul volumetto è pari in intensità a:

$dF = J_x B_z\, dxdydz.$ (2-17)

Poiché la forza applicata dal campo magnetico è radiale, si può calcolare la pressione esercitata da essa sull'elemento di superficie dxdz del plasma:

$$dP_m = \frac{dF}{dxdz} = j_x B_z dy. \qquad (2\text{-}18)$$

La pressione di radiazione che si esercita sulla superficie in esame si otterrà integrando rispetto a y da 0 all'infinito, supponendo che l'origine del piano cartesiano giaccia sull'asse centrale del toro; pertanto P assume l'espressione:

$$P_m = \int_0^\infty j_x B_z dy \qquad (2\text{-}19)$$

Per calcolare l'integrale si può ricorrere alla 4° equazione di Maxwell:

$$rot\vec{B} = \mu\vec{j}. \qquad (2\text{-}20)$$

che nel caso in esame si specializza nella seguente:

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu \vec{J_x}. \tag{2-21}$$

Poiché B_y si assume pari a 0, l'equazione diventa:

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} = \mu \vec{J_x}. \tag{2-22}$$

Quindi l'espressione della pressione diventa:

$$P_m = \int_0^\infty 1/\mu \frac{\partial B_z}{\partial y} B_z dy = \int_0^\infty 1/2\, \mu \frac{\partial B_z^2}{\partial y} = \frac{1}{2\mu} B_z^2(\infty) - \frac{1}{2\mu} B_z^2(0) = \frac{-1}{2\mu} B_z^2(0). \tag{2-23}$$

dove il segno meno dipende dal sistema di riferimento adottato. Assumendo il campo magnetico costante all'interno del toro, l'espressione della pressione diventa:

$$P_m = \frac{1}{2\mu} {B_z}^2 \tag{2-24}$$

che è appunto l'espressione cercata.

Il plasma è un gas che segue naturalmente le leggi idrodinamiche dei gas, per cui la sua pressione P_g che eserciterebbe sulle pareti del toro è esprimibile con le note leggi della teoria cinetica dei gas. Essa ha quindi l'espressione:

$$P_g = \frac{m}{3} n \bar{v^2}. \tag{2-25}$$

Nell'espressione precedente m è la massa delle molecole del gas, n è il numero di molecole per cm^3, $\bar{v^2}$ è la media dei moduli delle velocità dei centri di massa delle molecole.
La temperatura T di un gas si può esprimere in termini di energia cinetica media delle molecole mediante l'espressione:

$$\frac{m}{2} \bar{\xi^2} = \frac{k}{2} T. \tag{2-26}$$

dove $\bar{\xi^2}$ è la componente lungo l'asse x del moto del centro di massa delle molecole e k la costante di Boltzmann. Considerando le 3 componenti del centro di massa si ha:

$$\frac{m}{2} \bar{v^2} = \frac{3}{2} kT \rightarrow m\bar{v^2} = 3kT \tag{2-27}$$

Per cui l'espressione della pressione P_g diventa:

$$P_g = \frac{m}{3} n \bar{v^2} = nkT. \tag{2-28}$$

L'espressione precedente andrebbe più precisamente scritta facendo riferimento alle tre tipologie di particelle presenti nel plasma, cioè elettroni e ioni di Deuterio e Trizio. In tale modo l'espressione assume la seguente forma:

$$P_g = (n_e + n_D + n_T)kT = n_{tot} kT \tag{2-29}$$

Nel seguito si assumerà $n = n_{tot}$.

Per l'equilibrio del plasma si chiede che la pressione del gas sia inferiore alla pressione magnetica

e ciò è espresso dal coefficiente β che deve essere minore di 1:

$$\beta = \frac{p_g}{p_m} < 1. \quad (2\text{-}30)$$

Dall'espressione di β consegue immediatamente il limite superiore della densità del plasma. Infatti la condizione su β si può anche scrivere:

$$nkT < \frac{B^2}{2\mu_0}. \quad (2\text{-}31)$$

essendo μ_0 la permeabilità magnetica nel vuoto.
Dalla precedente deriva:

$$n < \frac{B^2}{2\mu_0}\frac{1}{kt}. \quad (2\text{-}32)$$

Assumendo per B un valore simile a quello presente in ITER, cioè 10 Tesla e per le altre grandezze che compaiono i seguenti valori:

$\mu_0 = 4\ \pi\ 10^{-7}$ w*s/A*m
$k = 1{,}3805*10^{-23}$ j/k
$T = 10^8$ °K

si trova immediatamente che:
$n < 28{,}8*10^{15}$ ioni / cm^3.

Quindi la condizione di equilibrio consente di definire che il valore di n deve essere inferiore a 10^{15} ioni / cm^3.

Confrontando il risultato trovato con il criterio di Lawson, si può scrivere:
$n_{max}*\tau_{min} > 10^{14}$, (2-33)

il che consente di scrivere:

$$\tau_{min} > \frac{10^{14}}{28{,}8*10^{15}} \approx 0{,}1s. \quad (2\text{-}34)$$

Quindi τ, il tempo di confinamento, dovrà essere almeno dell'ordine del secondo.

■ *Il riscaldamento del Plasma – La Neutral Beam Test Facility*

Come osservato all'interno del presente documento, ITER sarà il primo impianto in grado di mantenere attiva la fusione nucleare fino a 3600 s (fino ad oggi il massimo è stato 390 s, raggiunti nel reattore Tore Supra in Francia), e a produrre energia netta, ovvero energia in quantità superiore a quella necessaria per l'attivazione della reazione nucleare.
Per ottenere il riscaldamento del plasma fino alle altissime temperature previste per il progetto ITER, si utilizzano due sistemi di riscaldamento ausiliario, uno a radiofrequenza (RF) e l'altro a iniezione di neutri.
L'iniezione di fasci energetici di atomi neutri (fino a 1 MeV) sarà uno dei metodi primari utilizzati per riscaldare il plasma e per guidare la corrente di plasma all'interno di esso. Il progetto richiede per ogni linea fino a 16,5 MW di potenza. Inizialmente sono previste due linee per iniettare tangenzialmente alla direzione della corrente di plasma, e con la possibilità di eventuale aggiunta di una terza linea. Il design generale degli iniettori ha preso forma nel corso degli ultimi 17 anni, ed ora è basato su una sorgente di ioni negativi e un acceleratore elettrostatico derivato da acceleratori di ioni negativi sviluppati dalla Japan Atomic Energy Agency (JAEA), ora Agency for Quantum and Radiological Science and Technology (QST). Nel corso degli ultimi anni, il concetto di base del sistema è stato ulteriormente perfezionato e sviluppato.
Il progetto ITER richiede, quindi, un sistema di riscaldamento aggiuntivo rispetto ai sistemi a radiofrequenza, costituito da due iniettori di fascio neutro, ognuno in grado di fornire un'accelerazione

Figura 13 - *Il complesso di edifici di PRIMA che ospiterà i due esperimenti SPIDER e MITICA*

di 1 MV ad un fascio di ioni negativi di deuterio di 40 A, fornendo al plasma una potenza di circa 17 MW per un'ora. Questi valori non sono mai stati sperimentalmente provati, pertanto è stato deciso di costruire una Test Facility. Tale Test Facility, denominata PRIMA (Padova Research on ITER Megavolt Accelerator) illustrata in figura 13, è in corso di costruzione a Padova e comprende una sorgente full-size di ioni negativi, SPIDER, ed un prototipo in scala uno a uno dell'iniettore di ITER, MITICA, con l'obiettivo di sviluppare e mettere a punto gli iniettori di riscaldamento da installare in ITER (fig. 13).

■ *Il progetto MITICA*

MITICA è un prototipo scala 1:1 dell'iniettore a fascio neutro di ITER (vedi figura 14), identico ad ITER HNB, compreso il sistema di alimentazione e la linea di trasmissione ad alta tensione (vedi figura 15).

La potenza elettrica di uscita dei sistemi di alimentazione dell'acceleratore di MITICA denominato AGPS (Acceleration Grid Power Supply) e della sorgente ionica ISEPS (Ion Source and Extractor Power Supply), viene trasmessa all'iniettore tramite una linea di trasmissione da 1 MV (TL), lunga più di 100 m. La linea è costituita da una tubazione in acciaio al carbonio contenente tutti i conduttori attivi e isolati da alta pressione del gas SF6 (pressione nominale di 6,5 bar, fino a 80°C). Nell'ultima parte, la TL ospita anche i tubi che trasportano l'acqua di raffreddamento alle reti di accelerazione e alla sorgente di ioni. La TL è collegata al recipiente attraverso un bushing HV che fun-

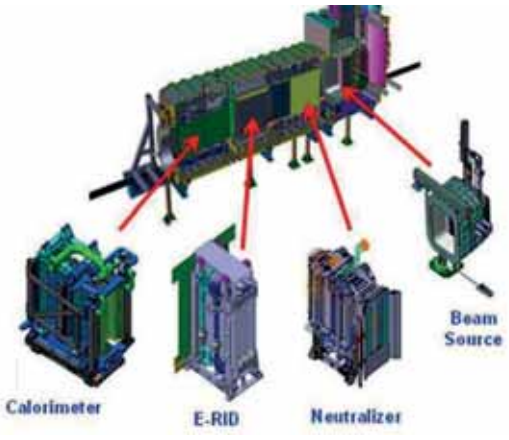


Figura 14 – *Sezione di MITICA*

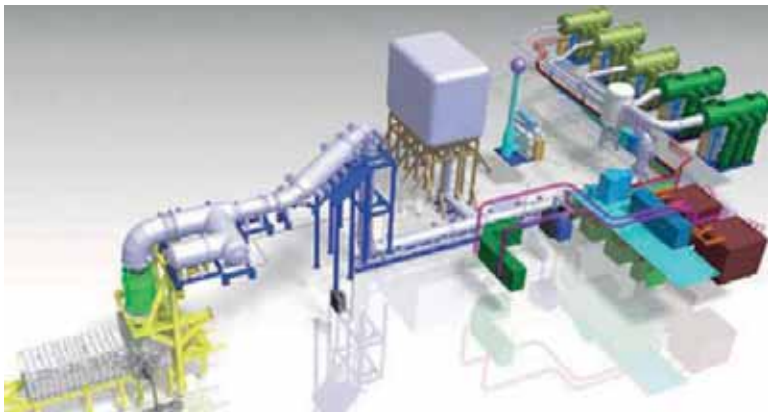


Figura 15 – *Prospetto generale di MITICA, compresa la Transmission Line*

ge anche da barriera tra il gas in pressione contenuto nella TL ed il vessel. Esso è progettato per fornire una doppia barriera, un requisito fondamentale negli impianti nucleari come ITER.

■ *Il progetto SPIDER*

SPIDER è il prototipo della sorgente di ioni negativi dell'HNB.
La Beam Source (BS) di SPIDER è progettata per accelerare il fascio fino a 100 kV con una potenza totale di 6 MW. La sorgente include: 8 antenne RF e una camera di espansione per produrre il plasma da cui vengono estratti gli ioni e una serie di griglie per l'estrazione e l'accelerazione del fascio di ioni negativi. Un campo magnetico, generato da una corrente di qualche kA, permette di aumentare la densità di corrente degli ioni negativi estratti. Le griglie ed i componenti principali sono attivamente raffreddati. SPIDER è inoltre provvisto di un "electron dump", costituito da più tubi metallici verticali opportunamente disposti in modo da assorbire la maggior parte della potenza associata agli elettroni in uscita dall'acceleratore. Una vista esplosa della sorgente SPIDER BEAM è mostrata in figura 16.

Figura 16 *Sezione esplosa della SPIDER Beam Source.*

Calcoli ingegneristici e strutturali

Si forniscono di seguiti i valori dei principali parametri nucleari che caratterizzano un sistema a fusione e le equazioni di base che consentono di ricavarli.

■ *Potenza specifica nucleare*

La potenza specifica nucleare generata dal Reattore a fusione è:

$$w = \Phi\Sigma\varepsilon = f_N N \cdot f_v v \cdot N\sigma\varepsilon = f_N f_v N^2 v\sigma\varepsilon \qquad (3\text{-}13)$$

dove

$$f_N = \frac{N_{T_f}}{N_T} = \frac{N_{10^9}}{N_{10^8}} \cong 10^{-4}$$

(vedi Tab.1)

$f_v = \frac{v_{T_f}}{v_T} = \frac{v_{10^9}}{v_{10^8}} = \sqrt{\frac{T_f}{T}} = \sqrt{\frac{10^9}{10^8}} = \sqrt{10} \cong 3$, ε=14 MeV è l'energia rilasciata per reazione nucleare.

■ *Ripartizione Potenza specifica nucleare (vedi figura 17)*

- trasporto nuclei ed elettroni (equipartizione dell'energia cinetica):

$$w_T = 2\alpha_T \frac{3NkT}{2\tau} \qquad (3\text{-}14)$$

essendo $\alpha_T \cong 10^{-2}$

- radiazione di Bremsstrahlung, dell'ordine di w_T:

$$w_B = \alpha_B N^2 Z^2 (kT)^{1/2} \quad (3\text{-}15)$$

dove $\alpha_B \cong 5.3 \cdot 10^{-37} W/m^3$ (per il deuterio), N sono nuclei/m^3, Z=1 è il numero atomico e kT è espresso in keV.

- radiazione gamma:

$$w_\gamma = \alpha_\gamma w \quad (3\text{-}16)$$

essendo $\alpha_\gamma \cong 0{,}1$

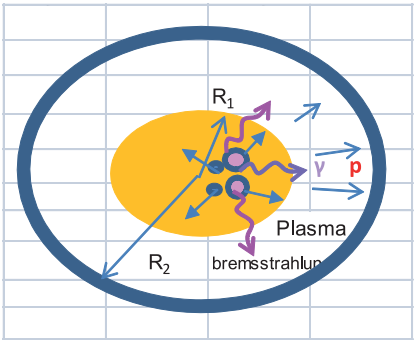


Figura 17
Plasma con protoni, elettroni, gamma e radiazione di Bremsstrahlung.

Potenze

Potenza nucleare termica

$$P_n = P_t = w \cdot V_1 = \frac{4\pi R_1^3}{3} w \quad (3\text{-}17)$$

Potenza elettrica

$$P_e = \eta P_t \quad (3\text{-}18)$$

Pressioni (vedi figura 17, figura 18 e Tab. 3)

bordo R_1

- gas ionizzato (protoni ed elettroni): $p_{1,gas} = 2NkT$ (3-19)
- radiazione gamma: $p_{1,\gamma} = \frac{w_\gamma}{c} \cdot \frac{\pi R_1^2 \cdot 2\pi l}{2\pi R_1 \cdot 2\pi l} = \frac{w_\gamma}{c} \cdot \frac{R_1}{2}$ (3-20)
- Bremsstrahlung: $p_{1,B} = \frac{w_B}{c} \cdot \frac{R_1}{2}$ (3-21)
- od anche per la radiazione elettromagnetica totale: $p_{1,rad} \cong \frac{\rho}{10^5} \frac{\sigma T^4}{c}$ (3-22)

essendo ρ la densità del combustibile in kg/m^3, $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/(m^{2}K^4) la costante di Stefan-Boltzmann e $c = 3 \cdot 10^8$ m/s la velocità della luce.

bordo R_2

- azione elettrodinamica su bobine toroidali: $p_{2,el} = p_{1,gas} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2$ (3-23)

- radiazione gamma: $p_{2,\gamma} = p_{1,\gamma}\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$ (3-24)
- Bremsstrahlung: $p_{2,B} = p_{1,B}\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$ (3-25)
- od anche per la radiazione elettromagnetica totale: $p_{2,rad} = p_{1,rad}\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$ (3-26)

■ *Sollecitazioni elettrodinamiche sulle bobine toroidali (vedi Tab. 3 e figura 18)*

Come abbiamo visto, la pressione espansiva nel plasma è dovuta a due componenti (facciamo riferimento ad un reattore di potenza elettrica P=1000 MWe):

1. Pressione dovuta alle particelle ionizzate uguale a circa 3500 bar;
2. Pressione radiativa, per $T=10^8$K, uguale a circa 800 bar.

Tale pressione espansiva è contenuta dall'azione elettrodinamica sul plasma ad opera del campo magnetico toroidale B.
Per la terza legge della dinamica, una reazione elettrodinamica agisce sulla corrente delle bobine toroidali che hanno sviluppato B (vedi figura 18).
Vedendolo in altro modo, possiamo notare che la pressione espansiva, imprimendo velocità radiale v alle particelle ionizzate del plasma, produce un controcampo magnetico che sviluppa un'azione elettrodinamica verso l'esterno sulle bobine toroidali!
La pressione radiativa agisce invece sulle pareti della camera.

L'azione su ciascuna bobina toroidale è dell'ordine delle **migliaia di tonnellate**.

L'alto valore delle pressioni in gioco può essere giustificato facendo un confronto con i dati tecnici pubblicati sul sito ITER.
Poiché risulta:
ITER: Volume plasma Vi=840 mc, massa combustibile per ciclo Mi=1g, induzione magnetica Bi=12Tesla, temperatura Ti=150 milioni di gradi;
Reattore 1000MWe: Volume plasma Vr=180 mc, massa combustibile per ciclo Mr=75g, induzione magnetica Br=2Tesla, temperatura Tr=100 milioni di gradi;
dalla relazione dei gas perfetti pV=MRT possiamo ricavare il rapporto delle pressioni nei due reattori:

$$\frac{p_r}{p_i} = \frac{M_r}{M_i}\cdot\frac{T_r}{T_i}\cdot\frac{V_i}{V_r} = \frac{75}{1}\cdot\frac{100}{150}\cdot\frac{840}{180} \cong 250$$

Come si può vedere la pressione p_r per un reattore da 1000MWe è circa 250 volte quella p_i di ITER.

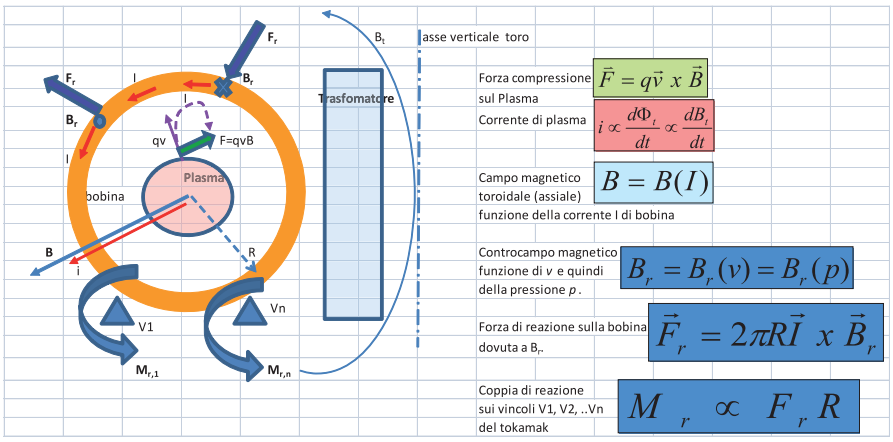
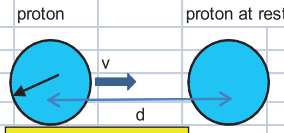


Figura 18
Sollecitazioni elettrodinamiche sulle bobine toroidali e quindi sui vincoli strutturali del reattore.

Tavola 3 - *Pressioni e stabilità in un reattore Tokamak da 1000 MWe*

Reattore Tokamak					
D =	3	m			
l =	4	m			
V =	178	m^3			
Elementary charge e =	1.60E-19	C			
Boltzmann constant k =	1.38E-23	J/K			
permittivity of free space ε_0 =	8.85E-12	F/m			
d =	1E-14	m			
Ep =	1.15E-14	J	7E+04	eV	
T* =	**1.1E+09**	°K			
T =	1E+08	°K	9	keV	
$p_{Tokamak}$ =	4E+08	Pa	**3521**	bar	
$p_{Tokamak,rad}$ =	8E+07	Pa	**801**	bar	
m = m_p =	1.67E-27	kg			
v =	1.57E+06	m/s			
v*=v $(T^*/T)^{0,5}$=	5.25E+06	m/s			
σ_s =	1E-28	m^2	1	barns	
β =	1E-02				
$\sigma_f = \beta\,\sigma$ =	1E-30	m^2	1E-02	barns	
Nτ =	**2E+23**	s/m^3			
ε =	1.40E+06	eV			
	2.24E-13	J			
w =	2E+07	W/m^3	7E+07	2E+07	
α =f_N= **N*/N= N** $(T>10^9°K)$/**N** =	3E-04				
N =	**3E+23**	n/m^3			
N*= N $(T>10^9°K)$ =	7E+19	n/m^3			
λ_f =1/(Nσ_f) =	4E+06	m			
τ =	**1**	s			
λ_s =1/(Nσ_s) =	4E+04	m			
t =$\lambda_f/\hat{v}$=	0.7	s			
N $(T>10^9°K)$ che si scontrano e fondono al sec	9E+19	nuclei/s m^3			
N_{totali} = N V =	5E+25	nuclei			
Massa combustibile Mc=NV/N_A=	75	g			
densità combustibile ρ =	4E-04	Kg/m^3			
Massa comb che brucia al sec Mc'=N'V/N_A=	2.6.E-02	g/s			
Pt =	3553	MWt			
η =	0.3			Tokamak	
P_e =	**1066**	MW	i	r	
μ_0 =	1.26E-06	H/m			
n =	10	spire/m			
j =	15	A/mmq		D	l
Sspira =	10000	mmq			
i =	2E+05	A			
B = μ_0 n i =	2	Tesla			
F = e v B =	4.75E-13	N		B	
raggio percorso elicoidale r =(v m)/(eB) =	0.01	m			
t_r = 2πr/v =2πm/(eB) =	3E-08	s			
Forza sulle bobine per m assiale, F_l = p·πD =	3E+09	N/m	**3E+05**	t/m	
$(Stability)_{Tok,linear}$ = (D/2r)(D/2λ_s) =	**7E-03**				
$Stability_{Sun}/Stability_{Tok}$ =	**8.E+25**				
$\alpha_{Sun}/\alpha_{Tok}$ =	3E-23				
$\alpha_{Tok}/\alpha_{Sun}$ =	**3E+22**				
$Stability_{Sun}/Stability_{Tok}$ =	6E+22		1° caso		
$Stability_{Sun}/Stability_{Tok}$ =	3E+24		2° caso		

$$v_G = \frac{v}{2} \qquad E_{k,G} = \frac{1}{2}(2m)v_G^2 = m\frac{v^2}{4} = \frac{E_k}{2}$$



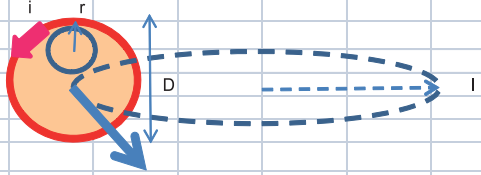
$$p = NkT \qquad p_{l,rad} \cong \frac{\rho}{10^5}\frac{\sigma T^4}{c}$$

$$N\tau \geq \frac{1}{v^*\sigma_f} = \frac{1}{\sigma_f}\sqrt{\frac{m}{3kT^*}}$$

$$w = \Phi\Sigma\,\varepsilon = N_{T>10^9°K}\,v_{T>10^9°K}\,N\sigma_f\varepsilon$$

$$w = \alpha\, v^*\, N^2 \sigma_f\, \varepsilon$$

$$(Stability)_{Tok,linear} = \frac{D}{2r}\cdot\frac{D}{2\lambda_s}$$



$$\frac{(Stability)_{Sun}}{(Stability)_{Tok}} = \left(\frac{Stability_{Sun,linear}}{Stability_{Tok,linear}}\right)^2$$

$$\frac{Stability_{Sun}}{Stability_{Tok}} = \frac{\lambda_{Tok}}{\lambda_{Sun}} = \frac{N_{Sun}}{N_{Tok}}\cdot\frac{\sigma_{Sun}}{\sigma_{Tok}} = \frac{p_{Sun}T_{Tok}}{p_{Tok}T_{Sun}}\cdot\frac{\sigma_{Sun}}{\sigma_{Tok}} = \frac{p_{Sun}v_{Tok}^2}{p_{Tok}v_{Sun}^2}\cdot\frac{\sigma_{Sun}}{\sigma_{Tok}} = \frac{p_{Sun}}{p_{Tok}}\cdot\frac{\sigma_{Sun}^3}{\sigma_{Tok}^3} = \frac{p_{Sun}^4}{p_{Tok}^4}$$

$$\frac{Stability_{Sun}}{Stability_{Tok}} = \left(\frac{\lambda_{Tok}}{\lambda_{Sun}}\right)^2 = \left(\frac{N_{Sun}}{N_{Tok}}\cdot\frac{\sigma_{Sun}}{\sigma_{Tok}}\right)^2 = \left(\frac{p_{Sun}T_{Tok}}{p_{Tok}T_{Sun}}\cdot\frac{\sigma_{Sun}}{\sigma_{Tok}}\right)^2 = \left(\frac{p_{Sun}T_{Tok}}{p_{Tok}T_{Sun}}\cdot\frac{p_{Sun}}{p_{Tok}}\right)^2 = \left(\frac{p_{Sun}^2T_{Tok}}{p_{Tok}^2T_{Sun}}\right)^2 = \frac{p_{Sun}^4}{p_{Tok}^4}\frac{T_{Tok}^2}{T_{Sun}^2}$$

Nella Figura 18 sono rappresentate le sollecitazioni sulle bobine toroidali e quindi sui vincoli strutturali del reattore.

Aspetti di strumentazione, regolazione, controllo e protezione dell'impianto a fusione

Un plasma confinato magneticamente è un sistema molto complesso. Infatti non può essere prodotto e mantenuto senza un sistema sofisticato di controlli in feedback. L'energia libera disponibile nel plasma tende a generare turbolenza e instabilità fluide (MHD) che riducono la qualità del confinamento.

Per la produzione ed il mantenimento di un plasma termonucleare, sono necessari sistemi di controllo addizionali che assicurino che la produzione di potenza venga mantenuta per lunghi periodi. Il cattivo funzionamento dei sistemi di controllo porta il sistema in condizioni che tendono a ridurre la potenza da fusione prodotta o persino allo spegnimento della scarica. Allo stato attuale di R&D, non si prevede che si possano verificare runaway termici. Sono comunque previste misure per controllare e sopprimere eventuali escursioni termiche. Inoltre sono previste 40 diagnostiche fondamentali: diagnostiche dedicate alle protezioni, ai controlli e agli studi di fisica, misure ottenute da DC a raggi di neutroni e di particelle di diverse specie ioniche, fascio diagnostico di atomi neutri per spettroscopia attiva (CXRS, MSE ….).
Un particolare fenomeno da evitare e che rappresenta l'incidente più severo per un impianto di potenza a fusione è la disruption o disruzione improvvisa del plasma.
La disruzione è un evento violento che distrugge il plasma a confinamento magnetico come conseguenza di un'instabilità che si innesca in modo particolarmente rapido, spesso di tipo magnetico (MHD). La temperatura scende drasticamente e sia il calore che le particelle vengono istantaneamente rilasciate dal confinamento e scaricate sul vessel di contenimento, causando un danno proporzionale all'energia immagazzinata. La perdita del contenimento associata alla produzione di elettroni in fuga produce un danno di grandi proporzioni all'impianto. Gli effetti magnetici, associati alla perdita improvvisa della corrente plasmatica, generano forze magnetiche sulle strutture metalliche che circondano il plasma, quali vessel, bobine, e strutture interne, note come eventi di spostamento verticale che comportano forti rotture meccaniche.
Questo fenomeno non accade o comunque è molto meno severo nella configurazione Stellarator perché il confinamento non dipende dalla corrente plasmatica.
Per evitare la disruption e mitigarla, nel progetto ITER, e nel Divertor Test Tokamak, verrà provato il controllo delle disruzioni mediante:

1. ECCD in regimi di alto beta (Disruption avoidance using ECCD in high beta conditions, AUG e TCV)
2. Mitigazione di ELMs mediante ECRH (ELM mitigation using edge ECRH, TCV)
3. Fisica avanzata degli NTM (Advanced NTM physics, TCV)
4. Esperimenti di Wall Cleaning mediante onde EC (ECRH wall conditioning and in Helium, TCV).

Aspetti di Sicurezza e Radioprotezione

L'analisi di sicurezza per i reattori a fusione viene effettuata con gli stessi strumenti e metodologie che sono stati messi a punto ed utilizzati per i reattori a fissione, in particolare i PRA (Probabilistic Risk Assessment) dei reattori di potenza. Infatti si utilizzano strumenti di identificazione di possibili eventi iniziatori come la FMEA, l'Hazop, gli Alberi dei guasti e degli Eventi per i sistemi e componenti degli impianti. A partire dagli eventi iniziatori si sviluppano gli alberi degli eventi sia qualitativi che quantitativi fino all'individuazione delle sequenze incidentali più gravose con le relative probabilità di accadimento insieme alla valutazione delle conseguenze in termini di rilasci radioattivi all'ambiente.
A seguito dei risultati dell'Analisi incidentale possono essere richieste delle modifiche al progetto dell' impianto per renderlo più sicuro e prevenire gli incidenti.
Come per tutti i progetti di realizzazione di impianti nucleari, anche per quelli a fusione si adotta nel progetto la cosiddetta "Difesa in profondità" che prevede l'installazione di una serie di "barriere" che si oppongono alla fuoriuscita nell'ambiente esterno dei prodotti radioattivi in caso di scenario incidentale per mitigarne gli effetti.
Ad una prima valutazione appare evidente come gli scenari incidentali per i reattori a fusione appaiono meno gravosi di quelli relativi ai reattori a fissione soprattutto in termini di conseguenze verso l'ambiente.

Sarebbe utile ed auspicabile che in futuro si possa fare un confronto dettagliato dei risultati delle analisi degli scenari incidentali fra i reattori a fusione e quelli a fissione (anche di IV generazione). In particolare per i DBA (Design Base Accident) cioè gli incidenti di riferimento per il progetto debbono essere confrontate le rispettive probabilità di accadimento e le relative conseguenze in termini di rilasci radioattivi nell'ambiente.

Peraltro è difficile sostenere, come ingegneri, di lunga esperienza trasversale su fusione e fissione nucleare, che la tecnologia di produzione di energia nucleare da fusione sia più sicura della fissione. Sono entrambe sicure se gestite opportunamente. La fusione appare più "amica" perché gestisce piccole quantità di "combustibile" e non deve affrontare l'annoso problema dei rifiuti nucleari a lunga vita, che comunque, inevitabilmente, risulta una eredità penalizzante per le future generazioni. Ma è altresì vero che non si può affermare che esiste una forma di energia generata da fusione nucleare che non produca "scorie" radioattive.
Difatti, la reazione da fusione avviene fra il deuterio ed il trizio e, quindi, il rifiuto principe generato dalla reazione di fusione rimane il trizio. Esistono poi i prodotti attivati dalla presenza di trizio (vedi le pareti del vacuum vessel) che hanno la capacità di essere adsorbiti negli interstizi della struttura metallica degli acciai come pure le polveri radioattive a base di tungsteno, tantalio e cobalto 60. La tecnologia del trattamento del trizio è stata particolarmente studiata e sviluppata in ITER sia a livello di trattamento acqua che gas.
Si può quindi con certezza affermare che i rifiuti generati dalla fusione nucleare sono caratterizzati da tempi di dimezzamento nel decadimento radioattivo dell'ordine di qualche decina di anni (circa trenta anni per il trizio che è il principale rifiuto) e, quindi, facilmente gestibili anche soltanto con depositi temporanei.

Un ultimo aspetto di sicurezza della fusione termonucleare a confinamento magnetico, non presente nei reattori a fissione, è quello dei campi magnetici molto intensi generati sull'impianto ed in particolare delle variazioni rapide di campo a seguito di transitori operazionali ed incidentali. Le conseguenze sul personale d'impianto e la popolazione devono essere valutate accuratamente in modo da scongiurare problemi di tipo sanitario.

Elementi di confronto qualitativo-quantitativo fra reattore a fusione ed a fissione

Appare di particolare interesse effettuare una comparazione tra i parametri caratteristici di un reattore a fissione termico e di un reattore a fusione, a parità di potenza dell'impianto assunta uguale a 1000 MW.
I suddetti parametri sono riportati nella tabella 4 in cui il primo parametro considerato è la potenza specifica, che per un reattore a fusione può essere espressa dalla relazione:

$Ps = E(\sigma V)n_1n_2$ [KW/kg]
dove:
E: energia rilasci ata dalla singola reazione
σ: sezione d'urto media funzione della velocità
V: valor medio efficace della velocità delle due particelle
n_1 e n_2: numero di nuclei di tipo 1 e 2

Questo valore nei reattori a fusione è pari alla metà del valore tipico di un reattore a fissione.
Nel caso del reattore a fissione veloce BREST 300 di IV generazione, prossimo alla costruzione, la potenza specifica, in un dato punto del combustibile, è calcolata secondo la relazione:

$$P_s = E_f N_f \cdot \int_{E_s}^{+\infty} \varphi(E)\sigma_f(E)dE \qquad [W/cm^3]$$

in cui:
E_f è l'energia mediamente rilasciata da un processo di fissione (circa 192 MeV);
N_f è il numero di atomi di fissile contenuti in un cm^3 di combustibile, che nel caso del BREST 300 sono gli isotopi 238U e 239Pu;
E_s è l'energia di soglia dei neutroni oltre la quale la fissione veloce è tecnicamente possibile;
σ_f è la sezione d'urto di fissione, misurata in cm^2, per gli isotopi 239Pu, 241Pu, ma anche 235U e successivo 236U, formatosi per cattura neutronica. Tale sezione prende forma per energie maggiori del rispettivo valore di soglia Es; φ(E) è il numero di neutroni, con energie comprese tra E ed E +

dE, che attraversano nell'unità di tempo una superficie circolare di 1 cm^2 centrata in un dato punto. Oppure, in termini più semplici, è lo spettro di distribuzione energetica del flusso neutronico.
Il nocciolo del BREST 300 è progettato per produrre una potenza di 700 MWth, e ha un volume di combustibile, in forma di nitrati di Pu e U, pari a 1.2465 x 10^6 cm^3. Pertanto la potenza specifica media del reattore è pari a 561,6 W/cm^3.
Il nocciolo del BREST 300 ha forma cilindrica con un ingombro complessivo di 1100 mm di altezza attiva e 2200 mm di diametro. Pertanto la potenza specifica, relativa all'ingombro volumetrico, è 167 W/cm^3.
I reattori di IV generazione refrigerati con piombo hanno un'alta potenza specifica e questo permette di realizzarli in dimensioni contenute, offrendo la possibilità di erogare potenze interessanti in spazi ridotti e limitando i carichi strutturali che ne deriverebbero. Infatti, tutto il circuito primario è percorso da Pb fuso che, allo stato liquido e per le temperature medie di funzionamento pari a 753 °K, ha una densità di 10.52 g/cm^3, davvero considerevole.
Il secondo parametro da considerare nel confronto è l'intensità del flusso neutronico generato nelle reazioni di fusione. Questo, per poter produrre la potenza richiesta, deve essere di un ordine di grandezza superiore al valore della grandezza analoga dei sistemi a fissione.
Per un LFR (Lead Fast Reactor) come il BREST 300 diventano, invece, paragonabili. Il flusso neutronico di progetto del BREST 300 è dell'ordine di 1 X 10^{15} neutroni/cm^2sec. Infatti, rispetto a un comune reattore termico, le sezioni d'urto di fissione veloce sono circa due ordini di grandezza inferiori e pertanto i flussi neutronici devono essere due ordini di grandezza maggiori rispetto a quelli comuni nei reattori termici se si vuole una potenza specifica dello stesso ordine di grandezza (200 e 500 W/cm^3).
Guardando la tabella 4, nella colonna relativa al reattore a fusione, appaiono altre due grandezze, il flusso dei nuclei e il "flusso dei nuclei fondibili" che non possono avere grandezze corrispondenti nei reattori a fissione, ma che sono concettualmente, ma non fisicamente (quindi i valori non sono immediatamente rapportabili), equivalenti alle grandezze che misurano la quantità di combustibile presente nel nocciolo di un reattore a fissione.
I successivi due parametri, "Pressione"e "Temperatura", rappresentano le maggiori differenze, dal punto di vista tecnologico, tra i due sistemi.
Un impianto a fissione da 1000 MWe lavora normalmente con temperature al di sotto dei 10^3 °K e con pressioni dell'ordine di 100 bar (circa 70 bar per un BWR, 100 bar per un HWR, 180 bar per un PWR), valori caratteristici di applicazioni impiantistiche spinte ma che rientrano comunque nell'ambito di tecnologie attualmente consolidate.
La pressione di progetto nel circuito primario del BREST 300 è pari a 17 bar, rappresentando un valore del tutto gestibile nella progettazione strutturale del vessel e di quella dello scambiatore intermedio.
La temperatura di ingresso del refrigerante (piombo) nel nocciolo è pari a 693 K e quella di uscita è 813 K. Anche questi parametri non inficiano la resistenza degli acciai impiegati, che sono di tipo martensitico ad alto contenuto di cromo, scelti prioritariamente per l'ottima resistenza alla corrosione da parte del piombo. E' necessario comunque preriscaldare il circuito primario prima dell'introduzione del piombo fuso nello stesso o mantenere a temperatura idonea tutto il circuito primario quando il reattore viene spento e si vuole movimentare il combustibile senza che il piombo solidifichi (fenomeni di "freezing" e di "flow blockage").
Un reattore a fusione di potenza analoga necessita invece di temperature dell'ordine dei 108 °K e pressioni dell'ordine dei 10^3 bar, il che porta i sistemi al di fuori delle tecnologie comunemente utilizzate, per cui una parte significativa della ricerca è rivolta a raggiungere ma soprattutto a mantenere i suddetti valori nei sistemi sperimentali realizzati e in costruzione.
L'ultimo parametro considerato, "i materiali di fabbricazione", deve necessariamente tenere conto delle suddette fondamentali differenze dei parametri fisici caratteristici del sistema, per cui mentre per gli impianti a fissione si ricorre ad acciai del tipo inox AISI serie 300, ferritici o austenitici al nichel cromo (Inconel), occorre ricorrere ad acciai speciali e materiali ceramici, anch'essi oggetto di ricerca, negli impianti a fusione.
Il progetto delle componenti strutturali in acciaio del BREST 300 si deve quindi avvalere degli studi condotti su acciai martensitici ad alto contenuto di cromo, introducendo comunque una novità nel campo della fissione.
In sintesi, si può affermare che i sistemi a confronto, dal punto di vista nucleare, a meno dello spettro neutronico qui non considerato e le reazioni di partenza evidentemente diverse, non sono estremamente difformi essendo, ad esempio, la densità di potenza dello stesso ordine di grandezza e l'intensità tipica del flusso neutronico diversa per un solo ordine di grandezza; ciò che cambia so-

Tavola 4 - *Confronto parametrico reattore a fusione e reattore fissione*

	Fusione	Fissione	Unità
Densità di potenza	10	100	KW/l
Flusso neutronico	1E+15	1E+14	n/cm^{2}s
Flusso nuclei	1E+25		n/cm^{2}s
Flusso nuclei fondibili	1E+22		n/cm^{2}s
Dimensioni	100	50	m^3
Pressione	1E+3	1E+2	bar
	1E+8	1E+7	Pa
Temperatura	1E+8	1E+3	K
materiali	Acciai speciali e ceramici	acciai	

stanzialmente sono i parametri fisici in cui il nocciolo si trova ad operare, con il reattore a fusione che richiede temperature e pressioni ancora al di fuori delle normali applicazioni tecnologiche.

Conclusioni

Come osservato in precedenza, le criticità da superare sulla strada della fusione non sono poche e rimangono molti i parametri che presentano, nel reattore a fusione, ordini di grandezza anche molto superiori a quelli di un reattore a fissione, per affrontare i quali saranno realizzate infrastrutture di ricerca e prototipi sperimentali come ITER, DTT, DEMO, in uno spettro temporale che possiamo collocare da oggi al 2030-40.
Peraltro, i cosiddetti by-product o side-technologies già sviluppati o che saranno sviluppati durante questo cammino di ricerca nel settore dei materiali e dell'ingegneria costituiranno di per sé un importante risultato, con applicazioni e ricadute in tutti i settori industriali.
E' possibile concludere che questo primo approccio qualitativo e analitico alla fusione e la relativa analisi comparata sviluppati nel presente rapporto tecnico dalla Commissione Ricerca e Reattori innovativi dell'Area Nucleare, ha inteso iniziare una collaborazione fattiva su questa tematica con gli iscritti dell'Ordine, le altre Commissioni, ma anche con ENEA e gli altri Istituti che operano nel settore della fusione nucleare.
La Commissione nucleare può rappresentare un riferimento istituzionale, come organo tecnico indipendente per la progettazione e verifica dell'ingegneria del sistema ed è a disposizione del Paese e delle sue strutture di ricerca.

Bibliografia

[1] Toigo V. et al. Progress in the realization of the PRIMA Neutral Beam Test Facility. Nuclear Fusion (ed. IAEA). 2015, n.55.
[2] Watanabe K. et al. Design of a –1MV dc UHV power supply for ITER NBI. Nuclear Fusion. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2009, n.49.
[3] Grisham L.R. et al. Recent improvements to the ITER neutral beam system design. Elsevier. Fusion Engineering and Design, 2012, n.87, 1805– 1815.
[4] Umeda N., Taniguchi M., Kashiwagi M., Dairaku M., Hanada M., Tobari H., Watanabe K., Sakamoto K., Inoue T. Development of 1MeV accelerator and HV bushing at JAEA toward ITER Neutral Beam System. Elsevier. Fusion Engineering and Design, 2009, n.84, 1875– 1880.
[5] Sonato P. et al. The ITER full size plasma source device design. Elsevier. Fusion Engineering and Design, 2009, n.84, 1875– 1880.
[6] Sonato P. et al. Status of PRIMA, the test facility for ITER neutral beam injectors. Atti del Convegno American Institute of Physics, Third International Symposium On Negative Ions, Beams And Sources. Jyväskylä, Finlandia, 3–7 Settembre 2012.
[7] Decreto ministeriale 1 dicembre 1980, Disciplina dei contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e di materiale metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche (G.U. 11 febbraio 1981, n. 40)
[8] Decreto ministeriale 10 settembre 1981 Modificazioni al decreto ministeriale 1° dicembre 1980, relativo alla "disciplina dei contenitori a pressione di gas con membrature miste di materiale isolante e di materiale metallico, contenenti parti attive di apparecchiature elettriche" (G.U. 16 ottobre 1981, n. 285).
[9] D. Mazza - Reattore nucleare di IV generazione refrigerato con piombo BREST 300: la simulazione neutronica tramite il software MCNPX, i flussi neutronici e la risposta di una tipica sonda per reattori veloci. Articolo dal Quaderno N 2/2015, Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.

a cura di Ing. G. Lucarelli, Ing. C. Di Leo

Introduzione e cenni storici

Quando il 12 aprile 1981, esattamente venti anni dopo lo storico volo di Yuri Gagarin, lo Shuttle Columbia si innalzò dalla rampa di lancio di Cape Canaveral per la sua prima missione orbitale, contrassegnata con la sigla STS-1 (STS è l'acronimo di Space Transportation System, che, come vedremo tra breve designava le varie missioni Shuttle), il suo equipaggio di sole due persone era reduce da un lunghissimo periodo di addestramento. John Young, ormai cinquantenne, comandante della missione, veterano di due voli Gemini e due Apollo, noto anche presso il grande pubblico per aver calpestato il suolo lunare con la missione Apollo 16, e Robert Crippen, 43 anni, pilota esordiente, e proveniente dal programma MOL (Manned Orbiting Laboratory), successivamente cancellato, erano stati designati per il primo volo Shuttle. Alle ore 7:00 locali di quella mattina del 12 aprile, il mondo intero poté entusiasmarsi nell'assistere ad un lancio perfetto, con tutta l'emozio-

SHUTTLE,
l'aereo cosmico

ne e l'incertezza della prima volta. Lo Shuttle si levò maestosamente su una colonna di fuoco e fiamme sulla rampa 39A, per una missione che risultò riuscitissima in ogni suo dettaglio, facendo esclamare ad un Crippen pieno di emozione la seguente frase: "Ragazzi, che vista, che vista!". La missione STS-1 durò in tutto 2 giorni, 6 ore, 20 minuti e 53 secondi, durante i quali il Columbia percorse l'orbita col dorso rivolto alla Terra e i due astronauti, aperti i portelli della stiva, effettuarono tutti i test tecnici dei sistemi di bordo previsti dal programma.
Malgrado qualche apprensione, dovuta al distacco di alcune piastrelle isolanti, presto ridimensionata dall'esame delle foto di un satellite da ricognizione KH-11 che mostravano la parte inferiore della navetta sostanzialmente intatta, il rientro si svolse secondo copione e Young, una volta posato il carrello sulla pista 23 della Base dell'Aeronautica di Edwards, in California, poté anche permettersi di scherzare chiedendo via radio se dovesse direttamente parcheggiare lo Shuttle in un hangar. Da quel momento in poi era cominciata una grande era per l'astronautica, quella delle navette riutilizzabili, che collezionando in totale 135 lanci avrebbe avuto una durata di 30 anni.
La navetta spaziale Shuttle, il primo veicolo riutilizzabile della moderna astronautica, venne costruito dalla NASA negli anni Settanta. L'idea del rivoluzionario mezzo di trasporto ed il lavoro di ricerca per arrivarci risalgono però ai primi del Novecento, e si possono ritrovare nei lavori pionieristici di Tsiolkovsky in URSS, Goddard negli USA, e Oberth e Sänger in Germania. Durante il secondo conflitto mondiale, l'argomento venne affrontato, sia pure teoricamente anche a Peenemunde, la base tedesca sul Mar Baltico dove sotto la direzione di von Braun si realizzò la V2.
Terminata la guerra le ricerche continuarono, come ne diede spesso testimonianza lo stesso von Braun, ma l'entusiasmo per i razzi tradizionali "a perdere" come lo storico Saturn V, lascò in secondo piano l'idea dell'astronave riutilizzabile, non fosse altro per il fatto che, tutto sommato, la razzotecnica dopo l'avvento della V2 era già matura e disponibile, quantunque richiedesse ancora ulteriori sviluppi e perfezionamenti. Per un veicolo recuperabile, invece, era necessario condurre ulteriori ricerche, concernenti in particolar modo il volo ad alta velocità e ad alta quota, i materiali da impiegare, l'aerodinamica e la guida. Per condurre a buon fine questi esperimenti, la NASA costruì alcuni aeroplani sperimentali, della serie "X" tra i quali spiccava la figura dell'X-15.
I problemi dei materiali e del volo ad altezze elevate con alte velocità furono dunque studiati a fondo durante gli anni Cinquanta e Sessanta con l'aviorazzo X-15 che arrivò a toccare i 100 km di quota ed una velocità sette volte più alta del suono (Mach 7). Gli aspetti aerodinamici furono invece studiati con una serie di quattro piccoli velivoli (l'M2-F2 e l'HL-10 della Northrop più l'X-24A e l'X-24B della Martin Marietta) chiamati appunto "lifting bodies", cioè a fusoliera portante. In fig.1 è mostrato l'X-15 appena sganciato dal gigantesco bombardiere NB-52 Stratofortress che aveva appunto il compito di portare questo spazioplano in quota e di sganciarlo come se fosse stato una gigantesca bomba.

Figura 1:
Il North American X-15

I "lifting bodies" invece iniziarono i collaudi nel 1966 per terminarli circa dieci anni dopo. Anche questi velivoli venivano portati in quota da un B-52 e successivamente sganciati affinché potessero portare a felice compimento la loro missione. Per di più, alla fine degli anni Sessanta fu avviato un progetto per la costruzione del noto Dyna Soar X-20 per conto dell'USAF, di fatto mai realizzato e dalle cui ceneri nacque appunto il modello Space Shuttle che oggi tutti noi conosciamo. L'obiettivo di questi esperimenti era di realizzare una mininavetta abitata da un astronauta da lanciare con un razzo vettore Titan. Essa sarebbe dovuta rientrare con un volo planato e compiere un atterraggio su pista proprio come successivamente avrebbe fatto lo Shuttle della NASA. Nel 1963 le limitazioni imposte dalle Nazioni Unite sull'uso militare dello spazio causarono la fine del programma, il quale peraltro incontrava non poche difficoltà a causa degli elevati investimenti richiesti. Sommando insieme queste esperienze, si raccolsero le conoscenze indispensabili alla progettazione della navetta. La fig.2 è suddivisa in due immagini. In alto è riportato un modello dello spazioplano X-20 Dyna Soar, mentre in basso è raffigurato il flight deck dello stesso.

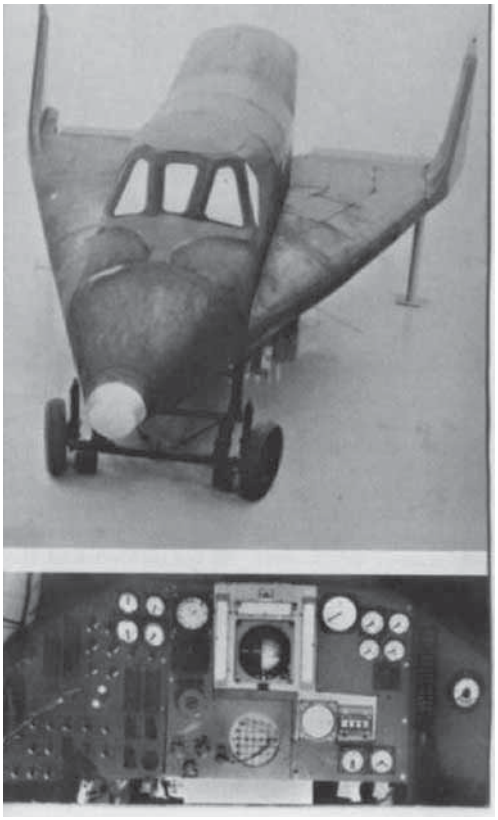
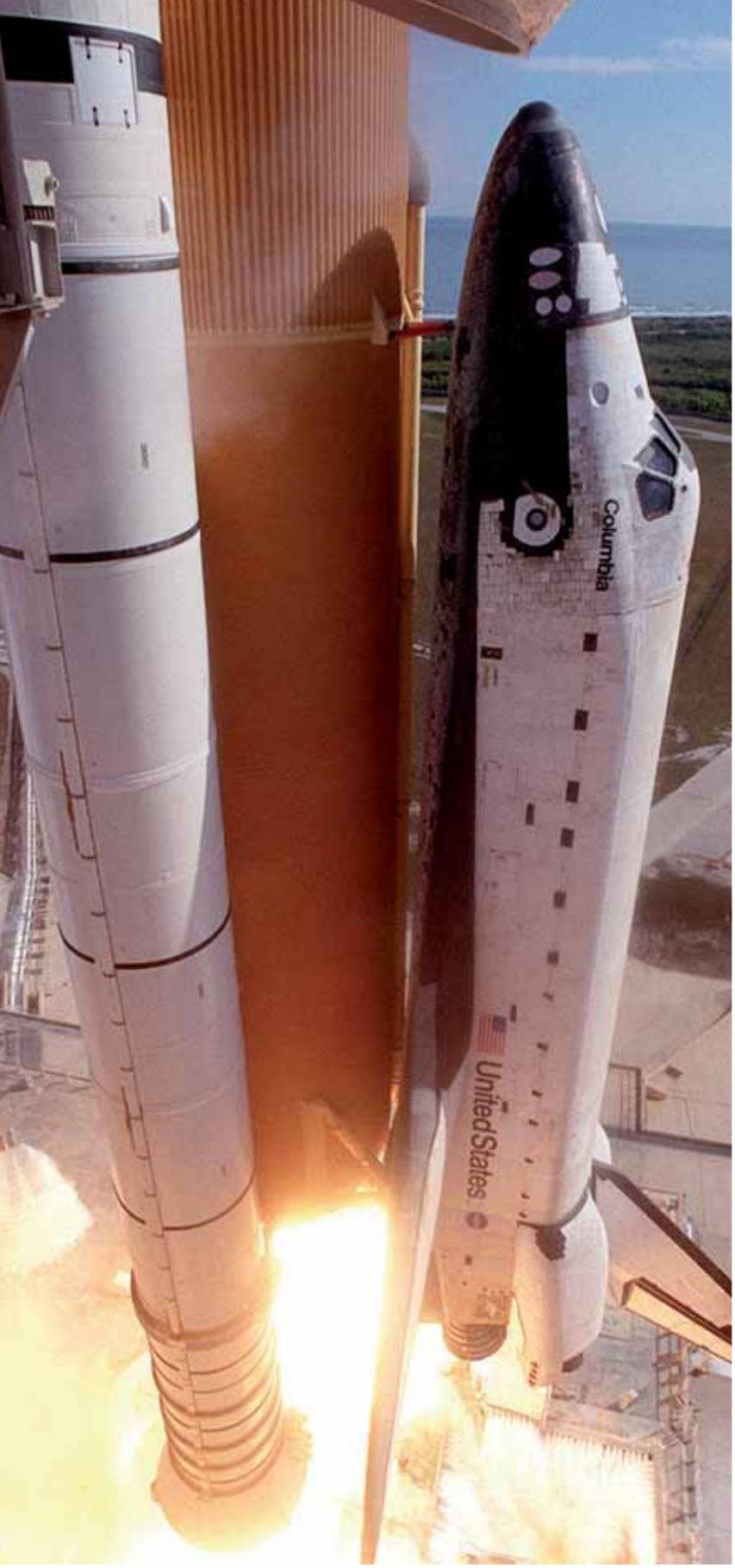


Figura 2:
Modello del velivolo X-20

Un rapporto scritto nel 1967 dal comitato per la scienza, un organo costitutivo del presidente americano, segnò il via delle attività spaziali statunitensi che fecero seguito al programma Apollo. Il comitato, nel suo documento fece specifico riferimento alla necessità di disporre di un mezzo economico per andare in orbita terrestre, tornare e/o rimanervi fino a tempo indeterminato. Gli uffici della programmazione della NASA pensavano già al futuro ma si dovette attendere il 1969 affinchè venisse registrato l'avvio effettivo della nuova attività. La NASA infatti assegnò nel gennaio di quell'anno quattro contratti da 500 mila dollari ad altrettante grandi società aerospaziali affinchè studiassero il concetto di un veicolo spaziale riutilizzabile chiamato Integrated Launch and Reentry Vehicles (ILRV). Furono questi il primo nome e la prima sigla assegnati alla futura navetta. Per sei mesi (tale era il tempo a disposizione) la General Dynamics, la Lockheed, la Mc Donnel Douglas e la North American Rockwell (ora Rockwell International) lavorarono all'idea e nel novembre successivo consegnarono alla NASA il progetto di una macchina per un veicolo formato da due stadi interamente riutilizzabili. Esso tuttavia non era l'unico interesse del momento. Un documento redatto sempre nello stesso periodo da un gruppo di studio dell'ente spaziale statunitense, dal titolo "America's Next Decades in Space" raccomandava anche l'impegno nella costruzione di una stazione spaziale abitata. Alla medesima conclusione giunse anche un altro gruppo di indagine voluto da Nixon che oltre la NASA coinvolse anche il Dipartimento della Difesa ed il comitato consultivo per la scienza del presidente. Dopo l'entusiasmo per lo sbarco sulla Luna l'atteggiamento generale cambiò rotta, ed alle imprese nel cosmo si preferì una maggiore attenzione per alcuni problemi terrestri ritenuti più immediati. Lo stesso presidente intervenendo nel dibattito

e pur assicurando allo spazio un posto tra le priorità nazionali, dimostrò di non ignorare le proteste. Così i bilanci della NASA cominciarono ad essere ridimensionati. I responsabili dell'ente presero atto della situazione e limitarono il loro interesse alla navetta, lasciando la stazione cosmica per un futuro passo.
Intanto le ristrettezze di bilancio incominciarono ad incidere anche sullo stesso progetto della navetta, condizionandone in qualche modo le caratteristiche. Dopo altrettante valutazioni tecniche ed economiche, nel 1971 venne scartata l'idea di due veicoli riutilizzabili scegliendone solo uno. Ad esso sarebbe spettata la mansione di decollare da terra, assistito da due potenti razzi ausiliari, di compiere l'attività orbitale prevista, ed infine di rientrare, atterrando come un comune aeroplano. Nasceva in tal modo il sistema Space Shuttle. Così si giunse al 5 gennaio 1972, giorno in cui il presidente Nixon approvò il programma dello Shuttle. Il costo previsto per lo sviluppo era di 5,5 miliardi di dollari. Nel prezzo del sistema erano incluse tutte le ricerche necessarie, la costruzione di due veicoli, i primi test di volo e in quota, ed i primi sei lanci in orbita. La cifra comprendeva anche la sistemazione delle piattaforme di lancio, al Kennedy Space Center. In pratica si decise un adattamento ed un aggiornamento di quanto era stato utilizzato prima per il progetto Apollo. Il 26 luglio 1972 la NASA scelse la Rockwell di Downey sita in California per la progettazione, lo sviluppo e la produzione del nuovo veicolo orbitale recuperabile ed il contratto definitivo venne firmato quasi un anno più tardi nel marzo del 1973. In quel momento si previde oltre alla costruzione delle prime due unità anche la realizzazione di altre tre navette di serie. Dall'inizio dell'attività dello Shuttle, fino al suo epilogo, gli Orbiter prodotti furono in tutto i seguenti sei: Enterprise, Columbia, Challenger Discovery, Atlantis ed Endeavour. Il primo di essi, l'Enterprise, non era destinato a volare nello spazio ma solo a dei preliminari test di volo planato (senza motore) denominati ALT, che furono brillantemente portati a termine nella seconda metà degli anni Settanta. Il Columbia ed il Challenger andarono perduti in due tragici incidenti. Il Discovery, l'Atlantis e l'Endeavour, dopo aver compiuto con successo un'attività trentennale (i voli Shuttle sono stati complessivamente 135 e si sono conclusi appunto con la missione STS-135) sono oggi conservati in appositi musei. Molto si è discusso circa l'opportunità di ritirare anzitempo gli Shuttle. L'astronauta Walter Cunningham, per esempio, che con Eisele e Schirra prese parte alla missione Apollo 7 che si svolse tra l'11 ed il 21 ottobre 1968, in una recente intervista ha fatto rilevare come sia stata secondo lui erronea la decisione di mettere fuori uso lo Shuttle senza sostituirlo con un mezzo alternativo, negando agli astronauti statunitensi un accesso autonomo allo spazio. Infatti, come ben sappiamo, oggi l'accesso alla Stazione Spaziale Internazionale è appannaggio esclusivo della Russia a bordo delle "vecchie" ma supercollaudate capsule Soyuz e gli astronauti americani (e non solo) che devono trascorrere dei periodi sulla stazione sono costretti a farsi trasportare dai russi che naturalmente si fanno pagare per questa sorta di "passaggio". In realtà è bene precisare che attualmente oltre alle Soyuz possono portare uomini nello spazio anche le capsule Shenzhou (molto simili alle Soyuz) della Cina Popolare che vanno ad agganciarsi ai laboratori orbitali Tiangong. Tutte le altre nazioni, non hanno per ora nessun accesso autonomo allo spazio.
Cunningham non si è rivelato molto ottimista sulla situazione dell'astronautica statunitense. Egli ha affermato testualmente che "Un primo errore è stato certamente quello di accantonare lo Shuttle. Infatti, se avessimo tenuto lo Shuttle in servizio, avremmo mantenuto la nostra storica indipendenza per le missioni umane nello spazio e saremmo protetti da pressioni da parte della Russia. Forse con lo Shuttle avremmo rimandato lo sviluppo di un nuovo veicolo spaziale, per il quale, peraltro non si sente l'urgenza." Ed ha aggiunto: "lo Shuttle poteva fare comodo all'America, ancora per un po' di tempo. È vero che le sue missioni costavano molto e richiedeva molta, forse troppa manutenzione, però la sicurezza è stata un po' la scusa per metterlo da parte con buona pace dell'opinione

Figura 3:
Fletcher e Nixon a colloquio



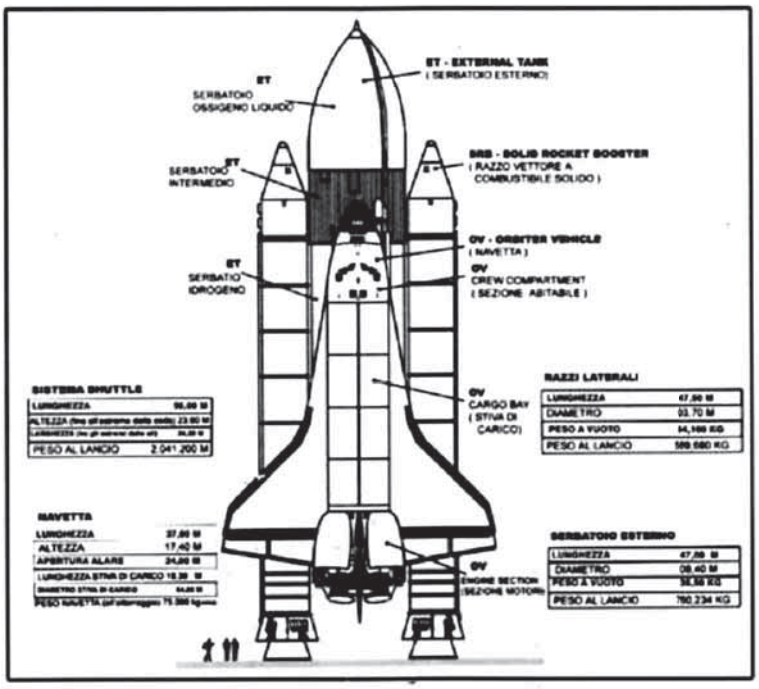
pubblica. E poi tutti i veicoli spaziali, fin dagli inizi, sono sempre costati molto. Lo Shuttle è stato accantonato a soli 30 anni di vita, mentre alcuni nostri sistemi militari, assai sofisticati, sono in funzione da più di 50 anni. Ogni navetta era stata progettata per 100 missioni, ma ognuna ne ha compiute in media solo una trentina. Venivano sempre migliorati e modificati, e secondo me erano dei veicoli spaziali sicuri".
In fig.3 è riportata una foto "storica" che ritrae l'allora presidente americano Richard Nixon a colloquio con l'allora amministratore della NASA James C. Fletcher quando a San Clemente, in California discutevano la proposta di progetto dello Shuttle.
In questa foto che risale al 5 gennaio 1972 è mostrato un modellino in scala del sistema STS ancora piuttosto dissimile da quella che sarebbe stata la sua configurazione definitiva. Lo stesso giorno Nixon annunciò che gli Stati Uniti avrebbero proseguito con l'immediato sviluppo di un tipo di sistema di trasporto spaziale completamente nuovo, destinato a contribuire a trasformare la frontiera dello spazio in un territorio familiare. Questo sistema di trasporto era appunto lo Shuttle.

Generalità sul sistema Space Transportation System (STS)

Il sistema STS (Space Trasnsportation System) era composto dall'Orbiter, che era il veicolo che lavorava in orbita e poi rientrava, da due razzi ausiliari a propellente solido SRB, Solid Rocket Boosters (nelle prime missioni venivano anch'essi recuperati, ricaricati e riutilizzati), utili per aiutare il decollo e da un grande serbatoio esterno (ET, acronimo di External Tank) che una volta utilizzato veniva sganciato e si disintegrava rientrando in atmosfera. L'ET che all'esterno presentava un colore tra il marrone ed il rossiccio (simile alla ruggine), è stato l'unico elemento a non essere mai stato recuperato e conteneva l'idrogeno e l'ossigeno liquidi che fungevano da propellenti per l'Orbiter. Il suo peso totale al decollo nella prima missione era di 2.020.000 kg (19.808.120 N), mentre quando aveva esaurito la scorta di propellenti e veniva sganciato pesava solo 89.000 kg (872.734 N). Si badi bene che questi pesi si devono considerare iniziali (cioè riferiti alle prime missioni) perché dal giorno del primo volo fu svolto un lavoro di alleggerimento ottenuto per esempio con la sostituzione di alcuni tipi di materiali, al fine di recuperare del peso a vantaggio del carico utile (payload) da trasportare a bordo. In fig. 4 è riportato un disegno che ci illustra in modo abbastanza chiaro quale fosse la configurazione del sistema Space Shuttle al lancio

(si può avere un'idea delle dimensioni del sistema se lo si confronta con le sagome umane riportate in basso a sinistra).
Il contratto con la società Rockwell prevedeva inizialmente la costruzione di due Orbiter più una struttura della navetta per un ciclo di prove ed un complesso motori anch'esso per dei test. Il primo Shuttle, chiamato Enterprise (Orbiter Vehicle-101) uscì dall'officina il 17 settembre 1976. Esso servì ad una serie di tredici collaudi condotti per nove mesi nel 1977 sulla Base californiana di Edwards sotto la denominazione ALT (Approach and Landing Test) e rivolti sia alla sperimentazione dell'avvicinamento e dell'atterraggio che delle caratteristiche dinamiche del velivolo. Complessivamente cinque voli furono compiuti con Enterprise ancorato senza piloti sul dorso di un Jumbo 747 opportunamente modificato, in dotazione alla NASA; in altri tre invece vi erano due astronauti (Haise e Fullerton o Engle e Truly) ed infine in ulteriori cinque voli la navetta si distaccò dal jumbo, pilotata alternativamente sempre dai due equipaggi ed atterrando con gli strumenti in funzione. In fig.5 sono mostrate due fasi di una missione ALT dell'Enterprise.
In particolare nella foto a sinistra è mostrato l'Enterprise appena dopo essere stato rilasciato dal "jumbo madre" per il volo libero n.4 del 12 ottobre 1977. Questo fu il primo volo senza il cono di coda che copriva i motori principali dell'Orbiter. Appena 2,5 minuti più tardi l'Orbiter sarebbe atterrato sulla pista di Edwards. Nell'immagine a destra è mostrato il "flying brick" cioè il "mattone volante" (così era soprannominato scherzosamente l'Orbiter). Si può scorgere l'Enterprise mentre tornava dal volo libero n.4 senza il cono di coda. Si noti che il timone di direzione/freno aerodinamico era parzialmente aperto.
In fig.6 sono indicate le dimensioni e le parti delle quali era formato il Sistema di trasporto spaziale riutilizzabile della NASA
Terminati i voli sperimentali, Enterprise subì un ciclo di test di vibrazioni e poi venne impiegato per le prove di montaggio finale, di trasporto sul veicolo cingolato ed infine di verifica sulla rampa di lancio. Successivamente la prima navetta divenne motivo d'attrazione nei saloni aerospaziali effettuando dei voli sempre sulla schiena del jumbo nei cieli delle capitali di diverse nazioni.
Al secondo Shuttle chiamato Columbia (OV-102) fu riservato il battesimo dello spazio. Uscito dalla fabbrica di Palmdale nel marzo 1979, il 25 dello stesso mese, giunse, ancorata ad un jumbo al Kennedy Space Center in Florida. Il primo decollo, come già detto avvenne il 12 aprile 1981. Intanto una struttura dello Shuttle

Figura 4: *Disegno del sistema STS*



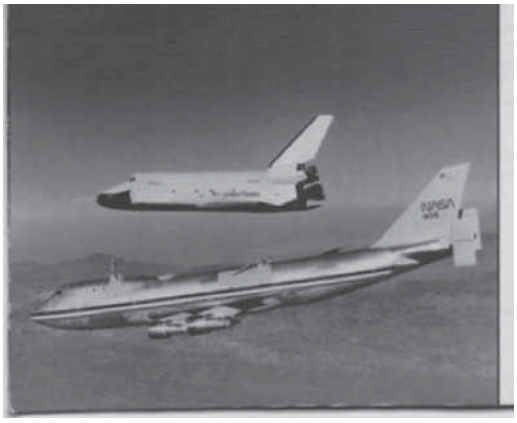
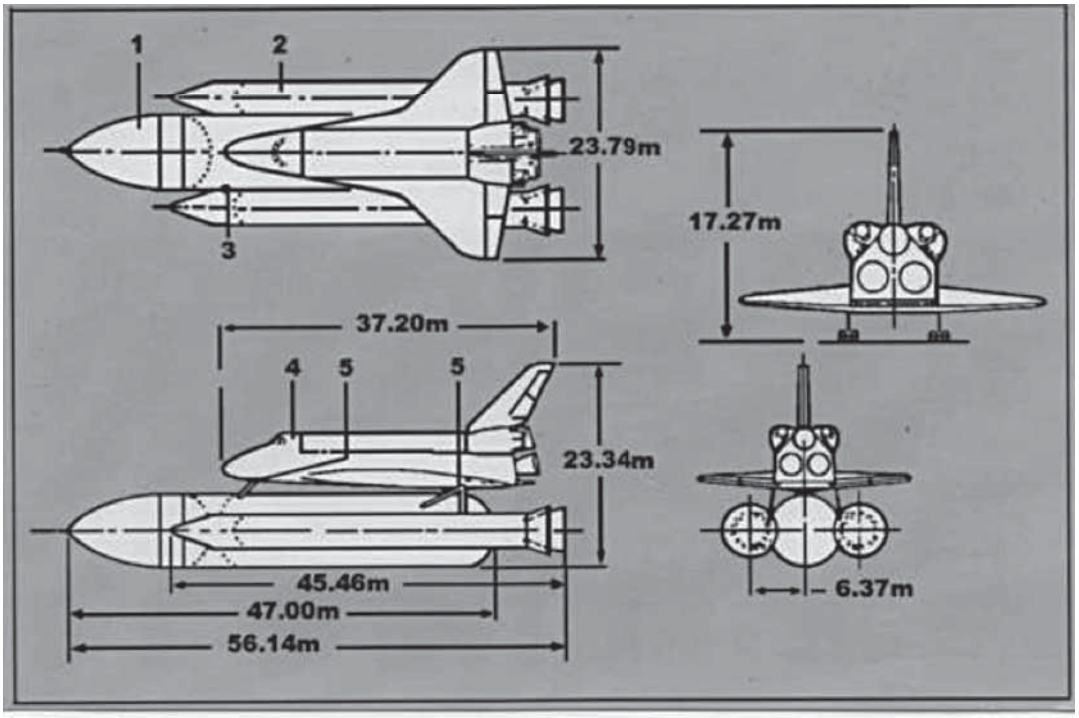


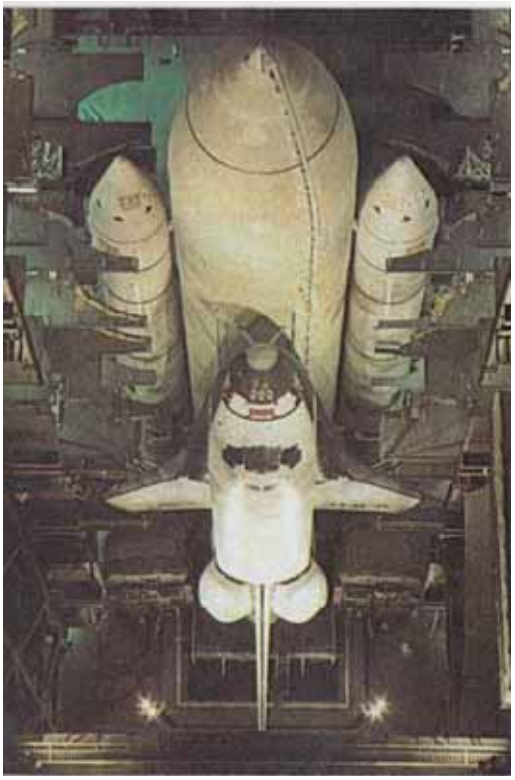
Figura 5:
Due fasi di una missione ALT

Figura 6: Dimensioni del sistema Shuttle



Legenda
1. Serbatoio idrogeno ed ossigeno liquidi (ET);
2. Due razzi ausiliari (SRB);
3. Punto d'attacco del razzo ausiliario;
4. Orbiter;
5. Punti di attacco della navetta al serbatoio centrale.

Figura 7: Assemblaggio del Columbia



realizzata, come prevedeva il contratto, soltanto per le prove, venne recuperata e completata, divenendo il terzo veicolo costruito ed il secondo pronto per il volo. Chiamato Challenger, effettuò il suo debutto il 4 aprile 1983 nella settima missione della navetta. In fig.7, intanto, è mostrata una fase dell'assemblaggio dell'Orbiter Columbia, del serbatoio esterno e dei due booster a propellente solido al KSC in Florida.
La NASA nel frattempo, stipulò con la società Rockwell il secondo contratto già previsto (29 gennaio 1979), con il quale si diede il via alla costruzione di altre due navette: Discovery (OV-103) e Atlantis (OV-104). L'ultima navetta che andò ad aggiungersi alla già nutrita flotta fu l'Endeavour, contrassegnata con la sigla OV-105.
Sfortunatamente due delle suddette navette andarono distrutte:

- Il 28-01-1986 andò perduto il Challenger, che, a detta della Commissione di inchiesta "esplose dopo 73 secondi dal lancio per la rottura nella congiunzione tra i due segmenti inferiori di un propulsore a propellente solido con conseguente distruzione delle guarnizioni atte ad impedire la fuoriuscita del gas caldo di combustione".
- L'1-02-2003 concluse tragicamente la sua carriera anche il Columbia che esplose in

Figura 8: *Lancio del primo Shuttle*

cielo sopra il Texas durante la fase di rientro nell'atmosfera perché, sempre a detta della Commissione di inchiesta, "durante la fase di lancio, il distacco di una parte della copertura di protezione del serbatoio esterno andò a colpire una parte della semiala sinistra della navetta danneggiandone le piastrelle dello scudo termico il quale non fu più in grado di garantire agli astronauti dell'equipaggio la dovuta protezione".

In fig.8 si può vedere la foto del lancio del primo Shuttle.

Il sistema di propulsione dello Shuttle.

Ai lati del grande serbatoio, sistemato sotto la pancia della navetta erano agganciati due razzi per aiutare il decollo. Chiamati dai tecnici SRB (Solid Rocket Boosters), essi erano i più grandi razzi a propellente solido che abbiano mai volato. Per 123 secondi ciascun SRB bruciava 503.000 kg (4.932.418 N) di propellente solido, fornendo una spinta di 1.704.000 kg (16.709.424 N). Costruiti dalla Thiokol a blocchi che venivano montati uno sopra l'altro, avevano un propellente formato da polvere di allumi-

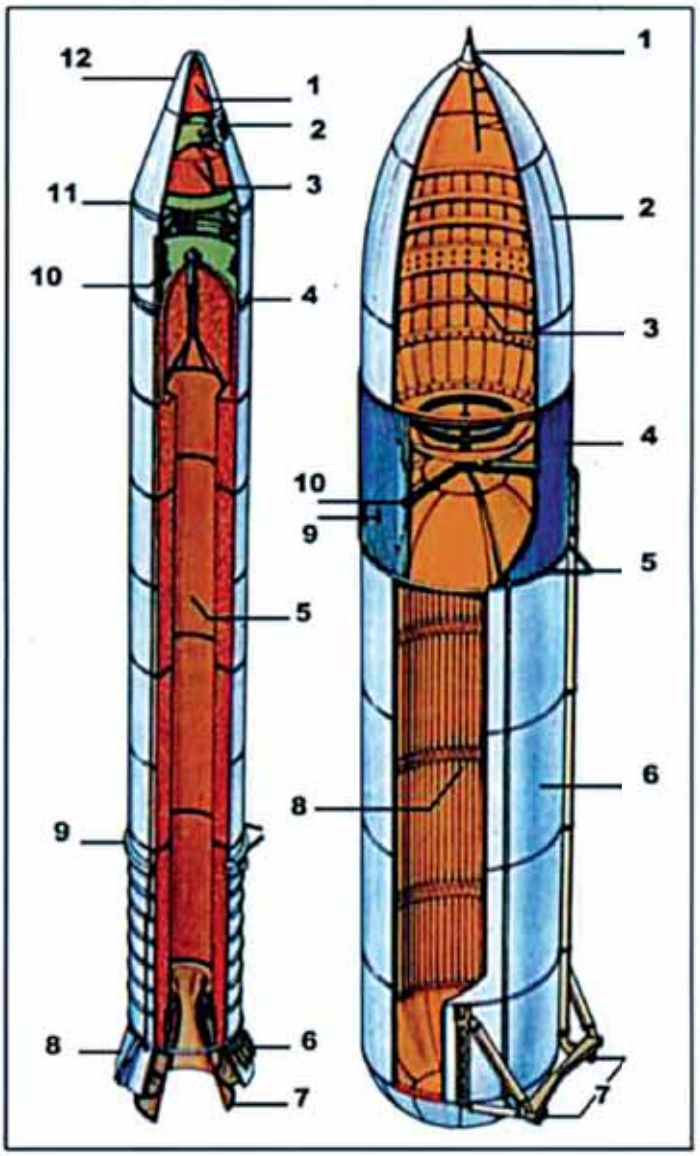
Figura 9: Spaccato di un SRB (sinistra) e di un ET (destra)

Legenda del booster a propellente solido (sinistra).

1. Paracadute di stabilizzazione;
2. Quattro motori di separazione (9.832 kg o 96.412 N di spinta ciascuno);
3. Paracadute principali;
4. Punto di connessione tra SRB e serbatoio ausiliario (supporto di spinta);
5. Grano di propellente solido diviso in sezioni;
6. Quattro motori di separazione;
7. Ugello e sistema di controllo della direzione della spinta;
8. Schermo posteriore e supporto per il lancio;
9. Anello di supporto principale dell'SRB, connessione principale SRB/ET;
10. Unità elettroniche per la separazione, il recupero e la sicurezza del poligono di lancio e strumentazione di volo;
11. Scudo anteriore;
12. Ogiva anteriore.

Legenda del serbatoio esterno ET (destra).

1. Valvola di sfiato del serbatoio dell'LO_2 e relativo coperchio;
2. Serbatoio dell'LO_2;
3. Setti anti-sciacquio;
4. Struttura di collegamento tra i due serbatoi;
5. Attacco anteriore per l'Orbiter;
6. Serbatoio dell'LH_2;
7. Tubazioni dei propellenti e del gas di pressurizzazione; connessioni elettriche;
8. Connessioni ombelicali tra i serbatoi;
9. Attacco anteriore per un SRB.



nio come combustibile, polvere di perclorato di alluminio come ossidante più un misto di ossido di ferro per catalizzatore ed un polimero che funzionava sia da legante che da combustibile. Il propellente, nella sua forma solida, aveva una geometria interna che consentiva di ridurre la spinta di un terzo dopo 55 secondi di volo così da diminuire gli sforzi ai quali l'intero veicolo e gli astronauti venivano sottoposti. Nelle versioni più recenti le pareti del razzo erano costruite in fibra di carbonio invece che in acciaio come nel modello iniziale. In tal caso si otteneva una considerevole diminuzione di peso (da 45.000 kg o 441.270 N a 29.000 kg o 284.374 N) a favore di un carico trasportato dalla navetta di 2.700.000 kg (26.476.200 N).

Durante il funzionamento era possibile orientare l'ugello di scarico del razzo in sincronia con gli altri tre motori della navetta, in modo da correggere, come necessario, la traiettoria. Il funzionamento dei due SRB terminava a 50 chilometri di altezza dopo due minuti e sette secondi dal lancio, quando i computers dello Shuttle comandavano il loro distacco dal grande ser-

batoio. Allora si accendevano otto piccoli razzi a propellente solido sistemati quattro nell'ogiva del vettore e quattro nella parte posteriore. Ciascuno forniva una spinta di 9.000 kg (88.250 N) ed insieme allontanavano l'SRB dalla navetta che continuava la sua corsa verso l'orbita. Nell'ogiva erano collocati alcuni apparati elettronici ed il paracadute che rallentava la caduta in mare del vettore vuoto. Esso dopo essere stato recuperato, risistemato e riempito di propellente, era riutilizzato in un altro volo. Ogni SRB era stato progettato per compiere una ventina di missioni.
In fig.9 possiamo vedere a sinistra lo spaccato di un SRB e a destra quello di un ET.
I tre motori principali della navetta avevano bisogno per funzionare di un'ingente quantità di idrogeno e di ossigeno liquidi entrambi stivati in un grande serbatoio attaccato alla navetta stessa. I tecnici lo chiamavano External Tank o, più semplicemente ET. Costruito dalla Martin Marietta in lega di alluminio lavorato con spessori di 5,2 centimetri pesava a vuoto 35.000 kg (343.210 N), aveva un diametro di 8 metri ed una lunghezza di 48 metri. Nelle missioni iniziali esso era l'unico elemento del nuovo sistema di trasporto spaziale che andava perduto in ogni missione (nelle ultime missioni andavano perduti anche gli SRB e si riutilizzava solo l'Orbiter). Infatti, consumati i 704.000 chilogrammi (6.903.424 N) di propellenti che conteneva, a 103 chilometri di altezza, un comando impartito dal controllo della navetta ne provocava il distacco ed il grande serbatoio vuoto precipitava secondo una traiettoria stabilita nell'Oceano Indiano.
L'External Tank, in realtà, era formato da due serbatoi: uno maggiore per i 603.000 kg (5.913.018 N) di ossigeno liquido stivato alla temperatura di –147°C (126 K) ed uno di minori dimensioni collocato sopra il primo. Questo conteneva 101.000 kg (990.406 N) di idrogeno liquido alla temperatura di – 251°C (22 K). Per evitare la facile evaporazione dei propellenti, tutta la superficie esterna del serbatoio era ricoperta di una vernice di poliuretano che fungeva da isolante termico. Due condotti del diametro di 43 centimetri trasportavano i due liquidi ai motori. La vita dell'ET durava otto minuti e poi veniva distrutto. La NASA, tuttavia, aveva inizialmente allo studio un suo recupero e riutilizzo come elemento di piattaforme orbitali (recupero di fatto mai avvenuto).
Quanto di meglio i progettisti di motori spaziali erano in grado di progettare, lo si trovava, con ogni probabilità nei tre grandi propulsori dell'Orbiter, che con una spinta di 210.000 kg (2.059.260 N) ciascuno, portavano in orbita la navetta. Si trattava dei più potenti propulsori ad idrogeno ed ossigeno liquidi fino ad allora messi a punto. La loro costruzione era dovuta alla Rocketdyne, una divisione della Rockwell International. Ognuno era alto 4.5 metri aveva una bocca di scarico di 2,37 metri di diametro e pesava 1.000 kg (9806 N). Nel sistema della navetta erano distinti con la sigla SSME (Shuttle Spacecraft Main Engines) e prima di loro il motore della stessa specie di maggiori caratteristiche era il famoso J-2 impiegato nel secondo e terzo stadio del gigantesco vettore Saturn V che portò l'uomo sulla Luna. Ma la sua spinta era molto inferiore e raggiungeva appena 104.000 kg (1.019.824 N). Entrambi erano usciti dagli stessi uffici del Marshall Space Flight Center della NASA. L'eccezionalità del sistema SSME stava anzitutto nella possibilità di essere per la prima volta riutilizzato. Prima dello Shuttle i motori venivano costruiti per funzionare quei pochi minuti necessari al raggiungimento dell'orbita perché tutto, poi, finiva distrutto. I tre SSME, invece, pur restando accesi in ogni volo per 8 minuti, erano garantiti per un uso complessivo di 7 ore e 30 minuti, sia pure in tempi successivi. Ciò vuol dire che ogni motore poteva essere adoperato per 55 missioni, dopo di che doveva essere sottoposto ad una profonda revisione.
Per di più, la sua spinta era regolabile dal 50% al 109% rispetto al valore nominale. Questa possibilità consentì di ridurre gli sforzi ai quali venivano prima sottoposti gli astronauti limitando l'accelerazione del veicolo ad un massimo di 3 g. Per dare una più precisa idea dell'alta tecnologia costruttiva impiegata negli SSME che in volo venivano pure orientati a seconda delle necessità per variare la traiettoria, gli elementi di cui erano formati, erano in grado di resistere a temperature che andavano da –251°C (22 K) che era quella dell'idrogeno liquido, ai 3.515°C (3.788 K) che si sviluppavano nella camera di combustione. Ultimo elemento rilevante era l'elevata pressione alla quale tali motori dovevano funzionare. Nella camera di combustione, infatti si sviluppava una pressione di 2.059 newton per centimetro quadrato che era il triplo di quella presente nei motori J-2 del Saturn. Ogni SSME era provvisto di un apparato di regolazione formato da un computer Honeywell che assicurava l'integrazione fra i dati provenienti dai comandi di volo e quelli in arrivo dai sensori del motore stesso. Quando l'Orbiter raggiungeva l'orbita i tre propulsori venivano spurgati del propellente residuo al fine di evitare pericoli. Si deve dire infatti che lo Shuttle poteva giungere alla quota stabilita anche se uno dei tre motori fosse andato in avaria. In fig.10 è riportato un disegno dei tre motori principali.

Figura 10: I tre motori principali

Legenda

1. Controllo di adduzione dell'LH_2 al motore;
2. Valvola dell'LH_2;
3. Valvola dell'LO_2;
4. Tubazione principale dell'LH_2;
5. Condotto per la ricircolazione dell'LH_2;
6. Connessione per l'LH_2 tra serbatoio esterno ed Orbiter;
7. Tubazione principale dell'LO_2;
8. Connessione per l'LO_2 tra serbatoio esterno ed Orbiter;
9. Condotto di adduzione dell'LH_2 al motore;
10. Pannello di interfaccia del sistema di distribuzione dei propellenti;
11. Cuscinetto della sospensione cardanica del motore;
12. Scudo termico;
13. Motore n. 3 (di destra);
14. Motore n. 2 (di sinistra);
15. Motore n. 1 (centrale).

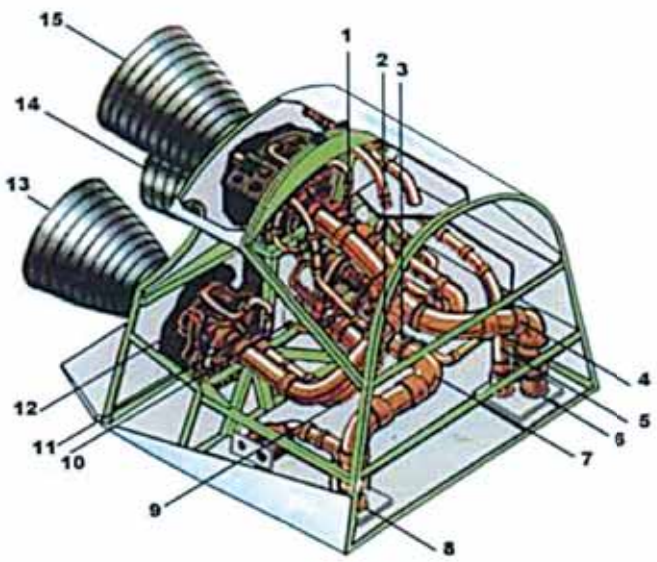


Figura 11: Motori principali del Discovery

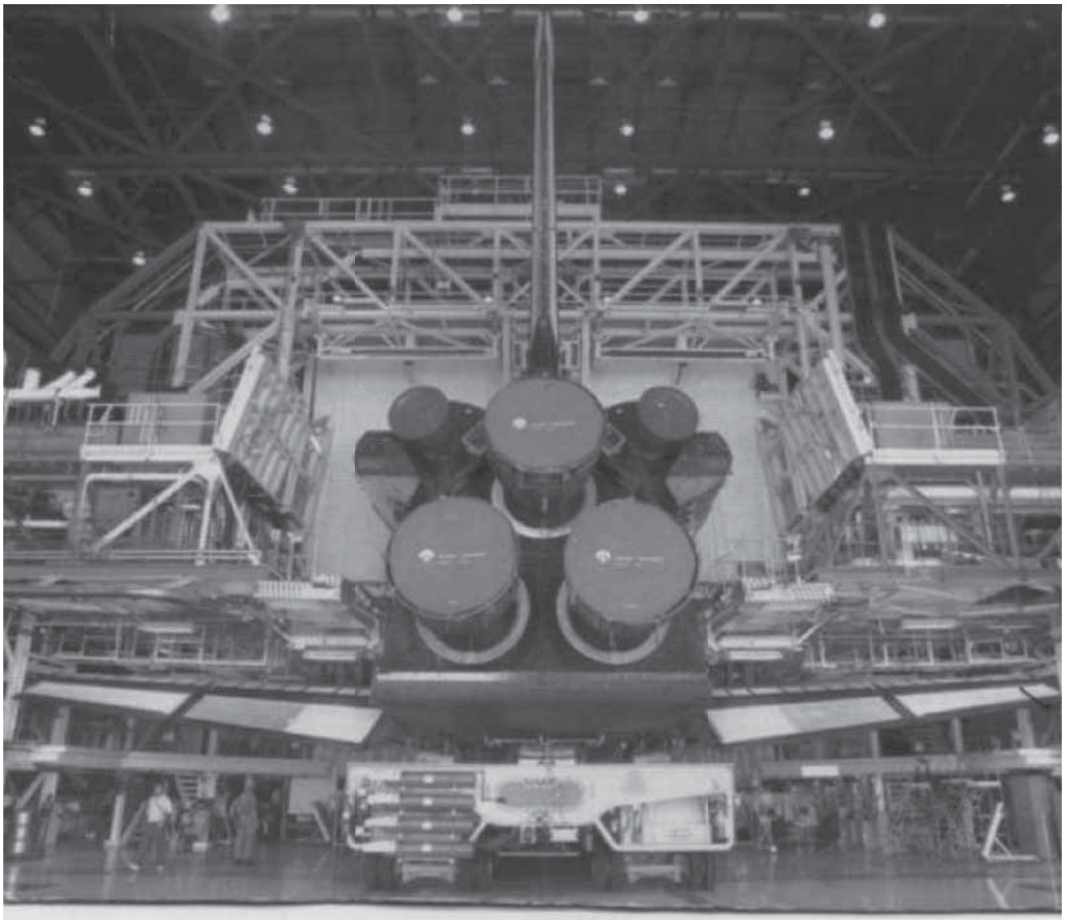
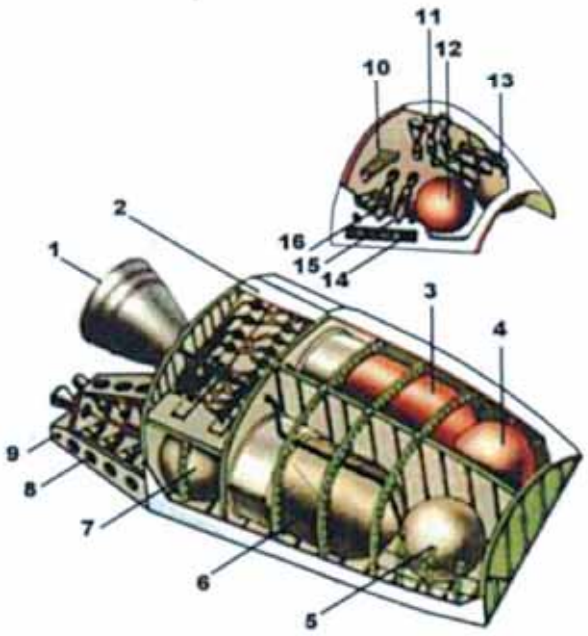


Figura 12: Sistemi OMS ed RCS

Legenda
1. Motore dell'OMS;
2. Serbatoio dell'elio del RCS;
3. Serbatoio del combustibile dell'OMS;
4. Serbatoio del combustibile del RCS;
5. Serbatoio dell'ossidante del RCS;
6. Serbatoio dell'ossidante dell'OMS;
7. Serbatoio dell'elio dell'OMS;
8. Motori a razzo primari del RCS;
9. Motori vernieri del RCS;
10. Supporto delle connessioni elettriche;
11. Motori primari anteriori del RCS;
12. Serbatoio dell'ossidante;
13. Serbatoio del combustibile;
14. Connessioni di servizio;
15. Serbatoio dell'elio;
16. Motori vernieri.



In fig.11 è riportata un'immagine che ci mostra il Discovery mentre usciva a marcia indietro dall'OPF-2 verso il Vehicle Assembly Building, in preparazione dell'STS-85.
La connessione tra i tre motori principali ed i più piccoli OMS è evidenziata in questa foto. Si noti che le superfici di controllo aerodinamico tendevano ad abbassarsi quando il veicolo non era azionato dal motore. Quando i tre grandi motori SSME venivano spenti, la navetta non era ancora definitivamente collocata nella sua orbita. L'ultimo lavoro di inserzione orbitale veniva invece compiuto da altri due propulsori, sistemati in coda a fianco degli SSME. Questi erano gli Orbital Maneuvering Subsystems (OMS) ed erano costruiti dalla McDonnell Douglas. Il loro ruolo in una missione era rilevante in quanto oltre all'inserimento orbitale consentivano di rendere circolare l'orbita, consentivano dei trasferimenti su orbite diverse, offrivano la possibilità di effettuare dei rendez-vous con altri veicoli spaziali ed infine rendevano possibile l'uscita dall'orbita ed il rientro sulla Terra. Per fare tutto ciò i due OMS, ciascuno con una spinta di 2.670 kg (26.182 N) avevano a disposizione una riserva di 11.000 kg (107.866 N) di propellenti liquidi (monometilidrazina e tetrossido di azoto). Essi, inoltre, erano progettati per compiere 100 missioni, per sopportare 1.000 riaccensioni e funzionare ininterrottamente per 15 ore.
I condotti che trasportavano i propellenti ai due OMS erano collegati anche con una rete di tubi secondari che alimentavano una serie di piccoli propulsori da 387 kg (3.795 N) di spinta ciascuno (comunque dotati di serbatoi propri) variamente distribuiti sulla superficie esterna della navetta e che formavano il cosiddetto Reaction Control System (RCS). Essi erano divisi in tre gruppi: due posteriori formati da 12 propulsori ognuno, posti ai lati esterni degli OMS ed uno anteriore di 14 propulsori, inseriti proprio nella punta dello Shuttle. In ogni gruppo vi erano due propulsori ancora più piccoli da 12 kg (118 N) di spinta ciascuno chiamati razzi vernieri. Tutti insieme, i 38 più i 6 servivano all'astronave per mantenere e correggere la posizione in orbita, compiere dei movimenti lungo i tre assi ed infine controllare la corretta esposizione del veicolo durante la fase di rientro in atmosfera.
I razzi vernieri erano garantiti per 100 missioni, 500.000 riaccensioni e 125.000 secondi cumulativi di funzionamento. Tutti gli altri 38 piccoli propulsori avevano anch'essi una durata di 100 missioni, 50.000 riaccensioni e 20.000 secondi di funzionamento. In fig.12 è riportato uno spaccato del sistema di manovra orbitale (OMS) ed uno di controllo d'assetto (RCS).

Struttura dell'Orbiter

L'Orbiter costituiva l'elemento del sistema Space Shuttle che assicurava la messa in orbita dell'equipaggio e del materiale necessari per portare a termine i compiti previsti e che provvedeva pure a ricondurli a terra. Esso forniva anche l'ambiente necessario alla vita dell'equipaggio che, a differenza delle precedenti mis-

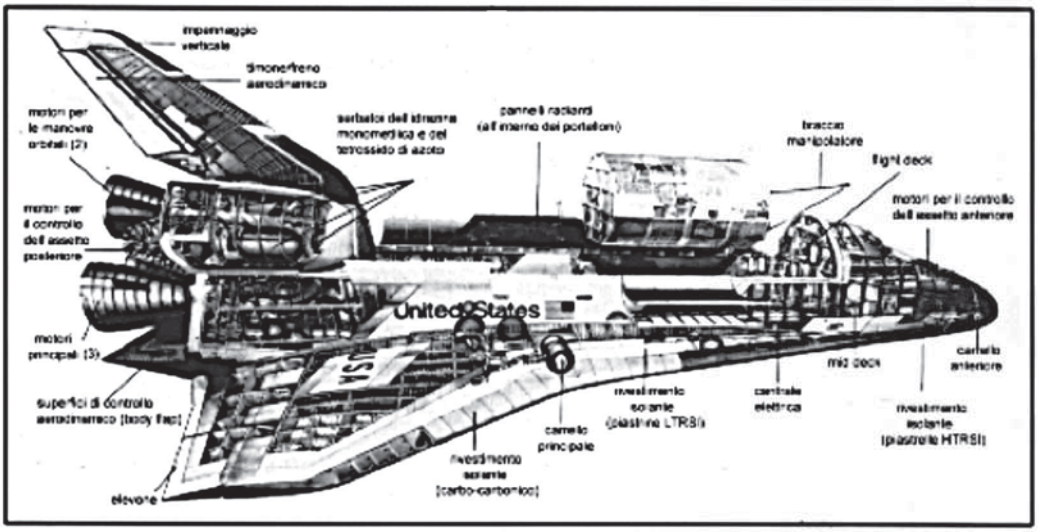


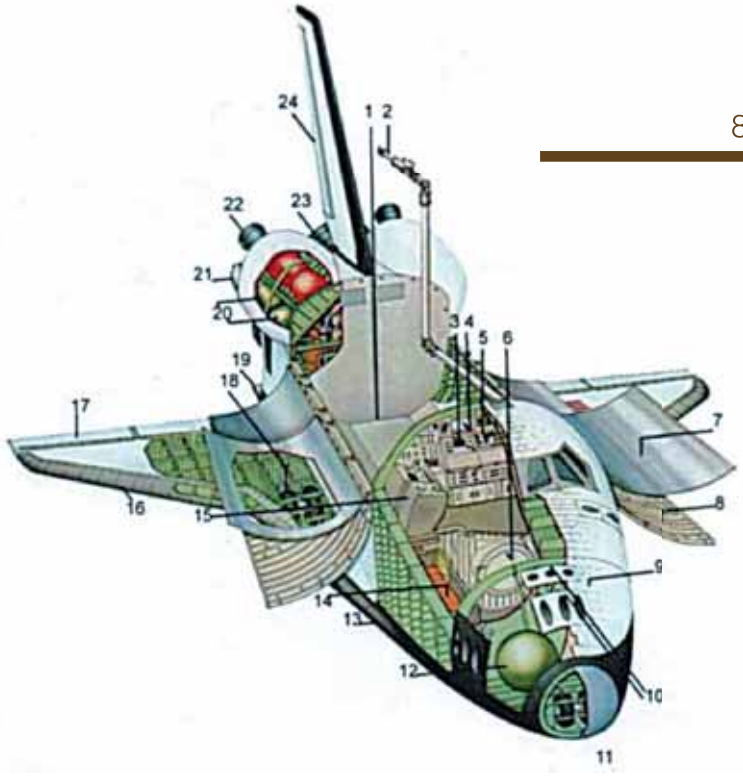
Figura 13: Struttura longitudinale dell'Orbiter

sioni, includeva sistematicamente scienziati ed ingegneri specializzati, a seconda della missione programmata. La struttura dell'Orbiter, come si può vedere in fig.13, constava della fusoliera, delle ali e dell'impennaggio verticale; a sua volta la fusoliera era costituita dalla parte anteriore, che comprendeva la cabina dell'equipaggio per un totale di 71,5 metri cubi, della parte centrale (18,3 m x 5,2 m x 4 m) e della parte posteriore (5,5 m x 6,7 m x 6,1 m); l'impennaggio verticale (che fungeva da timone di direzione e da aerofreno) aveva un'altezza di 8,1 m.

L'Orbiter presentava sulla parte posteriore della fusoliera delle superfici di controllo aerodinamico (body flap) disposte su una lunghezza di 6,1 metri e per un'area totale di 12,6 metri quadri, nonché sulle ali (elevoni) per una lunghezza di 4,2 + 3,8 metri. La fusoliera aveva una struttura convenzionale in alluminio, capace grazie al suo rivestimento, di sopportare un carico termico massimo corrispondente a 177°C (450 K) ed era protetta da superfici isolanti riutilizzabili. La fusoliera anteriore era in lega di alluminio completamente rivettata, caratterizzata da elevate doti di robustezza e visibilità. Presentava infatti, da un lato, finestrini anteriori, laterali e superiori, e dall'altro paratie, ordinate e pannelli irrigiditi, gran parte dei quali, compresi i grandi pannelli finestrati, erano lavorati a macchina. La fusoliera anteriore, aveva inoltre un alloggiamento per il carrello di atterraggio anteriore, irrigidito da una trave di supporto e da due puntoni. Anche se la struttura era realizzata principalmente in lega di alluminio, nella parte posteriore esistevano anche degli elementi in titanio, ai quali erano ancorati i motori, mentre invece i due portelloni superiori che si aprivano una volta raggiunta l'orbita, erano realizzati con una leggera struttura a nido d'ape, ricoperta di grafite epossidica. I portelloni si aprivano nello spazio sia per esporre gli strumenti scientifici del vano payload all'ambiente cosmico, al quale avrebbero dovuto lavorare, sia perché attaccati al loro interno vi erano dei pannelli radiatori che avevano la funzione di smaltire il calore prodotto dagli apparati dell'astronave.

La cabina dell'equipaggio era completamente pressurizzata ed era suddivisa in tre zone orizzontali: "flight deck", "mid deck" ed "equipment bay". Il primo, nel quale trovava posto l'equipaggio durante le operazioni di volo, era costituito da una sezione anteriore, utilizzata durante il lancio ed il rientro, e che disponeva di due posti di guida per il comandante della missione (a sinistra) e per il pilota (a destra) e da una posteriore per le operazioni in orbita che alloggiava il pilota orbitale e lo specialista responsabile delle operazioni con il carico pagante. L'equipaggio di una missione tipo era composto da sette astronauti: il comandante, il pilota, ed altri cinque membri tra specialisti di missione e specialisti di carico utile. Il quadro comandi comprendeva cinque centri di controllo e più di 2.000 indicatori. Nella sezione centrale (mid deck) era contenuta gran parte della strumentazione avionica, mentre nella stiva inferiore (equipment bay) trovavano posto gli equipaggiamenti. Il ponte di comando aveva un pavimento a griglia aperta e disponeva di un passaggio per la camera di compensazione (airlock) e per il tunnel di trasferimento, che consentiva di accedere all'esterno e allo Spacelab.

Figura 14: Altro spaccato dell'Orbiter



Legenda
1. Stiva (18,3 m x 4,6 m);
2. Remote Manipulator System;
3. Strumenti e comandi per rendez-vous e docking;
4. Oblò posteriori;
5. Pannello di comando per le operazioni col carico utile;
6. Airlock (camera di compensazione);
7. Radiatori per lo smaltimento del calore nello spazio;
8. Portelloni della stiva;
9. Piastrelle isolanti per basse temperature;
10. Motori per controllo d'assetto anteriori;
11. Carrello anteriore;
12. Serbatoio dell'ossidante;
13. Piastrelle isolanti per alte temperature;
14. Cuccetta;
15. Strumentazione e comandi per le operazioni della missione;
16. Rivestimento isolante in carbo-carbonio;
17. Elevone;
18. Carrello principale;
19. Body flap;
20. Serbatoi dell'idrazina e del tetrossido d'azoto;
21. Motori di controllo posteriori;
22. Motori manovra;
23. Motori principali;
24. Timone di direzione/aerofreno.

In fig.14 è mostrato un altro spaccato dell'Orbiter che questa volta è visto in posizione frontale.
La fusoliera centrale era la struttura principale per portare i carichi. Il suo rivestimento era totalmente lavorato a macchina ed era costituito da pannelli sandwich a nido d'ape: presentava delle ordinate con una sezione centrale a struttura scatolare, pannelli rivettati e nervature integrate a macchina. Di queste ordinate ve ne erano 12 principali complete e 13 parziali, tutte opportunamente stabilizzate. La struttura della fusoliera centrale era irrobustita da due longheroni principali e da due longheroni di attacco dei portelloni, che ne costituivano la parte superiore. In essa trovavano ancora posto due paratie (una anteriore ed una posteriore) di separazione dal resto della fusoliera, una piastra di supporto dei connettori, l'alloggiamento del carrello principale d'atterraggio, le interfacce d'attacco dell'ala e sei stabilizzatori delle cerniere dei portelloni. Il rivestimento esterno era sagomato in modo da realizzare un raccordo con l'ala, importante per le prestazioni aerodinamiche.
Questa parte della fusoliera costituiva la cargo-bay, cioè la stiva del sistema, ed in essa si trovava alloggiato il carico pagante, diverso a seconda della natura della missione. La sua parte superiore, infatti, per motivi di accessibilità era costituita due portelloni, costruiti in grafite epossidica e aventi un peso di 1.500 chilogrammi (14.710 newton). Essi supportavano all'interno quattro pannelli radianti, di cui due erano mobili e due fissati alle porte, che erano esposti allo spazio quando le porte erano aperte per dissipare il calore proveniente dagli equipaggiamenti elettrici presenti nell'Orbiter e nel carico pagante. Essi avevano una struttura parzialmente scatolare a pannelli a nido d'ape e a centine, in grado di resistere a torsione. Questa enorme stiva aveva punti di attacco per il carico pagante, distribuiti lungo tutta la sua lunghezza ed era in grado di trasportare cinque veicoli spaziali privi di uomini (in genere satelliti o sonde) per ogni missione, strumenti per l'osservazione della Terra e dello spazio sovrastante, apparati per piccoli esperimenti autonomi per una varietà di utilizzatori o un intero laboratorio scientifico con personale, perfettamente equipaggiato.
L'Orbiter forniva a tutto questo energia elettrica, riscaldamento e raffreddamento, trasmissione di dati, visualizzatori per gli specialisti a bordo e possibilità di comunicare con le stazioni a terra. Nella parte posteriore della cargo

bay vi era una piattaforma che poteva effettuare un puntamento con una precisione di mezzo grado, il cui assetto era controllato da piccoli razzi vernieri, che venivano accesi dai computer dell'Orbiter. La parte posteriore della fusoliera trasmetteva alla parte centrale i carichi derivanti dalla spinta dei motori principali e, durante l'ascesa, al serbatoio esterno. Essa era costituita da pannelli di alluminio lavorati a macchina con una struttura interna di titanio, di tipo scatolare, rinforzata da una resina epossidica con fibre di boro. Essa era munita di attacchi per le semiali, per i body flaps nonché per l'impennaggio verticale. Oltre alle interfacce d'attacco con il serbatoio esterno presentava all'estremità lo scudo termico posteriore. Nella sua parte posteriore trovavano posto il supporto della turbopompa a bassa pressione e quelli dei motori principali.

Le semiali erano dotate di longheroni ondulati, centine a struttura reticolare e lamiere irrigidite da correnti di lega di alluminio alloy, per uno spessore complessivo di 2,54 centimetri. Nella parte centrale la struttura era scatolare per offrire buona resistenza alla torsione. Ogni semiala era dotata di elevoni che presentavano un'escursione variabile tra +36,5° e – 21,5° ed un "guanto" (glove) di raccordo alla fusoliera con un'apertura di 18 metri ed uno spessore massimo di 1,5 metri.

L'impennaggio verticale aveva una struttura a due longheroni multicentinata, con rivestimento a nervatura integrata, lavorato a macchina. Esso costituiva una scatola in lega di alluminio, imbullonata ai due longheroni principali della fusoliera posteriore. La parte mobile era dotata di attuatori della manovra per cui essa poteva ruotare nei due sensi di ±27,1. Il timone poteva anche aprirsi in due parti simmetriche, formando un diedro di 99,6°, per funzionare da freno aerodinamico durante l'atterraggio e la sua struttura era a pannelli in alluminio a nido d'ape.

I sottosistemi

Il sottosistema idraulico provvedeva attraverso i vari attuatori al movimento degli elevoni, dei flaps, del timone di direzione/aerofreno, dei freni aerodinamici, nonché dei carrelli di atterraggio e dei loro freni. Altra funzione importantissima, svolta dal sottosistema idraulico, era l'azionamento delle valvole dei motori principali e dei meccanismi di orientamento degli stessi e inoltre dei dispositivi che provvedevano alla chiusura delle linee di adduzione del propellente al momento del distacco del serbatoio esterno dall'Orbiter. La potenza necessaria era generata da tre turbopompe a gas, azionate dalla decomposizione dell'idrazina, quando passava su un letto catalitico. Esse lavoravano a 74.160 giri al minuto.

L'Orbiter dello Space Shuttle era provvisto di un complesso quanto indispensabile sistema di protezione termica. Infatti tuffandosi verso l'atmosfera, ad oltre 100 chilometri al di sopra della superficie terrestre, gli astronauti delle missioni Shuttle, non più protetti dagli scudi termici convenzionali, facevano affidamento sulle oltre 30.000 piastrelle di ceramica per salvarsi dall'incenerimento. Ad una tecnologia antica quanto la civiltà umana spettava dunque il compito di difendere l'incolumità degli equipaggi e quindi il progresso della tecnologia in campo spaziale.

Le proprietà di riutilizzo dell'Orbiter avevano creato particolari problemi per quanto concerneva le protezioni termiche, che costituivano il sistema del controllo termico passivo: i metodi precedentemente usati, come ad esempio quelli usati nelle missioni Apollo, consistevano sostanzialmente nell'uso di materiali ablativi, persi quindi al termine di ogni missione. Si desiderava questa volta un isolamento termico stabile e capace di proteggere la struttura sottostante, in alluminio per circa 100 missioni dalle temperature eccezionali del volo orbitale e dal calore bruciante durante il rientro in atmosfera nel viaggio di ritorno. Si fece così ricorso ad un particolare tipo di tessere o piastrelle, ed in particolare sette tipi di piastrelle, in base alle esigenze di protezione ed al cimento termico delle varie parti: sulla parte superiore dell'Orbiter e sui fianchi, un isolante flessibile, costituito da strati di feltro di nylon rivestiti di silicone capace di isolare fino a 370°C (643 K); sulle fiancate anteriori e sui piani di coda piastrelle di fibre di silice con rivestimento vetroso di 20 centimetri quadri ciascuna, spesse circa 2,5 centimetri, che proteggevano le superfici di alluminio fino a 650°C (923 K); sul fondo, sul bordo d'attacco della coda e parzialmente sulle ali, piastrelle di colore nero lucente capaci di sopportare fino a 1.260°C (1.533 K); infine, per il naso e per la parte esterna del bordo d'attacco delle ali, le più cimentate termicamente, un rivestimento detto "carbo-carbonio rinforzato", ossia un rivestimento in carbonio con l'aggiunta di fibre di carbonio che, una volta trattato termicamente, veniva ricoperto di carburo di silicio. Quest'ultima protezione consentiva di raggiungere senza danni per la struttura i 1650°C (1923 K). Coperture di metallo o di fibre di vetro proteggevano, come vedremo meglio in seguito, gli accessi e le connessioni mobili. In fig.15 è riportata una foto del Challenger. Si noti il contrasto tra le piastrelle color bianco e quelle nere.

Le piastrelle erano state smaltate esternamente

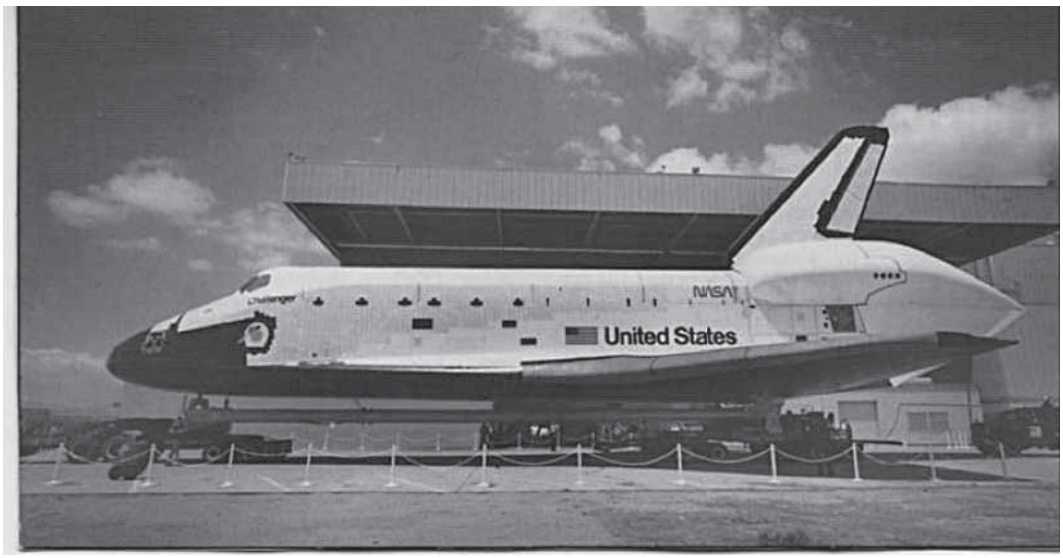


Figura 15:
Foto del Challenger.

con uno strato di vetrina (anch'essa un materiale ceramico) allo scopo di produrre una superficie straordinariamente levigata e riflettente in grado di aiutare a deflettere gran parte del calore dalle piastrelle stesse. Era anche stato usato vetro misto ad altre forme di ceramica nella foggiatura dei fermi di ancoraggio delle piastrelle intorno ai giunti articolati ed alle aperture della navetta, come i portelli del carrello di atterraggio. Nel complesso la superficie esterna dello Shuttle era costituita per oltre il 70% da diversi tipi di vetro appositamente creati dalla Corning Glass Works di New York.
In fig.16 è riportato invece un disegno che mostra i materiali che costituivano il sistema di protezione termica della superficie inferiore dello Space Shuttle, uguale per tutte le navette.
Il sistema di protezione termica dello Space

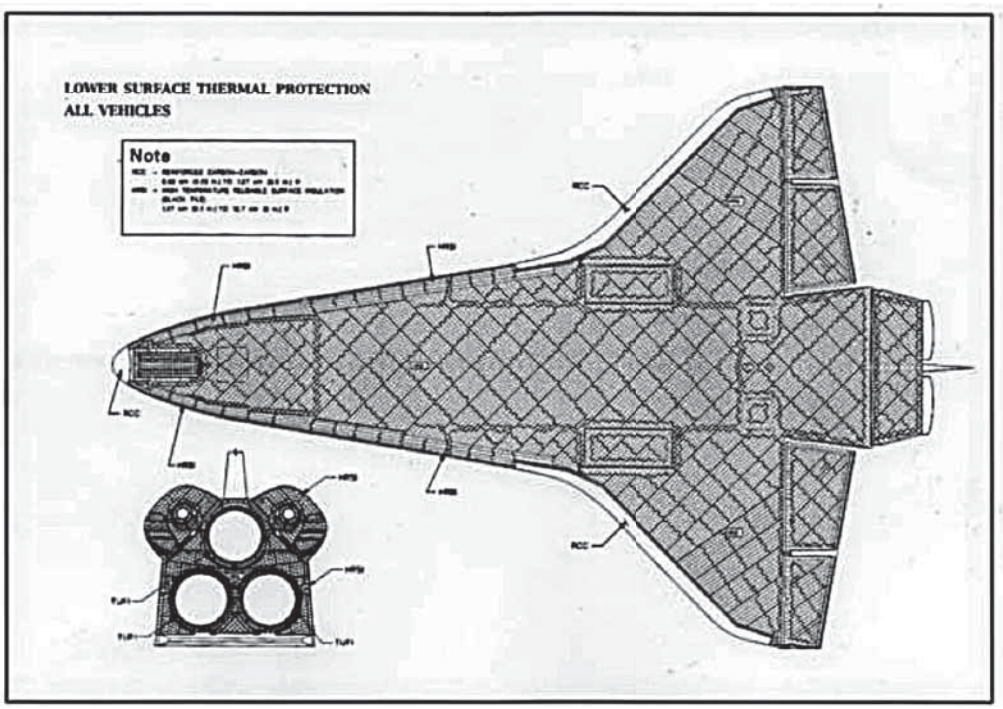


Figura 16:
Materiali di rivestimento del ventre dell'Orbiter

Shuttle era lo scudo termico che proteggeva l'Orbiter durante il rientro atmosferico da una missione, quando si raggiungevano temperature di 1650 °C. Inoltre, costituiva anche una barriera dal freddo dello spazio mentre lo Shuttle era in orbita. Esso ricopriva completamente la superficie dello Shuttle, ed era costituito da sette diversi materiali a seconda della protezione termica richiesta in una particolare parte del velivolo.

Lo scudo termico dello Shuttle aveva tre caratteristiche che lo distinguevano da quelli usati in precedenza: riutilizzabilità, leggerezza e fragilità.

Per quanto riguarda la riutilizzabilità è bene dire che le navette precedenti utilizzavano uno scudo termico ablativo, che si distruggeva al rientro atmosferico e non poteva essere riutilizzato. Lo Shuttle, che era un velivolo riutilizzabile, richiedeva uno scudo termico anch'esso riutilizzabile.

Inoltre gli scudi ablativi usati in precedenza erano molto pesanti. Ad esempio quello impiegato nel modulo di comando Apollo rappresentava un terzo della massa totale del velivolo. Lo Shuttle possedeva un'area molto più estesa rispetto alle navette precedenti, quindi lo scudo termico doveva essere leggero

Infine vi era il problema della fragilità. L'unica tecnologia nota all'inizio degli anni settanta con le caratteristiche di peso e protezione richieste era anche piuttosto fragile a causa della sua bassa densità. I materiali utilizzati per rivestire l'Orbiter erano:

- RCC (Reinforced Carbon-Carbon): sopportava temperature superiori a 1.269 °C (1.542 K). Il carbo-carbonio rinforzato era molto usato sui bordi di entrata alari, nel nose-cap, inclusa una superficie immediatamente dietro al muso stesso nella parte inferiore (pannello del "mento") e sulla superficie immediatamente intorno all'attacco strutturale anteriore Orbiter-ET.

In fig.17 possiamo vedere il nose-cap dell'Orbiter in fase di integrazione.

- HRSI (High-temperature Reusable Surface Insulation): utilizzato nella parte inferiore dell'Orbiter; sopportava temperature fino a 1.260 °C (1.533 K). Le HRSI erano piastre nere per alte temperature per superfici isolanti riusabili ed erano usate in tutta la parte inferiore del veicolo dove l'RCC non era usato, nello scudo termico di base ed in zone selezionate sulla piastra superiore della fusoliera anteriore, in porzioni dei pod OMS/RCS, nei bordi di entrata e di uscita dello stabilizzatore verticale, nelle superfici di raccordo dell'ala, nei bordi di uscita degli elevoni, nelle zone adiacenti all'RCC, sulla superficie superiore dell'ala, nell'interfaccia con l'RCC dei bordi d'entrata dell'ala, nella parte superiore del body-flap ed intorno ai bordi di uscita del pod su OV-102. Le piastrelle HRSI avevano un rivestimento superficiale nero, necessario per l'emissione termica ed in fig.18 è riportata la sezione della prua dell'Orbiter.
- FRCI (Fibrous Refractory Composite Insulation): piastrelle isolanti in composito refrattario fibroso nero usate per aumentare la resistenza e la durata dello strato protettivo. Alcune mattonelle HSRI furono sostituite con altre costituite di questo materiale. In fig.19 è riportata una sezione del bordo d'attacco dell'ala.
- AFRSI (Advanced Flexible Reusable Surface Insulation): isolante flessibile, sopportava temperature fino a 649 °C (922 K). Dopo la consegna iniziale del Columbia furono sviluppate coperte isolanti superficiali bianche flessibili e riusabili, di tipo avanzato (AFRSI). Le coperte AFRSI consentivano un incremento di produttività e durabilità, tempi e costi ridotti di fabbricazione ed installazione ed una riduzione di peso rispetto a quello delle piastrelle LRSI.
- LRSI (Low-temperature Reusable Surface Insulation): utilizzato nei primi voli, ma successivamente sostituito quasi completamente dal materiale AFRSI. Si trattava di piastrelle riusabili bianche per basse temperature e isolamento superficiale usate in aree selezionate della fusoliera anteriore, della fusoliera media e della fusoliera posteriore, dello stabilizzatore verticale, della

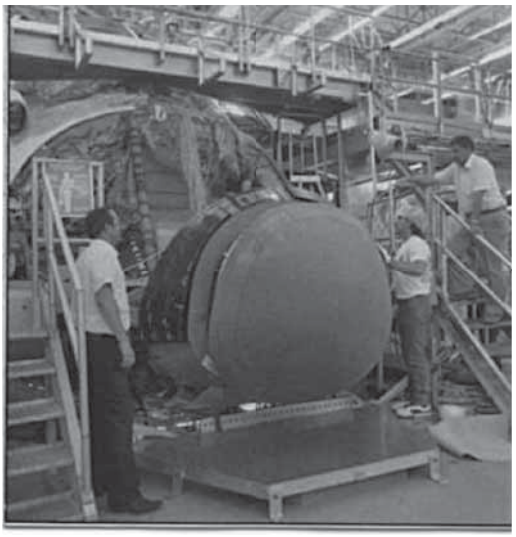
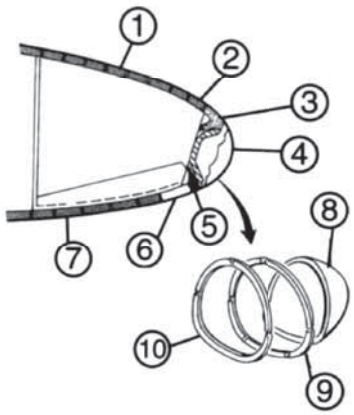


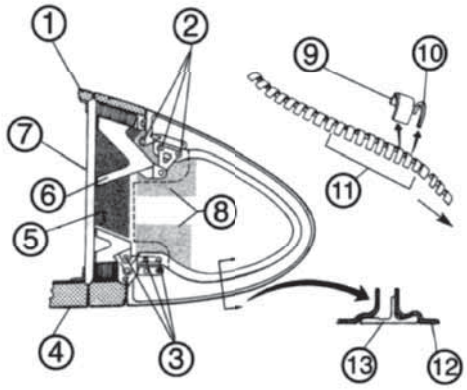
Figura 17: Nose-cap in allestimento

Figura 18: Sezione della prua dell'Orbiter



Legenda
1. Piastrelle di HRSI o FRCI-12;
2. Prima fila di HRSI o FRCI-12;
3. Isolamento interno;
4. Muso in carbo-carbonio rinforzato;
5. Sigillo in RCC;
6. Pannello di "mento" in RCC;
7. Piatrelle HRSI o FRC-12;
8. Parte Anteriore del muso rinforzata in carbo-carbonio;
9. Striscia di sigillo in RCC (una a destra, una a sinistra ed una inferiore);
10. Striscia di sigillo in RCC (una a destra, una a sinistra ed una inferiore).

Figura 19: Sezione del bordo d'attacco dell'ala



Legenda
1. Piastrelle HRSI o FRCI-12;
2. Anelli di tenuta in Inconel e bulloni A-286;
3. Anelli di tenuta in Inconel e bulloni A-286
4. Piastrelle HRSI o FRCI-12;
5. Isolamento in ceracromo;
6. Supporto di Inconel;
7. Longherone del bordo d'attacco dell'ala;
8. Pannelli d'isolamento;
9. Bordo d'attacco in RCC;
10. Strisce sigillanti in RCC;
11. Pannelli 5-13;
12. Pannelli dell'ala in RCC
13. Sigillo termico in RCC.

superficie superiore delle semiali e dei pod OMS/RCS. Queste piastrelle proteggevano aree dove le temperature erano al di sotto di 648°C (921 K) ed avevano un rivestimento superficiale bianco per fornire migliori caratteristiche termiche nel volo in orbita. In fig.20 è riportata una foto della parte ventrale del Columbia. Si noti la perfetta disposizione delle piastrelle.

- TUFI (Toughened Unipiece Fibrous Insulation): materiale resistente utilizzato in varie regioni dell'Orbiter. Queste piastrelle indurite monopezzo isolanti fibrose furono sviluppate nel 1993 e usate su limitate superfici degli Orbiter, principalmente per lo scudo termico di base intorno agli SSME. Le piastrelle TUFI colorate di nero si rivelarono più resistenti ai danni delle piastrelle HRSI che esse sostituivano.
- FRSI (Felt Reusable Surface Insulation): sopportava temperature fino a 371 °C (644 K). Si trattava di coperte bianche di feltro Nomex rivestito, riusabile per isolamento superficiale, che erano usate sulla superiore dei portelli della stiva del carico pagante, sulle fiancate della fusoliera media e di quella posteriore, in porzioni della superficie superiore dell'ala e parte dei pod OMS/RCS.

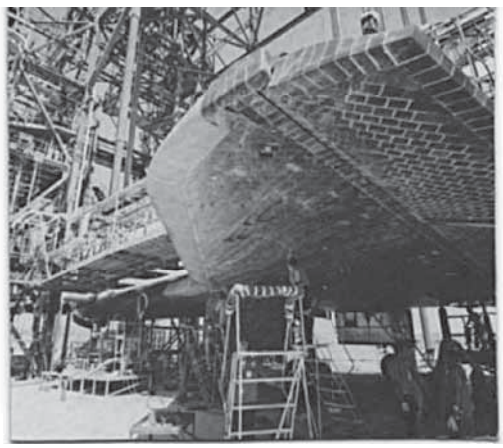


Figura 20: Superficie inferiore del Columbia

In fig.21 possiamo vedere ancora la superficie inferiore del Columbia mentre quest'ultimo veniva posizionato.

- Altri materiali erano usati in altre aree speciali. Questi materiali includevano vetri termici per i finestrini, una combinazione di tessuto silicato bianco e pigmentato nero per barriere termiche e riempimento di interstizi, metallo per l'FRCS e pannelli per sigillatura elevoni sulla superficie superiore dell'ala, materiale per vulcanizzazione a temperatura ambiente (RTV) per gli ombelicali sui lati della fusoliera posteriore dell'Orbiter ed altro ancora.

Figura 21: Altra foto del ventre del Columbia

Figura 22: Una piastrella numerata

In fig.22 è riportata una piastrella numerata tenuta tra le mani da un tecnico.
Ogni materiale aveva caratteristiche diverse, tra cui un certo grado di resistenza al calore, di resistenza all'impatto e peso. Esse determinavano la posizione, la quantità e il tipo di materiale utilizzato.
Il sistema di protezione termica era costituito da diversi tipi di protezione, che potevano essere suddivisi principalmente in due categorie: sistemi che utilizzavano mattonelle e sistemi che non le utilizzavano. Il criterio di selezione di un materiale consisteva principalmente nello scegliere il materiale più leggero tra quelli che fornivano la protezione richiesta in una data regione dello Shuttle. In alcuni casi tuttavia, si dovevano utilizzare materiali più pesanti, poiché resistevano meglio agli impatti, oppure materiali con manutenzione più leggera.
La maggior parte dell' Orbiter era ricoperto da mattonelle in silicio, ricavato da sabbia di quarzo molto puro. L'isolamento impediva il trasferimento di calore alla struttura sottostante in alluminio dell'Orbiter. Erano presenti circa 31.000 mattonelle uniche, che erano situate individualmente in una precisa posizione.
Le mattonelle non erano assicurate meccanicamente al velivolo, ma incollate. Poiché il materiale era fragile e non poteva piegarsi, le mattonelle erano incollate tramite un adesivo in silicone ad uno strato in Nomex, che era a sua volta incollato alla struttura sottostante. In questo modo le mattonelle erano isolate dalle flessioni ed espansioni dell'Orbiter. In fig.23 è riportato il disegno di una mattonella HRSI, nel quale sono evidenziate alcune sue proprietà.
Le mattonelle HRSI (di colore nero) fornivano protezione per temperature fino a 1260 °C. Erano presenti 20.548 mattonelle di questo materiale che coprivano i portelli del carrello d'atterraggio, le connessioni con il serbatoio esterno e tutta la superficie inferiore dell'Orbiter. Esse erano utilizzate anche nella parte superiore della fusoliera anteriore, nelle regioni dell'Orbital Maneuvering System, sul bordo anteriore dello stabilizzatore verticale e in altre regioni come sulla parte superiore della superficie degli ipersostentatori. Generalmente queste mattonelle erano quadrate con un lato di 152 mm, e composte da fibre (10%) di silicio (purezza 99,8%) e da vuoto (90%) ed erano caratterizzate da una struttura ceramica. L'alta percentuale di vuoto causava una bassa densità (144 kg/m^3), rendendole sufficientemente leggere e resistenti alle alte accelerazioni. Queste mattonelle avevano un aspetto vetroso poiché erano rivestite di vetro in tetrasilicide e borosilicato.

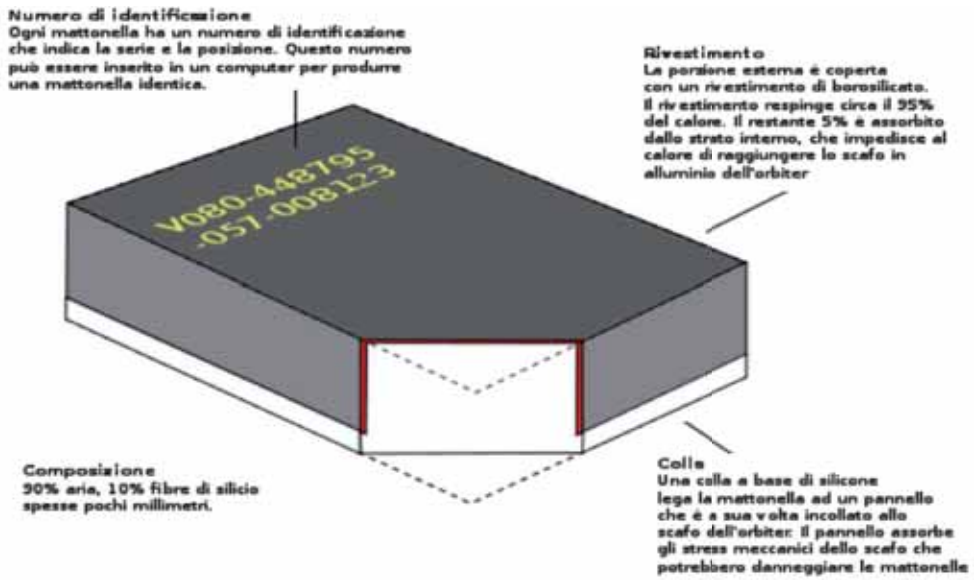


Figura 23: Piastrella HRSI

Le mattonelle HRSI erano utilizzate assieme a materiali più resistenti, ed erano progettate per proteggere sia dalle temperature estremamente basse (come nello spazio) sia da temperature estremamente alte durante il rientro.
Le mattonelle FRCI (Fibrous Refractory Composite Insulation Tiles) di colore nero possedevano una maggiore resistenza, durata, e avevano un peso inferiore alle mattonelle HRSI. Alcune mattonelle HRSI furono sostituite con altre di tipo FRCI. Le mattonelle TUFI, più resistenti e robuste entrarono in uso nel 1996. Una versione di esse era di colore nero ed erano utilizzate nella parte inferiore dell'Orbiter, mentre un'altra versione era di colore bianco ed erano usate per la parte superiore. Le mattonelle di tipo bianco erano molto più resistenti agli impatti rispetto alle altre, ma conducevano maggiore calore, quindi potevano essere utilizzate solo nella parte superiore degli ipersostentatori e nella zone dei motori principali. Le versioni nere fornivano maggiore isolamento dal calore ed erano adatte per la parte inferiore dell'Orbiter ma avendo un peso superiore, il loro utilizzo era ristretto in aree specifiche.
Le mattonelle di colore bianco, ricoprivano la parte superiore delle ali nei pressi del bordo anteriore. Inoltre erano usate in alcune zone della fusoliera, nella coda verticale e nei pressi del sistema OMS/RCS. Proteggevano le zone che raggiungevano temperature fino a 649 °C (922 K), erano di forma quadrata con lato di circa 203 mm ed avevano un rivestimento di composti di silicio e ossido d'alluminio. Erano riutilizzabili fino a 100 missioni, e venivano attentamente ispezionate nell'Orbiter Processing Facility dopo ogni missione.
Tra le mattonelle LRSI esistevano degli interstizi (gap), necessari a causa dell'espansione termica tra la mattonella e la superficie sottostante. Tuttavia i gap venivano riempiti con degli inserti detti "gap filler", per evitare un loro surriscaldamento dovuto alla formazioni di flussi causati da gradienti di pressione.
I materiali utilizzati erano fibre bianche AB312 o una copertura nera AB312 con fibre di allumina. Venivano utilizzati sul bordo delle ali, nel naso della parte anteriore della fusoliera, nel parabrezza e nel portello laterale, nei flaps, nello stabilizzatore verticale e nello schermo dei motori principali.
I gap filler sporgenti costituivano un problema perché disturbavano il normale flusso d'aria laminare sotto l'Orbiter durante il rientro, e causavano delle turbolenze a velocità minori. Un flusso d'aria turbolento risultante da una mescolanza di aria calda e fredda poteva avere conseguenze sulla temperatura dello Shuttle. In fig.24 è riportata una foto del Columbia dopo la missione STS-4.
In questa figura si può vedere come il Columbia "mostrasse" ai tecnici le piastrelle che ricoprivano il carrello di atterraggio principale.
I sistemi di protezione termici utilizzati che non erano composti da mattonelle erano:

- Advanced Flexible Reusable Surface Insulation (AFRSI): sviluppato dopo la costruzione del Columbia, era un materiale a bassa densità costituito da fibre di silicio di colore bianco. Buona parte delle mattonelle LRSI

Figura 24: Columbia dopo la STS-4

Figura 25: Un tecnico al lavoro sul Columbia

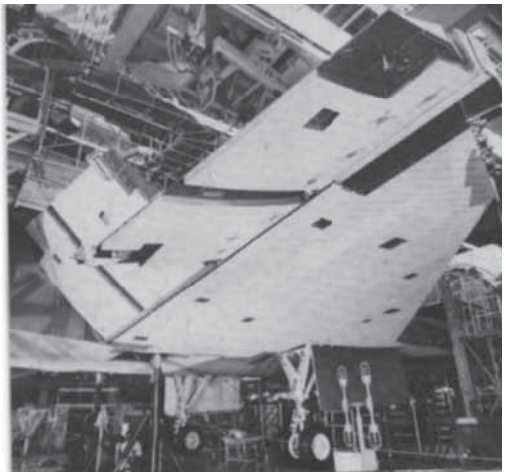


Figura 26: Assemblaggio dell'Enterprise

furono sostituite da rivestimenti AFRSI, poiché richiedevano minore manutenzione conservando le stesse proprietà termiche.

- Reinforced Carbon-Carbon (RCC): era un materiale di colore grigio chiaro che sopportava temperature fino a 1.510 °C (1.783 K) e proteggeva i bordi anteriori delle ali e la parte anteriore del muso. Ogni ala possedeva 22 pannelli RCC, di spessore variabile tra 6,35 mm e 12,7 mm. L'espansione termica e i movimenti laterali erano permessi da sigilli a forma di T.
- Nomex Felt Reusable Surface Insulation (FRSI): questo materiale flessibile e di colore bianco forniva protezione a temperature fino a 371 °C (644 K) ed era utilizzato per ricoprire la superficie superiore delle ali, i portelli della stiva di carico e la fusoliera anteriore.

In fig. 25 è fotografato un tecnico intento a sistemare le piastrelle del Columbia prima di un volo.

In fig. 26 si vedono gli elevoni dell'Enterprise durante l'assemblaggio. Nella foto sono ben visibili le piastrelle che lo ricoprivano.

Il sistema di protezione termico a mattonelle fu oggetto di preoccupazioni durante lo sviluppo dello Space Shuttle, principalmente per l'affidabilità dell'adesione delle mattonelle. Alcuni ingegneri ipotizzarono che, in caso di distacco di una mattonella, la pressione aerodinamica avrebbe strappato via tutte le altre. Inoltre altre situazioni problematiche potevano essere rappresentate dal ghiaccio o altri detriti che potevano impattare sulle mattonelle durante la fase ascensionale.

Le preoccupazioni furono sufficientemente serie da sviluppare un kit di riparazione d'emergenza da utilizzare in orbita. Nel dicembre 1979 furono completati i prototipi e le procedure, che prevedevano un kit di riparazione e un sistema di propulsione chiamato MMU e sviluppato dalla Martin Marietta di cui si parlerà nella terza parte di questo libro che sarà dedicata alle applicazioni.

Era inoltre stata progettata una piattaforma di lavoro manovrabile che avrebbe assicurato l'astronauta equipaggiato con la tuta spaziale dotata di propulsione MMU. Circa un anno prima del primo lancio di una missione Shuttle del 1981, la NASA decise che la tecnica di riparazione non valeva il rischio e l'addestramento aggiuntivo richiesto, quindi lo sviluppo del progetto venne annullato. Ulteriori studi indicarono che le mattonelle non si sarebbero distaccate facilmente, anche se nella prima missione alcune mattonelle si staccarono, ma fortunatamente non erano situate in zone critiche.

In fig.27 possiamo vedere delle piastrelle nere resistenti alle alte temperature che ricoprivano i portelli delle ruote.

Il 1° febbraio 2003 lo Space Shuttle Columbia fu distrutto durante il rientro atmosferico a causa di un problema nel sistema di protezione termico. Un frammento di rivestimento del serbatoio esterno danneggiò un pannello RCC sul

bordo anteriore dell'ala sinistra. Durante il rientro il calore riuscì a penetrare lo scudo termico e distrusse lo Shuttle, che si disintegrava.
Dopo il disastro, il sistema di protezione termico fu sottoposto a controlli e modifiche per due anni. Nel 2005 la missione STS-114 fu il primo volo Shuttle ad essere compiuto con le nuove procedure di sicurezza: da allora il lancio fu sempre ripreso con telecamere, e i video venivano di volta in volta analizzati per identificare eventuali frammenti che avrebbero potuto colpire lo scudo termico (come nell'incidente del Columbia) dopo il lancio; lo scudo termico dello Shuttle veniva ispezionato con l'Orbiter Boom Sensor System, una estensione del braccio robotico dello Shuttle prima dell'attracco alla Stazione Spaziale Internazionale e lo Shuttle effettuava una manovra chiamata "rendez-vous pitch maneuver". Essa consisteva di una rotazione di 360° in modo che gli astronauti della stazione potessero riprendere delle immagini ad alta risoluzione dello scudo termico; le immagini venivano quindi inviate ed analizzate da un gruppo di esperti che verificavano l'integrità dello scudo termico; nel caso fossero stati rilevati danni critici era previsto l'utilizzo di kit di riparazione e sostituzione dello scudo termico. In fig. 28 è mostrato un altro tecnico della Rockwell intento a disporre delle piastrelle.
Se i danni non potevano essere riparati in orbita, era disponibile una missione Shuttle di recupero detta Launch On Need (LON) e indicata con il codice STS-3XX. Lo Shuttle danneggiato poteva essere fatto rientrare in modo automatico, senza equipaggio, mentre quello di recupero giungeva sulla stazione per recuperare gli astronauti.
In fig.29 è mostrata in primo piano la preparazione ad un lancio avvenuta dopo il disastro del Columbia. Si possono scorgere due navette: una destinata ad essere lanciata ed una di riserva.

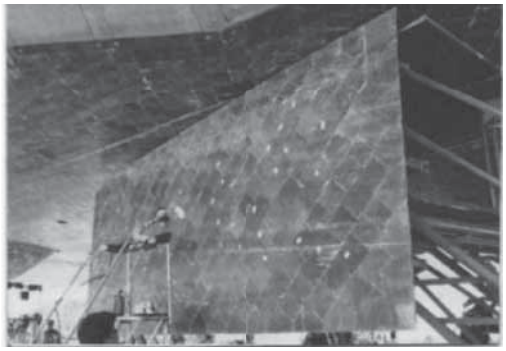


Figura 27: "Mosaico" di piastrelle nere

Figura 28: Tecnico della Rockwell

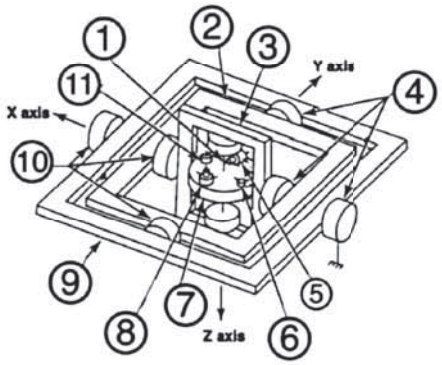
Figura 29: Due Shuttle pronti al lancio

Il sistema avionico

Il sistema avionico dello Space Shuttle consisteva di più di 300 unità elettroniche principali, dislocate in tutto il veicolo e collegate tra loro da 482.700 metri di cavi elettrici. Vi erano approssimativamente 120.400 segmenti di cavo elettrico e 6.500 connettori; cablaggio e connettori pesavano circa 31.793 kg (311.760 N). Questo peso era minore del peso di un sistema a barre o per l'elaborazione dati. Il peso totale dell'avionica dell'Orbiter, inclusi i cablaggi ed i connettori era di oltre 27.250 kg (267.220 N).
Sostanzialmente, l'Orbiter era dotato di moderni ed affidabili sistemi avionici, per la guida ed il controllo, che includevano le scatole nere (che si rivelarono importantissime quando si dovettero ricostruire i due catastrofici incidenti) e che spaziavano dai cinque calcolatori di bordo che colloquiavano tra loro per decidere "chi avesse ragione" agli strumenti della navigazione aerea convenzionale, usati durante gli ultimi 10 minuti di volo. In particolare essi comprendevano due inseguitori stellari, un'unità per le misure inerziali, disposta nella parte anteriore della cabina, giroscopi per la misura delle velocità angolari, servo amplificatori per la manovra delle superfici di controllo, sistemi di comando

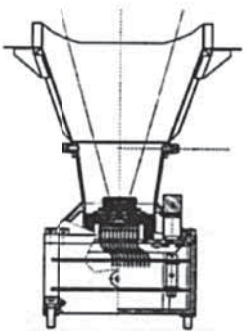
Figura 30: Unità di misurazione inerziale

Legenda
1. Snodo di azimuth;
2. Snodo di beccheggio;
3. Snodo di rollio interno;
4. Servomeccanismo;
5. Giroscopio di azimuth;
6. Accelerometro;
7. Piattaforma;
8. Giroscopio verticale;
9. Snodo esterno di rollio;
10. Revolver;
11. Accelerometro.



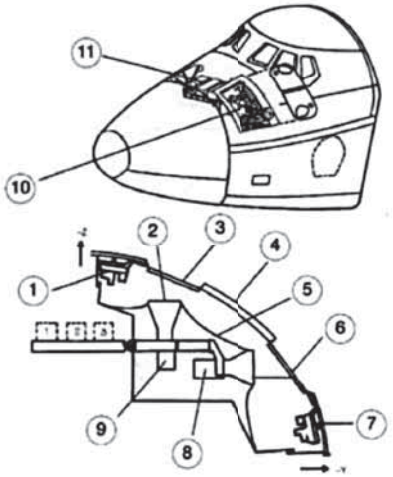
e azionamento dei motori per le manovre orbitali, un sistema di navigazione TACAN, radioaltimetri, sistemi d'appoggio per l'equipaggio, memorie di massa, ricevitori UHF, accelerometri, sensori elettronici per il rendez-vous ed altro ancora. In fig.30 è disegnata un'unità di misurazione inerziale dello Space Shuttle.
Andando più in dettaglio, l'avionica dell'Orbiter consisteva di un sistema di guida, navigazione e controllo (GNC) a prova di avaria, incluse tre unità di misura inerziali (IMU), triplo sistema di atterraggio a microonde con fascio di scansione in banda Qu, tre complessi giroscopici Notrhrop misuratori di velocità angolari, tre sistemi TACAN in banda L della Hoffman Electronic Corporation, tre complessi di accelerometri Bendix, due radioaltimetri in banda C della Honeywell, quattro complessi-trasduttori di dati della Airesearch, tre indicatori d'assetto della Lear Siegler, due indicatori di situazione orizzontale della Collins, due machmetri della Sperry, due altimetri barometrici della Bendix ed infine, due transponder-ATC (Air Traffic Control) 4096 Mode-C. Un sistema di navigazione inerziale di alta precisione (HAINS) cominciò ad aumentare gli IMUs originali Singer-Kearfott KT-70 durante il 1991 e furono le unità primarie in servizio dal 1994. Furono acquistate 17 unità di volo e due di non volo. Le HAINS offrivano migliori prestazioni, più bassi tassi di avaria, ed erano più piccole e più leggere. Le unità HAINS contenevano anche un microprocessore dedicato con memoria per il trattamento e l'immagazzinamento di fattori di compensazione e con taratura dalla fabbrica del venditore, riducendo quindi la necessità di estesi caricamenti di dati iniziali da parte dei computer dell'Orbiter. La HANS era fisicamente e funzionalmente intercambiabile con l'IMUs, l'originale Singer KT-70. Durante il 1997 la Honewell iniziò lo sviluppo di un nuovo sistema spaziale integrato di posizionamento globale/sistema ricevitore inerziale di navigazione (SIGI) per sostituire i sistemi IMU, HAINS, TACAN e GPS. Due inseguitori stellari (star tracker) Ball Brothers erano situati appena avanti ed a sinistra del parabrezza del comandante.
L'inseguitore stellare o puntatore stellare o star tracker, è un sistema di navigazione largamente utilizzato per l'orientamento e la navigazione di veicoli spaziali, Shuttle compreso. Il funzionamento di un siffatto dispositivo era basato su una o più camere ottiche in grado di individuare le stelle più luminose e dalla posizione di esse, ricavare, tramite cataloghi stellari memorizzati a bordo, la posizione e l'orientamento del mezzo. Tra i maggiori e più rinomati produttori al mondo di questi dispositivi va citata l'italiana Selex Galileo del gruppo Finmeccanica. In fig.31 è riportato uno star tracker.
Gli star tracker erano usati per allineare gli IMU dell'Orbiter, come pure per inseguire bersagli e fornire vettori line-of-site per calcoli di rendezvous. Lo star tracker non si sarebbe potuto usare se l'errore di allineamento dell'IMU fosse stato maggiore di 19 gradi, in quanto gli angoli che venivano dati allo star tracker per la ricerca erano basati sull'esatta conoscenza dell'assetto dell'Orbiter che era a sua volta basato sugli angoli della sospensione cardanica dell'IMU. SE l'assetto era fortemente errato, lo star tracker poteva acquisire ed inseguire la stella sbagliata. In questo caso, sia un "modo" speciale HUD oppure un traguardo ottico dell'equipaggio poteva essere usato per orientare gli star trackers. Questo era fatto dall'equipaggio orientando l'Orbiter finché una stella nota appariva nel HUD o nel COAS, e successivamente facendo seguire i GPC quando la stella era avvistata. Il COAS era un apparato ottico con un reticolo messo a fuoco all'infinito e proiettato su un vetro combinatore.
Ogni star tracker aveva un portello che lo proteggeva durante la salita ed il rientro, portello che era normalmente lasciato aperto in orbita

Figura 31: Uno star tracker



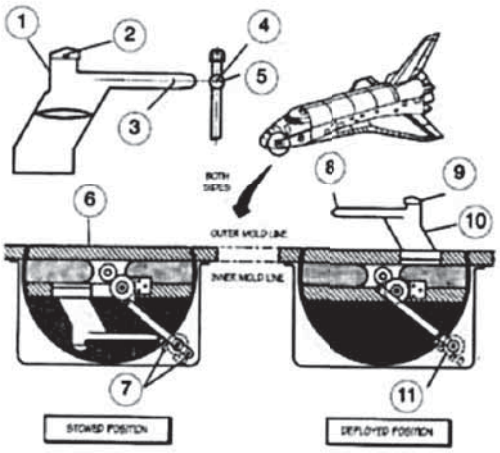
io roma

Figura 32: Disposizione degli star trackers



Legenda
1. Attuatore del portello dell'asse Z;
2. Tonalità di luce dell'asse Z;
3. Pannello dell'asse Z;
4. Pannello di accesso;
5. Coperta di isolamento multistrato;
6. Portello dell'asse Y;
7. Attuatore del portello dell'asse Y;
8. Star tracker dell'asse Y;
9. Star tracker dell'asse Z;
10. Star trackers;
11. Unità di misurazione inerziale (IMU) o HAINS.

Figura 33: Sonde dei dati dell'aria



Legenda
1. Asta;
2. Sensore di temperatura totale;
3. Portelli di pressione statica;
4. Portello di pressione totale;
5. Portelli;
6. Protezione termica;
7. Interruttori;
8. Ogiva del sensore di pressione;
9. Ogiva della temperatura totale;
10. Asta;
11. Motori di guida duale.

per permettere l'uso degli star trackers. I GPC contenevano sensori inerziali per 50 stelle, per la loro luminosità e capacità di fornire una completa copertura del cielo. Non vi era ridondanza per gli star trackers; essi funzionavano indipendentemente e ciascuna entità poteva effettuare l'intero compito. Nuovi star trackers allo stato solido furono consegnati con l'OV-105 ed unità aggiuntive erano state acquistate quando i fondi erano stati disponibili. I nuovi star trackers erano fisicamente e funzionalmente intercambiabili con gli originali e, infatti, i due tipi potevano essere mescolati in un singolo volo. In fig.32 possiamo vedere in che modo erano disposti gli star trackers all'interno dell'Orbiter.
Due sonde per dati dell'aria erano situate sui lati sinistro e destro della parte inferiore della fusoliera anteriore dell'Orbiter. Durante la salita in orbita, la deorbitazione e l'inizio del rientro, le sonde erano stivate all'interno della fusoliera. A circa Mach 5 le sonde erano dispiegate nel flusso d'aria per fornire informazioni sull'ambiente di volo. Ogni complesso-sonda era alto 54 centimetri, largo 11 centimetri e pesava 87 kg (855 N). Ogni sonda aveva quattro fori di pressione e due sensori di temperatura. L'estensione delle sonde dei dati aria doveva essere iniziata manualmente dall'equipaggio di condotta e questa era una delle ragioni per le quali l'Orbiter non poteva atterrare autonomamente. In fig.33 si può vedere un disegno schematico relativo alle sonde dei dati dell'aria.

Guida, navigazione e computer. Le comunicazioni.

Le prestazioni della navetta dipendevano da una serie di apparati elettronici che costituiscono l'avionica, come è definita in gergo aerospaziale tutta l'elettronica imbarcata su un velivolo o su una nave spaziale. Sullo Shuttle l'avionica era raggruppata in tre zone: nella cabina di comando, nel piano sottostante la cabina e nella parte posteriore.
Il cuore di tutti i sistemi era composto da un gruppo di cinque computer IBM Advanced Stem/4 Pi model AP-101 dal quale tutto dipendeva: quattro eseguivano il normale lavoro della missione ed uno rimaneva di riserva. Mai pri-

ma dello Shuttle, un veicolo spaziale aveva avuto una tale capacità di elaborazione. Per fare un confronto, essa era 40 volte maggiore rispetto a quella disponibile sui vettori Saturn V per la Luna. Anche la capacità di memoria era cinque volte più grande mentre grazie alla miniaturizzazione, tutte le dimensioni erano state rimpicciolite ed occupavano un volume che era tre volte minore rispetto a quello occupato dai computer del Saturn V.
L'unità centrale, la Central Processing Unit, che era il "cervello" del sistema era una scatola che misurava 19,2 per 25,7 centimetri con una profondità di 50 centimetri. Il suo peso era di circa 24,98 kg (245 N). In fig.34 è mostrata tale unità.
Le richieste erano formulate attraverso tre tastiere mentre le risposte erano date con quattro schermi a raggi catodici in bianco e nero, sui quali potevano comparire cifre e grafici a seconda delle necessità. Durante le fasi del decollo e del rientro a terra tutti i computers erano in azione, compiendo lo stesso lavoro in un perfetto sincronismo che veniva verificato da 250 a 350 volte al secondo.
Il risultato di ciascun computer veniva verificato automaticamente dagli altri con un controllo incrociato, attuato ogni secondo. Il sistema, oltre a garantire il buon svolgimento delle operazioni, consentiva anche una tolleranza agli errori eventualmente compiuti, i quali non mettevano così fuori uso gli elaboratori. Essi, tra l'altro erano in grado di rilevare le proprie manchevolezze. Una volta raggiunta l'orbita, un computer si occupava della guida, un altro gestiva gli apparati di cui era composta la navetta, un altro ancora o altri due, a seconda delle necessità, lavoravano per il carico utile imbarcato nella stiva. Il quinto rimaneva di riserva. Quest'ultimo aveva la funzione di estremo controllore del sistema e per garantirgli maggior affidabilità adoperava anche un programma scritto in maniera riversa. Esso era stato redatto dalla Rockwell mentre gli altri programmi erano sempre dell'IBM. Il gruppo dei cinque "cervelli" permetteva alla navetta di compiere automaticamente ogni fase della missione. I piloti, tuttavia, potevano intervenire manualmente in qualsiasi momento del volo, modificando la situazione a seconda delle necessità. Per realizzare ogni operazione di navigazione gli elaboratori si avvalevano delle informazioni fornite loro dai diversi sensori della navetta come le piattaforme inerziali che rilevavano il suo assetto o i sensori stellari che precisavano la posizione del veicolo. Tutti i dati raccolti erano confrontati con quelli del programma di volo stivato nella memoria del computer e se questo rilevava delle discordanze provvedeva alle correzioni

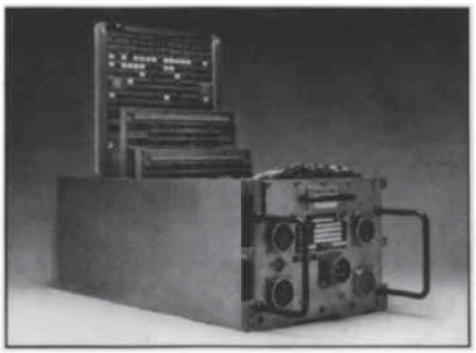


Figura 34: Unità centrale

necessarie accendendo i motori quel tanto che sarebbe servito a ripristinare una posizione esatta.
Ciascun computer aveva una memoria a nuclei di ferrite ad accesso casuale (random) non volatile e non distruttiva, contenente 106.496 parole, ciascuna di 32 bit. Inoltre vi erano due registratori con 134 megabit di memoria ciascuno, dove erano stivati i nove pacchetti di programmi per le diverse fasi della missione. In caso di emergenza era sufficiente un solo computer per guidare e riportare a terra lo Shuttle in condizioni di assoluta sicurezza.
Con la navetta si è in un certo senso rivoluzionato anche il sistema dei collegamenti tra un'astronave in orbita e la Terra. La rete di stazioni STDN (Space Tracking and Data Network) della NASA era ancora utilizzata, ma di fatto essa era sostituita da una nuova rete completamente spaziale che si basava sui satelliti TDRS (Tracking and Data Relay Satellite System) in orbita geostazionaria a 36.000 chilometri di altezza che funzionavano da ponte radio tra la navetta e la stazione di ascolto terrestre. In tal modo tutte le comunicazioni confluivano verso l'unico centro di ricezione, il NASA Ground Terminal (NGT), costruito a White Sands nel New

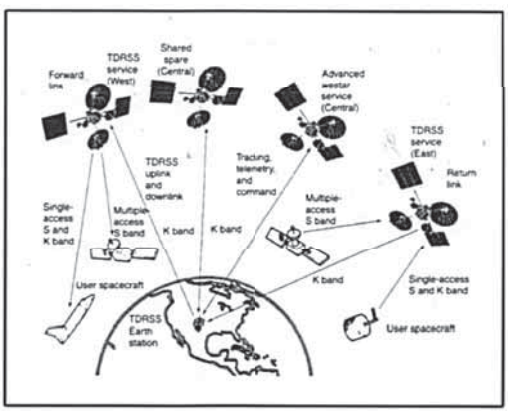


Figura 35: Sistema delle comunicazioni

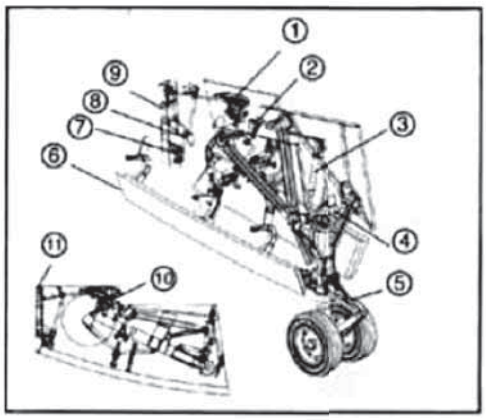
Mexico, il quale le rispediva con un altro salto cosmico che coinvolgeva un satellite per le telecomunicazioni interne domestiche al centro di controllo dei voli umani a Houston, nel Texas. Il vantaggio del nuovo sistema era notevole. Prima, con il ricorso alla rete STDN, una missione orbitale poteva essere seguita direttamente soltanto per il 15% del suo svolgimento. Con le due sonde TDRS, la copertura del periodo orbitale era quasi totale.
Ma vi era un altro elemento importante. Esso riguardava la possibilità di trasmettere a terra una quantità notevolmente maggiore di dati rispetto al passato: durante una missione Spacelab il flusso raggiunse i 50 milioni di bits al secondo. Il primo dei due TDRS fu lanciato dalla navetta durante la sesta missione dell'aprile 1983. Sfortunatamente il cattivo funzionamento del secondo stadio del vettore IUS con il quale doveva raggiungere l'orbita geostazionaria lo spinse invece su un'orbita sbagliata e soltanto nel giugno successivo, con una delicata serie di manovre il satellite giunse al suo punto di destinazione sull'Oceano Atlantico a 41 gradi di longitudine ovest. La posizione del secondo TDRS era sopra l'Oceano Pacifico a 171 gradi di longitudine ovest. In fig.35 è schematizzato l'intero sistema delle comunicazioni.
Il sistema prevedeva anche un terzo satellite di riserva a 79 gradi di longitudine ovest da utilizzare qualora fossero sorti problemi nei primi due. Un TDRS pesava 2.268 kg (22.240 N) ed era equipaggiato con due pannelli di celle fotovoltaiche che aperti, raggiungevano una lunghezza di 17,4 metri. Inoltre due delle quattro antenne di cui era dotato avevano un diametro di 4,9 metri ed una volta dispiegate si estendevano per complessivi 12,8 metri. Il TDRS, costruito dalla società TRW, era studiato per poter lavorare dieci anni senza difficoltà sulle tre bande di frequenza S, Ku e C.

Il carrello di atterraggio dell'Orbiter

Il carrello dell'Orbiter era di tipo convenzionale a triciclo, consistente in un carrello anteriore e due carrelli principali, sinistro e destro. Ciascun carrello includeva un ammortizzatore e due complessi ruote-pneumatici. Il carrello anteriore era situato nella parte inferiore della fusoliera anteriore ed i carrelli principali erano situati nella parte inferiore delle semiali sinistra e destra adiacenti alla fusoliera centrale. Quando il carrello anteriore era retratto, due portelli coprivano il vano carrello ed in fig.36 sono mostrati i carrelli sinistro e destro dell'Orbiter che avevano appena toccato terra (il carrello anteriore era ancora alzato, come era giusto che fosse) durante un atterraggio presso la Base di Edwards.
Ciascun carrello principale aveva un singolo portello che chiudeva il vano carrello. I portelli destro e sinistro del carrello anteriore erano cernierati alla sezione del muso. I portelli erano costruiti in lega di alluminio a nido d'ape e il sinistro era leggermente più lungo del destro. Ciascun portello aveva un bloccaggio di chiusura all'estremità anteriore e posteriore per bloccare il portello di chiusura quando il carrello era retratto e ciascuno aveva una guarnizione di pressione oltre ad una barriera termica. Una zavorra in piombo nel vano carrello anteriore forniva un bilanciamento del peso ed il controllo del centro di gravità. Il carrello di atterraggio era costruito in acciaio ad alta resistenza alle sollecitazioni ed alla corrosione ed in leghe di alluminio, acciaio inossidabile e bronzo di alluminio. Vernice all'uretano e rivestimento in cadmio-titano erano applicati su tut-

Figura 36: Atterraggio di un Orbiter

Figura 37: Carrello anteriore

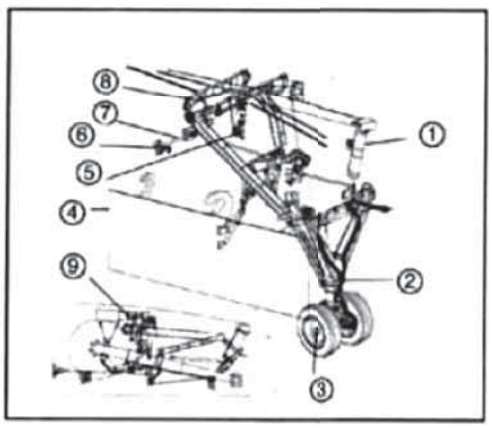


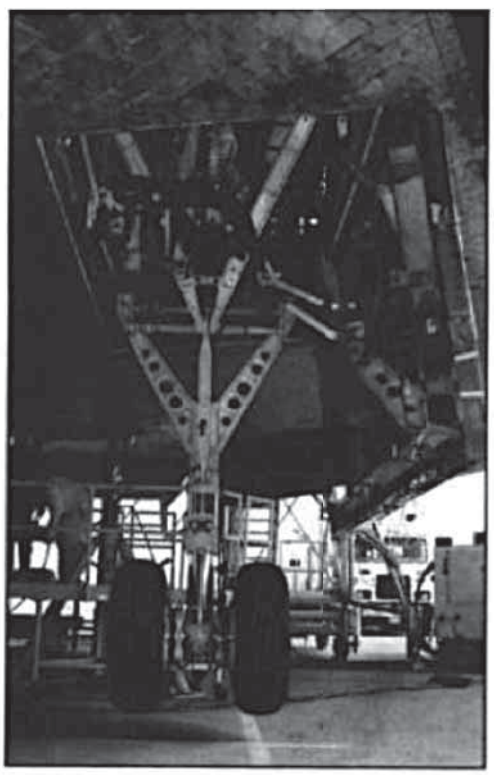
Legenda

1. Rilascio pirotecnico;
2. Estensore del montante;
3. Attuatore del montante;
4. Dispositivo di bloccaggio del portello;
5. Compasso di torsione;
6. Uno dei due portelli;
7. Gancio del portello;
8. Dispositivo di bloccaggio del portello;
9. Complesso ammortizzatore ausiliario a molla-portello del booster;
10. Rilascio pirotecnico;
11. Complesso ausiliario ammortizzatore a molla.

te le superfici in acciaio esposte, ed anodizzazione convenzionale più vernice all'uretano era applicata in tutte le superfici di alluminio esposte. Ciascuno dei tre carrelli conteneva un ammortizzatore che era la principale sorgente di attenuazione dell'urto durante l'atterraggio dell'Orbiter. Gli ammortizzatori erano di tipo convenzionale idropneumatico (idrogeno gassoso/fluido idraulico). Una variante dal tipo convenzionale era la separazione dell'azoto gassoso dal fluido idraulico mediante un diaframma galleggiante, per precludere la possibilità che l'azoto si disperdesse nel fluido idraulico durante le manovre a gravità nulla. Questa separazione era necessaria al fine di mantenere alte le prestazioni dell'ammortizzatore in fase di atterraggio. Durante la retrazione ogni carrello era idraulicamente ruotato in avanti e verso l'alto da strutture di supporto a terra fino ad impiegare un gancio di blocco in alto per ogni portello nel rispettivo vano. Il dispositivo di blocco si agganciava ad rullo su ciascun ammortizzatore. Un collegamento meccanico mosso da ogni carrello chiudeva meccanicamente ciascun carrello. Il carrello non poteva essere retratto in volo. In fig.37 è schematizzato il carrello anteriore.
Quando veniva comandata l'estrazione del carrello dall'equipaggio, il gancio di blocco per ciascun carrello era sbloccato da pressione idraulica. Una volta che il gancio era aperto dal rullo sull'ammortizzatore, il carrello era abbassato e spostato all'indietro da molle, martinetti idraulici, forze aerodinamiche e dalla gravità. I portelli si aprivano a caduta libera quando venivano sbloccati, talvolta aiutati da ruote e pneumatici che spingevano su di essi. I carrelli raggiungevano la posizione di estensione completa entro 10 secondi ed erano bloccati in posizione estesa da sistemi a molla. Se la pressione idraulica non era disponibile per aprire il gancio di blocco, un sistema pirotecnico in ciascun gancio del cancello apriva automaticamente il gancio di blocco in ciascuno dei carrelli un secondo dopo che l'equipaggio aveva impartito al carrello il comando di estrazione. Il carrello di atterraggio era abbassato a 91 metri prima dell'atterraggio e gli attuatori dei carrelli anteriore e principale includevano un sistema oleodinamico di ammortizzazione per controllare la velocità di estrazione del carrello in caduta libera e quindi prevenire danni al carrello ed al blocco di estensione. Gli attuatori dei carrelli servivano anche come attuatori di retrazione del carrello stesso, sebbene ciò non potesse avvenire in volo. Il carrello anteriore conteneva anche un sistema pirotecnico, per assicurare ulteriormente l'apertura del portello e l'estensione del carrello nel caso in cui notevoli

Figura 38: Carrello principale



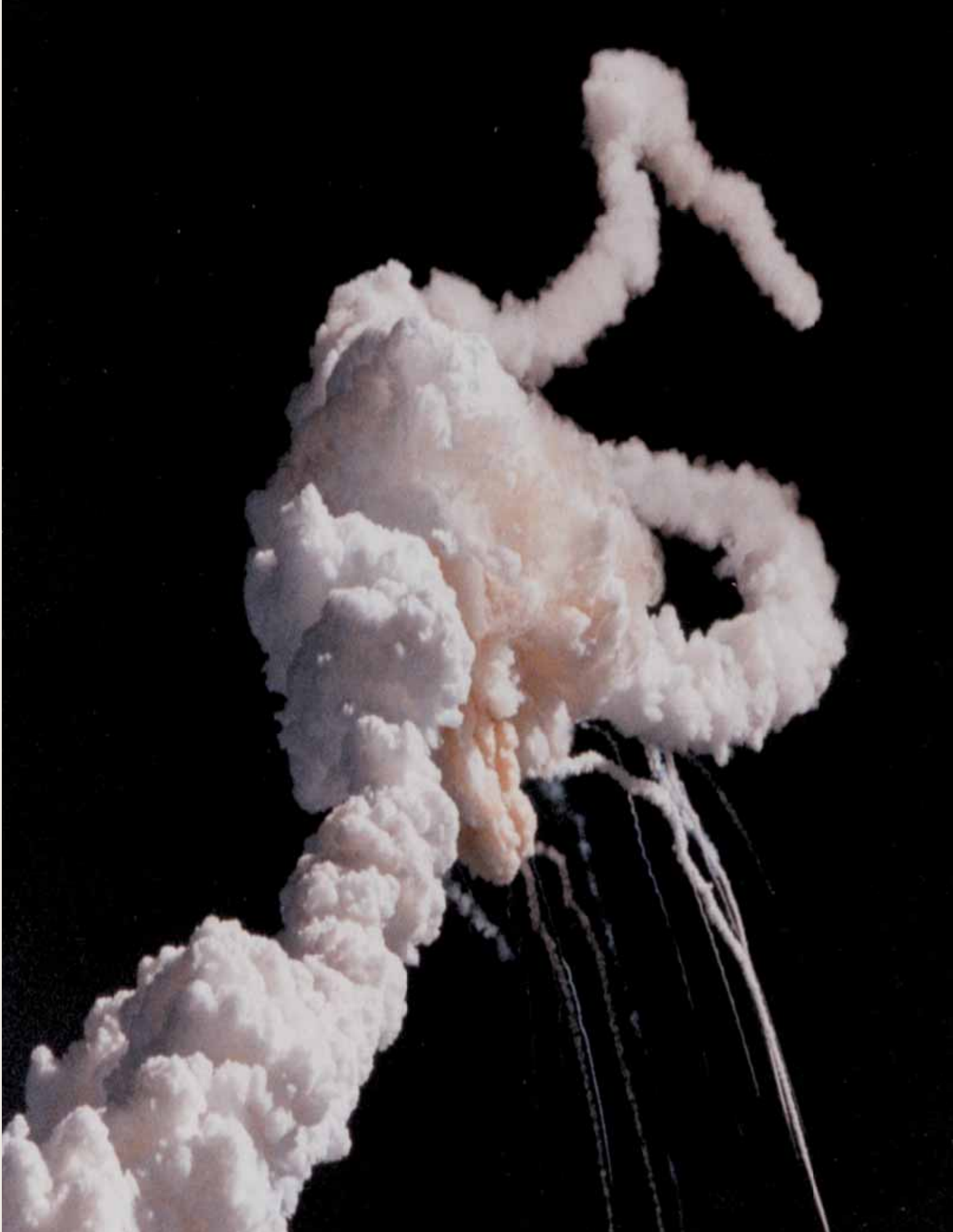


Legenda
1. Attuatore del puntone;
2. Tubi del freno idraulico;
3. Sensore di velocità della ruota;
4. Portello;
5. Gancio per la serratura superiore;
6. Gancio del portello;
7. Collegamento portello;
8. Complesso di bloccaggio;
9. Sgancio di emergenza esplosivo;

forze aerodinamiche avessero agito sul portello del carrello anteriore. Questo sistema pirotecnico era attivato ogni volta che il carrello veniva estratto. I pneumatici dei carrelli erano prodotti dalla Michelin. I due pneumatici venivano gonfiati con azoto gassoso e la vita media del pneumatico del carrello anteriore era normalmente di cinque atterraggi sebbene in pratica i pneumatici venissero sostituiti ad ogni volo. Il carrello anteriore era sterzabile elettro-idraulicamente. Il Columbia ed il Challenger furono consegnati con un carrello anteriore con un sistema sterzabile che risultò inefficace a controllare l'Orbiter durante rapide manovre transitorie ad alta velocità. Mentre si indagava nel tentativo di dare una solazione al problema, il sistema di sterzo del ruotino anteriore fu disattivato sull'OV-102 che seguì l'STS-4 e non fu più attivato sull'OV-099. Discovery e Atlantis furono consegnati con tubazioni, cablaggi e accessori per un sistema di sterzo del ruotino anteriore, ma nessuno fu effettivamente installato in attesa della progettazione di un sistema funzionante. In fig.38 è schematizzato un carrello principale.

Un sistema di sterzo migliorato del ruotino anteriore fu incorporato nel Columbia in tempo per l'STS-32/61-C ed il sistema da allora è stato montato su Discovery e Atlantis. Il Challenger non fu modificato prima della sua perdita e l'Endeavour fu consegnato col nuovo sistema già installato. La manovra di sterzo era effettuata attraverso i GPC di bordo oppure mediante la pedaliera. Ciascuna ruota del carrello principale aveva un complesso frenante equipaggiato con sistemi anti-skid. Il carico massimo ammissibile per un pneumatico del carrello principale era di 5.995 kg (58.789 N). Un programma che era in atto per migliorare il carrello degli Orbiter ebbe come risultato l'incorporazione di assali principali più robusti per fornire una configurazione più rigida in grado di ridurre la flessione freno-asse e minimizzare potenziali danni ai freno. Questa variante migliorò significativamente la resistenza ai danni del carrello dell'Orbiter.

Fine prima parte



Opera House - Arch.Henning Larsen – (Copenhagen)

Copyright © Moreno Maggi

Industry 4.0
Come la Digital Transformation incide nella rivoluzione industriale

Ing. Giovanni Gasbarrone
Dott. Gian Paolo Balboni

Dal 2000, l'Europa ha sperimentato una significativa deindustrializzazione. Ad esempio, il contributo della produzione al PIL europeo è diminuito dal 18,5% nel 2000 al 15% nel 2012 e 3,8 milioni di posti di lavoro sono andati persi tra il 2008 e il 2012 in questo settore. (Fonte: World Bank)

L'industria è centrale per l'economia europea. Contribuisce alla prosperità degli europei e offre posti di lavoro a 36 milioni di persone – cioè circa un posto di lavoro su cinque in Europa. In particolare, il settore manifatturiero è estremamente importante per il suo ruolo nel guidare la produttività e l'innovazione.

Oltre l'80% delle esportazioni dell'UE è generato dall'industria (Fonte: Eurostat — Extra-EU trade in manufactured goods — April 2017).

La digitalizzazione dell'Industria porta competitività e sviluppo economico e per questo è al centro dei piani d'azione della Comunità Europea. Ma perché è così importante la Digital Transformation per l'Industria Europea e attraverso quali piattaforme si attua?

La sempre maggiore disponibilità di piattaforme tecnologiche in un'ottica di convergenza tra Mobile, Intelligenza Artificiale, Cloud, Big Data/Analytics sta drammaticamente cambiando il modo in cui noi viviamo, lavoriamo, ed interagiamo.

L'industria delle Telecomunicazioni ha fornito tutti i building blocks delle infrastrutture: rete di accesso a larga banda fissa e mobile, l'infrastruttura core, l'interconnessione e le piattaforme applicative in Cloud. Tutto il processo di trasformazione digitale dipenderà dalla Telecommunication Industry che sta abilitando i cambiamenti anche nell'organizzazione del lavoro come nel caso dello smart working.

Questo trend si colloca nella Quarta Rivoluzione Industriale, denominata "Industria 4.0". L'industria delle Telecomunicazioni sta giocando un ruolo cruciale nell'abilitare questa trasformazione digitale che sta interessando tutti i mercati verticali (Finance, Automotive, Public Sector, Healthcare…).

Chiamiamola Industria 4.0, Industrial Internet come negli USA, IVI come in Giappone oppure Impresa 4.0 come auspica ora il MISE. Il fatto è unico ed ineludibile: la convergenza fra le tecnologie informatiche, quelle di telecomunicazioni, la sensoristica avanzata e il mondo dei Big Data ha iniziato a cambiare radicalmente il modo in cui vengono prodotti e utilizzati beni e servizi, avviando un processo di trasformazione che oggi ha il focus sul processo manifatturiero ma domani si espanderà a ogni tipo di ambiente produttivo.

Sul fronte della manifattura in senso stretto, è stata la Germania a essere antesignana del progetto di trasformazione. Il termine Industria 4.0 per designare questo fenomeno è stato utilizzato per la prima volta nel 2011 durante la fiera CEBIT di Hannover, e da allora è diventato il mantra di riferimento per l'industria manifatturiera prima tedesca e poi europea.

Ovviamente la Germania ha avviato un processo organizzato e di teutonica precisione, con approccio top-down. I ministeri hanno convocato le grandi aziende, queste hanno aggregato quelle medio-piccole, sono stati costituiti gruppi di lavoro verticali che hanno prodotto raccomandazioni e specifiche che si sono poi tradotte in linee guida, finanzia-

menti, percorsi operativi nel giro di soli due anni (il tutto senza dimenticare di tenere in partita i sindacati e i canali di commercio…)
Negli Stati Uniti il processo è stato invece guidato direttamente dalle grandi aziende. Un poderoso conglomerato industriale quale è GE già valutava nel 2011, tramite il proprio centro studi, che l'uso accorto della sensoristica distribuita e di sistemi di gestione intelligenti avrebbe portato efficienze produttive dell'ordine di qualche percento. Dimostrando altresì quale potesse essere la potenza, a livello mondiale, del risparmio di anche solo l'1% in settori di larga diffusione, come i trasporti a lunga distanza.
Stiamo parlando di un fenomeno a cui spesso ci si riferisce con il termine di "quarta rivoluzione industriale", e che presenta una caratteristica estremamente importante: diversamente dalla rivoluzione guidata dal processo di automazione industriale, questa di oggi promette di avere un fortissimo impatto sistemico con un relativamente piccolo rinnovo degli equipaggiamenti produttivi.
Senza però dimenticare che Industria 4.0 è un tassello che va inquadrato nel più vasto fenomeno della trasformazione digitale del mondo, dove giocano e giocheranno un ruolo anche tecnologie relativamente lontane dai processi di produzione industriale, come ad esempio le nano e le biotecnologie, o nuovi materiali, i veicoli a guida autonoma e il quantum computing. Tecnologie che troveranno il proprio momento di gloria in campi applicativi probabilmente molto diversi dalla produzione, e con tempi che potranno differire di lustri.

Per restare però focalizzati sul tema centrale del ragionamento, il fattore di trasformazione più rilevante non è quello che riguarda l'introduzione della singola tecnologia innovativa nel processo di produzione, bensì il fatto che l'interconnessione generalizzata delle macchine e la improvvisa disponibilità di dati relativi a tutte le fasi del processo, dentro e fuori dall'azienda (ovvero progetto, produzione, vendita/affitto e utilizzo in campo) apre la porta a una completa ridefinizione delle fasi stesse, nonché alla creazione di modelli di business totalmente nuovi, non fattibili anche solo pochi anni fa.
È quindi tutta la filiera che si può ridisegnare e riorganizzare, modificando i rapporti (e a volte anche i ruoli) fra cliente, fornitore e utilizzatore finale, modificando l'offerta commerciale da vendita di prodotto a fornitura di servizio, passando da una organizzazione basata su un modello tayloristico ad una struttura flessibile che opera in modalità lean.
Se guardiamo al fenomeno con uno sguardo mondiale, possiamo identificare tre diverse declinazioni operative che caratterizzano tre diversi "sistemi paese". La Germania, senza dubbio la capofila europea per questa trasformazione, la sta percorrendo con l'obiettivo primario di un recupero di efficienza nel ciclo produttivo, grazie ad un uso sapiente dei dati di processo. Gli Stati Uniti vendono nel fenomeno la grande opportunità per modificare radicalmente la relazione con il cliente, che da semplice utilizzatore di prodotto diventa fidelizzato, compratore dei servizi e persino co-sviluppatore di nuove modalità di offerta. Il Giappone, infine, integra perfettamente questo processo di cambiamento "data-driven" all'interno della cultura aziendale orientata a un miglioramento continuo (kainez) ed a una struttura di processo snella e velocemente riconfigurabile a seconda della domanda del mercato (lean).

L'evoluzione verso la smart factory: digital transformation e nuove professionalità

Il processo di trasformazione Industria 4.0 va comunque collocato come un tassello del più generale processo di cambiamento tecnologico che toccherà, settore dopo settore, tutti i segmenti dell'economia: dall'alimentare all'energia, dal turismo alla farmaceutica. Un percorso di trasformazione che sarà caratterizzato da un importante processo di deflazione tecnologica, connesso inevitabilmente alla progressiva smaterializzazione dei processi produttivi e dei prodotti. Se guardiamo retrospettivamente agli ultimi 10 anni, possiamo vedere gli effetti della deflazione tecnologica indotti sui prezzi al consumo dei servizi di telecomunicazioni, il primo settore (e più facile) settore che è stato aggredito dal processo di smaterializzazione in atto. Progressivamente questo effetto deflattivo si propagherà in altri ambiti, primi fra tutti quello della produzione dei beni industriali, il settore energetico e il settore agroalimentare.
Il risultato sarà infatti quello di poter produrre più velocemente beni e servizi di migliore qualità, che saranno resi disponibili sui mercati a prezzi sempre più competitivi.
In questo senso la trasformazione digitale, oggi dell'industria manifatturiera e domani degli altri settori, pone anche un significativo problema di trasformazione del mercato del lavoro, che modificherà sia le proprie dimensioni sia le proprie caratteristiche.

Uno studio del 2016 redatto da Citibank in partner con University of Oxford predice che il 47% dei lavori oggi presenti in US verranno totalmente automatizzati dalla trasformazione digitale. In UK la percentuale stimata è del 35%, mentre in China si arriva ad una percentuale di sostituzione del 77%.
Questa è una sfida che deve essere affrontata con estrema consapevolezza, guardano all'indispensabile percorso di sviluppo di nuove conoscenze per la forza lavoro di oggi.
L'OECD nel suo studio «DIGITALISATION, DEINDUSTRIALISATION AND THE FUTURE OF WORK» sviluppato nel 2016 ci avvisa che non è possibile pensare di attraversare la rivoluzione tecnologica in atto semplicemente aspettando che il naturale ricambio generazionale fornisca al mercato del lavoro le competenze dei "nativi digitali". Quando questi arriveranno in massa nelle aziende, esse potrebbero già essere state spazzate via da una concorrenza che oggi si sviluppa ad un ritmo molto più accelerato rispetto a quello dei tempi analogici.
Serve aprirsi alla sfida del cambiamento oggi, usando le risorse a disposizione ed operando con visione ampia e sguardo lungo. In questo senso Industria 4.0 è più che un cambiamento. E' una sfida vitale per il ruolo che l'Italia pensa di poter svolgere nel prossimo futuro del mondo digitale.

LA RIVOLUZIONE INDUSTRIA 4.0: IL RUOLO DELLE ALTE PROFESSIONALITÀ

- L'impatto della fabbrica intelligente porterà cambiamenti organizzativi e quindi sui contratti di lavoro e sulle relazioni industriali.
- In uno scenario caratterizzato, grazie al dominio della tecnologia, da una maggiore collaborazione e presenza di alte professionalità, più che nella mera elaborazione di ordini e direttive, emerge un paradigma del lavoro nel quale la dimensione stessa del contratto e la relazione di dipendenza fra lavoratore e impresa ne esce rivoluzionato.
- Il quadro che emerge per le alte professionalità nella nuova organizzazione del lavoro nell'Industria 4.0 è stato al centro dei lavori del Forum CIU (Confederazione Unione delle Professioni Intellettuali) al CNEL: "Un contratto tipo per i Quadri e le Alte Professionalità, Ricercatori e Professionisti Dipendenti". In tale ambito è stato presentato un approfondito studio sul sistema socio economico e sul tessuto produttivo nei poli industriali e dei servizi nel Lazio: http://www.ciuonline.it/news/forum-ciu-al-cnel-un-contratto-tipo-per-i-quadri-e-le-alte-professionalita-ricercatori-e-professionisti-dipendenti/

Infatti il Lazio al livello macroeconomico rappresenta un importante polo in Italia ed è una tra le più grandi regioni d'Europa, con un PIL analogo a paesi come il Portogallo o l'Irlanda.

LA RIVOLUZIONE INDUSTRIA 4.0: IL RUOLO DELLE ALTE PROFESSIONALITÀ E DEGLI INGEGNERI

Dalla ricerca "The Future of the Jobs" presentata al World Economic Forum emergono i seguenti dati:

- L'effetto sarà la creazione di 2 nuovi milioni di posti di lavoro, ma contemporaneamente ne spariranno 7, con un saldo netto nega-

tivo di oltre 5 milioni di posti di lavoro. L'Italia ne esce con un pareggio (200mila posti creati e altrettanti persi), meglio di altri paese come Spagna e Francia.

- A livello di gruppi professionali le perdite si concentreranno nelle aree amministrative e della produzione: rispettivamente 4,8 e 1,6 milioni di posti distrutti. Secondo la ricerca compenseranno parzialmente queste perdite l'area finanziaria, il management, l'informatica e l'ingegneria.
- Cambiano di conseguenza le competenze e abilità ricercate. Da qui emerge sempre di più il ruolo delle alte professionalità e degli ingegneri proprio perché lo scenario è in rapida evoluzione, dobbiamo anticipare i mutamenti organizzativi ed i salti di paradigma nell'Industria 4.0 per cogliere le opportunità dello Smart Manufacturing, l'innovazione digitale nei processi dell'industria. Nel 2020 sempre più sarà il problem solving con il pensiero critico e la creatività il vero asset dell'industrie 4.0
- Uno degli aspetti organizzativi che si colloca nello scenario evolutivo della Industria 4.0 è quello relativo allo smart working e sui suoi riflessi sulle alte professionalità. Emerge un quadro che impatta anche sui risvolti sociali e delle relazioni che sono legate alle sfide organizzative con l'introduzione dello smart working, tra cui emergono oltre a quelli noti della digital transformation, anche gli aspetti logistici, di processo e organizzativi talvolta non considerati adeguatamente nella pianificazione dell'evoluzione verso Industria 4.0 da parte delle organizzazioni.

Allegato
Il World Economic Forum dedica dei video introduttivi ed esplicativi della vision sulla Industry 4.0:

1 World Economic Forum I Center for the Fourth Industrial Revolution
World Economic Forum
https://www.youtube.com/watch?v=CwBSWOqaM40
Pubblicato il 9 feb 2018
http://www.weforum.org/

2 Cos'è Industria 4.0?
INDUSTRY 4.0 - World Economic Forum
Davos 2017: Industry 4.0
World Economic Forum
https://www.youtube.com/watch?v=e25AJycmOLI
http://www.weforum.org/

3 DIGITAL TRANSFORMATION IN THE ENTERPRISE
http://www.iothingsrome.com/programma-2017/
INDUSTRY 4.0 Trasformazione digitale nella fabbrica intelligente
21 novembre
Chairman: Giovanni Gasbarrone, Segretario Regionale, CIU Lazio e Presidente Commissione Telecomunicazioni, Ordine degli Ingegneri di Roma
L'evoluzione verso la smart factory: digital transformation e nuove professionalità

4 Europe's Digital Progress Report, SWD(2017) 160.
The EDPR report combines the quantitative evidence from DESI (Digital Economy and Society Index) with country-specific policy insights, allowing us to keep track of the progress made in terms of digitalisation by each Member State and providing an important feedback loop for policy-making at EU level
Europe's Digital Progress Report SWD(2017) 160 (zipped slides pdf, report pdf)

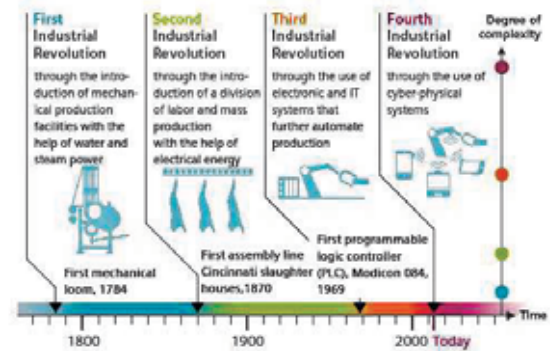
5 Implementation of an Industry 4.0 Strategy- The German Plattform Industrie 4.0
25 January 2017 Implementation of an Industry 4.0 Strategy- The German Plattform Industrie 4.0

6 Local partnership for developing automation and industry 4.0 competencies to improve the employment system
PROJECTS & INITIATIVES 16 October 2017
Local partnership for developing automation and industry 4.0.

INDUSTRY 4.0 – LA NUOVA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE

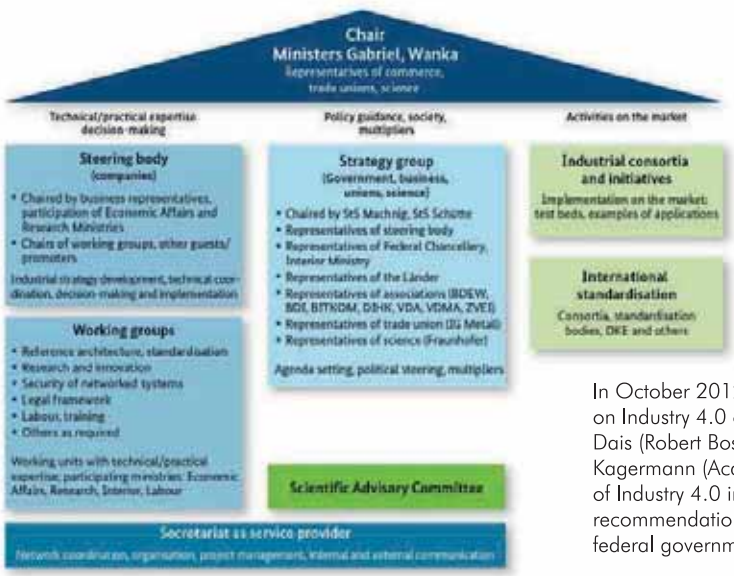
•Il termine Industry 4.0 è stato coniato in Germania nel 2011 per indicare il nuovo percorso di automatizzazione spinta che quel paese stava lanciando per restare alla guida della produzione industriale Europea.

•La prima volta che è stato usato in pubblico risale all'Hannover Fair del 2011



Source: DFKI 2011

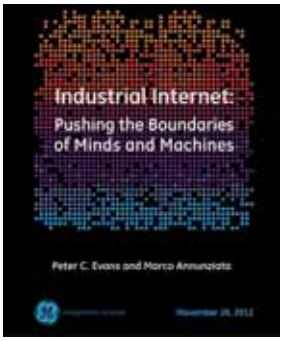
INDUSTRY 4.0 È NATA COME INIZIATIVA DEL GOVERNO TEDESCO

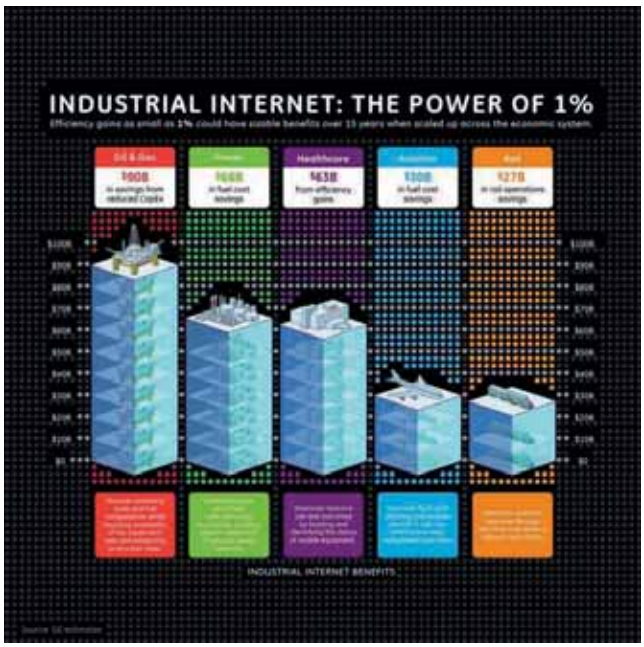


In October 2012 the Working Group on Industry 4.0 chaired by Siegfried Dais (Robert Bosch GmbH) and Kagermann (Acatech) presented a set of Industry 4.0 implementation recommendations to the German federal government.

On 8 April 2013 at the Hanover Fair the final report of the Working Group Industry 4.0 was presented.

NATURALMENTE NON È UN FENOMENO SOLO TEDESCO





UNO DEI FOCUS È NEL MANUFACTURING

McKinsey definisce il fenomeno "Industry 4.0" come la digitalizzazione del settore manufatturiero che fa leva sull'inserimento di sensori in tutti i componenti di un prodotto e nelle relative apparecchiature di produzione, la diffusione capillare dei Cyber Physical Systems, e l'analisi in real-time di tutti I dati rilevanti in tal modo generati.

McKinsey&Company

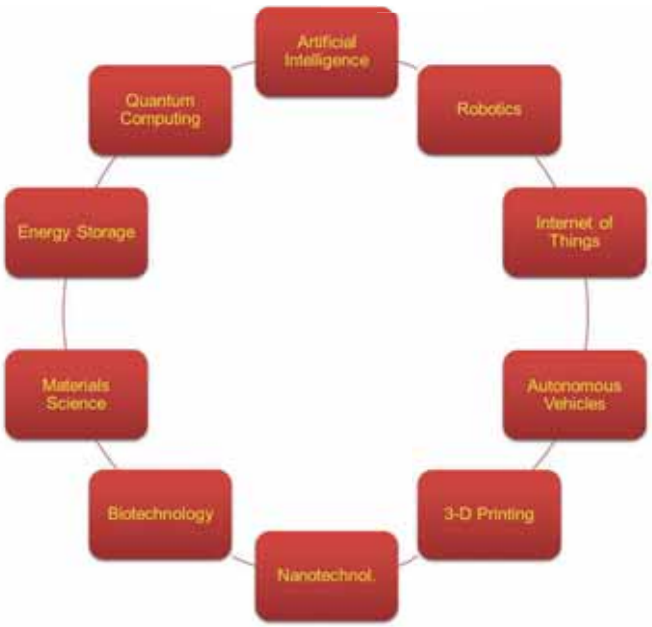
Alla base di tutto colloca le innovazioni dirompenti realizzate in quattro settori:

1. Data, computational power and connectivity (i.e. low-power, wide area networks)
2. Analytics and intelligence
3. Human-machine interaction (including touch interfaces and augmented reality)
4. Digital to physical conversion (i.e. advanced robotics and 3D printing)

In confronto alla terza rivoluzione industriale, la quarta promette di avere un forte impatto con un relativamente piccolo rinnovo degli equipaggiamenti produttivi

(Source McKinsey&Company «Industry 4.0: How to navigate digitalisation on the manufacturing sector » 2015)

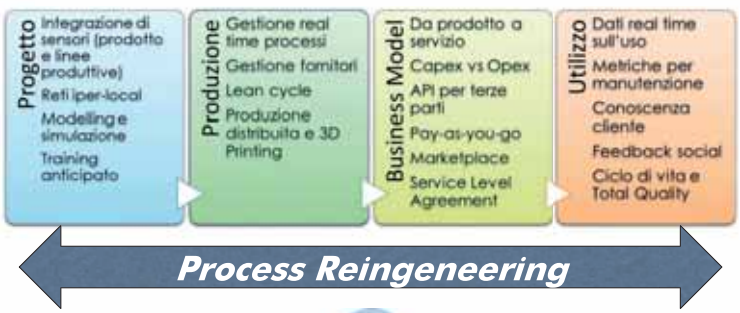
LE TECNOLOGIE DELLA TRASFORMAZIONE DIGITALE SONO TANTE



Source: WEF website

https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/

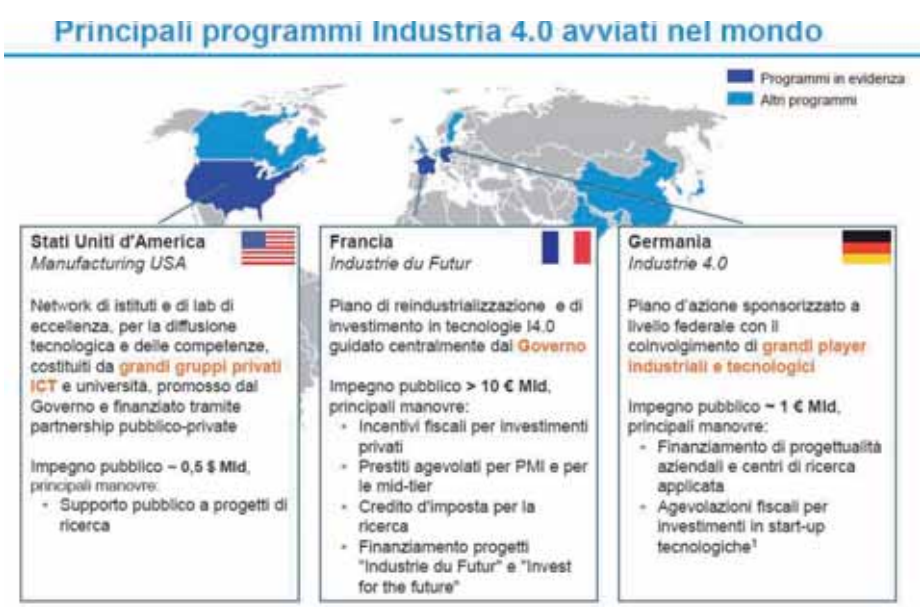
DOVE INTERVIENE IL CAMBIAMENTO



SI MODIFICANO I RAPPORTI CLIENTE-FORNITORE

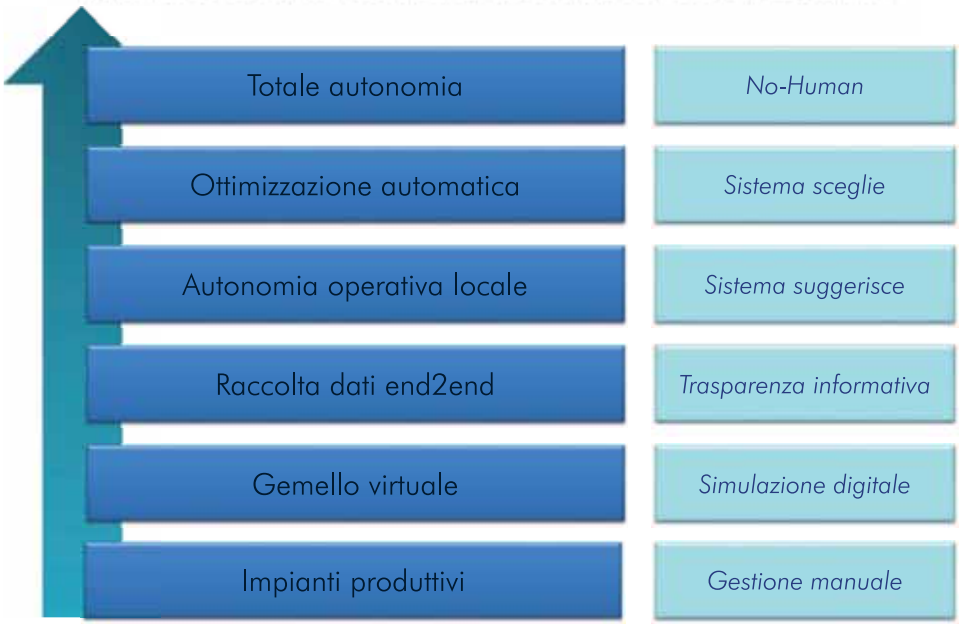
Fonte MISE - Piano Industria 4.0; http://www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/documenti/impresa_40_risultati_2017_azioni_2018.pdf

HA UN FORTE IMPATTO NELLA MANIFATTURA



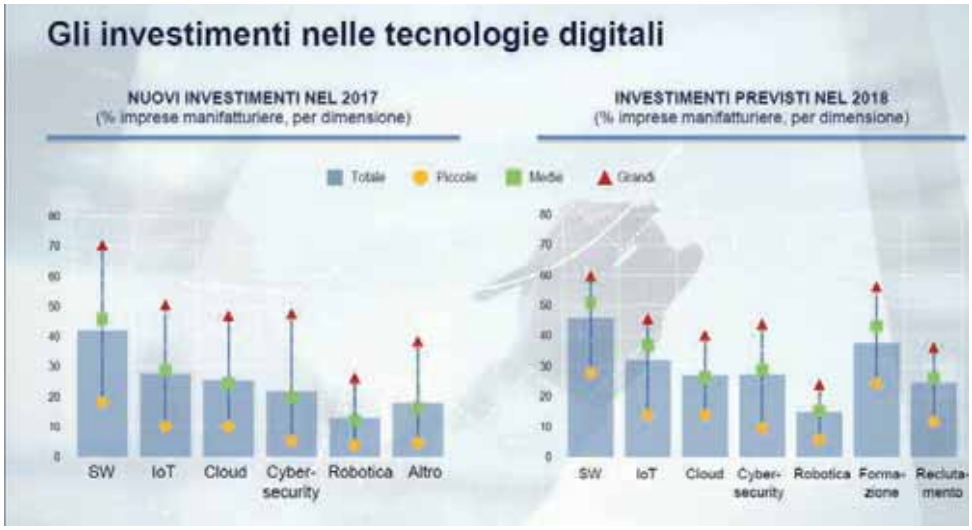
Fonte: http://www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/documenti/Piano_Industria_40.pdf

UNA ROADMAP COMPLESSIVA MOLTO SFIDANTE



Source Porsche Consulting – A&T 2017 - Torino

STATO DELL'ARTE NEI PAESI EU



fonte MISE – Piano Industria 4.0; http://www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/documenti/impresa_40_risultati_2017_azioni_2018.pdf

TELECOMMUNICATION INDUSTRY
COME LE TELECOMUNICAZIONI ABILITANO LA QUARTA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE

Enabling the digital revolution

La sempre maggiore disponibilità di piattaforme tecnologiche in un'ottica di convergenza tra Mobile, Intelligenza artificiale, Cloud, Big Data/Analytics sta drammaticamente cambiando il modo in cui noi viviamo, lavoriamo, ed interagiamo. Questo trend si colloca nella Quarta Rivoluzione Industriale.

Infatti il ruolo svolto dalla Telecommunication Industry risulta fondamentale nell'accelerazione della trasformazione digitale e nei processi di business, consentendo la trasformazione e digitalizzazione dell'industria verso la quarta rivoluzione.

LE TELECOMUNICAZIONI AL CENTRO DELLA QUARTA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE

L'industria delle Telecomunicazioni abilita la «digital transformation» per tutti i mercati verticali . Gli operatori tendono a differenziarsi sia nei modelli di business che nei servizi offerti alla clientela Business e Consumer. Più le performance degli operatori Telco si allineano grazie a reti più performanti e più è necessario differenziarsi, portando quindi l'industria a ricercare nuovi modelli di business e a soddisfare le esigenze dei clienti attraverso l'innovazione.

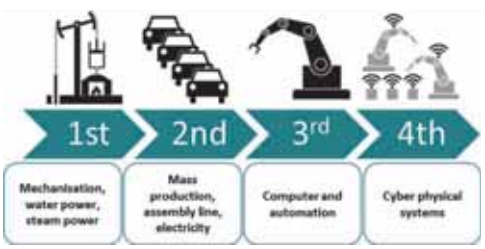
Un'esplosione di servizi che non genera tuttavia una crescita dei ricavi altrettanto significativa per gli operatori di Telecomunicazioni causata dalla migrazione dei ricavi dagli operatori Telco agli Over the Top. Assistiamo così a modelli di business in rapida evoluzione, ad un salto di paradigma nella tecnologia con infrastrutture all IP e SDN, e alla convergenza di piattaforme Cloud –Mobile- Social-Big Data.

INDUSTRY 4.0 : GSMA VISION - NETWORK 2020
5G WILL REVOLUTIONIZE KEY INDUSTRIES

IOT and industrial robotics

Augmented reality

Smart Transport
Sustainable Urban Mobility



Industry 4.0

TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY BUSINESS MODELS IN A CONVERGENCE SCENARIO

EUROPEAN INDUSTRY WILL MANTAIN ITS LEADING ROLE IF THE DIGITALIZATION WILL BE SUCCESFULL

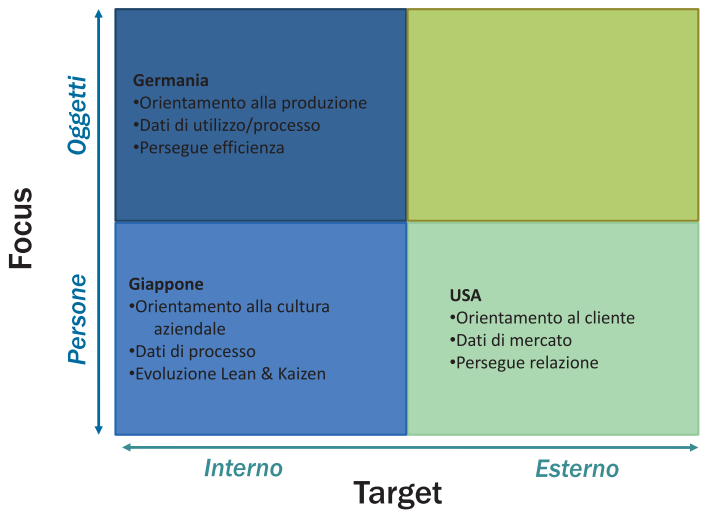
"Europe has a very competitive industrial base and is a global leader in important sectors. But Europe will only be able to maintain its leading role if the digitization of its industry is successful and reached fast. Our proposals aim to ensure that this happens.It requires a joint effort across Europe to attract the investments we need for growth in the digital economy."

Günther H. Oettinger, Commissioner for the Digital Economy and Society

The industrial revolution of our time is digital. We need the right scale for technologies such as cloud computing, data-driven science and the internet of things to reach their full potential. As companies aim to scale up across the Single Market, public e-services should also meet today's needs: be digital, open and cross-border by design. The EU is the right scale for the digital times.

Andrus Ansip, Vice-President for the Digital Single Market

TRE DIVERSE DECLINAZIONI PRINCIPALI

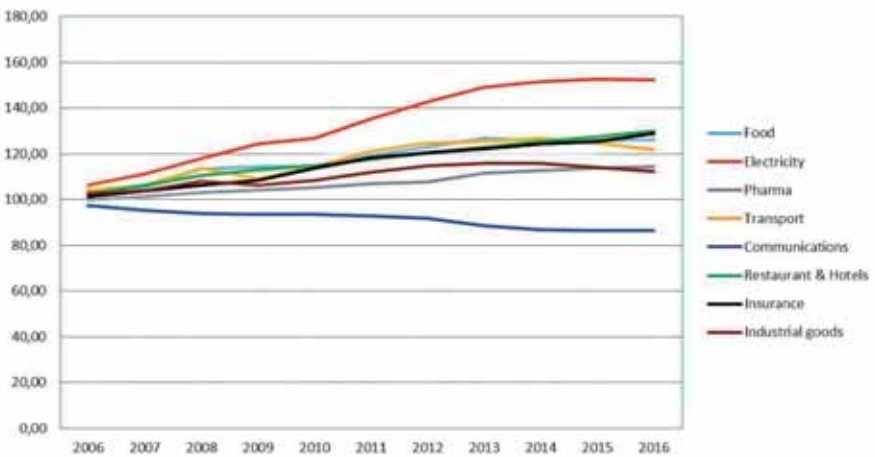


QUINDI CI SONO CONTROINDICAZIONI?

Source: Davos 2017 Global Risk Report

I SEGNALI DI UN CAMBIAMENTO DISRUPTIVE GENERALIZZATO

ANDAMENTO DEI PREZZI AL CONSUMO PER DIVERSE INDUSTRY IN EU 28



Source: elaborazione GPB su dati Eurostat 2016

CONTROINDICAZIONI

Un report di February 2016 redatto da Citibank in partner con University of Oxford predice che il 47% dei lavori di oggi in US verrano totalmente automatizzati dalla trasformazione digitale.
In UK la percentuale è del 35%. In China si arriva al 77%.
In generale nei paesi OCSE la media si attesta al 57%.

COME AFFRONTARE LA SFIDA?

"reskilling and upskilling of today's workers"

•Non è posibile attraversare la rivoluzione tecnologica in atto semplicemente aspettando il ricambio generazionale che fornisca al mercato del lavoro i "native digitali"!

•"In particular, business collaboration within industries to create larger pools of skilled talent will become indispensable, as will multi-sector skilling partnerships that leverage the very same collaborative models t underpin many of the technology-driven business changes underway today"

Source: OECD study «DIGITALISATION, DEINDUSTRIALISATION AND THE FUTURE OF WORK» September 2016

LA RIVOLUZIONE INDUSTRIA 4.0 NELLA ORGANIZZAZIONE ED IL RUOLO DELLE ALTE PROFESSIONALITA' E DEGLI INGEGNERI

- L'impatto della fabbrica intelligente porterà cambiamenti organizzativi e quindi sui contratti di lavoro e sulle relazioni industriali.

- In uno scenario caratterizzato, grazie al dominio della tecnologia, da una maggiore collaborazione e presenza di Quadri, Professionisti Ingegneri più che nella mera elaborazione di ordini e direttive, emerge un paradigma del lavoro nel quale la dimensione stessadel contratto e la relazione di dipendenza fra lavoratore e impresa ne esce rivoluzionato .

SCENARIO GENERALE: I LAVORATORI DELLA CONOSCENZA

Il dimagrimento della forza lavoro dovuto all'attuale crisi comporta un'accelerazione dello spostamento delle percentuali relative ai profili degli occupati. Le tendenze in atto sono documentate dagli studi dell'Unione Europea (CEDEFOP) che dimostra una crescita occupazionale polarizzata: lavori altamente qualificati e poco qualificati. Infatti per il 2020, circa il 40% delle persone al lavoro saranno occupate in un settore occupazionale di livello superiore, svolgendo ad esempio attività di quadri professionali o tecniche. Si prevede inoltre che l'espansione delle occupazioni altamente e mediamente qualificate persista anche nel prossimo decennio.

Dal 2020 il 31,5% dei posti di lavoro richiederanno qualifiche di alto livello ed il 50% qualifiche di medio livello. Emergono quindi i lavoratori della conoscenza (Quadri, manager, consulenti, professionisti, formatori, ricercatori, ingegneri, quadri, consulenti qualificati, ecc.), ossia tutti quei lavoratori, anche inquadrati entro il rapporto di lavoro dipendente, che investono sulla propria professionalità e costruiscono nel tempo un proprio percorso di promozione professionale;

Dalla ricerca *The Future of the Jobs* presentata al World Economic Forum

- L'effetto sarà la creazione di 2 nuovi milioni di posti di lavoro, ma contemporaneamente ne spariranno 7, con **un saldo netto negativo di oltre 5 milioni di posti di lavoro**. L'Italia ne esce con un pareggio (200mila posti creati e altrettanti persi), meglio di altri paese come Spagna e Francia
- A livello di gruppi professionali le perdite si concentreranno nelle aree amministrative e della produzione: rispettivamente 4,8 e 1,6 milioni di posti distrutti. Secondo la ricerca compenseranno parzialmente queste perdite **l'area finanziaria, il management, l'informatica e l'ingegneria**.
- Cambiano di conseguenza le competenze e abilità ricercate: nel 2020 il problem solving rimarrà la soft skill più ricercata, ma diventeranno più importanti il pensiero critico e la creatività. Proprio perché lo scenario è in rapida evoluzione, dobbiamo attrezzarci per cogliere i benefici dello **Smart Manufacturing**, l'innovazione digitale nei processi dell'industria:

La rivoluzione industria 4.0 nella organizzazione aziendale

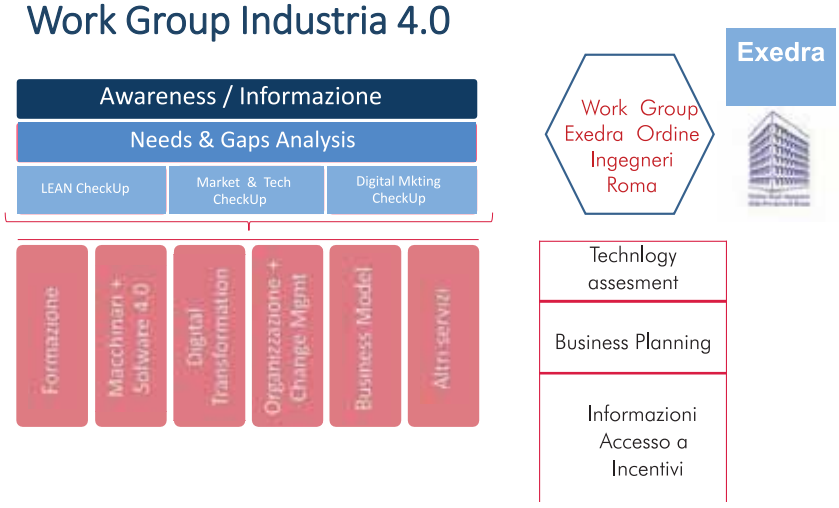
- Dalla ricerca "**The Future of the Jobs**" presentata al **World Economic Forum** è emerso che, nei prossimi anni, fattori tecnologici e demografici influenzeranno profondamente l'evoluzione del lavoro.
- Alcuni come la tecnologia del cloud e lo Smart Working, stanno influenzando le dinamiche già adesso e lo faranno ancora di più nei prossimi 2-3 anni.

Le sfide organizzative nel lavoro capitale umano e "digital transformation"

- Conferenza a Bruxelles su **e-Leadership and Key Enabling Technologies** . Tema della conferenza è stato il capitale umano e il suo sviluppo tecnologico ICT . In particolare, il tema è stato affrontato studiando due aree prioritarie:
  - Key Enabling Technologies (nanotechnology, micro- e nanoelectronics inclusi semiconductors, advanced materials, biotechnology e photonics).
  - e-Skills e e-Leadership che sostengono la Digital Transformation della economia Europea.

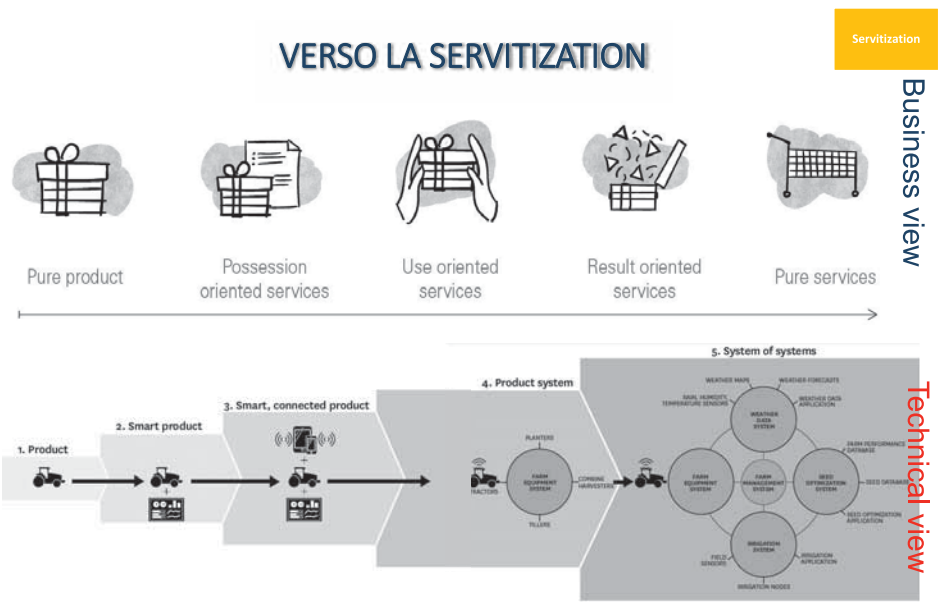
- Dalla conferenza sono emerse in modo chiaro alcune considerazioni che in ogni caso erano abbastanza note:
  - **Il capitale umano nei settori delle tecnologie evolute è vitale per lo sviluppo economico del nostro continente.**
  - **L'Italia sconta un gravissimo ritardo in questo settore.**

Servizi Social Network EXEDRA Work Group Industria 4.0



GLI INGREDIENTI DI I4.0 – FRA TECNOLOGIA E BUSINESS

VERSO LA SERVITIZATION



ESEMPI DI APPROCCIO «BY SERVICE»

Automobili come flotte gestite - fleet management noleggio e strumenti di ottimizzazione dei costi	ARVAL, GE Capital
Hw/computer come flotte gestite a consumo – pay per use	hp, SIEMENS
Sw /applicativi a consumo – on demand	COMPUSA
Assicurazioni a consumo - pay as you drive	sara
Prodotti per la GDO come scaffale gestito dal fornitore	nuncas
Aeromobili al costo per ora di volo – pay as you fly	NETJETS
Macchine movimento terra/utensili a ore di utilizzo - pay as you work	CAT
Motori aeronautici a ore di utilizzo	
Cuscinetti a sfere per giro di pala eolica	SCHAEFFLER
Prodotti come esperienza (fashion, luxury)	
Outcome del prodotto (temperatura, illuminazione)	

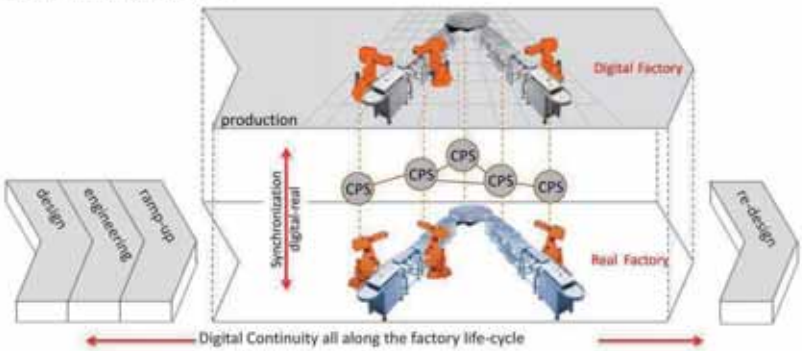
ADVANCED HUMAN MACHINE INTERFACES

AR & VR

App Stores for the Smart Factory:
Downloading Tailored User Interfaces for User Groups

CYBER PHYSICAL SYSTEMS

1 *To support the convergence of physical world and virtual world, where the latter must closely mirror the first and where the former generates an unprecedented volume of data to be handled by the digital representation of the factory.*



2 *To empower the ability to maintain the digital info available all along the factory life-cycle, despite changes in purpose and tools, allowing data to be enriched and used as needed in that specific phase*

ESEMPIO DI APPLICAZIONI VR A IMPIANTI INDUSTRIALI

AR & VR

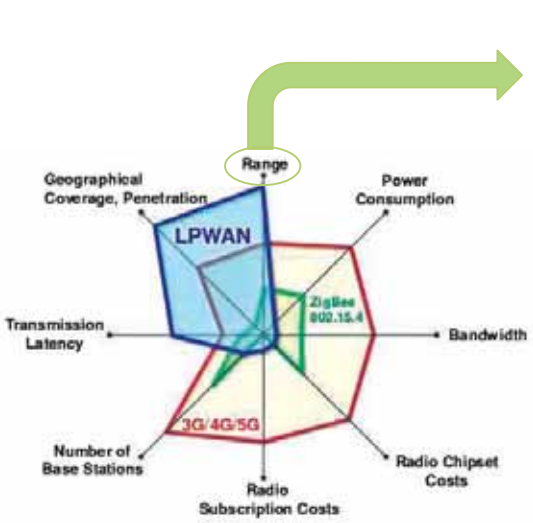
Source: VR-Star presentation

BI Analytics – Big Data & IOT

This Industry 4.0 platform includes condition monitoring solutions, but also **analytics solutions** in the context of large, complex and unstructured data sets (**Big Data analytics**), which are used in industrial manufacturing.
The most important use case in the IoT/I4.0 context or in the industrial Internet of Things is currently **analytics for predictive maintenance.** In the meantime, however, attention is also focusing on **controlling the data source**, i.e. the devices which supply the analyzed values.

SENSORS AND IOT NETWORKS

IoT & Big Data



Source: http://www.slideshare.net/PeterREgli/lpwan/4

BIG DATA

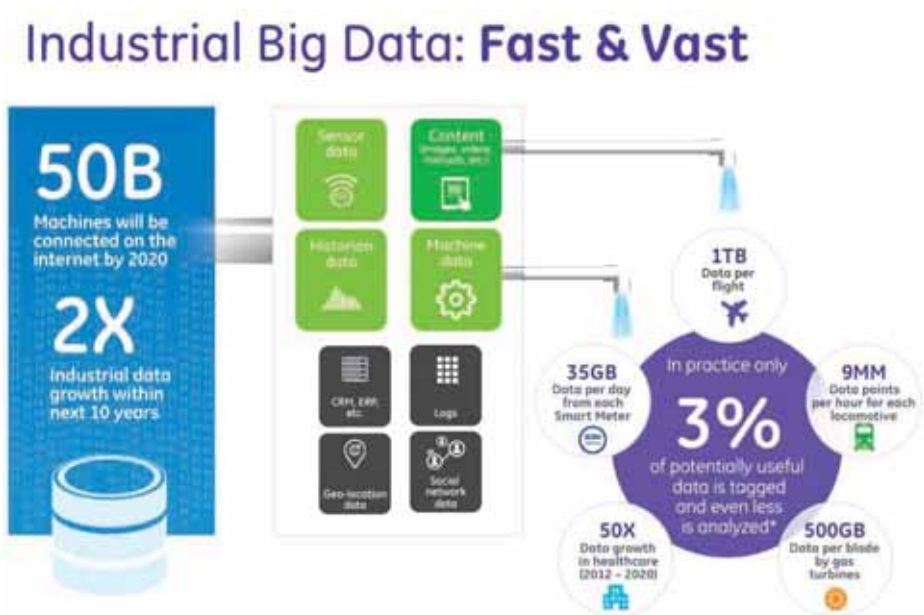
IoT & Big Data

Definition

"Big data" is high-volume, high-velocity and high-variety information assets that demand cost-effective, innovative forms of information processing for enhanced insight and decision making.

Characteristics

- Petabytes/exabytes of data
- Millions/billions of people
- Billions/trillions of records
- Loosely-structured and often distributed data
- Flat schemas with few complex interrelationships
- Often involving time-stamped events
- Often made up of incomplete data
- Often including connections between data elements that must be probabilistically inferred
- Applications that involved Big Data can be:
  - Transactional (e.g., Facebook, PhotoBox), o
  - Analytic (e.g., ClickFox, Merced Applications)



Source: General Electric

I BIG DATA DI INTERNET

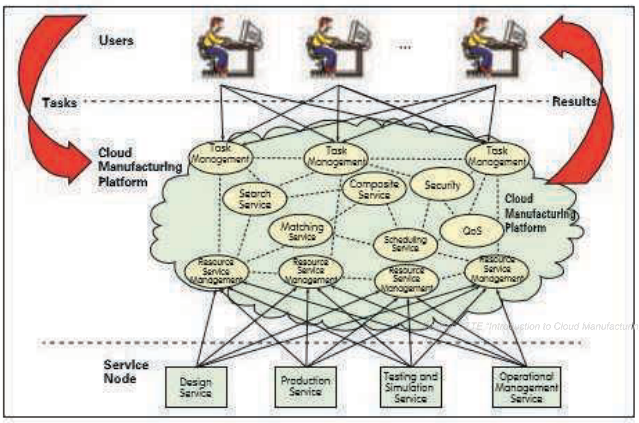
IoT & Big Data

CLOUD MANUFACTURING

Cloud

- **È un modello user-centric che abilita l'accesso ad un insieme di risorse manifatturiere distribuite, condivise e configurabili**. La loro composizione permette la creazione di **linee di produzione temporanee e riconfigurabili.**
- Le **risorse sono incapsulate in servizi cloud-based** gestiti in modo centralizzato.

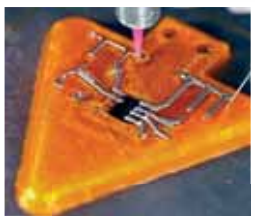
- Una piattaforma di cloud manufacturing supporta: la **gestione della richiesta**, la **ricerca delle migliori risorse**, **l'esecuzione del servizio** e la **gestione delle raccomandazioni**.



Source: ZTE "Introduction to Cloud Manufacturing"

ADDITIVE MANUFACTURING: I TRENDS

Source: Printed electronics – CES 2016



Source: http://foodotica.com/una-cena-completamente-in-3d/

Source: ENVISIONTEC presentation – WMF Barcellona 2016

COMPOSITE-BASED ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY (CBAM)

Source: http://impossible-objects.com/

ROBOTIC MANUFACTURING EVOLUTION

Robotics

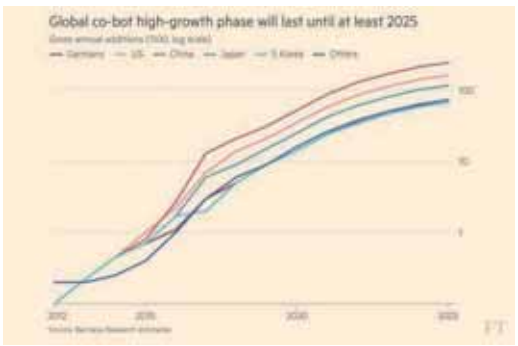
Baxter è un robot a basso costo (25K dollari) pensato per le SME e per lavorare gomito a gomito con gli umani.

Viene addestrato con una GUI o per manipolazione diretta delle braccia.

Reagisce automaticamente ai cambiamenti dell'ambiente circostante. E' dotato di visione artificiale e gestisce cambiamenti di posizioni, di velocità e di altezza del piano di lavoro.

E' dotato di sensori per gestire la sicurezza di chi gli lavora vicino.

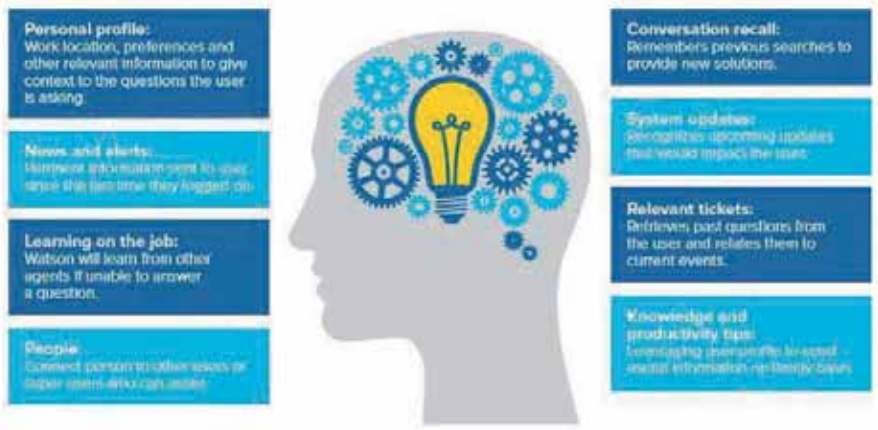
rethink robotics



COGNITIVE

Cognitive

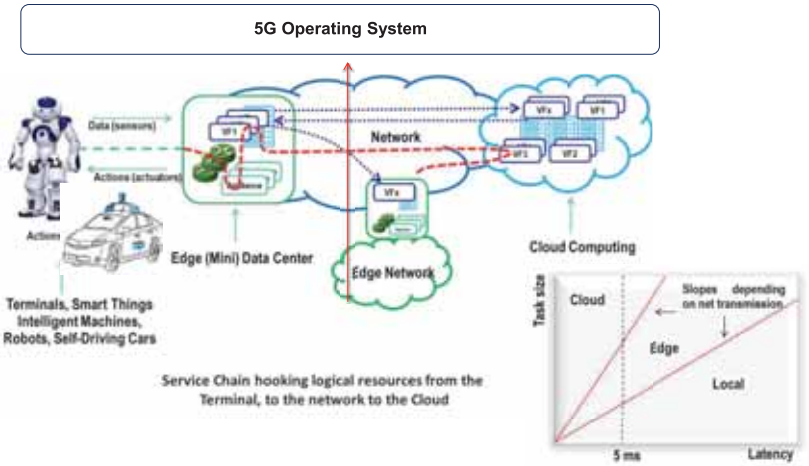
Cognitive assistance on a human scale



Source: IBM Client Care Services: Service Engagement Guide, 2016;
https://www.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?htmlfid=AZO12387USEN&&dd=yes&attachment=AZO12387USEN.PDF

LA «SOFTWARIZZAZIONE» CAMBIA ANCHE LE RETI DI TLC

Softwarization



INTEGRARE I FEEDBACK DEI CLIENTI

Social & Open

- ✓ Sentiment analysis
  - Specialized communities, social media, CRM
- ✓ Feedback a tutti i livelli
  - Vendite, marketing, fabbrica, designers
- ✓ Identificare i pattern causa →effetto
  - Il timing è essenziale, ma la correlazione può essere anche molto lasca!

CONCLUDENDO

- Industry 4.0 è solo un aspetto del processo di digitalizzazione
- La trasformazione digitale è un elemento che cambia il paradigma
- Questo non è un vantaggio o uno svantaggio: è un cambiamento.

Ovvero un vantaggio per chi lo sa cogliere

Cogliere il cambiamento implica poter giocare o meno un ruolo nel futuro mondo digitale

Vivere la trasformazione come opportunità

Quando soffia il vento del cambiamento,
alcuni costruiscono muri,
altri mulini a vento

(Proverbio Cinese)

Bibliografia

- https://www.iiconsortium.org/white-papers.htm
- https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/
- http://bmwi.de/EN/Topics/Economy/Industrial-policy/industrie-4-0,did=708234.html
- http://www.ge.com/digital/
- https://hbr.org/resources/pdfs/comm/microsoft/Competingin2020.pdf

Ing. Giovanni Gasbarrone
Presidente Commissione Telecomunicazioni – Ordine Ingegneri della Provincia di Roma
Dott. Gian Paolo Balboni
Strategic Executive Consultant – Coordinatore Lab Master MAINS – Scuola Superiore S.Anna di Pisa

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI ROMA
Piazza della Repubblica, 59 - 00185 - Roma

Tel. 06.487.93.11 - Fax: 06.487.931.223
Cod.Fisc. 80201950583
Orari di apertura al pubblico degli uffici

Lunedì	09:30-12:30	14:30-17:30
Martedì	09:30-12:30	14:30-17:30
Mercoledì	09:30-12:30	14:30-17:30
Giovedì	09:30-12:30	14:30-17:30
Venerdì	09:30-12:30	chiuso
Sabato	chiuso	

La Segreteria dell'Ordine chiude alle 16.00

AREE DEL SITO WEB DEL QUADERNO

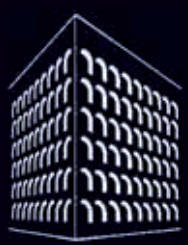
AREA CIVILE AMBIENTALE
http://ioroma.info/civile

AREA INDUSTRIALE
http://ioroma.info/industriale

AREA DELL'INFORMAZIONE
http://ioroma.info/informazione

AREA INTERSETTORIALE
http://ioroma.info/intersettoriale

E’ possibile sfogliare il numero in formato .pdf
all’indirizzo Internet
ioroma.info



Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma
www.ording.roma.it