



**Politecnico  
di Torino**

---

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Meccanica

## **Fusione Termonucleare Controllata:**

Il Caso PROTO-SPHERA e le Nuove Frontiere tra  
Intelligenza Artificiale e Propulsione Spaziale

Relatore:

Giuseppe Francesco Nallo

Candidato:

Giuseppe Campisi

ANNO ACCADEMICO 2024/2025



“Semplice ed efficiente mezzo di locomozione, il veicolo formato da due ruote connesse da un sistema di trasmissione e azionato dall'energia muscolare, ideato verso la metà del secolo scorso, si rivelò così adeguato al compito che doveva svolgere, da non richiedere che lievi modifiche nel secolo e mezzo trascorso dalla sua invenzione.

Molto diversa è stata l'evoluzione di un altro congegno meccanico inventato più di due secoli fa, nel 1769, [...] Si trattava di un rozzo congegno a tre ruote azionato da un motore che rappresentò la forma primitiva di quel veicolo noto come «automobile». Questo primitivo mezzo propulsore andò incontro nei decenni seguenti a sostanziali modifiche per migliorarne la sicurezza e incrementarne la velocità. Al tempo stesso servì da modello per l'invenzione di un altro più veloce mezzo di trasporto: l'aeroplano.

L'evoluzione di quest'ultimo, da quando nel 1903 il biplano di Wilbur Wright si librò per la prima volta in volo, tra la meraviglia della folla, percorrendo a bassa quota qualche decina di metri, fu ben più rapida e imponente di quella dell'automobile: il turboreattore sostituì il motore a scoppio. Infine, la realizzazione di un principio del tutto diverso, quello del razzo, rivoluzionò i sistemi propulsori precedenti e fece approdare l'uomo sulla Luna. [...]

Macchine imperfette come quella ideata da Cugnot, si sono prestate al gioco della selezione, così come avvenne nel caso del cervello del primo vertebrato apparso sul nostro pianeta, tra 300 e 400 milioni di anni fa. [...]

Non si prestò invece alla pressione selettiva, il solido e perfetto cervello degli invertebrati che si propagarono nelle zone sommerse ed emerse del pianeta e, in particolare, il modello che si può considerare il più riuscito: quello degli insetti.”

“L'imperfezione è dunque una componente fondamentale dell'evoluzione. Dagli anfibi all'*Homo sapiens*, il cervello dei vertebrati si è sempre prestato a un miglioramento, a un cambiamento, mentre negli invertebrati è nato così perfetto da non entrare nel gioco delle mutazioni, tanto è vero che i trilobiti vissuti centinaia di milioni di anni fa non sono essenzialmente diversi dagli insetti, dagli artropodi di oggi.

Ecco perché l'imperfezione merita un elogio.”



# Indice

<b>INDICE .....</b>	<b>V</b>
<b>PREFAZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>1. LA FISICA DELLA FUSIONE .....</b>	<b>6</b>
1.1 DIFETTO DI MASSA.....	7
1.2 REAZIONI DI FUSIONE.....	8
1.3 BARRIERA DI COULOMB .....	11
1.4 CRITERIO DI LAWSON, BILANCIO ENERGETICO E GUADAGNO DI FUSIONE.....	13
1.5 SEZIONE D'URTO .....	18
1.6 IL PLASMA E IL SUO CONFINAMENTO.....	21
<b>2. I REATTORI A FUSIONE .....</b>	<b>26</b>
2.1 TIPOLOGIE DI REATTORE.....	26
2.1.1 Tokamak .....	26
2.1.2 Stellarator.....	29
2.1.3 Proto-Sphera.....	32
2.2 LE COMPONENTI PRINCIPALI DI UN REATTORE.....	34
2.2.1 Sistema magnetico .....	35
2.2.2 Divertore .....	36
2.2.3 Vacuum vessel .....	38
2.2.4 Sistemi di raffreddamento .....	40
<b>3. LA TECNOLOGIA DEL VUOTO .....</b>	<b>42</b>
3.1 GENERALITÀ SUL VUOTO .....	42
3.2 POMPE DA VUOTO .....	46

3.3 PUNTO DI FUNZIONAMENTO.....	51
3.4 IL VUOTO NELLA FUSIONE TERMONUCLEARE CONTROLLATA.....	57
<b>4. LA PRODUZIONE DI ENERGIA .....</b>	<b>61</b>
<b>4. ....</b>	<b>64</b>
4.1 CICLO RANKINE-HIRN.....	64
4.2 CICLO JOULE-BRAYTON .....	67
4.3 CICLO COMBINATO.....	70
<b>5. AI &amp; FUSION TECHNOLOGY .....</b>	<b>74</b>
5.1 CONTROLLO E OTTIMIZZAZIONE DEL PLASMA.....	75
5.2 SVILUPPO DI MATERIALI PER REATTORI A FUSIONE.....	78
5.3 OTTIMIZZAZIONE OPERATIVA E MANUTENZIONE PREDITTIVA.....	81
<b>6. FUSION THRUSTER .....</b>	<b>85</b>
<b>CONCLUSIONE .....</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>96</b>

## PREFAZIONE

La stesura di questa tesi, come molte esperienze nella mia vita, è nata attraverso un percorso poco canonico. Fin da quando ho memoria e, a parere di mia madre, anche da prima ho sempre desiderato comprendere e scoprire come tutto ciò che mi circonda funzioni; che si trattasse di giocattoli, piccoli elettrodomestici rotti... o l'orologio subacqueo da polso ricevuto per Natale da mia cugina; per motivi a me inspiegabili continuava a funzionare sotto l'acqua corrente del lavandino. Come verificare dunque la motivazione di tale resistenza? Smontarlo era unico modo per carpirne il segreto. (Come ci si poteva aspettare) Inutile dire che smise di funzionare poco dopo; una volta aperto, non riuscii più a riassemblyarlo. Ore di utilizzo? Meno di una. Era la stessa notte di Natale quando decisi di saziare quella mia curiosità. E poi si sa, svelato "il trucco" non resta che passare oltre, al prossimo oggetto da scoprire (e rompere molto probabilmente).

Da allora sono passati molti anni, ma quella voglia/curiosità di comprendere i 'meccanismi nascosti' è rimasta e, per mia fortuna, buona parte di essa ha trovato terreno fertile in ambito accademico. È in questo modo che mi sono avvicinato alla Fusione Termonucleare Controllata: leggendo inizialmente testi divulgativi per arrivare a studi sempre più specialistici. Al momento di scegliere un credito libero o un tirocinio per l'università non ho avuto dubbi; bisognava soltanto trovare qualcuno disposto a prendere un ingegnere meccanico che di nucleare, sulla carta, ne sapeva zero. In questi casi, però, ci vuole anche molta fortuna: la mia, è stata reperire il

numero di telefono di una impiegata alla segreteria ENEA di Frascati, grazie alla quale (e non le sarò mai abbastanza grato) sono riuscito a mettermi in contatto con un ingegnere coinvolto in un progetto di fusione presso quella sede e, in seguito, a convincerlo a organizzare il mio tirocinio.

Il progetto che ho avuto l'onore di seguire è PROTO-SPHERA, un reattore innovativo le cui peculiarità verranno approfondite nelle pagine seguenti. L'idea della tesi arriva in secondo momento, come volontà di mettere nero su bianco la conoscenza acquisita, svincolandola dall'oblio di un meraviglioso e lontano ricordo a cui era destinata.

Mio malgrado, durante la sua stesura sono giunto a una conclusione: spesso siamo incapaci guardare oltre la punta del nostro naso. Una quantità immensa di conoscenza ci sfugge solo perché non inerente specificamente al nostro indirizzo di studi o al nostro ambito lavorativo. Forse è vero, o almeno lo è in queste circostanze, che gli unici limiti che abbiamo sono quelli che scegliamo di porci.



# INTRODUZIONE

La parola “nucleare” ha per molti anni rappresentato un termine non facile da pronunciare. Inizialmente, il suo impatto devastante fu associato alle incredibili stragi di Hiroshima e Nagasaki, al termine della Seconda Guerra Mondiale. Successivamente, il disastro di Černobyl' nel 1986 – l'incidente nucleare in assoluto più grave di cui si abbia notizia – ha consolidato una percezione profondamente negativa nei confronti di questa tecnologia, rendendo ancora oggi oltremodo difficoltosa qualsiasi comunicazione in materia.

In molti Paesi, ciò ha alimentato (e alimenta) politiche di progressivo ridimensionamento, dismissione o persino messa al bando di questa fonte energetica. Tale scelta, oggi, alla luce degli sviluppi tecnologici del settore, evidenzia una limitata conoscenza della materia, oltre a una distanza crescente tra comunità scientifica, politica e opinione pubblica. È doveroso sottolineare che quanto detto finora riguarda esclusivamente la FISSIONE nucleare.

Nell'ultimo periodo, con l'attenzione sempre maggiore verso la sostenibilità, l'energia nucleare sta riconquistando spazio nel dibattito come alternativa concreta ai combustibili fossili. Sempre più esperti ne riconoscono il potenziale, sottolineando il ruolo che può svolgere, in sinergia con le fonti rinnovabili, all'interno di un mix energetico stabile ed equilibrato. A questo scenario si aggiunge una prospettiva ancora più rivoluzionaria, che per molti rappresenta il vero “Sacro Graal” dell'energia: la FUSIONE TERMONUCLEARE CONTROLLATA. Questa tecnologia, ispirata ai

processi che alimentano le stelle, promette di fornire energia pulita, sicura e virtualmente inesauribile. Sebbene le sfide tecnologiche siano ancora molte, i progressi recenti indicano che la realizzazione di un reattore a fusione operativo è tutt'altro che utopica.

L'idea di base nella stesura dei capitoli è stata quella di adottare un approccio definibile "additivo", in cui ciascun capitolo funge da base propedeutica per quello successivo, analogamente a come ogni mattone di un muro si fa carico di quelli che gli verranno posizionati sopra. Nel primo capitolo (dei sei totali) verranno trattate le basi della fusione nucleare, illustrando le condizioni fisiche necessarie affinché il processo avvenga. Successivamente, si analizzeranno le principali configurazioni dei reattori a fusione, che, come vedremo, dipenderanno dal tipo di confinamento magnetico adottato. Nello stesso capitolo, verranno approfonditi i principali componenti di un reattore, con l'obiettivo di comprenderne in modo efficace il funzionamento. Seguirà il terzo capitolo con un approfondimento sulla creazione del vuoto, aspetto fondamentale per il corretto svolgimento e controllo della reazione di fusione. Saranno esaminate le tipologie di pompe utilizzate e analizzato il punto di funzionamento relativo a tale processo. Nel quarto capitolo si entrerà nel cuore della produzione di energia, esplorando gli impianti attualmente considerati fattibili e già ampiamente utilizzati, sia nel contesto della fissione che della combustione. Gli ultimi due capitoli saranno poi dedicati a quelle che sono state definite "le nuove frontiere" della tecnologia nucleare. Il quinto capitolo esaminerà l'utilizzo dell'intelligenza artificiale per affrontare alcune delle sfide legate a questa innovativa tecnologia: il capitolo si presenta come una panoramica divulgativa per comprendere come questa rappresenti un punto di svolta tecnologico. Infine, nell'ultimo capitolo si esplorerà l'impiego della fusione nucleare come propellente per i viaggi interplanetari. Saranno analizzati gli attuali sviluppi in corso, cercando di comprendere le caratteristiche di questi progetti e come questi ultimi potrebbero essere applicati nel futuro alle esplorazioni spaziali.

Attraverso questo lavoro, si intende non solo ridurre il divario tra scienza, politica e opinione pubblica, ma anche tra le diverse discipline ingegneristiche, che spesso operano in compartimenti stagni, senza una comunicazione effettiva tra loro. Questo atteggiamento mina a quella interdisciplinarietà, sempre più richiesta nel contesto lavorativo odierno.

## LA FISICA DELLA FUSIONE

Le dimensioni del nucleo atomico si collocano nell'intervallo compreso tra  $10^{-14}$  e  $10^{-15}$  metri. Al suo interno risiedono l'intera carica positiva e la quasi totalità della massa dell'atomo. A partire da questo dato conoscendo la carica di un protone e la massa di protone e neutrone (che risulta all'incirca uguale) è possibile calcolare la forza d'attrazione gravitazionale e la forza repulsiva coulombiana tra questi elementi costitutivi dell'atomo. Svolgendo i calcoli, si noterebbe che la forza di coulomb dell'ordine di  $10^9$  è tale da mantenere a circa  $10^{18}$  metri di distanza i due protoni; Ma allora come fanno a rimanere tanto vicini nel nucleo dell'atomo? Facendo riferimento nuovamente alle nostre nozioni di Fisica I arriviamo alla conclusione che certamente affinché rimangano in tale posizione esiste una 'forza' ancora maggiore di quella coulombiana che contrasta non solo la loro repulsione ma costringe i due nuclei a rimanere attaccati tra loro. In realtà in questi casi, per considerazioni che in questa sede non verranno affrontate, è più opportuno parlare di 'interazione', nello specifico interazione nucleare forte. Se prendiamo in considerazione tutte le interazioni che coinvolgono i componenti del nucleo, possiamo definire l'energia di legame come l'energia necessaria per separare il nucleo nei suoi costituenti. In altre parole, si tratta dell'energia di coesione che tiene uniti i nucleoni all'interno del nucleo. Si osserva che l'energia di legame è proporzionale al numero atomico, cioè alla somma di protoni e neutroni. Di conseguenza, l'energia di legame di ciascun nucleone è quasi

costante, a prescindere dal nucleo in cui si trova. È opportuno quindi diagrammare la curva dell'energia di legame per nucleone in funzione del peso atomico:

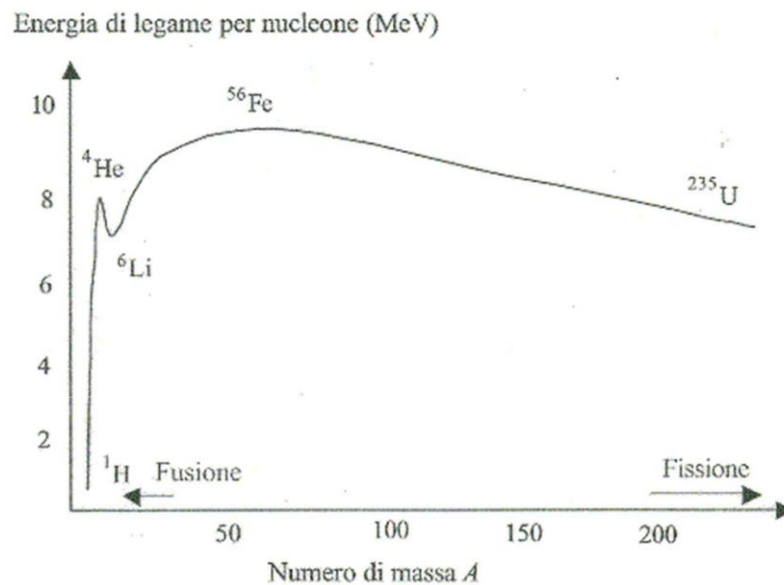


Figura 1: Energia di legame nucleare

Si può notare che l'energia di legame maggiore corrisponde a nuclei più stabili (come il  $^{56}\text{Fe}$ ), energie di legame minore viceversa sono tipiche di nuclei molto pesanti come l'uranio o molto leggere come l'idrogeno. Per ottenere energia (reazioni esotermiche) dovremmo produrre reazioni che portano da uno stato ad energia di legame inferiore ad uno con energia di legame superiore; avremo quindi reazioni di fissione nucleare per nuclei con  $A > 56$  e reazioni di fusione nucleare di nuclei con  $A < 56$ .

### 1.1 Difetto di massa

La possibilità di provocare in modo controllato questi processi (fissione e fusione) e di ricavarne energia è stata una delle scoperte epocali del '900 con conseguenze spettacolari e anche drammatiche. Il principio base, curiosamente, ha origine non in una teoria della struttura della materia ma in una teoria del moto, la relatività di A. Einstein che porta alla necessaria equivalenza di massa (a riposo) ed energia espressa

dalla famosa e divulgatissima relazione  $E = m * c^2$ , nota dal 1905. La massa totale di un nucleo è inferiore alla massa totale dei nucleoni che lo compongono. Questa differenza è nota come il difetto di massa ed è equivalente all'energia di legame del nucleo. Nella fissione, un nucleo instabile viene diviso in nuclei più stabili con una massa totale più piccola. Questa differenza di massa, il difetto di massa, è l'energia di legame che viene rilasciata. [1]

$$\Delta E_{LEGAME} = (N_{NEUTRONI} * m_{NEUTRONE} + N_{PROTONI} * m_{PROTONE} - m_{NUCLEO}) * c^2$$

Ma cerchiamo di capirci meglio. La fusione nucleare è il processo in cui due nuclei leggeri si uniscono in un nucleo più grande, eventualmente accompagnato dall'emissione di altre particelle, come neutroni o fotoni, con parziale trasformazione della massa in energia cinetica dei prodotti. Dalla fusione nucleare si ottiene un'enorme quantità di energia dovuta al difetto di massa. Quando i due nuclei si fondono, la massa del nucleo risultante non è pari alla somma delle masse dei due nuclei di partenza, ma più piccola. La differenza tra la somma delle masse di partenza e la massa finale, difetto di massa, viene convertita in energia, seguendo la formula di Einstein di cui sopra.

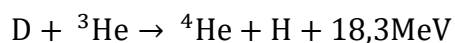
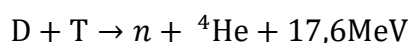
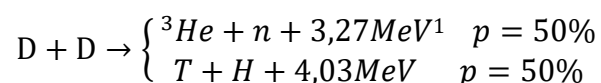
Guardando nuovamente la figura 1 capiamo quindi che le reazioni esotermiche si verificano quando avviene la fusione dei nuclei più leggeri del ferro, mentre per realizzare quella dei nuclei più pesanti c'è bisogno di energia dall'esterno. Questo è esattamente l'opposto di quanto succede nella fissione nucleare: per i nuclei più pesanti del ferro, la fissione avviene con il rilascio di energia, mentre per nuclei più leggeri è necessario fornire energia per innescare il processo. [2]

## 1.2 Reazioni di fusione

Si potrebbe pensare che le condizioni naturali in cui si verifica la fusione (elevate pressioni, temperature e forza gravitazionale), essendo presenti nelle stelle, non siano

riproducibili sulla terra. La prova sperimentale della fusione, quindi la riproducibilità di questa reazione sulla terra, è avvenuta per la prima volta negli Stati Uniti nel 1952. Purtroppo, la produzione di questa energia in quantità macroscopiche ingenti è riuscita finora solamente in applicazioni militari. La reazione è accompagnata, infatti, da una colossale esplosione e perciò assolutamente incontrollabile. L'impiego dell'energia di queste reazioni a scopi civili e pacifici richiede viceversa che le reazioni evolvano in modo tranquillo, controllabile e continuativo. In estrema sintesi sono questi i vincoli/problemi della fusione termonucleare controllata.

Esistono molteplici reazioni di fusione nucleare esotermiche utilizzabili in ambito energetico. Fra le reazioni di fusione dei nuclei leggeri il maggior interesse lo presentano reazioni seguenti:



Inoltre, per applicazioni energetiche, esiste un'altra reazione di fusione nucleare ritenuta interessante di seguito riportata:

$H + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He} + 8,7\text{MeV}$  \ Questa reazione non presenta neutroni o nuclei radioattivi fra i prodotti della reazione e presenta reagenti non radioattivi e ben disponibili sulla Terra. Di seguito verranno descritte le peculiarità delle reazioni introdotte.

---

<sup>1</sup> Si faccia presente che 1eV è l'energia assunta da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1V ed equivale a  $1.6021 \times 10^{-19} J$

Reazione D-D: la reazione D-D è interessante in quanto è caratterizzata da un'elevata disponibilità di combustibile nucleare: non richiede la presenza di trizio e il deuterio è disponibile in elevate quantità (1 kg di D ogni 30 kg di acqua). Tra i prodotti della reazione sono presenti sia i neutroni che il trizio; quest'ultimo, essendo un prodotto radioattivo, induce gravi problematiche radio-protezionistiche su un ipotetico impianto che lavora con questa reazione di fusione termonucleare.

Reazione D-T: attualmente questa reazione è la più promettente dal punto di vista energetico. Per utilizzare questa reazione è necessario creare artificialmente il trizio che oltre ad essere un prodotto radioattivo ( $T_{1/2} = 12,33 \text{ y}$ ) è di difficile stoccaggio. Allo stadio attuale della ricerca, si pensa che il metodo più efficiente per la produzione del trizio è quello di utilizzare delle opportune reazioni nucleari indotte sul litio. La disponibilità di litio sulla terra è localizzata solo in alcune regioni e si pensa che uno sfruttamento intensivo di questi giacimenti possa portare a danni ambientali non trascurabili.

Reazione  $\text{D} + {}^3\text{He}$ : questa reazione produce un'elevata quantità di energia, i reagenti e i prodotti della reazione non sono radioattivi e tra i prodotti della reazione non sono presenti neutroni. Tuttavia, la concentrazione isotopica dell' ${}^3\text{He}$  è estremamente ridotta.

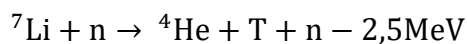
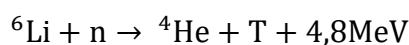
Reazione  $\text{H} + {}^{11}\text{B}$ : questa reazione non produce neutroni veloci, non presenta elementi radioattivi e i reagenti possono essere estratti in buone quantità dagli oceani. I tassi di reazione però della  $\text{H} + {}^{11}\text{B}$  sono estremamente ridotti aumentando le problematiche per la produzione energetica da questa fonte.

La produzione di neutroni nelle reazioni di fusione pone sfide significative. Questi, infatti, possono essere assorbiti dai materiali circostanti (pareti del reattore, strutture e componenti), attivandoli e trasformandoli in rifiuti radioattivi, un processo noto



come attivazione neutronica. Inoltre, la radioprotezione del personale e dell'ambiente richiede l'implementazione di schermature complesse e costose.

La reazione di fusione più promettente è la D-T che produce un neutrone veloce (14,07 MeV) e un nucleo di elio (3,53 MeV). Il neutrone generato dalla reazione, oltre a trasportare una quantità significativa di energia essenziale per scopi energetici, può essere utilizzato per la produzione di trizio direttamente in reattore. La produzione di trizio con questa strategia, in un ipotetico reattore a fusione nucleare D-T, avverrebbe utilizzando un blanket di litio attraverso le seguenti reazioni:



Il litio naturale ha una concentrazione isotopica del 7,5% per  ${}^6\text{Li}$  e del 92,5% per  ${}^7\text{Li}$ . Entrambe le reazioni per la produzione di trizio sono possibili; inoltre, il litio funge da moderatore per i neutroni veloci, aumentando l'efficacia della prima reazione a energie inferiori del neutrone incidente. La moderazione dei neutroni e le reazioni esotermiche sul  ${}^6\text{Li}$  riscaldano il termovettore, permettendo così la generazione di energia elettrica.[3]

### 1.3 Barriera di Coulomb

Abbiamo parlato in apertura di capitolo della forza di Coulomb e di come quest'ultima, data l'estrema vicinanza dei corpi carichi, porterebbe a farli allontanare a distanze che potremmo considerare infinite se prendiamo come riferimento il raggio atomico. Traducendolo in formula:

$$F_C = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 Z_2}{r^2}$$

Dove  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$  è la costante dielettrica del vuoto,  $Z_1$  e  $Z_2$  sono i numeri atomici dei due nuclei interagenti ed  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  è l'intensità della carica elettrica dell'elettrone.

Allo stesso modo abbiamo parlato dell'interazione nucleare forte che si verifica quando i nucleoni si trovano al di sotto di una certa soglia (10 - 15 m) e che viceversa costringe i corpi l'uno contro l'altro.

Graficando le due forze (Figura 2) possiamo vedere i rapporti di forza che ci sono date le distanze tra i due nucleoni considerati.

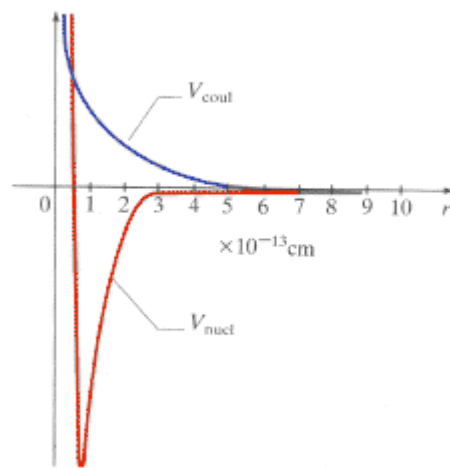


Figura 2: Potenziale coulombiano (in blu) e nucleare forte (in rosso)

È possibile dimostrare infatti che al di sotto di una certa soglia, le forze di repulsione sono vinte da quelle di attrazione nucleare, le quali permettono la normale coesistenza di più protoni all'interno di uno stesso nucleo. Quando invece i due nuclei sono lontani, la forza nucleare forte, essendo a corto raggio, non esercita alcuna attrazione significativa, mentre la repulsione elettrostatica tra i protoni impedisce loro di avvicinarsi. Questo genera una barriera di potenziale, nota come barriera di Coulomb (Figura 3), che i nuclei devono superare affinché possa avvenire la fusione.

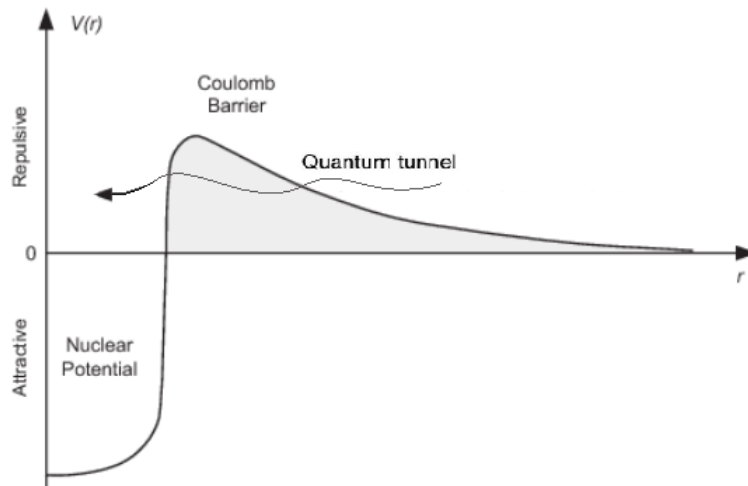


Figura 3: Distribuzione del potenziale netto tra energia repulsiva (Coulomb) e attrattiva (nucleare forte secondo il modello di Woods-Saxon) fra nuclei atomici; barriera di Coulomb

Per vincere tale barriera, i nuclei devono possedere un'energia cinetica sufficiente, tipicamente ottenibile tramite temperature estremamente elevate, tale da rendere possibile la reazione di fusione. Nel caso dei nuclei di Deuterio e Trizio l'energia che devono possedere per superare tale barriera è di  $V(r) = 280 \text{ keV}$ .

In accordo con la meccanica quantistica, è possibile l'attraversamento della barriera potenziale sfruttando l'effetto del tunnel quantistico, che permette loro di attraversare la barriera anche in assenza dell'energia classica richiesta.[4][5][6]

#### 1.4 Criterio di Lawson, Bilancio energetico e Guadagno di fusione

Come detto, dunque, il raggiungimento delle condizioni di fusione implica il superamento della barriera di Coulomb e quindi l'acquisizione di energia da parte dei nuclei coinvolti. In generale, fornendo energia alla materia, se ne provoca un cambiamento di stato che, procedendo da quello a minor contenuto energetico, la porta dallo stato solido a quello gassoso passando per lo stato liquido. L'ulteriore somministrazione di energia, nel caso si voglia arrivare alla fusione, porta la materia al raggiungimento del cosiddetto quarto stato, ovvero quello di plasma. Al contrario dello stato gassoso, quello di plasma è caratterizzato da una densità ridottissima e

inoltre in esso le molecole sono dissociate in atomi i quali sono in massima parte ionizzati, ovvero con i nuclei separati dagli elettroni. Il plasma è dunque una miscela di ioni, elettroni e atomi neutri che, al contrario dei gas, lo rende sensibile all'applicazione di campi elettrici e magnetici.

Detto ciò, risulta evidente che, volendo fornire agli atomi di deuterio e trizio abbastanza energia da superare la barriera di Coulomb e raggiungere la fusione, dobbiamo riscaldarli molto, portandoli allo stato di plasma.

Compreso che si ha bisogno di fornire energia per produrre una reazione di fusione, per avere una produzione energetica, si ha la necessità di avere un bilancio positivo fra l'energia fornita e quella ricavata. In sostanza la domanda è semplice: quali condizioni devono essere raggiunte affinché la reazione di fusione (sempre fra deuterio e trizio) possa avvenire con produzione netta di energia? La risposta a tale interrogativo fu fornita per la prima volta dall'ingegnere John D. Lawson nel 1957 formulando il cosiddetto criterio di Lawson, che in termini di 'prodotto triplo' si scrive come:

$$n_D \tau_E T \geq 3 \cdot 10^{21} [m^{-3} s keV]$$

In cui:

$n_D$  rappresenta la densità dei nuclei di deuterio e trizio presenti nel plasma (in termini di numero di nuclei per  $m^3$ );

$\tau_E$  rappresenta il tempo di confinamento dell'energia termica, ovvero la misura del tempo durante il quale il plasma trattiene la propria energia prima di iniziare a disperderla attraverso: conduzione, convezione, irraggiamento ecc.

$T$  rappresenta la temperatura che ciascuna coppia di nuclei coinvolti nella reazione deve mediamente mantenere

Il prodotto  $n_D \cdot \tau_E$  è in realtà funzione della temperatura, come da Figura 4.

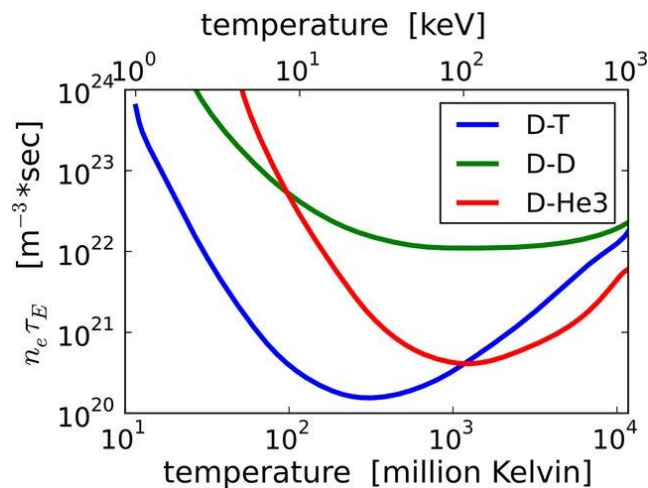


Figura 4: Criterio di Lawson per tre possibili reazioni di fusione

Posizionandoci al minimo di temperatura,  $T=20$  keV, abbiamo  $n_D \cdot \tau_E = 1.5 \times 10^{20} [m^{-3} s]$ . Si tenga comunque presente che ciascuna coppia di nuclei, deve possedere l'energia media di 20keV, ciò significa che in un plasma vi saranno particelle dotate dell'energia necessaria al superamento della barriera di Coulomb e altre no.

Le condizioni richieste dall'espressione di cui sopra possono essere raggiunte attraverso due strategie opposte:

- Nuclei a densità molto elevata ( $n \sim 10^{29} m^{-3}$ ) per tempi brevissimi ( $\tau_E \sim 10^{-9} s$ ). (Tipico del confinamento inerziale)
- Nuclei a densità più bassa ( $n \sim 10^{20} m^{-3}$ ) ma confinati per tempi più lunghi ( $\tau_E \sim 1 s$ ). (Tipico del confinamento magnetico)

Nelle ricerche attuali le caratteristiche necessarie affinché un plasma raggiunga le condizioni di fusione, non sono più espresse in termini del criterio di Lawson ma in termini di guadagno di fusione. [7]

Volendo calcolare un valore ingegneristico, possiamo scrivere:

$$Q = \frac{\text{Potenza termica netta prodotta}}{\text{Potenza termica introdotta da fonti esterne}}$$

Se viceversa, come da letteratura, andiamo a usare una metodologia più fisica:

considerata la reazione:  $\mathbf{a} + \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{b} + \mathbf{Y}$

la conservazione dell'energia relativistica totale può essere espressa come

$$m_a c^2 + K_a + m_X c^2 + K_X = m_b c^2 + K_b + m_Y c^2 + K_Y$$

dove K è l'energia cinetica ed m è la massa a riposo. Riscrivendo la relazione diventa:

$$m_a c^2 + m_X c^2 - m_b c^2 - m_Y c^2 = K_b + K_Y - K_a - K_X$$

Il guadagno di fusione è legato intrinsecamente al il difetto di massa di cui sopra, quindi alla variazione di energia cinetica. Può essere quindi espresso come:

$$Q = K_b + K_Y - K_a - K_X = (m_a + m_X - m_b - m_Y) c^2$$

Con  $m_a + m_X - m_b - m_Y = \Delta m$  difetto di massa di cui sopra

Sappiamo inoltre che nella maggior parte delle applicazioni di fusione le particelle reagenti hanno energie nell'intervallo di 1-10 keV. Le energie cinetiche iniziali sono quindi piccole rispetto ai valori finali di diversi MeV e possono essere trascurate.

$$Q \cong K_b + K_Y = \frac{1}{2} m_b v_b^2 + \frac{1}{2} m_Y v_Y^2$$

E scrivendo la conservazione della quantità di moto abbiamo:

$$m_b v_b = m_Y v_Y$$

Quindi:

$$\frac{1}{2} m_b v_b^2 \cong \frac{Q}{1 + \frac{m_b}{m_Y}}$$

$$\frac{1}{2} m_Y v_Y^2 \cong \frac{Q}{1 + \frac{m_Y}{m_b}}$$

Una conseguenza di questa condivisione di energia è immediatamente evidente: la particella di prodotto più leggera prende la quota maggiore di energia. Il rapporto tra le energie cinetiche è quindi:

$$\frac{\frac{1}{2} m_b v_b^2}{\frac{1}{2} m_Y v_Y^2} \cong \frac{m_Y}{m_b}$$

Nel caso della reazione D-T, il neutrone prodotto ha l'80% dell'energia liberata totale (17.6 MeV). Nelle reazioni D-D, il prodotto protone o neutrone ha il 75% dell'energia disponibile (4.03 MeV). [8]

Il criterio di Lawson, espresso in termini di Q corrisponde a Q=3, mentre si raggiungono le condizioni di pareggio energetico (break-even) quando si supera la condizione Q=1 in quanto si devono tenere comunque presenti le perdite di energia (non trascurabili in un contesto reale). Per mantenere il controllo complessivo della reazione è inoltre importante che Q non cresca eccessivamente. [7] Attualmente si prevede di potere realizzare reattori che operino in modo affidabile in un regime di guadagno Q=30/40 [1], quindi una potenza di fusione prodotta 30/40 volte la potenza termica introdotta esterna. Per rendere competitivi dal punto di vista economico impianti di produzione di energia elettrica basati sulla fusione termonucleare a confinamento magnetico è necessario raggiungere Q di circa 55 (calcoli riferiti rispetto al reattore ITER). [3]

Un calcolo interessante, arrivati a questo punto, può essere è **la «resa» energetica** del processo del processo di fusione. Considerando la reazione D + T accessibile a temperature vicine a 20keV (**1keV = 1.14x10<sup>7</sup>K**), e sapendo che una mole di combustibile (a queste temperature) ha una massa di ~5g e contiene un  $N_{Avogadro}$  di nuclei (**6.02 \* 10<sup>23</sup>**). In 1 kg di D e T si hanno dunque:

$$N = \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ nuclei/mol}}{5 \text{ g/mol}} \times 1000 \text{ g} = 1.204 \times 10^{26} \text{ nuclei reagenti}$$

Ogni reazione produce 17.6 MeV, quindi l'energia  $\Delta E$  liberata è: [1]

$$\left(17.6 \frac{\text{MeV}}{\text{nucleo}}\right) * (1.204 * 10^{26} \text{ nuclei}) = 3.384 * 10^{14} \text{ J} \approx 94 * 10^6 \text{ kWh}$$

Che vuol dire 10.000/15.000 tonnellate di carbone. Per quanto detto

precedentemente, l'energia termica introdotta da fonti esterne non può superare i

$$\frac{\Delta E_{\text{liberata}}}{Q} \approx \frac{94 \times 10^6 \text{ kWh}}{55} = 1,709 \text{ kWh.}$$

## 1.5 Sezione d'urto

La sezione d'urto è una grandezza fondamentale nella fisica delle interazioni nucleari e quantifica la probabilità che due particelle interagiscano tra loro in un determinato processo.[9] Si misura in barn, dove 1 barn equivale a  $10^{-28} \text{ m}^2$ , e presenta una forte dipendenza dall'energia relativa tra i reagenti. Nel contesto della fusione nucleare, la sezione d'urto determina l'efficienza con cui i nuclei possono superare la repulsione coulombiana e fondersi, rilasciando energia.

Il tasso di reazione in un plasma di fusione è definito dalla seguente relazione:

$$R = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$$

dove:

$\sigma$  è la sezione d'urto della reazione;

$v$  è la velocità relativa tra le particelle; che nella fusione termonucleare è descritta dalla distribuzione di velocità di Maxwell-Boltzmann.

$\langle \sigma v \rangle$  è il valore medio della sezione d'urto moltiplicato per la velocità, calcolato in base alla distribuzione delle velocità nel plasma, tipicamente una distribuzione di Maxwell-Boltzmann.



$n_1$  e  $n_2$  sono le densità dei nuclei reagenti; questi ultimi sono dipendenti dalle velocità dei nuclei e dalla temperatura secondo la legge:  $n(v) \propto e^{-m v^2 / 2 k T}$

$R$  rappresenta il numero di reazioni per unità di volume e tempo [10]

La sezione d'urto varia notevolmente a seconda della reazione di fusione considerata (Figura 5).

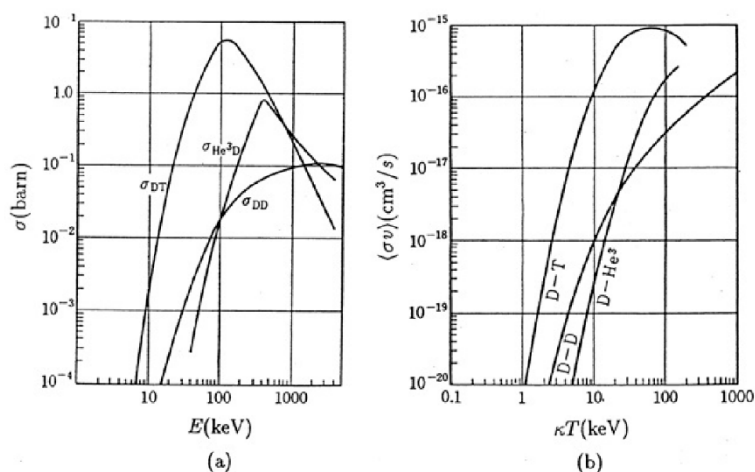
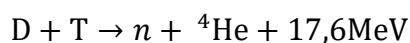


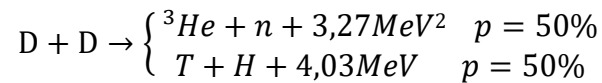
Figura 5: (a) Dipendenza della sezione d'urto della reazione di fusione rispetto all'energia cinetica dei nucleoni coinvolti.  
(b) Dipendenza di  $\langle \sigma v \rangle$  rispetto alla temperatura ionica

Per la reazione deuterio-trizio (D-T):



la sezione d'urto raggiunge il suo valore massimo, approssimativamente 5 barn, quando l'energia relativa tra i nuclei è di circa 100 keV. [11] Questa caratteristica rende la fusione D-T la più efficiente tra le reazioni di fusione termonucleare, ed è per questo largamente impiegata in progetti di reattori come ITER. [12]

Al contrario, nella reazione deuterio-deuterio (D-D):



la sezione d'urto è sensibilmente inferiore, il che implica la necessità di temperature più elevate per ottenere un tasso di reazione significativo. [10] Questo motiva la ragione per cui la fusione D-D, pur rimanendo interessante per sviluppi futuri, non rappresenta la scelta primaria per i primi reattori a fusione.

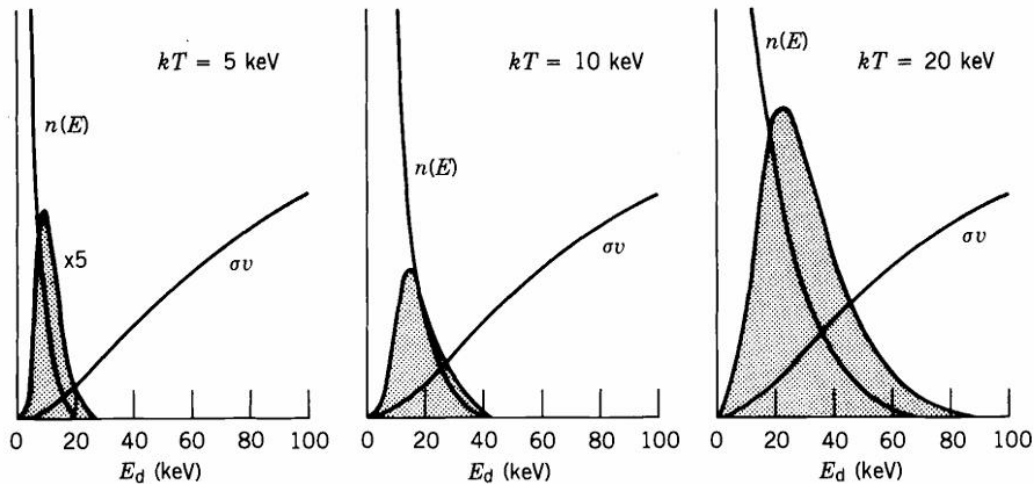


Figura 6: La regione scura indica il prodotto tra le curve  $n(v)$ ; è indicativo del tasso di reazione per le reazioni che coinvolgono due nuclei uguali (tipo D-D). Altrimenti dovremmo graficare la distribuzione di Maxwell-Boltzmann per entrambe le specie ed estendere anche a quest'ultima il prodotto delle curve per avere idea dell'andamento di  $R$ .

Un aspetto cruciale della sezione d'urto è il suo comportamento in diversi regimi di energia (Figura 6):

**Basse energie (inferiori a 1 keV):** la probabilità di fusione è minima a causa dell'insufficiente energia dei nuclei per superare la repulsione coulombiana.

**Energie intermedie (10-100 keV):** la probabilità di fusione aumenta notevolmente grazie all'effetto tunnel quantistico. Questo fenomeno, intrinsecamente legato all'energia dei nuclei reagenti, consente loro di superare

---

<sup>2</sup> Si faccia presente che 1eV è l'energia assunta da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1V ed equivale a  $1.6021 \times 10^{-19} J$

la barriera coulombiana anche quando la loro energia cinetica non è sufficiente per farlo classicamente. [13].

**Alte energie:** la sezione d'urto diminuisce poiché, sebbene le collisioni siano più frequenti, l'alta velocità riduce il tempo in cui i nuclei rimangono vicini, diminuendo la probabilità di fusione. [14]

La dipendenza energetica della sezione d'urto è essenziale per determinare le condizioni operative di un reattore a fusione. Per massimizzare l'efficienza, il plasma deve essere mantenuto a temperature di centinaia di milioni di Kelvin, in modo che l'energia media dei nuclei si trovi nella regione in cui la sezione d'urto è massima. [10] In definitiva, è possibile dire che la sezione d'urto è un parametro chiave per il controllo e l'ottimizzazione delle reazioni di fusione, influenzando direttamente la quantità di energia generata e la fattibilità tecnologica di un reattore a fusione. [8]

## **1.6 Il plasma e il suo confinamento**

Ricapitolando. Tutte le reazioni di fusione nucleare devono coinvolgere due corpi che collidono tra di loro, dato che la collisione simultanea tra più di due corpi è un evento estremamente improbabile. Anche se la reazione di fusione è esotermica, è necessario che i due nuclei interagenti posseggano una energia sufficiente per consentire il superamento della barriera coulombiana generata dalle cariche dei due nuclei. La reazione di fusione nucleare può avvenire anche per effetto tunnel ma con una probabilità estremamente ridotta soprattutto a energie termiche basse; questa probabilità cresce al crescere dell'energia a seguito di un aumento della sezione d'urto per questo tipo di processo.

Per poter sfruttare le reazioni di fusione nucleare è necessario portare gli atomi ad energie elevate; per ottenere questo obiettivo esistono due differenti processi:

1. **Accelerazione di ioni:** questa tecnica richiede l'utilizzo di un acceleratore ionico in grado di portare i nuclei a energie sufficienti da consentire il superamento della barriera coulombiana. Questo processo è utilizzato per la produzione di fasci neutronici veloci (sorgenti a spallazione) ma la reazione che si ottiene è quella di ionizzazione dei nuclei del bersaglio.

2. **Plasma termonucleare:** questa strategia prevede di portare il combustibile termonucleare allo stato di plasma, raggiungendo temperature dell'ordine di decine di keV (circa  $10^7$  K). A queste temperature, la probabilità di tunneling effect diventa sufficientemente alta da favorire le reazioni di fusione. Per sfruttare questo processo, è fondamentale sviluppare sistemi efficaci di generazione e confinamento del plasma. [8]

È, infatti, necessario scaldare il plasma fino a una determinata temperatura e mantenerlo confinato per un tempo tale da soddisfare il criterio di Lawson. Nei plasmi termonucleari astrofisici il confinamento è di tipo gravitazionale: la forza di gravità equilibra la pressione del plasma e si ottengono sistemi stabili per  $10^9$  anni. Un tale sistema di confinamento non è ovviamente realizzabile sulla terra ed è quindi necessario studiare vie alternative.

Il problema del confinamento è complesso in quanto il plasma è uno stato della materia in cui si possono sviluppare molti fenomeni di instabilità che possono portare al suo collasso, non è possibile realizzare il confinamento del plasma utilizzando solo pareti solide a causa dell'elevate temperature richieste dal criterio di Lawson e degli elevati carichi termici a cui sarebbero sottoposte. Un contatto diretto delle pareti con il plasma, oltre che a generare il danneggiamento delle pareti stesse, che porterebbe all'iniezione di impurezze, raffredderebbe il plasma allontanandolo dalla temperatura voluta.

A tale scopo, esistono due approcci principali: il confinamento inerziale e il confinamento magnetico.

Nel *confinamento inerziale*, che tratteremo superficialmente in quanto non rientra negli obiettivi della tesi, l'obiettivo è quello di raggiungere densità di plasma elevate in un tempo inferiore rispetto al tempo caratteristico di espansione del plasma ( $< 10^{-9}$ s); con queste modalità è possibile ottenere l'ignizione del plasma prima della sua espansione. Opportunamente scalato questo è il funzionamento che si trova anche negli ordigni termonucleari. Negli esperimenti di fusione a confinamento inerziale vengono focalizzati, su un pellet sferico di combustibile nucleare, con un opportuno numero di fasci laser ultra-intensi lanciategli contro.

Nel *confinamento magnetico* si confina il plasma attraverso l'iterazione delle particelle cariche del plasma stesso con campi magnetici opportunamente dimensionati. Con questa tecnica si prevedono tempi di confinamento paragonabili ai secondi. Le configurazioni di campo magnetico possono essere suddivise in due categorie: sistemi aperti e sistemi chiusi a geometria toroidale. (Figura 7) Nella seconda categoria, la configurazione a tokamak ha acquisito una notevole importanza nelle ricerche sulla fusione termonucleare controllata a confinamento magnetico, di cui ITER è la più importante. [3]

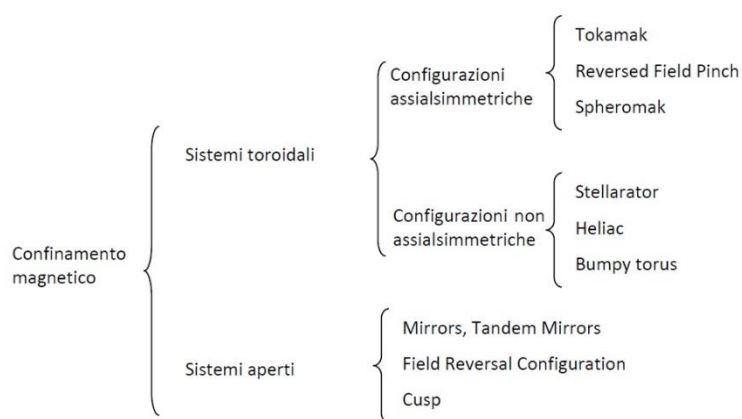


Figura 7: Possibili configurazioni di confinamento in un plasma termonucleare.

Questo tipo di confinamento sfrutta la sensibilità del plasma ai campi magnetici. In particolare, la forza di Lorenz (cui sono soggette le particelle cariche contenute nel plasma) imprime loro, combinandosi col loro moto, una traiettoria elicoidale attorno alle linee del campo magnetico (essa è infatti sempre perpendicolare alla direzione del campo e a quella della velocità della particella carica immersa in esso). Gli ioni sono dunque obbligati a seguire la direzione del campo magnetico creando il confinamento magnetico più semplice possibile. (Figura 8a)

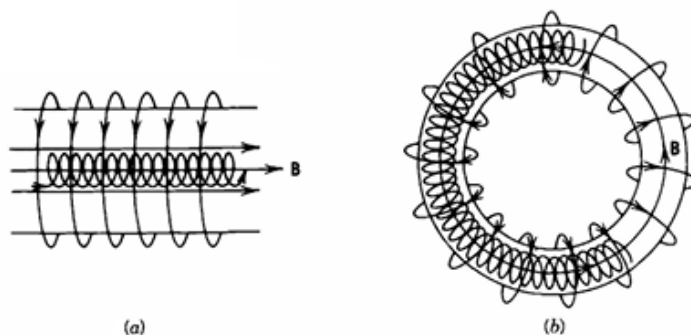


Figura 8: *Confinamento magnetico lineare aperto (a) e toroidale (b)*

Questo è sufficiente per confinare la particella in due sole direzioni. Per prevenire la perdita di particelle lungo l'asse, possiamo formare una toroide, mantenendo così la spirale in un anello. (Figura 8b) In un sistema di confinamento toroidale ideale, il campo magnetico dovrebbe essere uniforme per garantire che le particelle del plasma rimangano confinate al centro della toroide. Tuttavia, in un sistema reale l'intensità del campo magnetico toroidale diminuisce all'aumentare della distanza dal centro del toro. Questo significa che le particelle cariche che si muovono a spirale lungo le linee di campo percepiscono un campo magnetico più debole nella parte esterna del toro; quindi, si sentono meno vincolati in quella direzione. Le disomogeneità del campo magnetico toroidale fanno sì che esistano dei moti di deriva delle particelle, rispetto alla direzione del campo magnetico, verso la parete. Per compensare questo effetto, si introduce un campo magnetico poloidale, ovvero un campo magnetico diretto lungo la superficie del toro. Questo campo poloidale può essere generato tramite delle bobine

esterne disposte attorno al toro oppure facendo passare una corrente elettrica attraverso il plasma stesso (in questo modo contribuiamo anche a riscaldare il plasma). La combinazione del campo magnetico toroidale e del campo magnetico poloidale crea un campo magnetico con linee di forza a spirale che costringono le particelle cariche a muoversi dentro queste eliche, rimanendo confinate all'interno del plasma. [8]

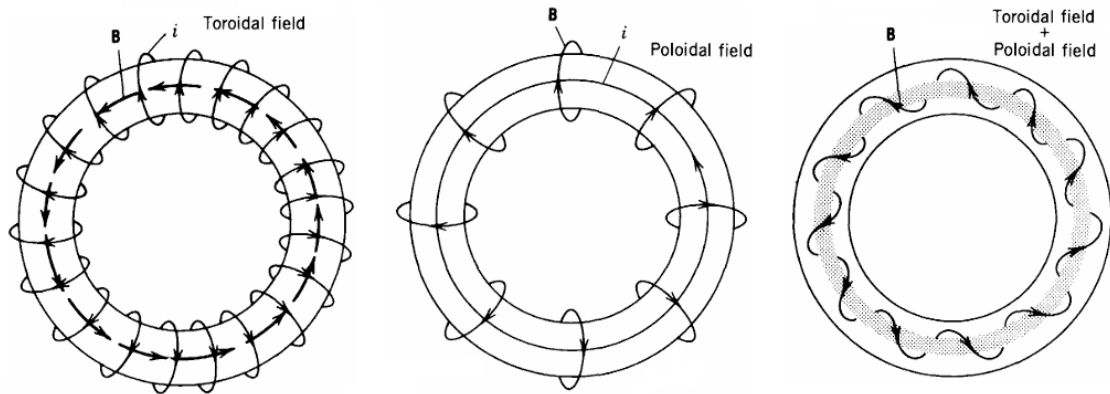


Figura 9: Campo toroidale, poloidale e la loro combinazione

Sono stati impiegati diversi approcci sperimentali per generare linee di campo elicoidali, dando origine principalmente a due tipologie di macchine, che rappresentano le soluzioni più avanzate per il raggiungimento degli obiettivi della fusione termonucleare controllata: i Tokamak e gli Stellarator. [15] Quanto spiegato (campo toroidale + campo poloidale) avviene solo nei dispositivi di tipo tokamak; nei dispositivi di tipo Stellarator il campo magnetico elicoidale è creato esclusivamente da bobine esterne disposte in una configurazione elicoidale.

## I REATTORI A FUSIONE

All'inizio delle sperimentazioni sulla fusione nucleare, questa tecnologia si presentava come altamente promettente. Con l'incremento delle temperature, però, emersero fenomeni di instabilità che resero il controllo del plasma la principale difficoltà della fusione termonucleare controllata. Per superare questi ostacoli, sono stati sviluppati diversi dispositivi, tra cui due configurazioni di riferimento: lo Stellarator e il Tokamak, che hanno guidato la ricerca internazionale grazie alla loro efficacia nel confinare il plasma. Tuttavia, un approccio innovativo è rappresentato da PROTO-SPHERA, un esperimento di confinamento magnetico sferico sviluppato presso i laboratori ENEA di Frascati che si distingue per i potenziali vantaggi in termini economici e di semplicità costruttiva.

In questo capitolo esamineremo prima queste tre configurazioni, per poi analizzare i loro componenti principali.

### 2.1 Tipologie di reattore

#### 2.1.1 Tokamak

Il nome "tokamak" deriva dall'acronimo russo "toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami", che significa "camera toroidale con bobine magnetiche". Questo concetto fu sviluppato per la prima volta presso l'Istituto Kurchatov di Mosca nel 1956 [16]. Il



tokamak utilizza una camera a vuoto a forma di toroide, riempita con gas combustibile (tipicamente deuterio e trizio), che viene riscaldato fino a trasformarsi in plasma.

Per raggiungere la fusione nucleare in un tokamak, è necessario seguire una serie di passaggi ben definiti. Inizialmente, all'interno della camera viene creato un vuoto spinto o ultraspinto mediante l'utilizzo di pompe da vuoto specializzate [17]. Successivamente, si procede con l'accensione della corrente di plasma, un processo che si articola in tre fasi principali:

1. **Immissione della corrente nelle bobine del campo toroidale:** queste bobine generano un campo magnetico toroidale che confina il plasma, impedendone il contatto con le pareti del reattore [10].
2. **Inserimento di una piccola quantità di gas:** viene introdotta una quantità minima di gas, tipicamente idrogeno o suoi isotopi (come deuterio e trizio), che costituirà il combustibile per la fusione [11].
3. **Immissione della corrente nella bobina del circuito primario:** questa bobina, posizionata nel centro del toro, genera un flusso magnetico nel nucleo del tokamak. In questo modo, si realizza un trasformatore in cui il toro funge da circuito secondario, con un solenoide centrale come primario. [18].

A questo punto, la corrente nel circuito primario viene ridotta rapidamente, generando un campo elettromagnetico variabile (per la legge di Faraday-Neumann-Lenz) che induce una corrente elettrica nel gas presente all'interno del toro [17]. Questa corrente elettrica riscalda il gas e innesca una scarica elettrica che ionizza gli atomi, trasformando il gas in plasma, uno stato della materia in cui gli elettroni e gli ioni si muovono liberamente [19]. Il plasma, divenuto un mezzo conduttivo, continua a riscaldarsi per effetto Joule fino a raggiungere le condizioni necessarie per la fusione. [20]

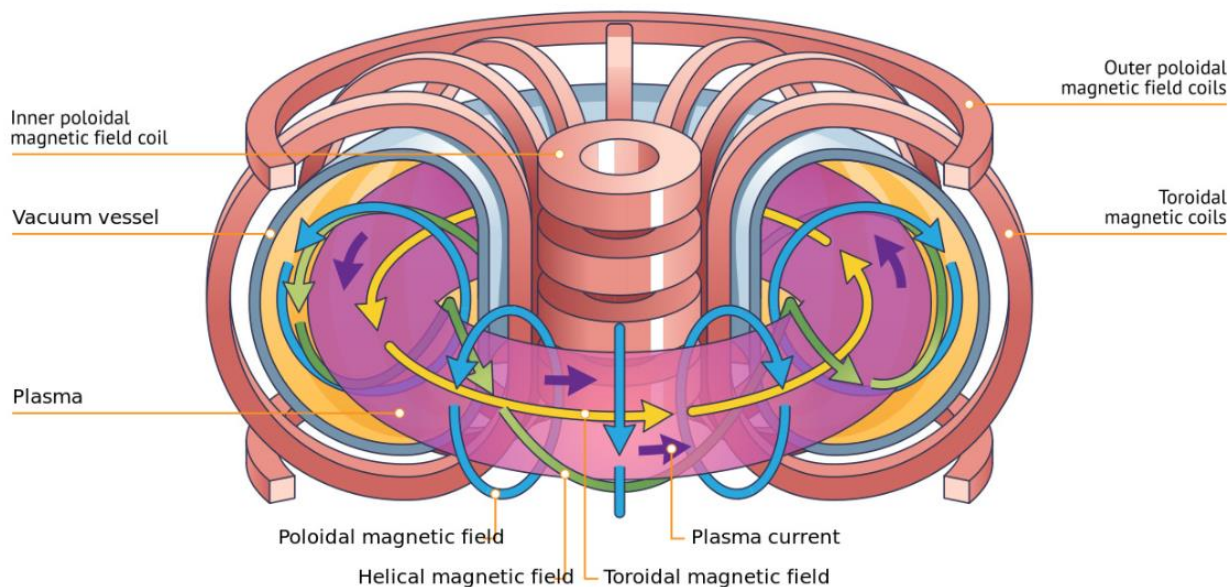


Figura 10: Schema generale di un tokamak e della sua configurazione magnetica

Il confinamento del plasma è ottenuto attraverso una combinazione di campi magnetici: un campo toroidale, generato da bobine esterne, e un campo poloidale, creato da una corrente indotta nel plasma stesso. Tuttavia, questa configurazione richiede che il tokamak operi in modo pulsato, poiché la corrente nel solenoide non può essere mantenuta indefinitamente [10].

Il plasma nei tokamak raggiunge densità di circa  $10^{20}$  particelle per metro cubo, molto inferiore rispetto alla densità dell'aria a pressione atmosferica, creando un ambiente di vuoto spinto [17]. Per soddisfare il criterio di Lawson, che definisce le condizioni necessarie per la fusione bisogna raggiungere condizioni definite di temperatura, densità e confinamento magnetico, con l'obiettivo di innescare reazioni di fusione autosostenute (condizione detta di 'ignizione' del plasma,  $Q = \infty$ ) [21].

Nonostante le sfide legate al funzionamento pulsato e alla complessità del confinamento magnetico, i tokamak rimangono uno dei dispositivi più promettenti per la fusione nucleare controllata, grazie alla loro capacità di raggiungere alte prestazioni in termini di temperatura e densità del plasma [11]. La ricerca continua a migliorare

l'efficienza e la stabilità di questi dispositivi, con l'obiettivo di rendere la fusione nucleare una fonte di energia praticabile e sostenibile [22].

### 2.1.2 Stellarator

Gli Stellarator rappresentano una delle tecnologie più promettenti per il confinamento magnetico del plasma, offrendo un'alternativa ai più noti Tokamak. A differenza di questi ultimi, gli Stellarator non si basano su una corrente toroidale indotta nel plasma per generare il campo magnetico necessario al confinamento. Al contrario, utilizzano bobine esterne complesse e accuratamente progettate per creare un campo magnetico intrinsecamente stabile e a simmetria elicoidale [23]. Questa configurazione riduce significativamente i rischi associati alle instabilità del plasma, che rappresentano una delle principali sfide nei Tokamak [24]. Tuttavia, la complessità geometrica degli Stellarator, derivante dalla necessità di modellare con precisione le bobine per ottenere un campo magnetico ottimale, rende la loro costruzione e manutenzione più impegnativa rispetto ai Tokamak [25].

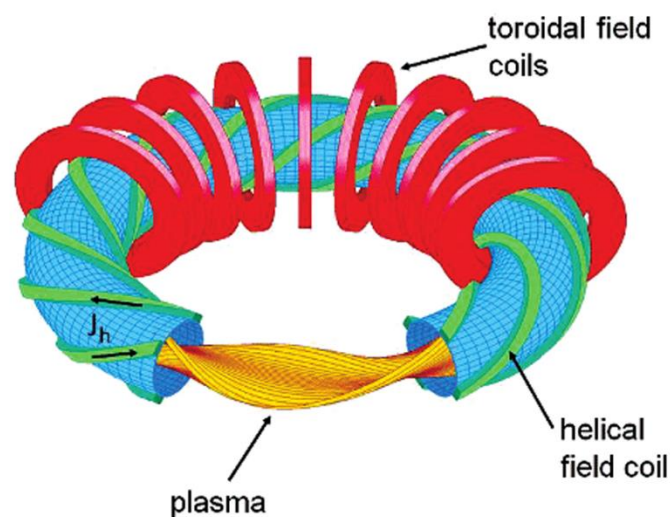


Figura 11: Configurazione di uno Stellarator classico a bobine elicoidali.

All'interno di uno Stellarator, il plasma assume una forma toroidale elicoidale (Figura 11), con linee di campo magnetico che formano superfici magnetiche annidate. Le particelle si muovono lungo queste superfici, ruotando orizzontalmente attorno all'asse centrale del dispositivo [26].

Nei modelli classici di Stellarator, la corrente elettrica nelle bobine elicoidali scorre in modo alternato, mentre nei modelli moderni la direzione è uniforme [27]. L'assenza di una corrente longitudinale nel plasma consente un funzionamento continuo e riduce le instabilità, rendendo gli Stellarator adatti a operazioni in stato stazionario [26].

Uno degli esempi più avanzati di Stellarator è il **Wendelstein 7-X (W7-X)** (Figura 12), costruito dal Max-Planck-Institut für Plasmaphysik a Greifswald, in Germania. Completato nel 2014, il W7-X è progettato per studiare la fattibilità del confinamento del plasma in configurazioni ottimizzate [28].

Il dispositivo è composto da 50 bobine superconduttrici ottimizzate, raffreddate con elio liquido a 3,4 K, che generano un campo magnetico complesso e stabile [29]. I risultati delle prime fasi operative hanno dimostrato che, rispetto ai Tokamak, le

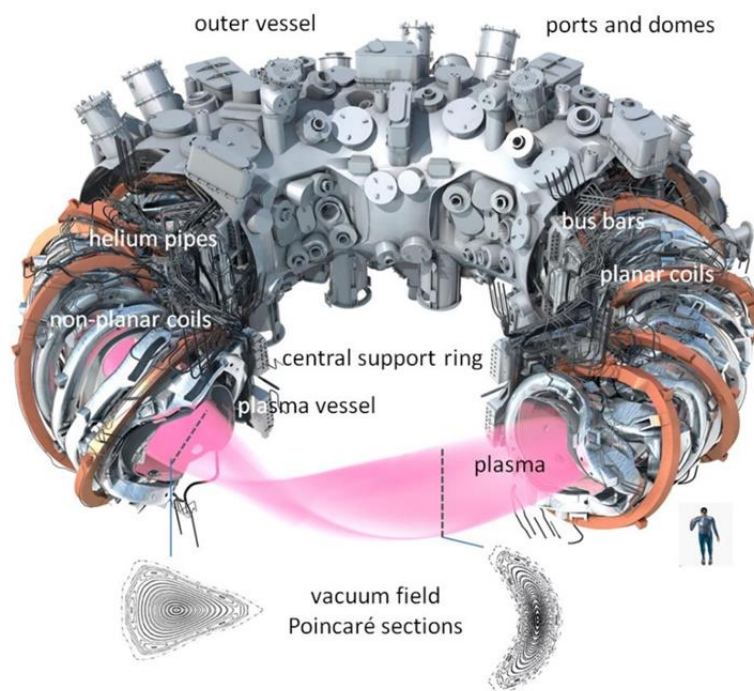


Figura 12: Stellarator Wendelstein 7-X.

geometrie ottimizzate possono migliorare le prestazioni di confinamento e avvicinare questi dispositivi alla fattibilità di un reattore a fusione commerciale [30].

La differenza tra il funzionamento pulsato dei Tokamak e quello stazionario degli Stellarator è legata principalmente al modo in cui questi dispositivi generano e mantengono il campo magnetico necessario per confinare il plasma.

Gli Stellarator non si basano su una corrente indotta nel plasma per generare il campo magnetico poloidale. Invece, utilizzano bobine esterne avvolte in modo complesso (spesso con forme elicoidali o torsionali) per creare direttamente un campo magnetico intrinsecamente stabile e tridimensionale, che confina il plasma senza bisogno di una corrente interna [23]. Poiché il campo magnetico è generato interamente da sorgenti esterne (le bobine), non c'è bisogno di un trasformatore o di una corrente indotta nel plasma. Questo permette agli Stellarator di operare in modo stazionario, mantenendo il plasma confinato per periodi di tempo teoricamente illimitati [24]. Inoltre, gli Stellarator sono meno soggetti a instabilità legate alla corrente del plasma, poiché questa corrente è molto ridotta o assente. Tuttavia, la complessità delle bobine e la difficoltà di costruzione rendono gli Stellarator più costosi e tecnologicamente impegnativi rispetto ai Tokamak [11].

Malgrado le sfide ingegneristiche, come la complessità delle bobine magnetiche e la necessità di precisione nella loro costruzione, gli Stellarator si confermano come una via promettente per la realizzazione di reattori a fusione in grado di operare in modo continuo e stabile [31]. Esperimenti come il Wendelstein 7-X hanno dimostrato progressi significativi, raggiungendo condizioni di plasma stabili e durature, aprendo la strada a ulteriori sviluppi nel campo della fusione termonucleare controllata [32].

### 2.1.3 Proto-Sphera

Il progetto PROTO-SPHERA (Spherical Plasma for Helicity Relaxation Assessment), sviluppato presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati, è il primo progetto di plasma con una configurazione semplicemente connessa, ovvero che non richiede elementi aggiuntivi all'interno del volume di plasma. [33] [34].

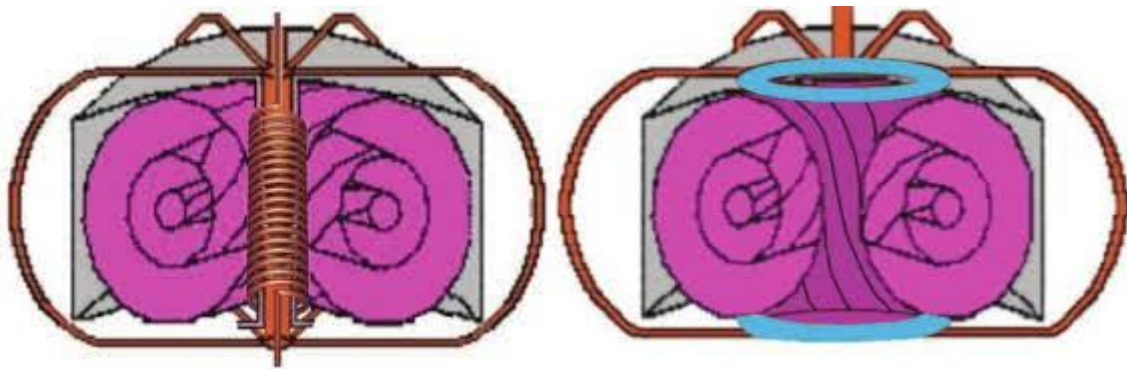


Figura 13: Differenze tra un tokamak sferico a PROTO-SPHERA

A differenza dei dispositivi tradizionali come i Tokamak e gli Stellarator, PROTO-SPHERA propone una configurazione alternativa che elimina alcune delle principali limitazioni ingegneristiche e fisiche associate a questi sistemi. La configurazione si basa su una geometria unica in cui un plasma cilindrico centrale, mantenuto da un arco elettrico alimentato da elettrodi (anodo e catodo), funge da primario per generare un campo magnetico poloidale, con linee di campo che si avvolgono attorno a esso. Questo plasma centrale è circondato da un plasma toroidale esterno, formando una struttura denominata "jet + torus" [35]. A differenza dei Tokamak, che richiedono una corrente toroidale indotta nel plasma, PROTO-SPHERA utilizza solo correnti esterne, eliminando la necessità di una colonna centrale solida. Questa caratteristica semplifica la costruzione del dispositivo e ne migliora la stabilità operativa.

Il plasma toroidale si forma grazie all'interazione tra il campo magnetico poloidale generato dal plasma centrale e le correnti esterne applicate attraverso gli elettrodi. Rendendo la colonna instabile, questa collassa in una toroide sferico, sfruttando il fenomeno della riconnessione magnetica. (Figura 14)

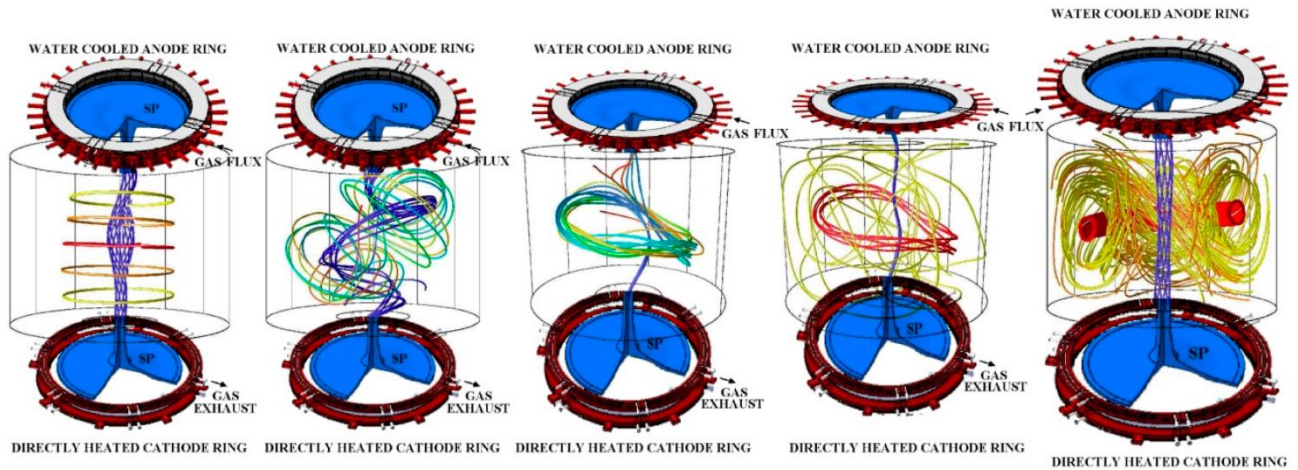


Figura 14: *Meccanismo di formazione del toro sferico in PROTO-SPHERA*

I principali vantaggi di PROTO-SPHERA rispetto ai Tokamak tradizionali sono di seguito analizzati. Innanzitutto, è immune alle interruzioni: nei Tokamak, il plasma può scomparire in millisecondi a causa di instabilità, causando danni elettromeccanici alla camera a vuoto e richiedendo un riavvio completo della scarica, mentre in PROTO-SPHERA i tori ottenuti finora sono immuni a queste interruzioni.

In secondo luogo, elimina il problema del conduttore centrale, che è il componente più fragile di un Tokamak, poiché il plasma stesso funge da conduttore. Inoltre, la corrente che scorre attraverso gli elettrodi lungo le linee di forza dello screw pinch permette di mantenere la configurazione toroidale attraverso l'iniezione diretta di corrente toroidale per tempi indefiniti. La geometria cilindrica facilita l'accesso ai componenti interni della macchina, semplificando la manutenzione e l'upgrade. Infine, una configurazione sferica potrebbe consentire la creazione di reattori a fusione più efficienti, sfruttando meglio i campi magnetici confinanti.

Rispetto ai Tokamak, PROTO-SPHERA riduce le complessità ingegneristiche e le perdite di energia per collisione con le pareti del reattore. Rispetto agli Stellarator, che utilizzano bobine complesse per generare un campo magnetico tridimensionale, PROTO-SPHERA sfrutta un meccanismo più semplice basato su un plasma centrale [37]. Tuttavia, mentre gli Stellarator possono operare in stato stazionario senza corrente di plasma, PROTO-SPHERA necessita ancora di verifiche sulla sua capacità di mantenere il confinamento per lunghi periodi [29].

Nonostante i risultati promettenti, PROTO-SPHERA affronta diverse sfide. Tra queste, l'ottimizzazione della stabilità del plasma centrale e l'aumento della corrente necessaria per raggiungere condizioni operative adeguate a un reattore a fusione.

Il progetto PROTO-SPHERA rappresenta un'alternativa promettente alle configurazioni tradizionali di confinamento magnetico. Se le sfide tecniche verranno superate, potrà contribuire significativamente allo sviluppo della fusione nucleare come fonte di energia sostenibile. Inoltre, la sua configurazione offre spunti interessanti per lo studio di fenomeni astrofisici, come la formazione di plasmi toroidali ed elicoidali attraverso la riconnessione magnetica, osservabili ad esempio nella Nebulosa del Granchio, dove i campi magnetici si sono generati dall'esplosione di una supernova. [36].

## **2.2 Le componenti principali di un reattore**

Affinché si raggiungano le condizioni indispensabili alla fusione è necessario che tutto all'interno del reattore funzioni in maniera impeccabile in modo da non turbare il delicato equilibrio che si cerca di instaurare. Realizzare un reattore a fusione rappresenta dunque una delle sfide scientifiche e ingegneristiche più ambiziose del nostro tempo. Un reattore a fusione difatti non è un dispositivo monolitico, ma un sistema integrato di più componenti, ciascuno dei quali deve svolgere un ruolo critico nel garantire il funzionamento sicuro ed efficiente dell'intero sistema.



In questo capitolo, esploreremo i componenti principali di un reattore a fusione quali: Sistema magnetico, Divertore, Vacuum vessel e Sistemi di raffreddamento.

### *2.2.1 Sistema magnetico*

Il sistema magnetico rappresenta uno degli elementi più critici nei reattori a fusione a confinamento magnetico, poiché è responsabile della generazione dei campi magnetici necessari per confinare, stabilizzare e controllare il plasma. La configurazione e il design delle bobine magnetiche variano significativamente a seconda del tipo di reattore: Tokamak, Stellarator o PROTO-SPHERA.

Nei **Tokamak**, il sistema magnetico è composto da tre sottosistemi principali: il solenoide centrale (CS), le bobine del campo toroidale (TF) e le bobine del campo poloidale (PF).

Il solenoide centrale funziona in modo pulsato e genera induttivamente la corrente toroidale nel plasma, agendo come il primario di un trasformatore e creando un campo magnetico poloidale che contribuisce al confinamento e alla stabilizzazione del plasma [17].

Le bobine del campo toroidale, disposte simmetricamente su piani verticali attorno all'asse di simmetria della macchina, generano un campo magnetico toroidale (a forma di ciambella) che avvolge il plasma, contribuendo alla sua stabilità. Queste bobine operano in regime continuo e rappresentano uno dei componenti più costosi del reattore, costituendo circa il 30% del costo totale in ITER [38].

Le bobine del campo poloidale, disposte su piani orizzontali, generano un campo magnetico poloidale che contribuisce all'equilibrio e al controllo del plasma, con alcune bobine progettate per compensare instabilità come lo spostamento verticale. Operano in regime variabile, con dinamiche diverse a seconda della loro funzione [17].

Negli **Stellarator**, il sistema magnetico è più complesso rispetto ai Tokamak, poiché non si basa su una corrente toroidale indotta nel plasma. Le bobine magnetiche hanno

una geometria tridimensionale e sono progettate per generare un campo magnetico intrinsecamente stabile. Le bobine modulari, con una forma elicoidale o toroidale modulata, creano un campo magnetico tridimensionale che elimina la necessità di una corrente toroidale nel plasma, permettendo un funzionamento in stato stazionario. Il campo magnetico generato dalle bobine è progettato per essere naturalmente stabile, riducendo il rischio di instabilità del plasma e rendendo gli Stellarator adatti per operazioni di lunga durata senza interruzioni. [37].

In **PROTO-SPHERA**, il sistema magnetico è diverso rispetto ai Tokamak e agli Stellarator, poiché non utilizza un conduttore centrale solido. Il plasma stesso funge da conduttore centrale, generando un campo magnetico poloidale che elimina la necessità di una colonna centrale solida, semplificando il design del dispositivo. Bobine esterne generano un campo magnetico aggiuntivo per stabilizzare il plasma e mantenere la configurazione "jet + torus". La corrente nel plasma centrale e nelle bobine esterne crea una configurazione magnetica autorganizzata, che favorisce la stabilità del plasma [39].

Le bobine magnetiche sono spesso realizzate in materiali **superconduttori**, come il niobio-titanio (Nb-Ti) o il niobio-stagno ( $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ), per ridurre le perdite energetiche e aumentare l'efficienza. Questi materiali operano a temperature criogeniche, richiedendo sistemi di raffreddamento avanzati [38]. Inoltre, le bobine devono resistere a forze magnetiche intense e a sollecitazioni termiche e meccaniche, e sono progettate con materiali strutturali robusti, come acciaio inossidabile o leghe speciali [40].

### *2.2.2 Divertore*

Il **divertore** rappresenta uno degli elementi più cruciali nei reattori a fusione a confinamento magnetico, svolgendo funzioni essenziali come la gestione del calore, il controllo delle impurità e la protezione delle pareti della camera di confinamento. La sua principale missione è agire come una "valvola di scarico" per il plasma, incanalando

particelle e calore in eccesso verso un'area specifica, lontana dalle pareti principali della camera, contribuendo così alla stabilità e all'efficienza del processo di fusione [41].

Fin dai primi esperimenti sui Tokamak negli anni '50, si osservò che il **vessel**, nonostante fosse isolato e sottovuoto, non era sufficiente a mantenere il plasma libero da impurità. Un primo miglioramento fu ottenuto introducendo una struttura chiamata **limiter**, posizionata all'interno della camera per lambire il bordo del plasma. Il limiter intercettava le linee magnetiche esterne, mantenendo l'ultima superficie di flusso chiusa separata dalla parete della camera. Tuttavia, i flussi di particelle ad alta energia che colpivano il limiter causavano **sputtering**, un fenomeno in cui gli atomi vengono strappati dalla superficie del materiale, generando impurità che contaminavano il plasma. Per mitigare questo problema, i limiter furono realizzati in materiali resistenti come tungsteno, molibdeno o grafite, e furono introdotti sistemi di pompaggio, come le pompe a criocondensazione, per rimuovere le impurità [7].

I limiti del limiter portarono allo sviluppo del **divertore magnetico**, una struttura che sfrutta una configurazione magnetica per dirigere le linee magnetiche esterne del plasma verso una zona specifica, chiamata **target** o **piatto collettore**. Questo avviene grazie a una configurazione delle linee di campo magnetico che crea un **punto X**, dove le linee di campo si aprono e guidano le particelle cariche (ioni ed elettroni) verso il target [17].

Il divertore poloidale, in particolare, utilizza bobine di espansione di flusso poste vicino alla superficie del plasma, con una corrente parallela ma opposta a quella del plasma, per generare un campo magnetico locale opposto. Questo crea un **separatrix magnetico (ultima superficie di flusso chiusa)**, migliorando il confinamento e riducendo la dispersione di energia [7].

Tra i ruoli del divertore ci sono dunque:

**La gestione del calore:** Il divertore assorbe e gestisce il calore in eccesso generato dal plasma, incanalandolo verso un sistema di raffreddamento. Un refrigerante (ad

esempio, acqua) trasporta il calore verso uno scambiatore di calore, dove viene utilizzato per generare vapore e produrre energia elettrica [17] [35].

**Il controllo delle impurità:** Il divertore rimuove le impurità, come atomi pesanti provenienti dalle pareti della camera o dal processo di sputtering, neutralizzandole e convogliandole verso un sistema di pompaggio che le espelle dal reattore [42].

**La protezione delle pareti della camera:** Concentrando il flusso di calore e particelle in un'area specifica, il divertore riduce l'erosione e il danneggiamento delle pareti principali della camera di confinamento, migliorando la durata e l'affidabilità del reattore [43][44].

### *2.2.3 Vacuum vessel*

Il vacuum vessel, o camera a vuoto, rappresenta un componente essenziale nei reattori a fusione, poiché garantisce l'ambiente sottovuoto necessario al confinamento del plasma. La sua funzione principale è quella di ridurre le interazioni tra il plasma e le particelle neutre residue, minimizzando le perdite di energia e contribuendo alla stabilità del sistema. Sebbene la funzione di base sia comune a tutte le configurazioni, il design del vacuum vessel varia a seconda della tipologia di reattore, come Tokamak, Stellarator e PROTO-SPHERA.

Nei Tokamak, la camera a vuoto assume una forma toroidale ed è generalmente composta da più settori assemblati in loco. Il rivestimento interno è realizzato in materiali resistenti alle alte temperature e alle radiazioni, come leghe di nichel e acciaio inossidabile. Il blanket, che riveste la parete interna, svolge un ruolo cruciale nella protezione strutturale e nella produzione di trizio, fondamentale per il ciclo di combustibile [7].

Negli Stellarator, la struttura della camera a vuoto è più complessa a causa della configurazione tridimensionale del campo magnetico. Il vessel è realizzato in moduli

prefabbricati assemblati con estrema precisione per garantire resistenza a sollecitazioni termiche e meccaniche elevate [37].

Nel caso di PROTO-SPHERA, il vacuum vessel ha un design cilindrico e ha subito diverse evoluzioni di materiale. Inizialmente, è stato utilizzato il vessel del tokamak START, realizzato in alluminio, con un diametro interno di 2 metri e uno spessore di 4 cm, donato dal Culham UKAEA Research Center nel 2004.[33] Successivamente, per migliorare la visibilità e il monitoraggio del plasma, il vacuum vessel è stato realizzato in polimetilmetacrilato (PMMA), noto anche come Plexiglas o acrilico, grazie alla sua trasparenza alla luce visibile.[45] Infine, l'ENEA ha commissionato alla Reynolds Polymer Technology la fornitura di un vessel in acrilico con elevata resistenza e chiarezza ottica per il progetto PROTO-SPHERA.[46]

Sebbene il PMMA non possa sopportare temperature elevate come i metalli, PROTO-SPHERA opera a temperature relativamente basse rispetto ad altri dispositivi di fusione. Il che lo rendeva compatibile con il vuoto operativo di PROTO-SPHERA.

La struttura include numerose porte per il pompaggio del vuoto e, per prevenire deformazioni e migliorare la stabilità, sono state integrate costole di irrigidimento [47].

Dal punto di vista tecnologico, i vacuum vessel nei reattori a fusione devono soddisfare requisiti in termini di materiali e sistemi di gestione termica. Gli acciai inossidabili e leghe di nichel sono preferiti per la loro resistenza alle alte temperature, alla corrosione e alle radiazioni. Inoltre, nei sistemi avanzati come ITER, sono previsti circuiti di raffreddamento attivi per dissipare il calore generato dal plasma e dalle interazioni neutroniche [48].

Confrontando le tre configurazioni principali, il vacuum vessel nei Tokamak è progettato per resistere a forze magnetiche e termiche intense, supportando elementi cruciali come il blanket e il divertore [17]. Negli Stellarator, la camera a vuoto deve adattarsi alla complessa geometria delle linee di campo magnetico, mentre in PROTO-

SPHERA il design è stato ottimizzato per il confinamento di un plasma senza conduttore centrale solido. [47].

#### *2.2.4 Sistemi di raffreddamento*

I sistemi di raffreddamento sono componenti fondamentali nei reattori a fusione, poiché garantiscono la gestione termica del plasma e dei componenti strutturali, prevenendo il surriscaldamento e il danneggiamento dei materiali. Il calore nei reattori a fusione è generato principalmente da due fonti: il plasma e le reazioni nucleari. Il plasma, confinato magneticamente, raggiunge temperature dell'ordine di centinaia di milioni di gradi Celsius, emettendo energia sotto forma di radiazione elettromagnetica e particelle cariche. Questa energia viene trasferita alle pareti del vacuum vessel e ai componenti interni, come il divertore e il blanket, attraverso processi di convezione, conduzione e radiazione [17]. Inoltre, le reazioni di fusione tra deuterio e trizio producono neutroni ad alta energia (14.1 MeV), che, interagendo con i materiali del blanket, generano ulteriore calore attraverso reazioni nucleari secondarie [49].

Il calore generato dal plasma e dai neutroni viene gestito attraverso sistemi di raffreddamento integrati, che utilizzano refrigeranti come acqua, elio o sali fusi. Questi refrigeranti circolano in condotti all'interno delle pareti del vacuum vessel, del divertore e del blanket, assorbendo il calore e trasferendolo a uno scambiatore di calore. Qui, il calore viene utilizzato per generare vapore ad alta pressione, che alimenta una turbina per la produzione di energia elettrica [41]. Nei reattori di ultima generazione, i sistemi di raffreddamento sono progettati per gestire carichi termici estremi, fino a  $10 \text{ MW/m}^2$ , utilizzando materiali avanzati e tecnologie criogeniche per ottimizzare l'efficienza e la durata dei componenti [38].

In sintesi, i sistemi di raffreddamento svolgono un ruolo cruciale nel garantire la stabilità termica e la sostenibilità energetica dei reattori a fusione. Il calore, generato

dal plasma e dalle reazioni nucleari, viene gestito attraverso circuiti di raffreddamento avanzati e trasferito a scambiatori di calore per la produzione di energia elettrica, contribuendo al successo della fusione nucleare controllata [50]. Studi recenti hanno evidenziato che l'efficienza dei sistemi di raffreddamento è direttamente correlata alla capacità di gestire carichi termici estremi, garantendo al contempo la durata e l'affidabilità dei materiali strutturali [51]. Inoltre, l'integrazione di tecnologie criogeniche e l'uso di refrigeranti innovativi, come l'elio e i sali fusi, hanno permesso di ottimizzare il trasferimento di calore e ridurre i costi operativi.

## LA TECNOLOGIA DEL VUOTO

### 3.1 Generalità sul vuoto

La tecnologia del vuoto si riferisce alla creazione e al mantenimento di un ambiente in cui la pressione è inferiore a quella atmosferica, con caratteristiche fisiche che variano in modo significativo a seconda del grado di rarefazione raggiunto [52]. Nel Sistema Internazionale, la pressione è misurata in Pascal (Pa), sebbene in contesti tecnici siano spesso utilizzate unità alternative come il torr, il mbar o il psi, legate a specifiche applicazioni e/o all'area geografica in cui ci si trova [53].

La classificazione del vuoto si articola in:

- **Basso vuoto** ( $10^5$ – $10^2$  Pa),
- **Vuoto medio** ( $10^2$ – $10^{-1}$  Pa),
- **Alto vuoto** ( $10^{-1}$ – $10^{-6}$  Pa),
- **Ultra-alto vuoto** ( $<10^{-6}$  Pa) [54].

In natura, condizioni di vuoto estremo si riscontrano nello spazio interstellare, dove la densità particellare può scendere a circa 1 atomo/ $m^3$ , mentre in ambito tecnologico, vuoti spinti sono necessari per minimizzare le interazioni tra particelle e superfici, come negli interferometri per onde gravitazionali o nei reattori a fusione [55].



### *La distribuzione statistica delle velocità di un gas ideale*

In condizioni di bassa pressione, il comportamento di un gas è descritto dalla teoria cinetica, con la **distribuzione di Maxwell-Boltzmann** che definisce la probabilità delle velocità molecolari, principalmente in funzione della temperatura. La distribuzione è data dalla formula:

$$f(\mathbf{v}, T) = 4\pi \left( \frac{M}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{Mv^2}{2kT}}$$

dove: M è la massa molecolare

k la costante di Boltzmann

T la temperatura [52].

Da questa distribuzione si derivano la velocità media ( $v_m = \sqrt{\frac{8kT}{\pi M}}$ ) e la velocità quadratica media ( $v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{M}}$ ), parametri essenziali per calcolare la pressione e il flusso di particelle. La pressione, definita come la forza per unità di superficie, è determinata dall'impulso trasferito dalle particelle alle pareti del recipiente, mentre il flusso rappresenta il numero di particelle che incidono su una superficie nell'unità di tempo. [55]

### *Il trasporto e le proprietà di trasporto*

Il trasporto di gas in regime di vuoto è governato dal **cammino libero medio** ( $\lambda$ ), definito come la distanza media percorsa da una particella generica tra due collisioni successive. Questo parametro è espresso dalla relazione:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi D^2 N}$$

dove D è il diametro molecolare e N la densità particellare.

A pressioni inferiori a  $10^{-3} Pa$ ,  $\lambda$  può superare il metro, dominando il **flusso molecolare**, in cui le collisioni con le pareti del recipiente sono più frequenti rispetto a quelle tra le molecole stesse [54].

In tale regime, la portata  $Q$  attraverso un condotto è proporzionale alla differenza di pressione ( $\Delta p$ ) e a un valore  $C$  che prende il nome di **conduttanza**.

$$Q = C\Delta p \quad (\text{legge di Knudsen}).$$

Questa legge è analoga alla legge di Ohm, dove la differenza di pressione corrisponde alla differenza di potenziale e la portata alla corrente elettrica. È nota, difatti, anche come la legge di Ohm della fluidodinamica [55].

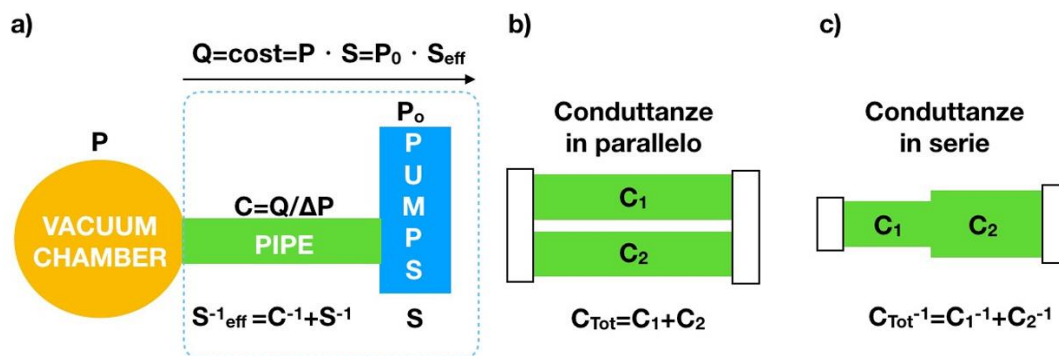


Figura 15: a) Definizione di conduttanza e di velocità di pompaggio efficace; b) conduttanze in parallelo; c) conduttanze in serie

Per geometrie complesse, la conduttanza equivalente si calcola sommando i contributi in serie ( $C_{\text{eq}} = C_1 + C_2$ ) o parallelo ( $1/C_{\text{eq}} = 1/C_1 + 1/C_2$ ). [55].

### Velocità di pompaggio efficace

Un parametro cruciale per valutare le prestazioni di un sistema di vuoto è la **velocità di pompaggio efficace** ( $S_{\text{eff}}$ ), che rappresenta la capacità effettiva del sistema di evacuare il gas dalla camera da vuoto, tenendo conto sia della velocità nominale della pompa ( $S$ ) che delle limitazioni imposte dai condotti di collegamento e dalle conduttanze ( $C$ ). La relazione che descrive questo fenomeno è:

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S}$$

dove:

- $S_{\text{eff}}$  è la velocità di pompaggio efficace, misurata in metri cubi al secondo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) o litri al secondo ( $\text{L}/\text{s}$ ).

- $C$  è la conduttanza del condotto, anch'essa misurata in  $\text{m}^3/\text{s}$  o  $\text{L}/\text{s}$ .
- $S$  è la velocità nominale della pompa, misurata in  $\text{m}^3/\text{s}$  o  $\text{L}/\text{s}$ .

Questo approccio semplifica la progettazione di sistemi complessi, evidenziando come limiti geometrici possano ridurre l'efficienza delle pompe [53].

L'evacuazione del gas "di volume" è un processo relativamente rapido e, superato il vuoto medio, il pompaggio delle camere subisce un rallentamento dettato dalla frequenza con cui le pareti rilasciano molecole di gas. La quantità di gas rilasciata dalle pareti determina la pressione finale di lavoro a partire da condizioni di vuoto medio. È quest'ultimo fenomeno che determina la pressione finale ottenibile.

#### *Effetti di superficie: adsorbimento, condensazione, assorbimento*

Tra tutte le molecole che urtano la superficie di una camera da vuoto solo una certa frazione vi aderisce concorrendo a formare uno strato di ricopertura. Diremo allora che le molecole che aderiscono alla superficie sono state soggette al fenomeno di **adsorbimento**. Se poi le molecole del gas si legano debolmente con le molecole della stessa specie già adsorbite, allora concorrono a creare altri strati depositati sulla parete: parleremo in tal caso di fenomeno di **condensazione**. In pratica si ha un cambiamento di fase dallo stato gassoso a quello liquido o solido. Infine, se le molecole del gas diffondono all'interno della matrice cristallina della parete o penetrano nelle sue porosità a tal punto da essere trattenute, allora parleremo di fenomeno di **assorbimento** (o più semplicemente assorbimento). In realtà pochi gas diffondono significativamente nei materiali solidi, fatta eccezione per l'idrogeno e l'elio per le loro dimensioni.

È possibile attuare il **desorbimento termico**, attivato da riscaldamento o radiazioni, per indurre il rilascio di gas precedentemente adsorbiti. Questo processo è fondamentale per eliminare i contaminanti e migliorare la qualità del vuoto, contribuendo così a ottimizzare le prestazioni del sistema. Il problema per il quale

facciamo il desorbimento è il **degassamento**, in quanto per vuoti sempre più spinti il rilascio di gas da una superficie solida o da un materiale all'interno di una camera a vuoto è sempre maggiore. Questo fenomeno diventa particolarmente critico perché anche quantità minime di gas possono compromettere il livello di vuoto desiderato. In un reattore a fusione, ad esempio, il degasaggio delle pareti a temperature comprese tra 200 e 450°C è fondamentale anche per rimuovere contaminanti come H<sub>2</sub> o CO [55]. Tecniche avanzate, come l'impiego di materiali getter (es. Ti, Zr), capaci di adsorbire selettivamente gas reattivi, sfruttano questo principio per garantire condizioni di vuoto stabili [52].

### 3.2 Pompe da vuoto

Il raggiungimento delle pressioni desiderate in un sistema di vuoto richiede l'utilizzo di pompe specializzate, ciascuna progettata per operare in specifici intervalli di pressione. Ogni tipo di pompa si distingue per la velocità di pompaggio, la pressione limite e il meccanismo di funzionamento. Spesso, l'impiego di una sola pompa non è sufficiente per raggiungere il grado di vuoto desiderato, rendendo necessaria l'integrazione di più tecnologie. Ad esempio, nei laboratori di ricerca, si lavora spesso

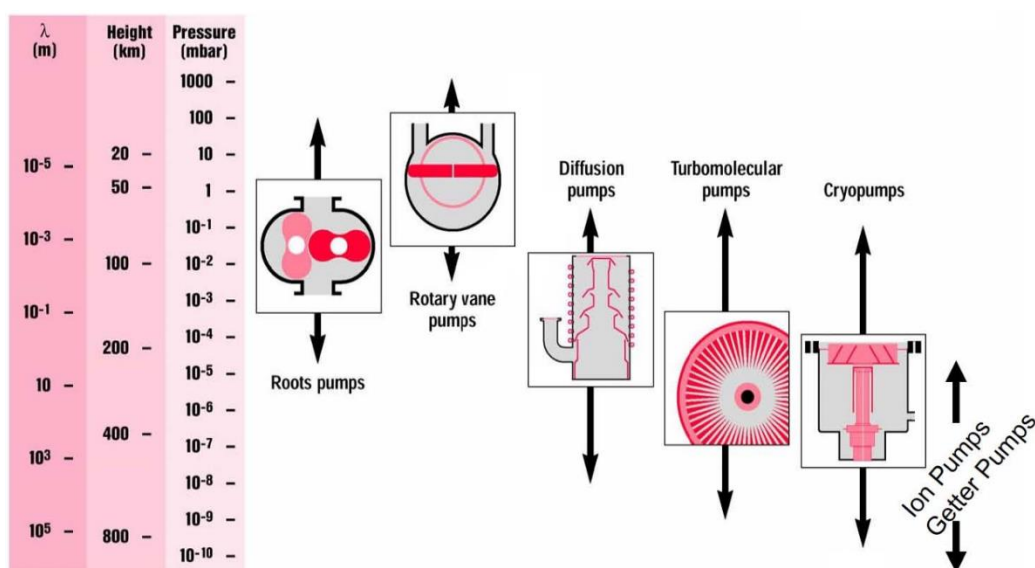


Figura 16: Nella prima e seconda colonna di sinistra sono riportati i valori del libero cammino medio molecolare e dell'altezza atmosferica corrispondenti a quei range di pressione

con livelli di vuoto fino a  $10^{-5}$  mbar, raggiungibili con una combinazione di pompe meccaniche primarie (fino a  $10^{-3}$  mbar) e pompe turbomolecolari secondarie [53].

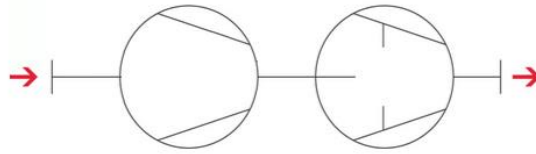


Figura 17: *Pompa da alto vuoto (come una turbomolecolare o una a diffusione) in serie con una rotativa a palette*

### 1. Pompe Rotative (Primarie)

Le pompe rotative a palette sono utilizzate per raggiungere pressioni comprese tra  $10^5$  e  $10^{-1}$  Pa, condizioni di basso e medio vuoto. Queste pompe sfruttano un rotore eccentrico alloggiato in una cavità cilindrica, dotato di due palette mobili mantenute in contatto con le pareti interne da molle. Durante la rotazione, il gas viene aspirato in una camera che si espande, isolato e poi compresso prima di essere espulso attraverso una valvola di scarico. La lubrificazione è garantita da oli speciali a bassa tensione di vapore, che assicurano tenuta e riducono l'attrito. Tuttavia, presentano alcune limitazioni, come la solubilità dei gas negli oli e la condensazione di vapori dentro al rotore [56].

Per superare queste limitazioni, le pompe a palette sono spesso dotate di una valvola a gas ballast. Questa valvola consente di gestire vapori d'acqua, senza che si condensino all'interno della pompa. [54] Si dice che si "zavorra" il sistema miscelando il fluido all'interno con aria proveniente dall'esterno in modo da spostarci dalle condizioni di condensazione di vapori. [56].

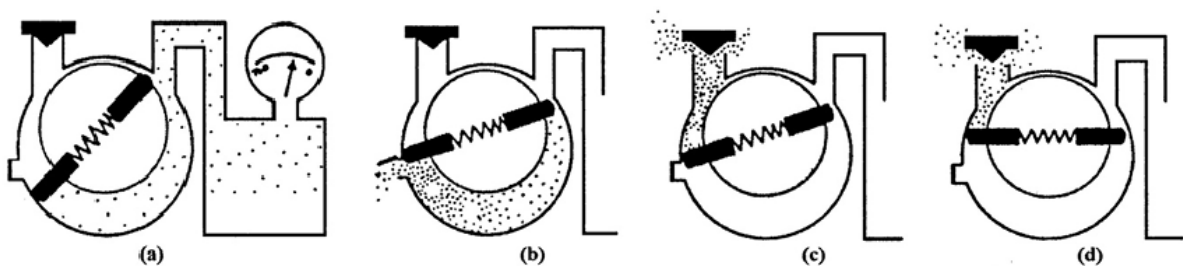


Figura 18: *Ciclo di una pompa da vuoto a palette con gas ballast*

In generale, le pompe a palette sono particolarmente adatte per il vuoto grezzo. La loro capacità di gestire vapori evitando la condensazione all'interno della pompa. Queste caratteristiche le rendono utili in vari contesti industriali e di ricerca, dove è richiesta una buona gestione del vuoto senza compromettere l'efficienza della pompa. [54].

## 2. Pompe Roots

Le pompe Roots sono pompe a pistoni rotanti, caratterizzate da due rotori simmetrici di forma bilobata che ruotano in direzioni opposte all'interno di una camera muoversi l'uno accanto all'altro e lungo la parete dell'alloggiamento con poco gioco e senza contatto reciproco. Queste pompe non sono in grado di raggiungere pressioni molto basse da sole, ma vengono utilizzate in combinazione con pompe di sostegno (ad esempio, pompe rotative a palette) per estendere il loro campo di lavoro al vuoto medio ( $1-10^{-3}$  mbar). Il loro funzionamento si basa sul trasporto di gas dalla zona di aspirazione a quella di scarico attraverso una compressione interna (come quelli a palette). [54].

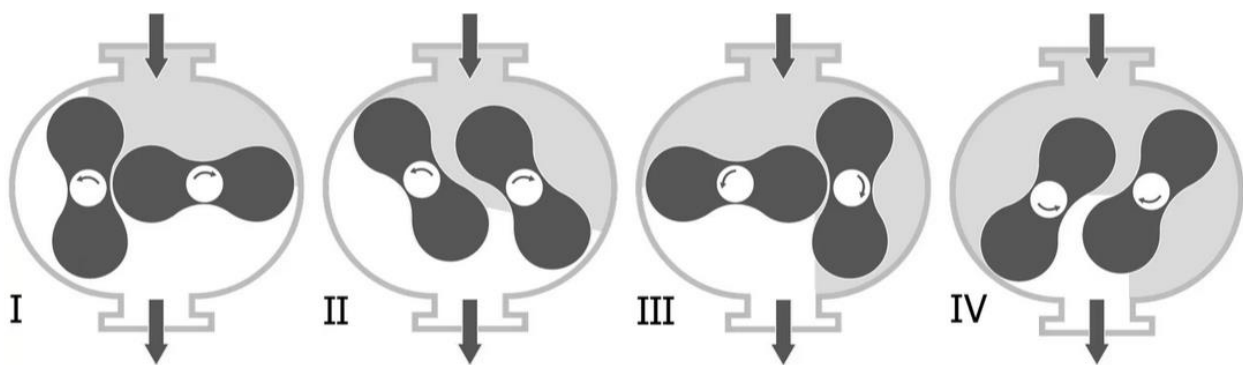


Figura 19: *Ciclo di una pompa roots*

### 3. Pompe a Diffusione

Nel regime di alto e ultra-alto vuoto ( $<10^{-1}$  Pa), le pompe a diffusione utilizzano getti di vapore (oli speciali o mercurio con tensione di vapore  $\sim 10^{-8}$  Pa) attraverso ugelli per trasferire quantità di moto alle molecole, dirigendole dalla zona di aspirazione a quella di scarico, verso una pompa primaria. Agisce secondo

la relazione  $\frac{p_2}{p_1} = e^{-\frac{\rho v L}{D}}$ , dove  $\rho$  è la densità del vapore e  $D$  è un coefficiente dipendente dai pesi molecolari. Presenta una minore efficienza per gas leggeri come idrogeno ed elio. [53] [54]

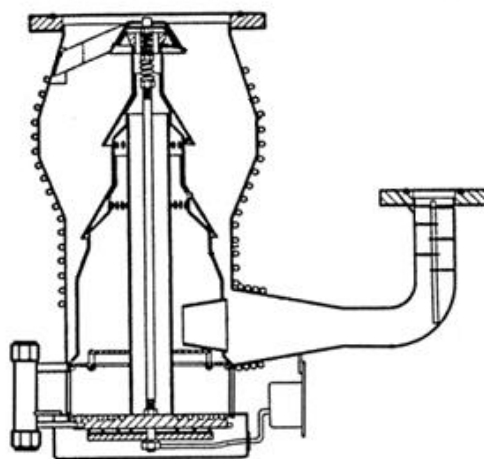


Figura 20: *Schema di una pompa a diffusione*

### 4. Pompe Turbomolecolari

Le pompe turbomolecolari impiegano palette rotanti a velocità periferiche di 300–400 m/s per generare gradienti di pressione tramite diffusione differenziale, raggiungendo pressioni fino a  $10^{-7}$  Pa con portate costanti [57]. Queste pompe combinano stadi a turbina con velocità rotazionali elevate (fino a 72.000 rpm) per trasferire impulso alle molecole di gas tramite collisioni. Grazie a cuscinetti ibridi o magnetici, raggiungono rapporti di compressione molto elevati, fino a  $10^9$  per gas pesanti come l'azoto, rendendole adatte per l'ultra-alto vuoto ( $10^{-7}$ – $10^{-11}$  mbar). Le pompe turbomolecolari sono ampiamente utilizzate in

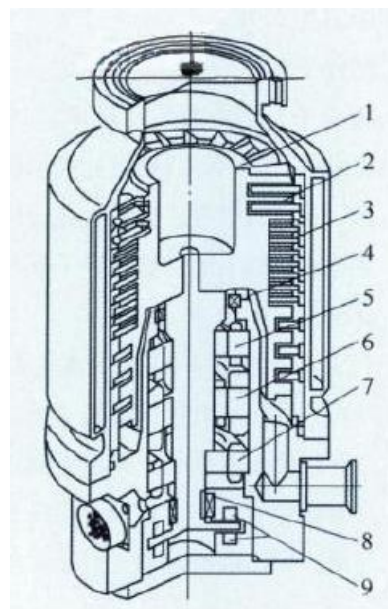


Figura 21: *Schema di una pompa turbomolecolare*

Le pompe turbomolecolari sono ampiamente utilizzate in

applicazioni di ricerca avanzata, come la fusione nucleare, dove è richiesta un'atmosfera priva di contaminanti [54].

## 5. Pompe Criogeniche

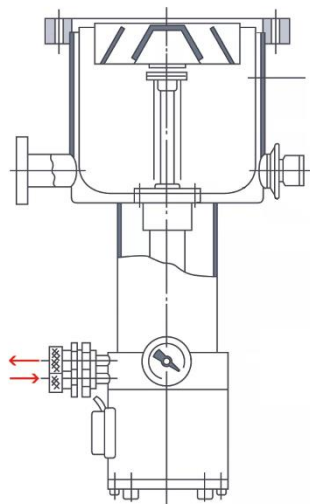


Figura 22: *Schema di una pompa a criogenica*

Le pompe criogeniche sfruttano superfici raffreddate a temperature criogeniche per condensare gas. La pressione ultima  $p_f$  è legata alla tensione di vapore saturo  $p_s$  dalla relazione  $p_f = p_s(T_r/T_p)^{(1/2)}$ , dove  $T_r$  e  $T_p$  sono le temperature del recipiente e della parete fredda [56].

Un primo stadio, raffreddato a 50–80 K, trattiene gas come  $H_2O$  e  $CO_2$ , mentre un secondo stadio, raffreddato a 10 K, condensa gas come  $N_2$ ,  $O_2$  e Ar.

Per gas leggeri come  $H_2$  e He, viene utilizzato un rivestimento di carbone attivo, che adsorbe le molecole tramite forze di Van der Waals. Queste pompe sono particolarmente adatte per applicazioni in cui è richiesta un'elevata velocità di pompaggio e un vuoto estremamente pulito, come nella produzione di semiconduttori, nella ricerca spaziale [54] e nella fusione nucleare.

## 6. Pompe a Getter e Ioniche

Le pompe a getter e ioniche combinano adsorbimento chimico (per gas reattivi) e ionizzazione (per gas nobili). Nelle pompe ioniche il film di titanio, sublimato a  $1500^\circ C$ , reagisce con  $H_2$ ,  $O_2$ , e  $CO$ , formando composti stabili, mentre gli ioni di gas nobili (creati attraverso una scarica elettrica) vengono intrappolati nel reticolo cristallino del catodo. Nelle pompe getter invece i gas attivi ( $H_2$ ,  $O_2$ ) vengono assorbiti su superfici porose attivate termicamente. [56]



Ogni tecnologia di pompaggio offre vantaggi specifici, la scelta della pompa dipende dalle esigenze del sistema, dalla tipologia di gas da pompare e dalle condizioni operative. La comprensione dei principi di funzionamento e delle caratteristiche tecniche di ciascuna pompa è essenziale per progettare sistemi di vuoto efficienti e affidabili.

### 3.3 Punto di funzionamento

I sistemi da vuoto sono fondamentali in ambito scientifico e industriale per creare ambienti a bassa pressione. La loro efficacia dipende non solo dalle pompe, ma dall'interazione tra tutti i componenti, come conduttanze, valvole e superfici del vessel. Due categorie principali distinguono i sistemi: *dinamici* (pompaggio continuo) e *statici* (sigillati dopo evacuazione) [58].

Il mantenimento del vuoto in un sistema è influenzato da fenomeni quali perdite, diffusione e degassamento, contributori critici alla pressione residua [59].

**Le perdite:** Si riferiscono a infiltrazioni di gas dall'esterno verso l'interno del sistema a causa di fessure, giunzioni non perfettamente sigillate. Questo è un problema di tenuta che può essere risolto migliorando le guarnizioni o la costruzione del sistema.

**Diffusione:** È il processo attraverso il quale i gas penetrano attraverso i materiali solidi, anche se privi di aperture visibili. Ad esempio, alcuni gas possono attraversare lentamente pareti metalliche o giunti O-ring in elastomeri, contribuendo all'aumento della pressione nel sistema nel tempo.

**Degassaggio:** È il rilascio di gas dalle superfici interne del sistema prima intrappolati nei materiali. Questo fenomeno è particolarmente rilevante a seconda della porosità del materiale in quanto i gas vengono rilasciati gradualmente e possono compromettere la qualità del vuoto.

Mentre le perdite riguardano principalmente l'ingresso di gas dall'esterno, la diffusione e il degassaggio sono fenomeni interni legati alle proprietà dei materiali.

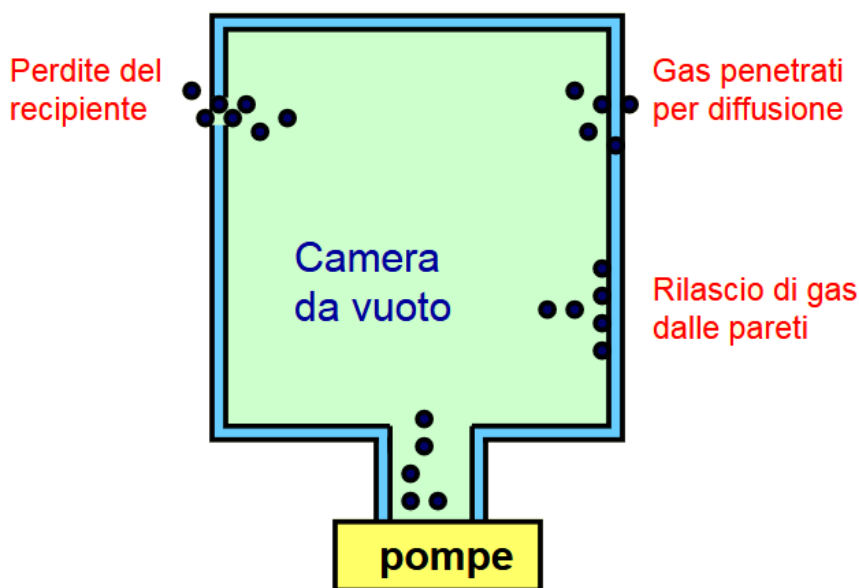


Figura 23: Schema di un sistema di produzione del vuoto, con focus sulle "perdite"

La figura precedente illustra il sistema da vuoto più semplice realizzabile, composto da una camera da vuoto (*vessel*), una conduttura che abbiamo detto essere una conduttanza (ossia una resistenza all'aspirazione del fluido) e una pompa, responsabile della creazione del vuoto all'interno della camera.

Nei sistemi da vuoto, è generalmente presente anche un altro componente essenziale: le valvole, che regolano i flussi di gas e, di conseguenza, la pressione all'interno del *vessel*. Il processo di evacuazione genera un gradiente di pressione che deve essere monitorato per evitare inefficienze della pompa e altri problemi operativi [60].

Com'è che si vede se la pompa sta lavorando più o meno efficacemente? Osservando il suo punto di funzionamento rispetto alla curva di pompaggio fornita dal produttore. Questo parametro è fondamentale per garantire che il sistema operi correttamente, raggiungendo la pressione desiderata e gestendo in modo adeguato il flusso di gas. Il punto di funzionamento rappresenta la pressione di regime che il sistema stabilisce in condizioni stabili, quando il flusso di gas che entra nel sistema (ad esempio, a causa di

perdite, degassaggio o altre sorgenti) e capacità della pompa di rimuovere quel gas si bilanciano.

La sua determinazione richiede la comprensione dei meccanismi di pompaggio, delle caratteristiche del sistema e delle dinamiche dei gas, elementi riflessi nella curva di pompaggio della pompa e nelle specifiche del sistema stesso [58].

Identificare con precisione il punto di funzionamento è essenziale per evitare inefficienze o sovraccarichi. A tal fine, si possono adottare due approcci: uno analitico e uno grafico

Il **metodo analitico** si basa su un approccio matematico per determinare il punto di funzionamento, sfruttando la relazione tra la pressione di regime e la velocità di pompaggio effettiva del sistema.

Partendo dall'equazione fondamentale per il bilancio dei flussi in un sistema da vuoto:

$$\frac{dP}{dt} = -\left(\frac{S_{eff}}{V}\right)P + \frac{Q_f}{V}$$

Dove:

- $P$  è la pressione nel sistema (mbar),
- $t$  è il tempo,
- $S_{eff}$  è la velocità di pompaggio effettiva (L/s),
- $V$  è il volume del sistema (L),
- $Q_f$  è la portata di degassamento o il flusso di gas che entra nel sistema (mbar · L/s).

Come già discusso, la velocità di pompaggio effettiva  $S_{eff}$  è determinata dalla velocità nominale della pompa  $S$  e dalla conduttanza del sistema  $C$ , secondo la relazione:

$$\mathbf{1/S_{eff} = 1/S + 1/C}$$

Ricordando che, in condizioni di regime, il sistema si trova in stato stazionario, la pressione non varia più nel tempo poiché il flusso di gas in entrata (dovuto a degassaggio, diffusione e altre sorgenti) è bilanciato da quello rimosso dalla pompa. Il bilancio dei flussi porta quindi all'espressione della pressione di regime:

$$P_{\text{regime}} = \frac{Q_f}{S_{\text{eff}}}$$

Questa formula evidenzia che la pressione finale del sistema dipende direttamente dal rapporto tra il degassamento  $Q_f$  e la velocità effettiva di pompaggio  $S_{\text{eff}}$ . Pertanto, per ottenere la pressione di lavoro desiderata, è fondamentale che il sistema abbia una velocità di pompaggio sufficientemente alta rispetto al carico di gas presente [59].

Il **metodo grafico** sfrutta invece la curva di pompaggio della pompa e il carico di gas del sistema andando a trovare il punto di lavoro come intersezione di queste due.

La curva di pompaggio, che il produttore della pompa fornisce, descrive la capacità di pompaggio della pompa in funzione della pressione. La curva indica come la portata di pompaggio diminuisca al crescere della pressione, mostrando quindi l'efficienza della pompa a diverse pressioni di lavoro [61].

Per determinare il punto di funzionamento con il metodo grafico, si procede come segue:

1. Si traccia la curva di pompaggio della pompa, che è una rappresentazione della portata di pompaggio  $S$  in funzione della pressione  $P$  all'interno del sistema.
2. Si determina il carico di gas del sistema, o Throughput, che è una funzione del degassamento  $Q_f$ , della pressione  $P$  e delle conduttanze  $C$ . Questo può essere rappresentato come  $Q_{\text{tot}}(P) = Q_f + C \cdot P$ .

In realtà, sulla curva non si rappresenta proprio il carico totale, ma quest'ultimo normalizzato rispetto alla pressione in modo che possa essere confrontato con la velocità di pompaggio  $S$

$$\frac{Q_{\text{tot}}}{P} = \frac{Q_f}{P} + C$$

Ricordiamo ancora che la conduttanza  $C$  è in realtà una conduttanza equivalente frutto dell'impianto a cui è collegata la pompa

3. Si cerca l'intersezione tra la curva della pompa e la curva del carico di gas. Il punto di intersezione rappresenta la pressione di lavoro (a regime) del sistema.

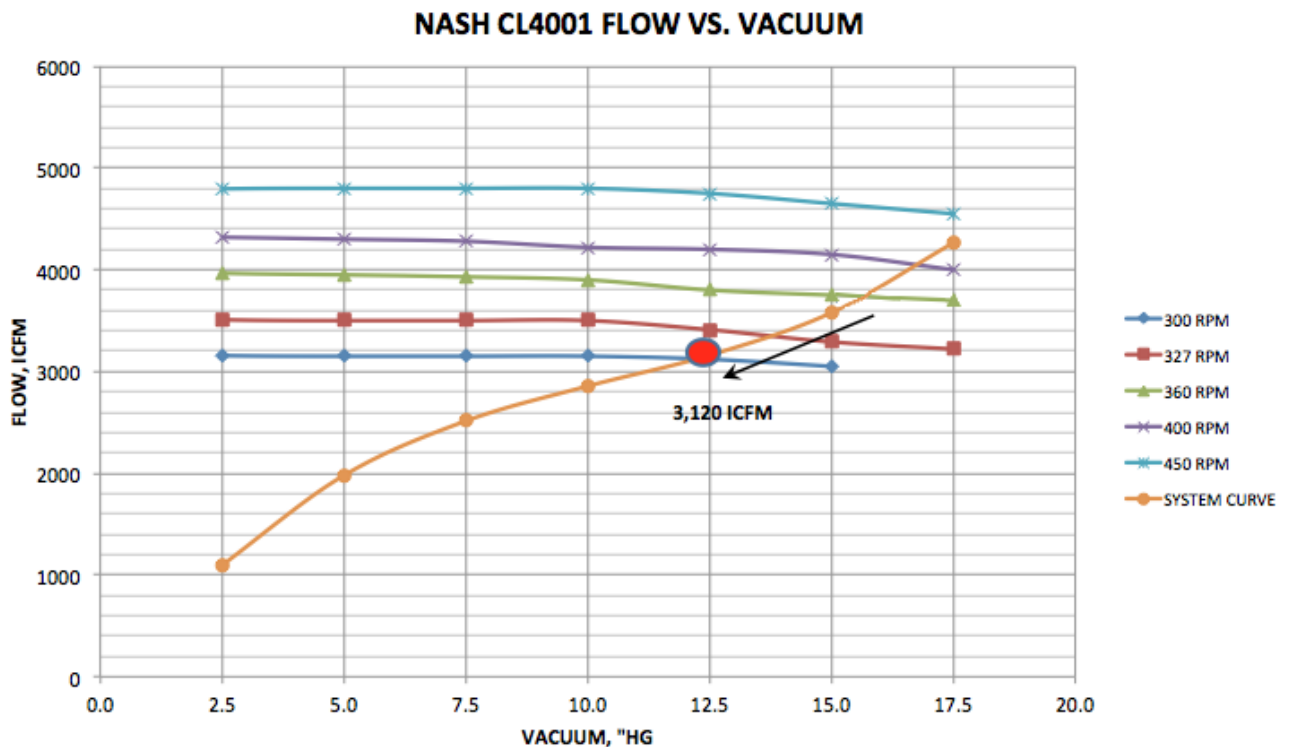


Figura 24: Stima del punto di funzionamento di un sistema da vuoto; ICFM (Cubic Feet per Minute - piedi cubi effettivi al minuto ( $\sim 0,472$  L/s)); "Hg (pollici di mercurio ( $\sim 3386$  Pa) )

La difficoltà nell'usare il metodo grafico sta nella costruzione della curva del sistema che passa per la misurazione empirica per punti al variare della pressione, tra cui poi interpolare la curva. Le norme ASME PTC 9 e 10 indicano la procedura rigorosa riguardo la sua costruzione [62], quest'ultima è considerata attendibile fin quando fenomeni tipici del vuoto spinto come il desorbimento non diventano dominanti. A quel punto è possibile applicare dei correttivi, o affidarsi a norme ISO e AVS (american vacuum society) specifiche per il vuoto, o a modelli CFD avanzati.

Questo approccio grafico è particolarmente utile perché offre una visione immediata dell'interazione tra la pompa e il sistema. È particolarmente vantaggioso in fase di progettazione, quando si hanno a disposizione diverse curve di pompaggio relative a

modelli differenti della stessa macchina, permettendo così di individuare quella più adatta alle nostre esigenze.

Per ottimizzare le prestazioni del sistema e ridurre la pressione finale, si possono adottare diverse strategie:

1. Bake-out: Riscaldare le superfici interne per accelerare il rilascio dei gas adsorbiti [63].
2. Materiali a Basso Degassamento: Utilizzare materiali con bassa permeabilità ai gas. [64].
3. Rivestimenti Superficiali: Applicare rivestimenti come l'ossido anodico o strati metallici per ridurre l'adsorbimento superficiale [59].

### Tempo di Svuotamento

Un altro fattore importante da considerare in condizioni di progetto è il tempo di svuotamento.

Il tempo di svuotamento di un sistema da vuoto rappresenta il tempo necessario affinché il sistema raggiunga una determinata pressione finale, partendo da una condizione di pressione in ingresso. Questo tempo è fondamentale per comprendere l'efficienza e la rapidità con cui un sistema da vuoto può operare. Un modo efficace per descrivere il processo di svuotamento è partendo nuovamente dall'equazione differenziale:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{S_{\text{eff}}}{V}P + \frac{Q_f}{V}$$

Questa equazione descrive la variazione della pressione nel tempo in funzione di due contributi principali: il flusso di gas estratto dalla pompa ( $-\frac{S_{\text{eff}}}{V}P$ ) e il flusso di gas aggiunto al sistema dal degassamento ( $\frac{Q_f}{V}$ ). [58]

Quando il sistema raggiunge una condizione di equilibrio (ovvero  $dP/dt = 0$ ), si ottiene la pressione di regime  $P_{\text{regime}}$ :

$$P_{\text{regime}} = \frac{Q_f}{S_{\text{eff}}}$$

Da cui si evince la probabilità diretta e inversa di  $P_{\text{regime}}$  con  $Q_f$  e  $S_{\text{eff}}$  [59].

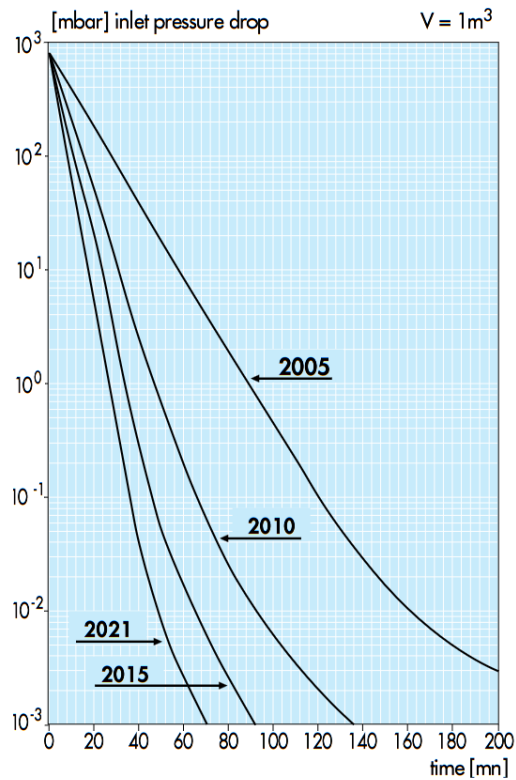


Figura 25: Grafico del tempo di svuotamento

La relazione evidenzia come il tempo dipenda linearmente dal volume  $V$  e inversamente dalla velocità efficace di pompaggio (quindi dalla velocità di pompaggio e dalla conduttanza) [60]. A pressioni molto basse, il degassamento diventa dominante rispetto al flusso di gas estratto, rendendo necessario un approccio progettuale che bilanci tutti i parametri coinvolti [58]. Nella pratica, in realtà, anche qui si fa riferimento ai grafici forniti dai produttori delle pompe relativi ai tempi di svuotamento

### 3.4 Il vuoto nella fusione termonucleare controllata

Prendendo i tokamak e in particolare ITER come esempio, il vacuum vessel, cuore di questi impianti, è costruito in acciaio inossidabile a basso tenore di carbonio, come AISI 316L ed EUROFER97, con spessori tra 40 e 60 mm. Le pareti interne sono rivestite in materiali refrattari come berillio e tungsteno per gestire elevati carichi termici. Le giunzioni saldate con electron beam welding assicurano una tenuta inferiore

Il tempo di svuotamento può essere ricavato dalla soluzione dell'equazione differenziale. In particolare, se si assume che il flusso di degassamento  $Q_f$  costante durante l'evacuazione, il tempo di svuotamento per ridurre la pressione da un valore iniziale  $P_0$  a una pressione finale  $P_{\text{finale}}$  è dato da:

$$t_{\text{svuotamento}} = \frac{V}{S_{\text{eff}}} \ln \left( \frac{P_0}{P_{\text{finale}}} \right)$$

La relazione evidenzia come il tempo dipenda linearmente dal volume  $V$  e inversamente dalla velocità efficace di

a  $10^{-9}$  mbar · L/s, mentre le flange utilizzano guarnizioni Helicoflex® in rame argento-placcato per resistere a temperature fino a 500°C [65].

I reattori operano in condizioni estreme e le condizioni di vuoto sono fondamentali per la buona riuscita degli esperimenti non solo durante la reazione di fusione ma anche prima e dopo. Di seguito analizzeremo le fasi principali indispensabili per il funzionamento del reattore

Nella fase di pre-vuoto, atta ad eliminare vapore acqueo e idrocarburi, il sistema deve raggiungere pressioni inferiori a  $10^{-7}$  mbar. Questo obiettivo è raggiunto mediante l'utilizzo pompe rotative a secco e turbomolecolari con velocità di pompaggio tra  $10^3$  e  $10^4$  L/s [66].

Nella fase di fusione, il vuoto si stabilizza tra  $10^{-5}$  e  $10^{-6}$  mbar con l'ausilio di criopompe raffreddate a 4.2 K, capaci di gestire velocità di pompaggio fino a  $10^6$  L/s per idrogeno e suoi isotopi [67]. Alternativamente è possibile utilizzare **Modulo di Criosorbimento** [68]; un dispositivo di adsorbimento criogenico che utilizza materiali porosi raffreddati per intrappolare gas in sistemi da vuoto spinto e ultra-alto vuoto. Esso può essere integrato o complementare alle pompe criogeniche. È particolarmente efficace per la rimozione di gas leggeri, l'elio He e il trizio T nel caso di specie.



Di seguito vengono presentati due layout semplificati di impianti da vuoto per reattori a fusione di tipo tokamak, tratti dalla letteratura [69][68]. Osservandoli entrambi, è possibile ottenere una visione d'insieme del funzionamento del sistema.

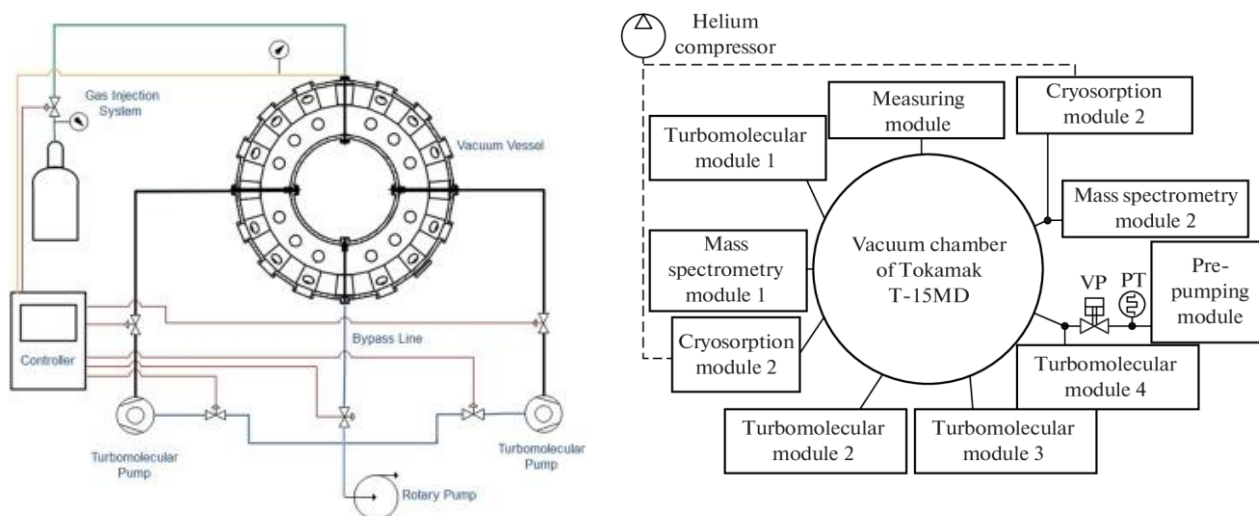


Figura 26: Impianti da vuoto per un reattore di tipo tokamak

Si può distinguere innanzitutto un gruppo di pre-pompaggio, composto da una o più pompe meccaniche, il cui compito è portare il vessel a un livello di vuoto basso o medio. Successivamente, entrano in funzione le pompe turbomolecolari, che, come si può notare nel secondo schema, sono distribuite intorno al tokamak in modo da creare un vuoto omogeneo lungo tutto il volume della camera. Queste pompe operano già prima dell'inizio del processo di fusione.

Quando la fusione ha inizio, entrano in azione le pompe criogeniche (che possiamo immaginare integrate nel modulo di Criosorbimento). Il loro ruolo, come detto, è quello di rimuovere elio e trizio mantenendo la pressione ottimale all'interno della camera da vuoto.

Infine, il sistema è regolato da un insieme di valvole gestite da un sistema di controllo, che si occupa di gestire la corretta esecuzione dell'intero processo.

Un elemento non rappresentato nei due layout, forse perché non è il suo scopo contribuire al vuoto all'interno della camera, è l'unità di aspirazione del divertore, il

cui compito è rimuovere le impurità derivanti, ad esempio, dall'erosione delle pareti della camera.

## LA PRODUZIONE DI ENERGIA

Questo capitolo esplora uno degli aspetti fondamentali per la produzione di energia dalla fusione nucleare: l'impianto di conversione dell'energia termica generata dal reattore in energia elettrica immessa nella rete. Verranno analizzati in dettaglio i meccanismi di produzione e trasferimento del calore nei reattori a fusione, con particolare attenzione ai componenti chiave e alle tecnologie impiegate.

Come visto nel primo capitolo, la reazione deuterio-trizio (D-T) rappresenta il processo principale attraverso cui viene liberata energia in questi sistemi. Tale reazione genera due prodotti fondamentali: i neutroni e le particelle alfa (He).

I neutroni, dotati di un'energia pari a 14,1 MeV, non essendo soggetti al confinamento magnetico, trasportano circa l'80% dell'energia rilasciata. Essi colpiscono la parete della camera da vuoto e penetrano nel blanket, provocandone il riscaldamento [50].

Le particelle alfa, invece, con un'energia di 3,5 MeV, vengono efficacemente confinate dai campi magnetici e trasferiscono il restante 20% dell'energia. Parte di questa energia viene depositata sulla parete della camera da vuoto, generando flussi termici localizzati molto intensi, mentre il resto viene gestito attraverso il divertore [72].

Il **blanket** è un componente chiave nei reattori a fusione, progettato non solo per produrre trizio attraverso reazioni nucleari con il litio, ma anche per convertire l'energia cinetica dei neutroni in calore. È proprio questo calore, ottenuto attraverso

lo scambio termico necessario per raffreddare il blanket, che costituisce la base per la produzione di energia elettrica.

Per garantire un trasferimento termico efficace, sono state sviluppate diverse strategie

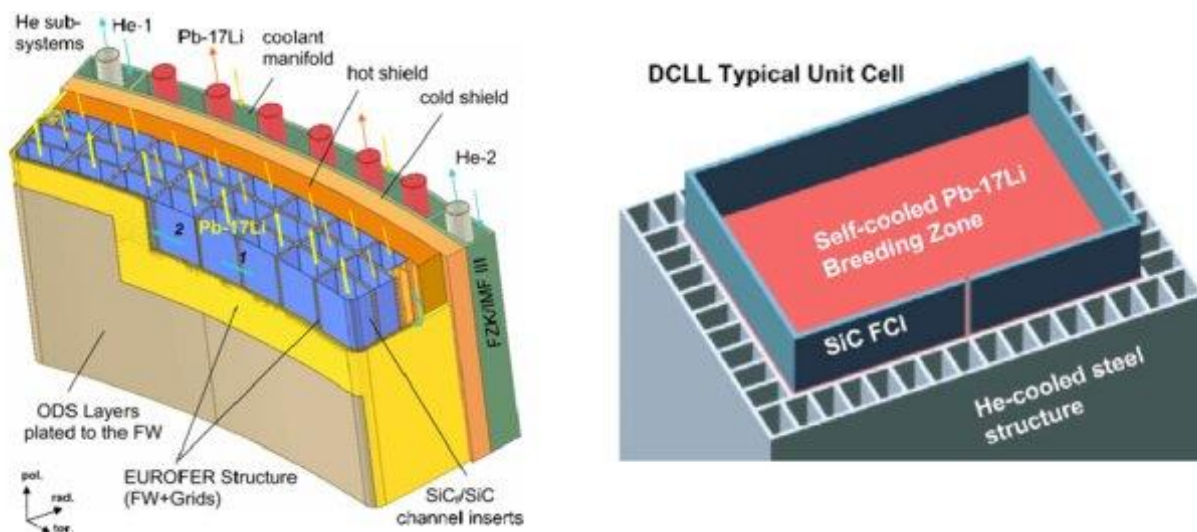


Figura 27: Unità di blanket

di raffreddamento del blanket, che prevedono l'uso di fluidi termovettori specifici.

Tra le soluzioni attualmente in fase di studio, quella più promettente risulta il **sistema a doppio circuito**: Separa il fluido di raccolta del calore (come il PbLi) dal blanket da un refrigerante secondario (ad esempio l'elio), che raffredda la sua struttura. Questa configurazione permette di operare a temperature fino a 700°C [73].

Il **divertore** svolge un ruolo essenziale nella gestione del calore e nell'estrazione delle impurità dal plasma. Progettato per resistere a carichi termici transienti estremamente elevati, deve affrontare flussi termici che possono raggiungere valori pari a 20 MW/m<sup>2</sup> in periodi brevissimi (0,1–1 ms) [74]. L'adozione di sistemi di raffreddamento a elio, come quello implementato nel dispositivo DEMO<sup>3</sup>, consente di operare a pressioni di

---

<sup>3</sup> ITER mira a dimostrare la produzione di energia da fusione, verrà seguito da DEMO (dimostrazione della produzione di elettricità)

circa 10 MPa e velocità di flusso pari a 100 m/s, garantendo la dissipazione di flussi termici fino a 15 MW/m<sup>2</sup> [75].

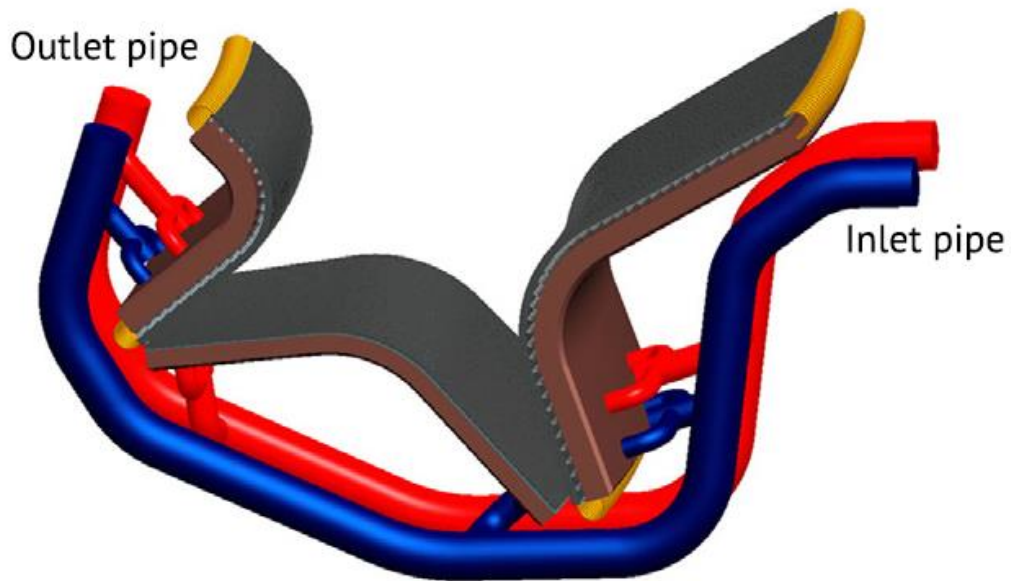


Figura 28: *Il blanket con i suoi condotti di raffreddamento*

Il trasferimento del calore al sistema di conversione energetica avviene attraverso circuiti primari appositamente progettati. L'elemento principale all'interfaccia tra il circuito primario proveniente dal reattore e il circuito secondario che andrà alla turbina per la produzione di elettricità è sempre uno scambiatore di calore, che andrà ad avere conformazioni differenti e nomi differenti a seconda della funzione che andrà a svolgere.

Da qui gli impianti proposti maggiormente per lo sfruttamento della fonte termica si affidano ai convenzionali cicli termodinamici, traendo ispirazione dagli impianti a fissione, le cui configurazioni principali sono:

- Impianto a vapore – ciclo Rankine-Hirn
- Impianto a gas – ciclo Joule-Brayton
- Cicli combinati

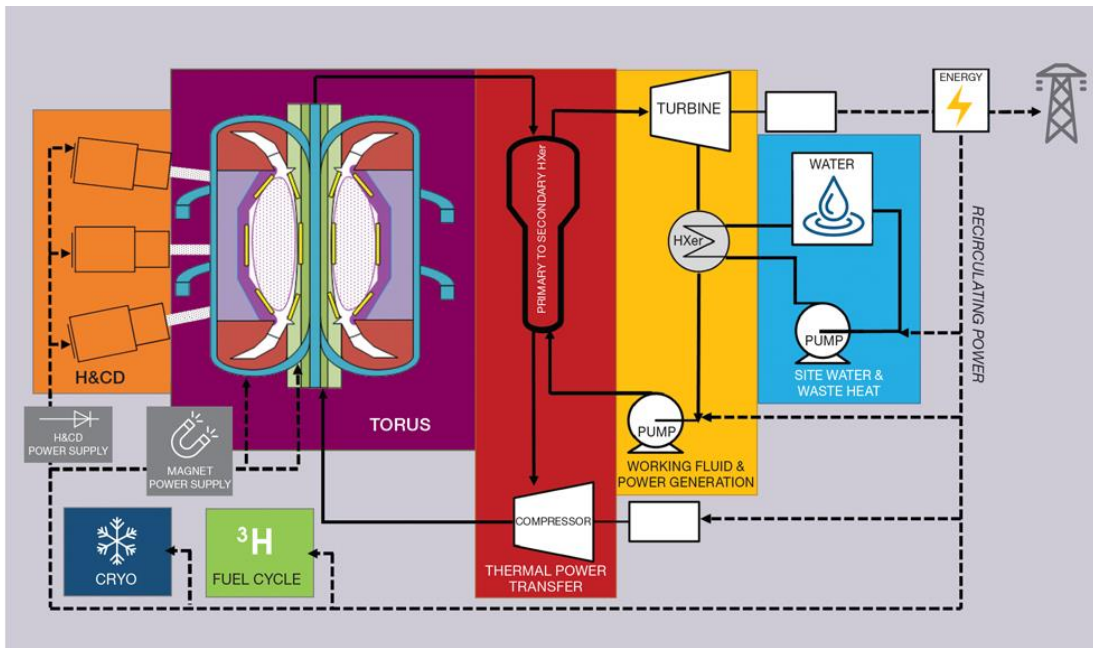


Figura 29: Impianto generico di un reattore

#### 4.1 Ciclo Rankine-Hirn

L'impianto a vapore costituisce un pilastro fondamentale nella conversione energetica dei sistemi nucleari. In particolare, nel contesto della fusione nucleare, dove le temperature del plasma superano i 100 milioni di °C, la gestione del flusso termico e la sua trasformazione in energia elettrica richiedono un'integrazione ottimizzata tra componenti termomeccanici e cicli termodinamici.

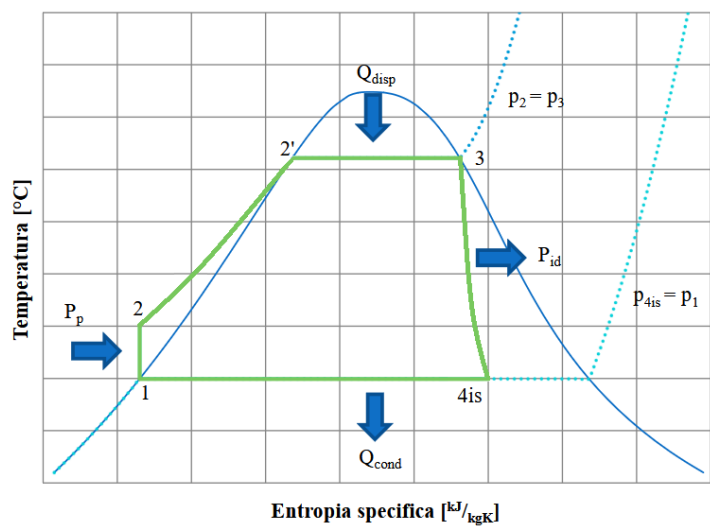
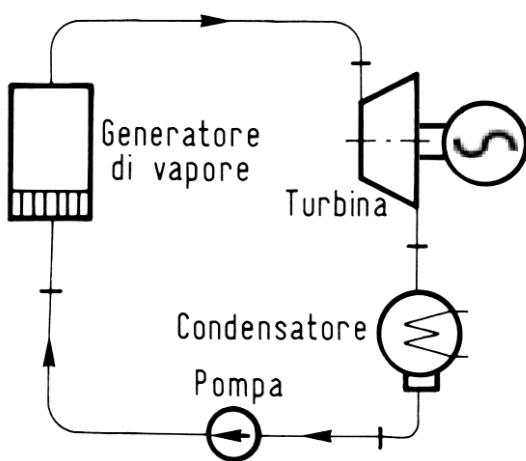


Figura 29: Impianto base a vapore e il corrispondente ciclo Rankine-Hirn reale

Il ciclo termodinamico di riferimento per descrivere il funzionamento degli impianti a vapore è il ciclo Rankine-Hirn. Il ciclo Rankine-Hirn, modello teorico di riferimento per tali applicazioni, descrive le trasformazioni del fluido di lavoro (tipicamente acqua) in un sistema chiuso.

Il layout di base (Figura 28) prevede:

- **Generatore di vapore:** in questa unità, una sorgente termica fornisce calore al fluido di lavoro, portandolo allo stato di vapore saturo. Nel contesto nucleare, la sorgente termica è rappresentata da un fluido termovettore riscaldato dal reattore, che trasferisce calore al fluido di lavoro.

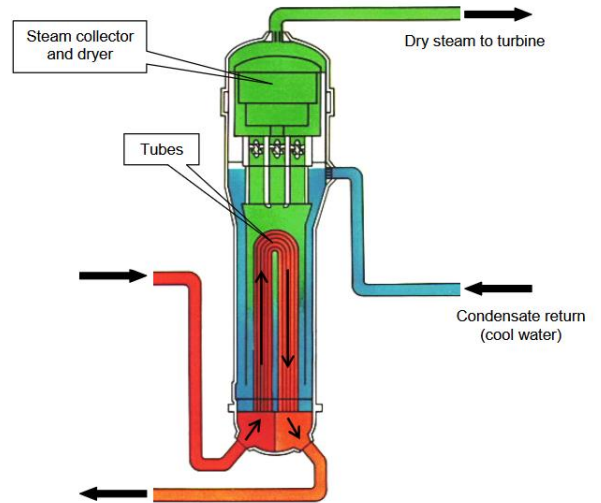


Figura 30: Generatore di vapore

- **Turbina:** il vapore generato espande nella turbina, producendo lavoro meccanico che viene convertito in energia elettrica tramite un alternatore.

- **Condensatore:** Rimuove il calore residuo tramite scambio con un bacino idrico o torri di raffreddamento, operando a pressioni sub-atmosferiche (0.05-0.1 bar) per massimizzare il salto entalpico.

- **Pompa:** il fluido viene infine riportato alla pressione iniziale, completando il ciclo, che riporta il fluido alla pressione iniziale.

Di seguito (Figura 31) è presentato un impianto a vapore e il diagramma termodinamico del ciclo che si genera.

Come è possibile notare, ed è su questo che si vuole mettere l'attenzione, il generatore di vapore (in questa configurazione) è alimentato direttamente dal calore proveniente dal blanket per mezzo del fluido termovettore, mentre il surriscaldatore da quello proveniente dal divertore.

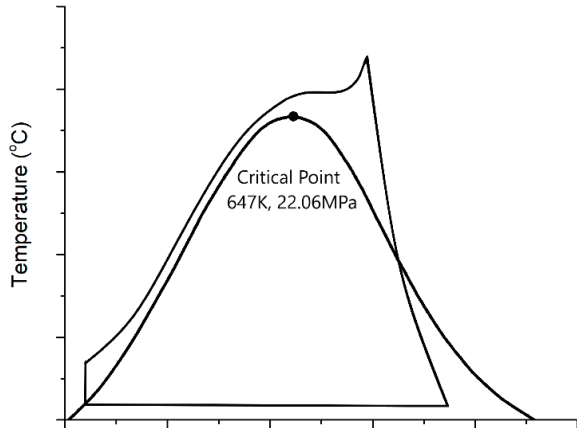
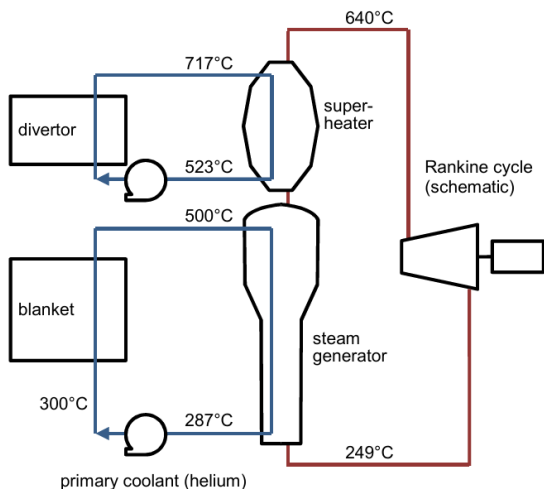


Figura 31: Impianto e ciclo a vapore supercritico

Le temperature in gioco, come è possibile vedere dallo schema dell'impianto, superano ampiamente il punto critico dell'acqua ( $T_{CR} = 374\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $p_{CR} = 220\text{bar}$ ). Di conseguenza, il ciclo termodinamico che si instaura è di tipo Rankine supercritico. In queste condizioni, il fluido di lavoro, superati i valori critici di pressione e temperatura, passa direttamente dallo stato liquido a quello vapore senza attraversare la regione bifase (liquido + vapore), assumendo uno stato supercritico.

Un esempio di impianto più convenzionale è invece rappresentato dal reattore DEMO.

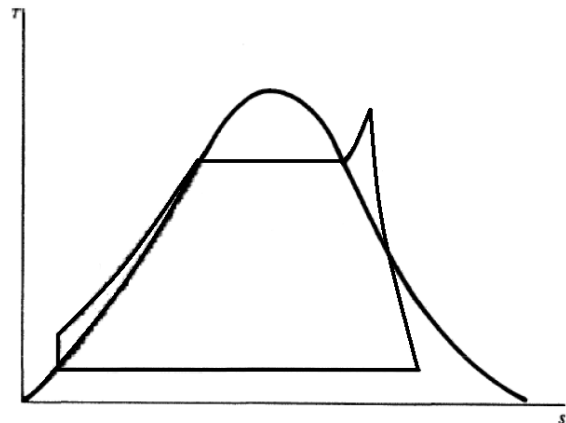
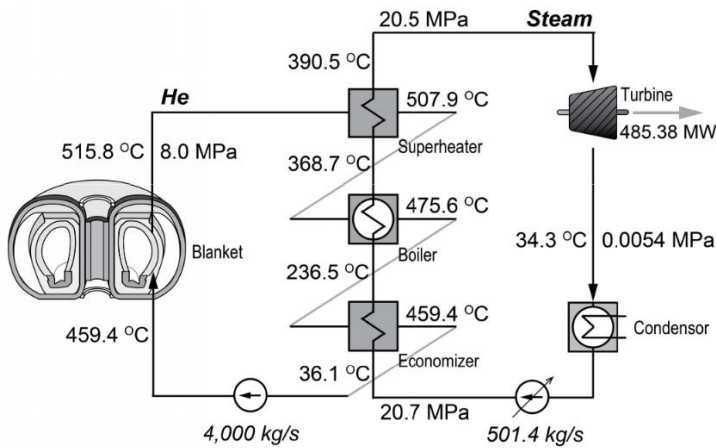


Figura 32: Impianto a vapore e relativo ciclo alimentato da tokamak

In questo caso il fluido opera in condizioni subcritiche e si ottiene il ciclo Rankine classico. La letteratura scientifica offre numerose configurazioni e ottimizzazioni di tali impianti, con l'obiettivo di massimizzare l'efficienza nell'utilizzo del calore generato



dal reattore. Tra le soluzioni proposte figurano, ad esempio, la rigenerazione o il surriscaldamento.

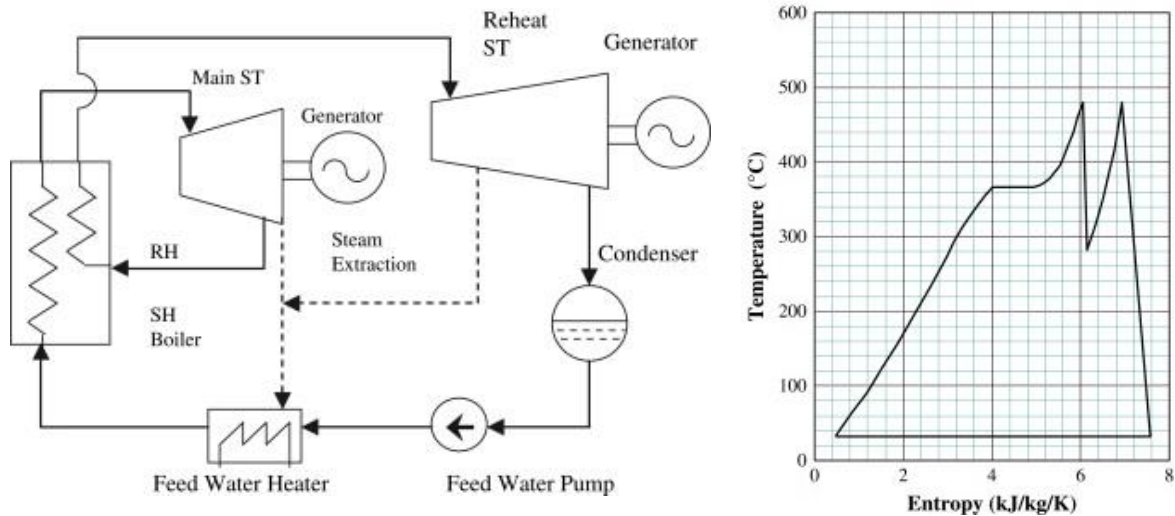


Figura 33: Impianto e ciclo a vapore surriscaldato

Tali soluzioni si scontrano tuttavia con limiti fisici imposti dalla stabilità del plasma e dalla gestione del TBR (Tritium Breeding Ratio), dove un'eccessiva sottrazione di calore dal blanket può compromettere la produzione di trizio. [76] Inoltre i cicli supercritici richiedono tempi di avvio più lunghi, criticità in sistemi a fusione con funzionamento pulsato.

Ad oggi, si riesce grazie a una serie di ottimizzazioni a raggiungere un'efficienza all'incirca del 40% massimo per impianti a vapore; nonostante tutto però risultano meno performanti rispetto ad altre configurazioni avanzate, che verranno analizzate nel seguito della trattazione.

## 4.2 Ciclo Joule-Brayton

Un sistema alternativo per la generazione di energia elettrica in contesti nucleari a fusione è rappresentato dagli impianti turbo-gas a ciclo chiuso.

Come illustrato schematicamente in Figura 34, tali impianti sono costituiti da quattro componenti fondamentali:

- un **compressore**, necessario per aumentare la pressione del fluido di lavoro;
- uno **scambiatore di calore ad alta temperatura**, che sostituisce il bruciatore convenzionale dei cicli a combustione, permettendo il trasferimento termico dal fluido termovettore primario (proveniente dal reattore) al fluido di lavoro secondario;
- una **turbina** accoppiata meccanicamente al compressore e a un generatore elettrico, dove il fluido subisce un'espansione convertendo l'entalpia in lavoro utile.
- uno **scambiatore a bassa temperatura**, che scambia con un circuito eterno il calore residuo e riporta il fluido alle condizioni termodinamiche iniziali, completando e chiudendo il ciclo.

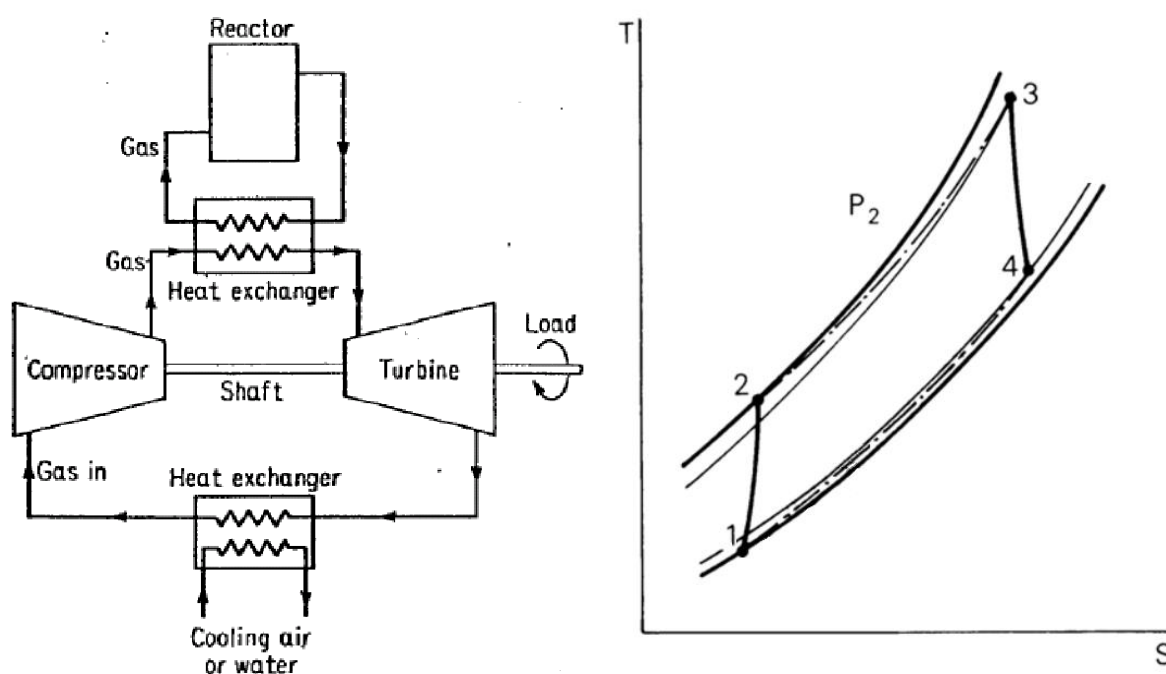


Figura 34: Impianto base a gas e il relativo ciclo Joule-Brayton reale

Da un punto di vista termodinamico il fluido esegue un ciclo di Joule-Brayton, modificato per tenere conto delle irreversibilità reali e delle cadute di pressione negli scambiatori. Le quattro trasformazioni possono essere descritte come:

- 1→2: il fluido subisce una compressione fino alla pressione  $p_2$ ;
- 2→3: riscaldamento del fluido di lavoro attraverso lo scambio termico col fluido termovettore proveniente dal reattore. Si noti, la caduta di pressione dovuta al passaggio nei condotti dello scambiatore (tipicamente 2-5% di  $p_2$ );
- 3→4: il fluido espande in turbina portandosi alla pressione  $p_4$

- 4→1: raffreddamento del fluido di lavoro nuovamente attraverso uno scambiatore di calore. La caduta di pressione riporta il fluido alla pressione iniziale

Anche qui si possono trovare configurazioni più o meno complesse al fine di aumentare l'efficienza a parità di potenza termica sviluppata dal reattore. Un esempio può essere la compressione interrefrigerata, oltre che anche qui la rigenerazione. Questa tipologia di impianti utilizza come fluido di lavoro (nel circuito chiuso) generalmente elio, o anidride carbonica. L'elio offre vantaggi unici grazie alla sua inerzia chimica, elevata conducibilità termica ( $0.15 \text{ W/mK}$  a  $800^\circ\text{C}$ ), e basso numero di Prandtl ( $Pr \approx 0.7$ ), che indica come la diffusione termica domini sulla diffusione cinematica. In altri termini possiamo dire che abbiamo un miglior trasferimento di calore di tipo convettivo, cosa che non avremmo per Prandtl alti dove lo strato limite idrodinamico domina su quello termico quindi la tipologia di scambio termico avviene principalmente per conduzione, richiedendo geometrie complesse (es. alette) per migliorare lo scambio. Alternative come la  $\text{CO}_2$  supercritica ( $\text{s-CO}_2$ ) presentano densità maggiori, riducendo le dimensioni degli scambiatori, ma hanno campi di ottimalità più bassi ( $31\text{-}200^\circ\text{C}$ ), risultando meno adatti a reattori a fusione. [77]

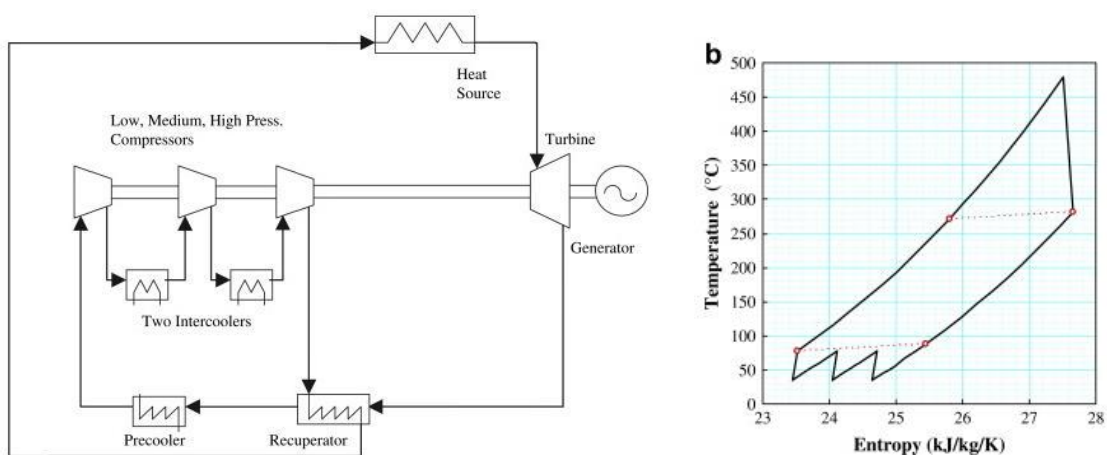


Figura 35: *Impianto a gas con compressione interrefrigerata e rigenerazione*

Ad oggi in impianti reali, basati sul ciclo di Brayton-Joule, l'efficienza si aggira massimo intorno al 48-50%. Maggiore, comunque, rispetto all'impianto a vapore ma, come scopriremo di seguito, comunque inferiore rispetto alla configurazione successiva.

### 4.3 Ciclo combinato

Una delle configurazioni più promettenti per la produzione di energia da reattori a fusione è l'integrazione **a cascata** tra cicli Joule-Brayton (topper) e Rankine-Hirn (bottomer), nota come **impianto combinato gas-vapore**.

Il layout di base, illustrato in Figura x, massimizza l'utilizzo del gradiente termico disponibile (tipicamente  $800^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C}$  circa) sfruttando sinergicamente i vantaggi dei due cicli.

**Ciclo topper (Joule-Brayton):** opera ad alte temperature ( $700\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ ), convertendo

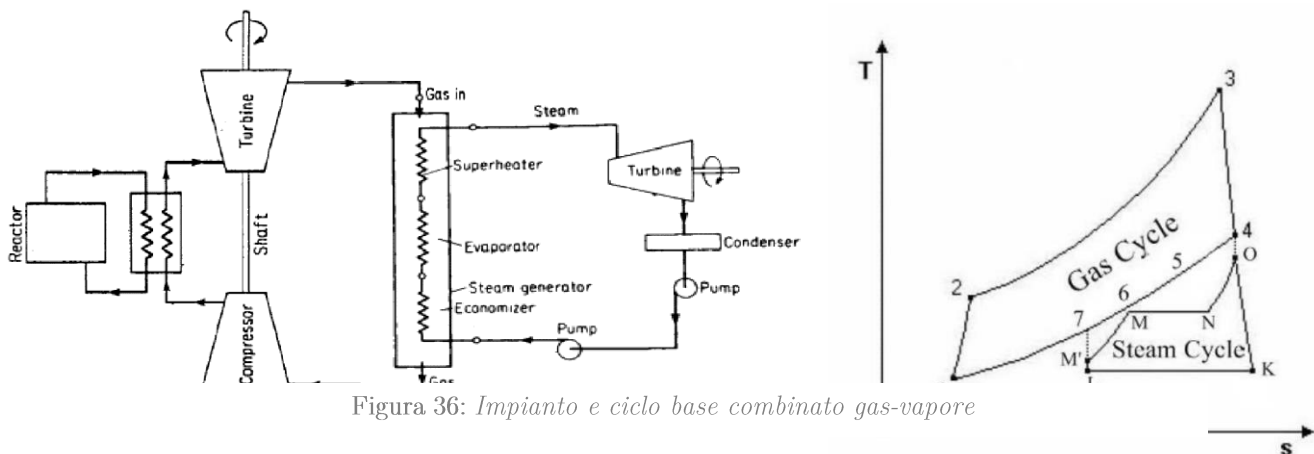


Figura 36: Impianto e ciclo base combinato gas-vapore

il 40-45% del calore primario in lavoro tramite espansione diretta del gas (elio o  $\text{CO}_2$ ).

**Ciclo bottomer (Rankine):** recupera il calore residuo dei gas di scarico ( $200\text{--}400^{\circ}\text{C}$ ) attraverso un **generatore di vapore a recupero (GVR)**, generando vapore surriscaldato per un'ulteriore conversione termoelettrica (10-15% di efficienza aggiuntiva).

Le motivazioni sui riferimenti a “topper” e “bottomer”, intuibili facilmente dal diagramma termodinamico, dipendono dalle posizioni relative dei due cicli.

Un elemento importante da analizzare è il **generatore di vapore a recupero (GVR)**, uno scambiatore di calore **a tre sezioni in controcorrente** (nella sua configurazione monolivello).

- Economizzatore: preriscalda l’acqua di alimentazione proveniente dalla pompa di alimentazione fino a una temperatura di poco minore a quella di vaporizzazione
- Evaporatore: assorbe una quota parte di energia quasi pari al calore latente per produrre vapore saturo.
- Surriscaldatore: incrementa la temperatura portando il vapore allo stato surriscaldato.

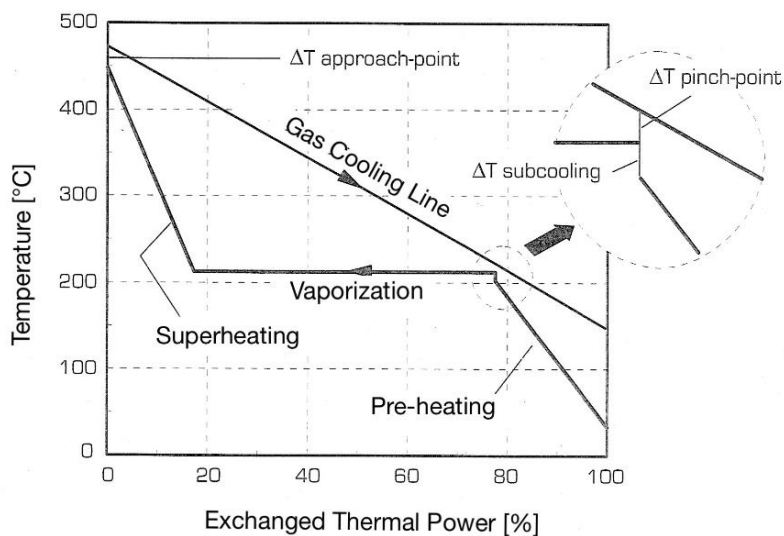
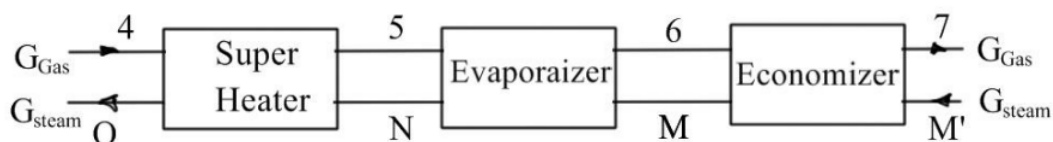


Figura 37: Schema di GVR con relativo grafico di scambio termico

Visionando il diagramma dello scambio termico (figura 36) si può notare come lo scambio termico sia caratterizzato da tre differenze di temperatura, ognuna delle quali è importante affinché lo scambio termico avvenga in condizioni ottimali:

- $\Delta T_{ap}$ : Approach-Point; è la più bassa differenza di temperatura nel surriscaldatore (dunque al suo ingresso)

- $\Delta T_{pp}$ : Pinch-Point; è la più bassa differenza di temperatura tra gas e vapore. Minimizzare questo parametro vuol dire massimizzare il rendimento del ciclo totale.
- $\Delta T_{sc}$ : Sub-Cooling; è la differenza tra la temperatura dell'acqua all'uscita dell'economizzatore e la sua temperatura di vaporizzazione.

È importante che esista questa differenza di temperatura per evitare l'inizio del processo di vaporizzazione nei tubi degli economizzatori, le bolle di vapore difatti fermerebbero il flusso d'acqua nel vaporizzatore mettendolo fuori uso.<sup>4</sup>

La relazione tra  $\Delta T_{pp}$  ed efficienza è descritta dall'equazione:

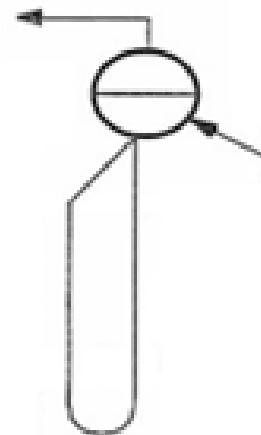
$$\eta_{\text{combinato}} = \eta_{\text{topper}} + (1 - \eta_{\text{topper}}) \cdot \eta_{\text{bottomer}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta T_{pp}}{T_{\text{gas,ingresso}}}\right)$$

Per massimizzare l'efficienza globale, si adottano configurazioni che massimizzano i rendimenti dei due cicli. Un esempio (Figura 37) può essere una compressione interrefrigerata per l'impianto a gas e surriscaldamento per l'impianto a vapore

Per gli impianti di tipo combinato, si raggiungono efficienze del 50-55%, fino al 60% (con  $\Delta T_{pp} = 18$  K). Ad oggi quest'ultima tipologia di impianto sembra essere la migliore messa in campo.

---

<sup>4</sup> L'evaporatore considerato per impianti di tipo combinato è solitamente a circolazione naturale come schematizzato in figura. Il suo funzionamento è schematizzabile nel modo seguente. L'acqua proveniente dall'economizzatore viene convogliata in un serbatoio superiore, da cui si diparte una serpentina immersa nello scambiatore. Il calore applicato alla serpentina induce la vaporizzazione dell'acqua al suo interno. La differenza di densità tra la miscela di vapore e acqua e l'acqua più fredda favorisce un moto convettivo naturale: la miscela sale attraverso la serpentina, mentre l'acqua più densa ridiscende, innescando un ciclo continuo. Il vapore saturo generato, che si accumula nella parte superiore del serbatoio, viene prelevato per essere processato negli apparati seguenti. Per un funzionamento ottimale è opportuno che ci sia una  $\Delta T_{sc}$  di subcooling. Questo affinché la condizione dell'acqua nella serpentina dell'evaporatore sia sempre in condizioni di liquido. Si potrebbe altrimenti innescare la formazione di bolle, le quali, aderendo alle pareti, possono ostruire il flusso e compromettere il ricircolo naturale.



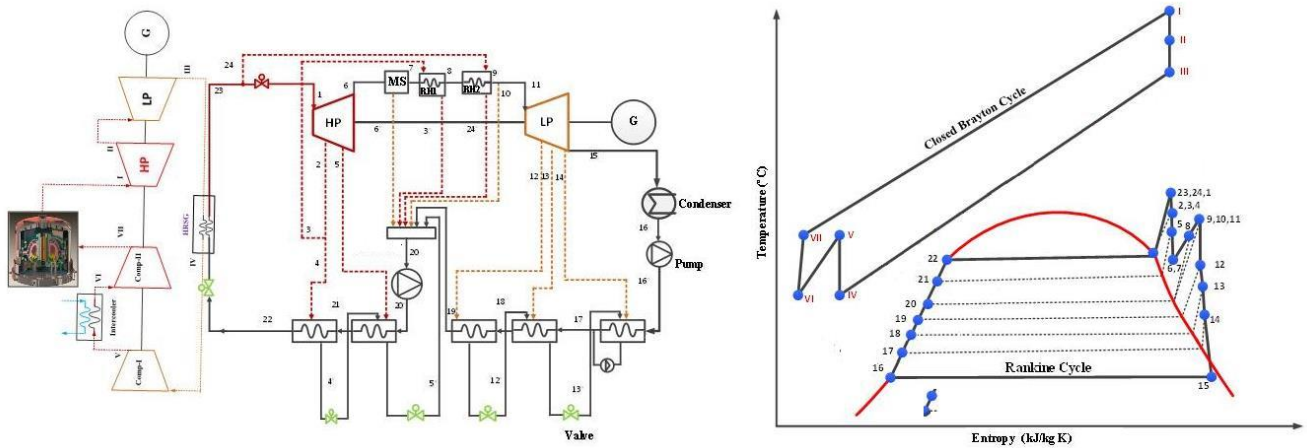


Figura 38: Impianto combinato con configurazione tale da massimizzare il rendimento

Si stanno studiando metodologie di conversione diretta dell'energia nucleare in elettricità utilizzando tecniche elettromagnetiche senza passare per l'energia termica come vettore energetico [78], ma la loro applicazione rimane ancora una sfida fisica e tecnologica, rendendo i cicli termici ancora la scelta preferita per non dire obbligata per i reattori a fusione.

## AI & FUSION TECHNOLOGY

La fusione nucleare, da oltre mezzo secolo oggetto di ricerca pionieristica, si trova oggi ad un punto storico: trasformarsi da sfida scientifica in soluzione energetica praticabile. Questo passaggio richiede però non solo la messa in opera degli ultimi avanzamenti nella fisica del plasma, ma un approccio alla progettazione, controllo e ottimizzazione dei reattori del tutto innovativo. In questo contesto, l'intelligenza artificiale (IA) emerge come catalizzatore tecnologico che, ridefinendo i problemi odierni attraverso approcci innovativi, è capace di risolverne alcuni o di posporre altri per il futuro. Il capitolo si propone di esplorare le frontiere attuali dell'IA applicata alla fusione nucleare evidenziando gli eventuali traguardi raggiungibili e mostrando soprattutto come questa tecnologia stia sempre più velocemente passando dall'essere uno strumento accessorio a diventare una realtà indispensabile nella progettazione.

Al cuore di questa rivoluzione vi è la capacità dell'IA di analizzare una moltitudine di dati e decifrarne i fenomeni che li legano, soluzione un tempo inaccessibile ai modelli tradizionali. Nei tokamak moderni, ad esempio, algoritmi di deep learning analizzano flussi di dati in tempo reale, prevedendo le instabilità con un'accuratezza superiore al 90%, come dimostrato negli esperimenti al Joint European Torus (JET) e al DIII-D [79]. Parallelamente reti neurali permettono di simulare il comportamento del plasma con una fedeltà senza precedenti, riducendo i tempi di ottimizzazione delle configurazioni magnetiche da mesi a poche ore. Questi progressi non sono meramente



quantitativi, ma rappresentano un salto qualitativo nella capacità di progettare reattori più compatti ed efficienti. Un esempio può essere l'utilizzo di algoritmi di controllo adattivo che integrano IA per stabilizzare il plasma in ambienti ad alto confinamento.

Un altro pilastro risiede nella simbiosi tra IA e scienza dei materiali. L'utilizzo di reti generative ha permesso di identificare leghe metalliche, come quelle tungsteno-renio, con una resistenza alle radiazioni fino a  $10^{25}$  n/m<sup>2</sup>, superando i limiti dei metodi sperimentali tradizionali [70]. Questi materiali, cruciali per i componenti interni dei reattori, vengono ora ottimizzati in frazioni del tempo precedentemente necessario, aprendo la strada a cicli di sviluppo rapidi e a costi contenuti.

Volgendo però uno sguardo a quello che si sta facendo, delle ricerche più recenti (2018-2024) emerge come l'IA stia cercando di porre rimedio a problemi storici. Dalle simulazioni surrogate (o modelli surrogati, sono modelli computazionali semplificati che approssimano il comportamento di sistemi complessi utilizzando tecniche di machine learning. Una volta addestrati, forniscono risultati in tempo reale.) che rimpiazzano codici sorgente con risparmi temporali del 70%, ai sistemi di manutenzione predittiva che aumentano la disponibilità operativa oltre il 95%, l'IA dimostra di essere il ponte tra la complessità teorica della fusione e le esigenze pragmatiche della commercializzazione. [71][79]

## **5.1 Controllo e ottimizzazione del plasma**

La stabilità del plasma è un aspetto fondamentale nella ricerca sulla fusione nucleare, poiché le instabilità possono compromettere il confinamento magnetico e ridurre l'efficienza del processo di fusione. Le instabilità del plasma sono fenomeni complessi che possono portare a una perdita di energia e particelle dal plasma, rendendo difficile il mantenimento delle condizioni necessarie per la fusione. Comprendere e controllare queste instabilità è essenziale per sviluppare reattori a fusione operativi e sicuri.

## Stabilità del plasma

Il plasma, essendo un fluido ionizzato, è soggetto a diverse tipologie di instabilità che possono influenzare negativamente il confinamento magnetico. Le principali instabilità includono:

- **Instabilità magnetoidrodinamiche:** queste instabilità derivano dall'interazione tra il plasma e i campi magnetici che lo confinano. Si manifestano come fluttuazioni nella densità, temperatura e velocità del plasma, che possono portare a fenomeni come le "disruption", ovvero interruzioni improvvise del confinamento che possono portare al contatto del plasma con le pareti del reattore col conseguente danneggiamento dello stesso. [80].
- **Turbolenze:** sono fluttuazioni microscopiche che causano un aumento del trasporto di particelle ed energia dal nucleo del plasma verso le regioni periferiche, riducendo l'efficienza del confinamento. Le turbolenze possono essere innescate da gradienti di pressione o temperatura e rappresentano una sfida significativa nella realizzazione di reattori a fusione stabili [81].

L'intelligenza artificiale (IA) sta emergendo come uno strumento potente per la gestione delle instabilità del plasma. Per esempio, presso il **DIII-D National Fusion Facility** in California, uno dei principali centri di ricerca sulla fusione, sono stati condotti esperimenti che utilizzano algoritmi di machine learning per monitorare il plasma e identificare segnali precursori delle instabilità. Questi algoritmi analizzano grandi volumi di dati provenienti da sensori e diagnostiche del plasma, come misure di temperatura, densità e campi magnetici, riuscendo a prevedere l'insorgenza di instabilità con anticipo sufficiente a intervenire [82]. Questo approccio ha permesso di sviluppare strategie di controllo attivo, come l'applicazione di campi magnetici aggiuntivi o l'iniezione di particelle per stabilizzare il plasma. Inoltre, presso il **Joint European Torus (JET)**, sono stati sviluppati modelli di deep learning per l'analisi dei precursori delle disruption basati sulla tomografia del plasma. Questi modelli utilizzano reti neurali per analizzare i profili di radiazione del plasma e identificare pattern anomali che precedono le instabilità, permettendo interventi preventivi [83].

Allo stesso modo, un altro studio condotto su Nature ha mostrato l'aspetto cruciale dello sviluppo di questi **modelli predittivi** basati su dati sperimentali. Questi modelli utilizzano tecniche di apprendimento automatico per analizzare dati storici e **identificare pattern** che possono essere utilizzati per prevedere il comportamento del plasma. Ad esempio, si è dimostrato come algoritmi di **deep reinforcement learning** riescano a controllare efficacemente il plasma in modo autonomo, adattando le strategie di controllo in tempo reale in base alle condizioni del plasma. Questo approccio rappresenta un significativo passo avanti rispetto ai metodi tradizionali, che spesso richiedono interventi manuali e sono limitati dalla complessità delle equazioni fisiche coinvolte. [84]

### **Modellazione accelerata del plasma**

Le simulazioni del comportamento del plasma sono fondamentali per la progettazione e l'ottimizzazione dei reattori a fusione. Tuttavia, i modelli fisici dettagliati richiedono tempi di calcolo significativi. Grazie all'avvento dell'AI la modellazione del comportamento del plasma, seppur computazionalmente intensiva a causa della complessità delle equazioni che descrivono la fisica del plasma, come le equazioni di **Maxwell** e le equazioni della **magnetoidrodinamica**, riesce a essere gestita molto più efficientemente. Le simulazioni richiedono tempi di calcolo molto lunghi, limitando la capacità di esplorare scenari complessi o di ottimizzare i parametri del reattore in modo efficiente. Tuttavia, l'uso di **reti neurali** e altre tecniche di intelligenza artificiale ha permesso di accelerare notevolmente queste simulazioni.

Ad esempio, in un articolo su *Journal of Computational Physics* firmato Matthews, Schweinzer, Coster nel 2021, hanno dimostrato che l'uso di reti neurali, col modello QLKNN, può ridurre i tempi di calcolo delle simulazioni del plasma fino a **10.000 volte**, mantenendo un elevato livello di accuratezza [85]. Questo risultato è stato ottenuto addestrando le reti neurali su un ampio dataset di simulazioni tradizionali, permettendo loro di apprendere le relazioni tra i parametri del plasma e il suo

comportamento. Una volta addestrate, le reti neurali possono essere utilizzate per prevedere rapidamente l'evoluzione del plasma senza dover risolvere le equazioni fisiche in modo completo.

L'adozione di modelli accelerati basati su IA è particolarmente rilevante per progetti su larga scala come **ITER**. La capacità di eseguire simulazioni rapide e accurate del comportamento del plasma consente una pianificazione più efficace delle operazioni e una risposta tempestiva a eventuali anomalie, contribuendo al successo complessivo del progetto [85].

L'efficacia dei modelli predittivi dipende comunque dalla qualità e dalla quantità dei dati sperimentali disponibili. Utilizzando dati raccolti da esperimenti precedenti, è possibile addestrare reti neurali in grado di riconoscere pattern complessi associati alle instabilità del plasma. Questo approccio data-driven migliora la capacità dei modelli di fornire previsioni affidabili in diverse condizioni operative [86]

## **5.2 Sviluppo di materiali per reattori a fusione**

I materiali utilizzati nei reattori a fusione devono affrontare condizioni operative senza precedenti, tra cui **temperature estreme** (fino a 150 milioni di gradi Celsius nel plasma), **flussi intensi di radiazioni neutroniche** e **sollecitazioni meccaniche prolungate**. Queste condizioni possono causare fenomeni come l'**irraggiamento neutronico**, che porta alla formazione di difetti reticolari, alla produzione di gas (ad esempio elio) all'interno del materiale e alla riduzione della resistenza meccanica. Lo sviluppo di materiali in grado di resistere a queste condizioni estreme rappresenta una delle principali sfide ingegneristiche e scientifiche. Identificarli è essenziale per garantire la sicurezza, l'affidabilità e la sostenibilità dei futuri reattori a fusione. L'intelligenza artificiale (IA) in particolare il machine learning (ML), sta emergendo

come strumenti fondamentali in questo contesto, facilitando sia l'identificazione di nuovi materiali resistenti sia la valutazione accurata delle loro proprietà.

### *Identificazione di materiali resistenti*

Presso l'**Oak Ridge National Laboratory (ORNL)**, uno dei principali centri di ricerca sulla fusione, è stato sviluppato un **database AI-driven** che utilizza algoritmi di machine learning per analizzare grandi volumi di dati sperimentali e computazionali. Questo database integra informazioni su proprietà termiche, meccaniche e di resistenza alle radiazioni di migliaia di materiali, permettendo di identificare leghe avanzate con caratteristiche ottimali per applicazioni nei reattori a fusione. Ad esempio, sono state studiate leghe a base di **tungsteno** e **ferro-cromo (Fe-Cr)**, che mostrano una maggiore resistenza all'irraggiamento neutronico rispetto ai materiali tradizionali.

Un altro esempio è l'approccio del **Physics-informed Meta-instrument for eXperiments (PiMiX)** che integra misurazioni multi-modali con modelli multi-fisici attraverso reti neurali, offrendo una metodologia per l'analisi integrata dei dati e il controllo nei sistemi di fusione nucleare. Questo metodo consente di ottimizzare le misurazioni e le analisi, facilitando la scoperta di leggi empiriche di scalabilità della fusione e la progettazione di nuovi reattori [70].

L'approccio basato sull'IA non solo riduce i tempi di sviluppo, ma consente anche di esplorare combinazioni di materiali che non sarebbero state considerate con metodi tradizionali. Un esempio è l'uso di **algoritmi di ottimizzazione bayesiana** per identificare composizioni chimiche che massimizzano la resistenza alle radiazioni e minimizzano la fragilità indotta da irraggiamento [87]. Questi metodi sono particolarmente utili per progettare materiali per componenti critici come le **pareti del reattore** e i **divertori**, che sono esposti ai carichi termici e alle radiazioni più intensi.

### *Valutazione delle proprietà dei materiali*

Oltre alla progettazione di nuovi materiali, l'IA è stata ampiamente utilizzata per valutare le proprietà dei materiali esistenti e prevedere il loro comportamento in

condizioni operative estreme. Modelli di machine learning sono stati sviluppati per analizzare parametri come lo **stress residuo**, la **resistenza alla fatica** e la **durata** dei materiali sotto stress termico e radiativo. Ad esempio, tecniche di **apprendimento supervisionato** sono state applicate per prevedere la formazione di difetti reticolari causati dall'irraggiamento neutronico, utilizzando dati provenienti da esperimenti di irradiazione e simulazioni computazionali [87] [70].

Un caso di studio significativo è rappresentato dalla collaborazione tra l'**UK Atomic Energy Authority (UKAEA)** e altri istituti di ricerca, dove modelli predittivi basati sull'IA sono stati validati attraverso test sperimentali su materiali esposti a condizioni simili a quelle di un reattore a fusione. Questi modelli hanno dimostrato una notevole accuratezza nel prevedere la degradazione dei materiali nel tempo, permettendo di ottimizzare i cicli di manutenzione e prolungare la vita utile dei componenti [87]. Inoltre, l'uso di tecniche di **deep learning** ha permesso di analizzare immagini microscopiche per identificare microfratture e difetti strutturali, fornendo informazioni preziose per migliorare la progettazione dei materiali.

#### *Collaborazioni con istituzioni per validare i modelli predittivi*

La validazione dei modelli predittivi basati su IA richiede collaborazioni con istituzioni specializzate. Ad esempio, collaborazioni tra laboratori di ricerca e istituzioni accademiche sono fondamentali per confrontare i risultati dei modelli con dati sperimentali e assicurare l'affidabilità delle previsioni. Queste collaborazioni facilitano l'integrazione di dati provenienti da diverse fonti e migliorano la robustezza dei modelli predittivi [70].

I progressi nello sviluppo di materiali resistenti alle condizioni estreme dei reattori a fusione hanno implicazioni dirette per progetti come **ITER** e **DEMO**, i futuri reattori sperimentali e commerciali. Ad esempio, ITER richiederà materiali in grado di resistere a flussi di neutroni fino a  $10^{14}$  **neutroni/cm<sup>2</sup>/s**, con una durata prevista di decenni. L'uso di materiali ottimizzati attraverso l'IA non solo migliorerà l'affidabilità del

reattore, ma ridurrà anche i costi di manutenzione e i tempi di fermo, contribuendo a rendere la fusione nucleare una fonte di energia economicamente sostenibile [88][89].

### 5.3 Ottimizzazione operativa e Manutenzione predittiva

L'ottimizzazione dei parametri operativi dei reattori a fusione nucleare rappresenta una sfida cruciale per garantire la stabilità del plasma e massimizzare l'efficienza energetica. Recenti sviluppi nell'intelligenza artificiale (IA) hanno permesso di implementare sistemi avanzati di controllo in tempo reale del plasma e la manutenzione predittiva dei componenti.

#### *Controllo in tempo reale*

I sistemi di controllo basati su IA superano i limiti degli approcci pre-programmati attraverso architetture ibride che combinano modelli fisici e apprendimento automatico. Il **Princeton Plasma Physics Laboratory** (PPPL), in collaborazione con **DeepMind**, ha implementato algoritmi di *deep reinforcement learning* (DRL) per stabilizzare il plasma nel tokamak DIII-D, riducendole del 40% mediante regolazione dinamica di parametri come la corrente toroidale e la densità del plasma [84]. Questi sistemi operano con latenze inferiori al millisecondo, sfruttando reti neurali ricorrenti (RNN) per analizzare flussi di dati in tempo reale da sensori diagnostici [90].

Un progresso parallelo riguarda l'uso di modelli ad alta fedeltà per accelerare le simulazioni plasmatiche. Tali approcci hanno dimostrato la possibilità di ottimizzare l'efficienza energetica riducendo la potenza d'ingresso senza compromettere le reazioni di fusione. Il **Princeton Plasma Physics Laboratory** (PPPL) ha implementato reti neurali convoluzionali (CNN) in grado di prevedere alcune tipologie di instabilità con 300 ms di anticipo e modificare dinamicamente i parametri operativi, come la forma del plasma o l'intensità dei fasci di potenza, per mantenere il reattore in condizioni ottimali [91].

Questi approcci non solo migliorano la stabilità del plasma, ma permettono anche una maggiore adattabilità alle condizioni variabili durante le operazioni del reattore. La capacità dell'IA di monitorare continuamente lo stato del plasma e regolare i parametri in tempo reale rappresenta un passo avanti significativo verso l'implementazione di reattori a fusione stabili e ad alta potenza [91][92].

### ***Manutenzione predittiva***

L'uso combinato di digital twin e intelligenza artificiale (IA) sta trasformando la manutenzione predittiva nei reattori a fusione, migliorando il monitoraggio e ottimizzando la gestione delle operazioni critiche. L'adozione di reti neurali ricorrenti, come i modelli LSTM (Long Short-Term Memory), ha permesso di analizzare con elevata accuratezza le sequenze termografiche delle piastre di berillio nei divertori, individuando precocemente segnali di deterioramento. Questa metodologia ha raggiunto un'accuratezza del 94%, riducendo il rischio di guasti imprevisti e migliorando la pianificazione degli interventi manutentivi [93].

L'impiego di digital twin consente inoltre di integrare simulazioni numeriche avanzate con dati acquisiti in tempo reale dai sensori installati nei componenti critici del reattore. La creazione di repliche virtuali permette di monitorare costantemente le condizioni operative, prevedere l'insorgere di anomalie e intervenire prima che i guasti compromettano la stabilità dell'impianto. L'applicazione di questo approccio ha dimostrato una riduzione significativa dei tempi di fermo non pianificati e un miglioramento dell'efficienza operativa [94].

Un'implementazione particolarmente rilevante riguarda il digital twin dell'alimentazione del solenoide centrale di ITER, un componente fondamentale per il mantenimento della configurazione magnetica del plasma. La simulazione in tempo reale delle dinamiche elettriche e termiche del sistema ha ridotto il margine di errore



nelle previsioni di comportamento, consentendo una gestione più efficiente e sicura dell'impianto. L'adozione di questa tecnologia ha migliorato l'affidabilità operativa e facilitato interventi manutentivi mirati [95].

L'integrazione di algoritmi IA con digital twin sta inoltre affrontando alcune delle sfide residue nella manutenzione dei reattori a fusione. L'eterogeneità dei materiali, come le giunzioni acciaio-rame nei componenti magnetici, e l'interferenza dei campi elettromagnetici con i sensori sono problematiche rilevanti. Per mitigare questi effetti, sono stati sviluppati algoritmi di anomaly detection basati su reti generative avversarie (GAN), capaci di distinguere i segnali di danno reale da artefatti generati dai campi magnetici superiori a tre Tesla. Test effettuati sul tokamak NSTX-U hanno dimostrato un'accuratezza dell'89% nell'identificazione delle anomalie [92].

Nel reattore DIII-D, l'integrazione di modelli predittivi per il monitoraggio delle saldature con algoritmi di controllo della corrente plasmatica ha portato a una riduzione del 30% degli stress termici, migliorando contemporaneamente la stabilità operativa e la durata dei componenti strutturali [84].

Questi sviluppi dimostrano che l'intelligenza artificiale e i digital twin rappresentano strumenti chiave per garantire il funzionamento stabile e sostenibile dei reattori a fusione. L'uso combinato di reti neurali, modelli predittivi e simulazioni avanzate riduce il rischio di guasti, ottimizza la gestione delle risorse e migliora la sicurezza operativa, ponendo le basi per una manutenzione sempre più autonoma e adattiva.

Nonostante i notevoli progressi, l'applicazione dell'intelligenza artificiale (IA) alla fusione nucleare presenta ancora diverse limitazioni. Una delle principali difficoltà

risiede nella complessità e nella variabilità del comportamento del plasma, che rende difficile sviluppare modelli IA generalizzabili a tutti i possibili scenari operativi. I sistemi di controllo tradizionali, basati su algoritmi deterministici, sono spesso lenti nell'adattarsi a condizioni impreviste, mentre i modelli di machine learning richiedono dataset estesi e accurati per essere addestrati efficacemente. Inoltre, la gestione delle instabilità del plasma rimane una sfida critica: sebbene l'IA abbia dimostrato di poterle prevedere e mitigare in tempo reale, l'ottimizzazione di tali interventi può comportare una riduzione delle prestazioni complessive del reattore [96][97][98].

Nonostante quindi successi in laboratorio, l'adozione su scala industriale richiede ripetibilità degli esperimenti e la presenza di infrastrutture dedicate. Un algoritmo **non ripetibile** che previene le instabilità del plasma in un tokamak sperimentale potrebbe non funzionare in un reattore più grande (come ITER) o in generale diverso. Obiettivo principale delle ricerche, infatti, non è solo la ricerca di una soluzione ma la ricerca di una soluzione applicabile su altre tipologie degli stessi reattori. In un certo senso non si vuole ricercare un modello, una legge che descriva e risolva quel problema in quello specifico reattore ma una legge che riesca a risolvere quella problematica di tutti i reattori. È indubbio però che per scrivere modelli di questo genere si ha bisogno di una elevata mole di dati che attualmente reattori commerciali non abbiamo.

Le prospettive per l'IA nella fusione nucleare rimangono comunque promettenti. In futuro, si prevede un'integrazione completa dei modelli IA nei reattori commerciali migliorandone la stabilità e la sicurezza.

## FUSION THRUSTER

La fusione nucleare è vista alla stragrande maggioranza come la prospettiva di energia quasi senza limiti, e a basso impatto ecologico. Per molti addetti ai lavori rappresenta anche una via per l'esplorazione spaziale profonda. I razzi chimici, basati sulla combustione di propellenti come idrogeno liquido e ossigeno, hanno permesso di raggiungere orbite terrestri e di inviare missioni sulla Luna e verso altri pianeti. Tuttavia, questi sistemi presentano limiti intrinseci, tra cui un basso rapporto spinta-peso e un'elevata quantità di propellente necessaria, che ne riducono l'efficienza per missioni di lunga durata o interplanetarie [99]. Le tecnologie di propulsione elettrica, come i motori ionici, hanno rappresentato un passo avanti significativo. Questi sistemi utilizzano campi elettrici o magnetici per accelerare ioni, producendo una spinta più efficiente rispetto ai razzi chimici. Tuttavia, anche queste tecnologie presentano limitazioni, tra cui una spinta relativamente bassa e una dipendenza da fonti di energia elettrica, spesso fornite da pannelli solari, che diventano meno efficaci a grandi distanze dal Sole [100]. In questo contesto, la fusione nucleare emerge come una soluzione potenzialmente rivoluzionaria; potrebbe offrire una spinta sufficiente per missioni interstellari, riducendo drasticamente i tempi di viaggio e aprendo nuove frontiere per l'esplorazione spaziale [101].

Le architetture di propulsione a fusione possono essere suddivise in due approcci principali: diretto e indiretto. Nell'approccio diretto, il plasma prodotto dalla fusione viene espulso direttamente come propellente, sfruttando la relazione fondamentale della propulsione  $F = \dot{m} \cdot v_e$ , dove  $F$  è la spinta,  $\dot{m}$  è la portata massica del propellente e  $v_e$  è la velocità di espulsione. Questo approccio massimizza l'efficienza energetica ma richiede un controllo preciso del plasma e della sua espulsione [102].

Nell'approccio indiretto, l'energia generata dalla fusione viene utilizzata per riscaldare un propellente secondario, come l'idrogeno, che viene poi espulso per produrre spinta. Questo metodo riduce le complessità legate alla gestione diretta del plasma di fusione ma introduce inefficienze termodinamiche dovute alla conversione di energia.

Un esempio di approccio diretto è il Direct Fusion Drive (DFD) è un rivoluzionario concetto di motore a razzo a fusione sviluppato da Princeton Plasma Physics Lab (PPPL) in collaborazione con Princeton Satellite Systems (PSS) che produrrebbe propulsione ed energia elettrica da un singolo reattore a fusione compatto [23]

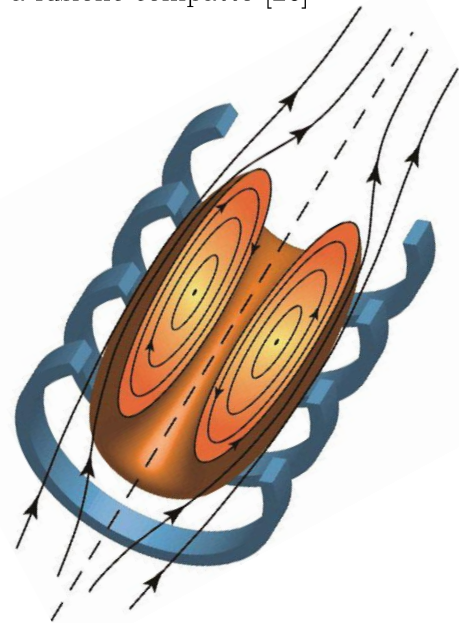
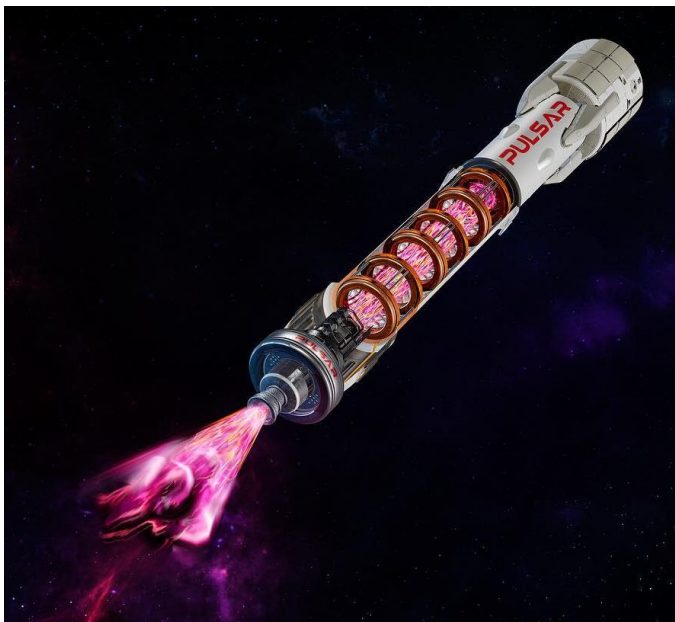


Figura 39: Direct Fusion Drive e la sua configurazione FRC

Il layout del DFD, come in tutti i propulsori basati su un'espulsione diretta del plasma, può essere spiegato (semplificando all'estremo) in un modo molto intuitivo. Un reattore a fusione è confinato da un campo magnetico che costringe il plasma al suo

interno. Se in un punto questo confinamento venisse interrotto, il plasma fuoriuscirebbe con una certa forza, generando una spinta che farebbe muovere il reattore nella direzione opposta. Questo fenomeno, se controllato, può essere sfruttato per ottenere una certa propulsione. Per rendere il processo più efficiente si utilizza un ugello magnetico che dirige il plasma in una direzione precisa, massimizzandone la spinta. Il layout tipo è dunque il seguente: Nello specifico per DFD, al centro trova una camera di fusione toroidale, realizzata in lega di titanio-rutenio per resistere a temperature superiori ai 1500 K.

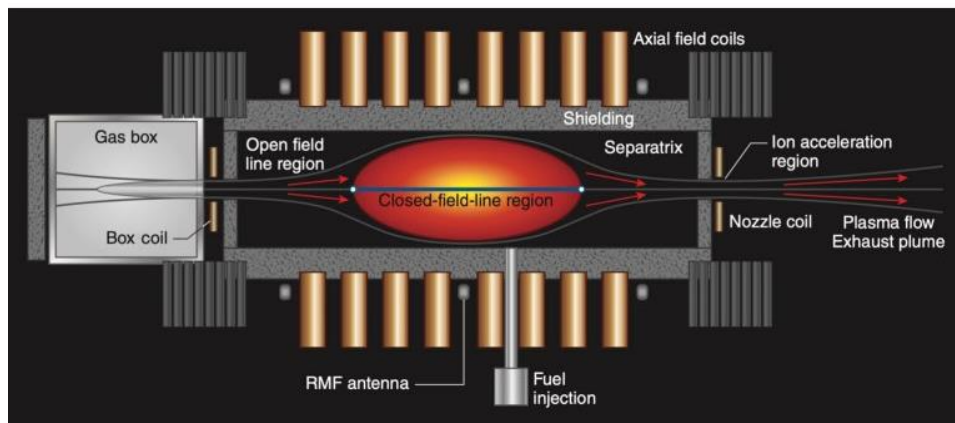
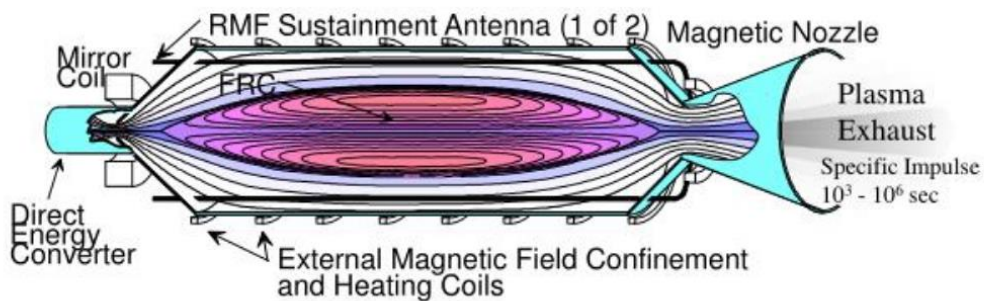


Figura 40: Layout tipico di un reattore a fusione

A differenza dei reattori Tokamak, questa camera non utilizza bobine magnetiche centrali, ma sfrutta una configurazione Field-Reversed (FRC), in cui il plasma si auto-organizza in una struttura chiusa, con linee di campo magnetico generate dalle correnti interne al plasma stesso (la stessa che si instaura in PROTO-SPHERA). Questo design riduce la massa complessiva del sistema del 40% rispetto a un reattore tradizionale [101]. Attorno alla camera sono disposte bobine superconduttrici in magnesio diboruro

(MgB<sub>2</sub>), materiale scelto per la sua capacità di mantenere la superconduttività a temperature relativamente elevate (25 K), semplificando i sistemi criogenici.

Il combustibile, costituito da una miscela isotopica di deuterio (D) ed elio-3 (<sup>3</sup>He), viene immagazzinato in serbatoi criogenici separati e iniettato nella camera tramite ugelli piezoelettrici, che regolano con precisione la portata per mantenere una pressione ottimale di 10<sup>-3</sup> bar [103]. Il riscaldamento del plasma è affidato a un sistema a microonde (ICRF), dove antenne risonanti operanti a 50-100 MHz trasferiscono energia agli ioni attraverso il meccanismo di risonanza ionica ciclotronica, portando il plasma a temperature di 100 keV (1,16 miliardi di K), necessarie per innescare la fusione [101].

La reazione di fusione  $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$  produce principalmente particelle cariche: nuclei di elio-4 ( $\alpha$ ) e protoni ad alta energia (14,7 MeV). Questa reazione è scelta accuratamente non tanto per la quantità di energia totale che può generare, quanto piuttosto per il fatto che produce direttamente particelle cariche ad alta velocità. Queste possono essere controllate e accelerate da campi magnetici, permettendo di ottenere una spinta efficace in un sistema di propulsione spaziale. Queste particelle vengono dirette verso un ugello magnetico, un componente critico costituito da un

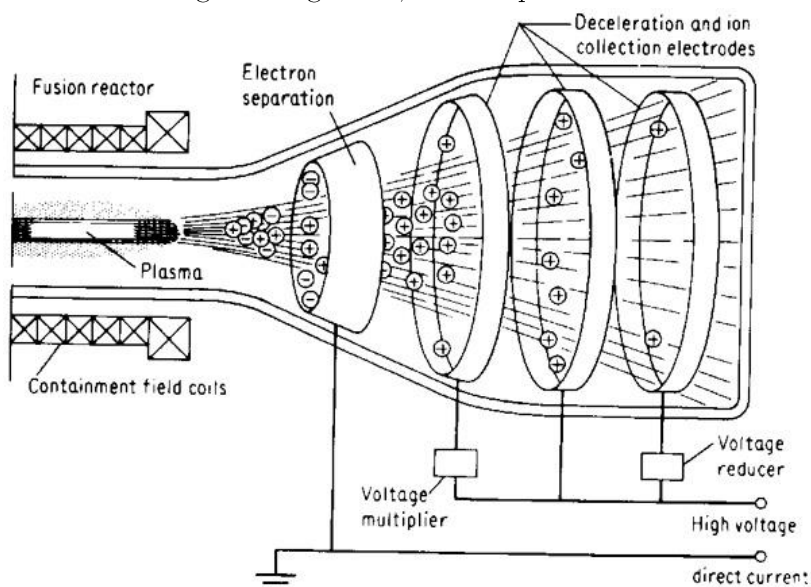


Figura 41: Ugello magnetico e relativo generatore MHG

cono divergente in grafite pirolitica, avvolto da bobine aggiuntive. L'ugello sfrutta

gradienti di campo magnetico per accelerare le particelle a velocità prossime a  $10^7$  m/s, generando una spinta continua compresa tra 1 e 10 N, con un impulso specifico teorico di 50.000 secondi, oltre 100 volte superiore a quello dei razzi chimici [104].

Parallelamente, un generatore magnetoidrodinamico (MHD), posizionato a valle (o a monte) dell'ugello, cattura i protoni residui e il plasma espulso. Questo dispositivo, realizzato in lega di litio-berillio, sfrutta il moto delle particelle cariche all'interno di un campo magnetico per indurre una corrente elettrica, in accordo con la legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica. Il fluido conduttore (il plasma) attraversa un canale magnetizzato, dove la forza di Lorentz separa le cariche elettriche, generando una differenza di potenziale tra gli elettrodi. L'energia estratta dal plasma può essere

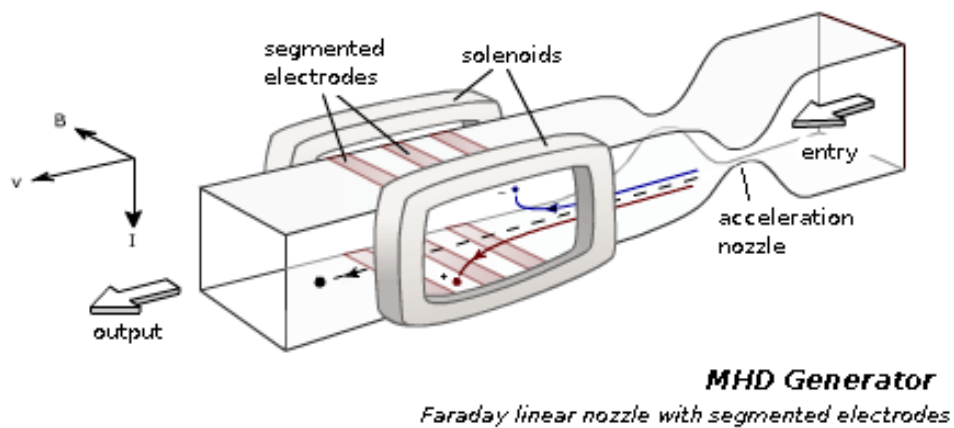


Figura 42: Schema base di un reattore MHG

utilizzata per alimentare i sistemi di bordo e i magneti superconduttori del reattore, migliorando l'efficienza complessiva del Direct Fusion Drive. In sistemi avanzati, l'energia convertita dal generatore MHD può raggiungere un'efficienza del 60-70%, riducendo la necessità di fonti di energia esterne [105].

Il funzionamento del generatore MHD, nel suo layout più semplice, può essere spiegato partendo dal concetto di forza di Lorentz. Quando un fluido conduttore, come un plasma, si muove attraverso un campo magnetico, le particelle cariche presenti nel fluido (elettroni e ioni) vengono deviate dalla forza di Lorentz. Questa forza agisce perpendicolarmente sia alla direzione del campo magnetico sia al movimento del fluido.

La separazione delle cariche genera una corrente elettrica che può essere raccolta da elettrodi posti lungo il percorso del fluido (Fig. 42).

L'energia prodotta da questo generatore nel DFD (circa 2 MW) alimenta i sistemi di bordo, inclusi i magneti superconduttori e gli strumenti scientifici, eliminando la necessità di pannelli solari o generatori ausiliari.

Il Direct Fusion Drive incarna la convergenza tra fisica del plasma, scienza dei materiali e ingegneria spaziale. Sebbene il suo sviluppo richieda progressi nella stabilizzazione del plasma e nella criogenia spaziale, i prototipi in fase di test (es. PFRC-2) e le simulazioni numeriche avanzate suggeriscono una fattibilità a medio termine. La realizzazione di un DFD operativo aprirebbe la strada non solo a missioni umane su Marte, ma anche all'esplorazione diretta dei giganti ghiacciati, ridefinendo i paradigmi dell'esplorazione interplanetaria.

Parlando di PROTO-SPHERA, data l'elevata compattezza e la configurazione sferica simile a quella FRC, non sarebbe difficile immaginare una propulsione a fusione basata proprio su questo reattore. Ai laboratori Enea, infatti, si sta già lavorando su questo, tenendo sul tavolo diverse ipotesi sia in configurazione diretta che indiretta.

La tecnologia Proto-Sphera, come quello di DFD, applicata alla propulsione a fusione rappresenta un approccio innovativo per lo sviluppo di thruster spaziali basati su reazioni nucleari. Questo sistema sfrutta configurazioni magnetiche semplicemente connesse per confinare il plasma e utilizzare i prodotti carichi delle reazioni di fusione come fonte di energia per la propulsione. Proto-Sphera è una variante della configurazione Tokamak, ma semplificata grazie all'assenza del tradizionale centro metallico. La corrente del plasma sostituisce il centro metallico, riducendo i problemi di manutenzione e migliorando l'accessibilità al reattore cilindrico. Questa struttura "aperta" del campo magnetico facilita il rifornimento e l'espulsione del plasma, rendendola particolarmente interessante per applicazioni spaziali.



Le configurazioni magnetiche semplicemente connesse, come Proto-Sphera, sono dotate di punti degeneri X (zone di nullo magnetico) che fungono da porte di uscita per il plasma. Questi punti permettono l'espulsione diretta dei prodotti carichi della fusione, come le particelle alfa, che emergono con energie dell'ordine dei MeV, molto superiori rispetto ai razzi chimici tradizionali (eV).

Il concetto di thruster basato su Proto-Sphera sfrutta i prodotti carichi delle reazioni di fusione per generare spinta. Sono state considerate due tipologie di reazioni:

- Deuterio-Tritio (D-T): produce particelle alfa e neutroni.
- Deuterio-Elio-3 (D-He3): produce protoni e particelle alfa.

La reazione D-He3 è preferita per la propulsione spaziale grazie alla produzione principalmente di prodotti carichi, che massimizzano la spinta e riducono la necessità di schermature neutroniche pesanti. Tuttavia, questa reazione richiede temperature più elevate e tempi di confinamento più lunghi rispetto alla D-T.

#### Caratteristiche del Proto-Thruster

Il Proto-Thruster basato su Proto-Sphera presenta vantaggi significativi:

- Alta spinta: fino a 10 N con una perdita minima di massa propellente.
- Elevato impulso specifico ( $I_{sp}$ ): valori superiori a  $10^6$  s, molto più alti rispetto ai razzi chimici.
- Efficienza energetica: circa il 30% dell'energia prodotta dalla fusione viene convertita in energia utile [107][106].

Il sistema Proto-Sphera ha il potenziale per rivoluzionare la propulsione spaziale grazie alla sua capacità di generare alta spinta e impulso specifico utilizzando prodotti carichi delle reazioni di fusione. Sebbene siano necessarie ulteriori dimostrazioni sperimentali per raggiungere un plasma in combustione stabile, questa tecnologia potrebbe abilitare missioni rapide verso Marte o Giove con tempi di trasferimento significativamente ridotti rispetto alle tecnologie attuali. [107][106]

È indubbio ormai senz'altro che la fusione nucleare ci pone davanti a prospettive tutt'altro che inverosimili e futuristiche. Si parla ormai (per DFD) di un motore a fusione nucleare che potrebbe raggiungere velocità superiori a 800.000 km/h; capace di raggiungere Marte in un tempo dimezzato rispetto ai competitor chimici (3 mesi) o fino a 30 giorni, mentre un viaggio verso Titano, una luna di Saturno, potrebbe richiedere solo due anni anziché decenni. [108][109][110]. Sebbene il suo sviluppo richieda ancora progressi, gli studi sono abbastanza concordi nel suggerire una fattibilità almeno nel medio termine.

## CONCLUSIONE

La fusione termonucleare controllata rappresenta una delle sfide tecnologiche più ambiziose e affascinanti del nostro tempo. Come evidenziato nel corso di questa trattazione, la ricerca ha compiuto passi significativi, grazie a innovazioni nei sistemi di confinamento del plasma, nell'ingegneria dei materiali e nell'ottimizzazione delle condizioni operative. Il progetto **Proto-Sphera** si inserisce in questo contesto come un'alternativa promettente, dimostrando che strategie differenti dai tradizionali Tokamak e Stellarator possono contribuire alla realizzazione di un reattore efficiente e sostenibile.

Parallelamente, l'intelligenza artificiale sta emergendo come un alleato essenziale nel perfezionamento delle tecnologie di fusione, migliorando il controllo del plasma, ottimizzando la progettazione dei reattori e prevedendo la manutenzione delle strutture. Questo connubio tra fusione nucleare e AI accelera il percorso verso la fattibilità commerciale di questi reattori. Il concetto di **fusion thruster** suggerisce scenari in cui l'energia delle stelle potrebbe un giorno alimentare i viaggi interplanetari, rivoluzionando il nostro approccio all'esplorazione spaziale.

Nel presente lavoro, tuttavia, non sono state trattate delle tematiche cruciali come la **sicurezza della fusione nucleare, il suo impatto sulla salute e la sostenibilità di questa tecnologia**. È importante sottolineare alcuni aspetti fondamentali:

- **Rischio di meltdown:** A differenza della fissione nucleare, in cui una reazione a catena fuori controllo può portare alla fusione del nocciolo e a una dispersione

di materiali radioattivi (come è avvenuto nei disastri di Černobyl' e Fukushima), nella fusione **questo rischio è assente**. Qualora qualcosa andasse storto, il plasma, che deve essere mantenuto a temperature di milioni di gradi per sostenere la reazione, si raffredderebbe immediatamente e la fusione si interromperebbe senza conseguenze catastrofiche.

- **Attivazione neutronica e gestione dei materiali radioattivi:** Sebbene la fusione produca molti meno scarti radioattivi rispetto alla fissione, i neutroni ad alta energia rilasciati nella reazione possono colpire le pareti del reattore, rendendo alcuni materiali temporaneamente radioattivi. Tuttavia, questi materiali vengono selezionati in modo da ridurre al minimo la loro attivazione neutronica e facilitare il loro smaltimento. A differenza delle scorie della fissione, che includono isotopi con emivite di **migliaia o milioni di anni** (come il plutonio-239 che ha un'emivita di circa **24.000 anni**), i materiali attivati dalla fusione hanno tempi di decadimento molto più brevi, generalmente nell'ordine di **decenni o al massimo di qualche secolo**, rendendo la loro gestione molto più semplice e sostenibile.
- **Impatti sulla salute e sull'ambiente:** la fusione nucleare non genera emissioni di gas serra, polveri sottili o altre sostanze inquinanti, riducendo così in modo significativo l'impatto ambientale rispetto alle fonti energetiche tradizionali basate sui combustibili fossili. Il trizio, uno dei principali combustibili, è leggermente radioattivo, con un tempo di decadimento di circa 12,3 anni; quindi, la sua gestione richiede precauzioni per prevenire dispersioni. Le tecnologie attuali di contenimento e recupero riducono notevolmente i rischi, rendendo l'impatto associato molto più contenuto rispetto alle scorie nucleari della fissione. In questo ambito, Eni e l'Autorità britannica per l'energia atomica (UKAEA) hanno avviato una collaborazione per sviluppare un impianto all'avanguardia per la gestione del trizio, evidenziando l'importanza

di questo aspetto nell'ambito della fusione nucleare come fonte di energia pulita.[111]

Dal punto di vista della sostenibilità, la fusione si distingue per la disponibilità praticamente illimitata del combustibile, l'elevata efficienza energetica e il ridotto impatto ambientale. Questi aspetti, sebbene non affrontati nel dettaglio in questo elaborato, possono rappresentare interessanti spunti di riflessione per futuri approfondimenti.

L'attuale direzione della ricerca e i progressi costanti ci indicano ormai come la fusione nucleare non sia solo fantascienza, ma rappresenti una di quelle tecnologie che ad oggi ancora non esiste, ma domani sarà necessaria.

# Bibliografia

- [1] Lazzaro, Enzo. "La fusione nucleare e la fisica del plasma". *Archi*, N. 2, 2008.
- [2] Curceanu, Catalina Oana. *Dai buchi neri all'adroterapia*. 2013.
- [3] Pezzoli, Andrea. *Produzione mediante deposizione laser pulsata e studio del comportamento in temperatura di film di tungsteno per ricerche sulla fusione nucleare*. 2011
- [4] INFN Genova. *Fisica e ingegneria della fusione: la ricerca verso una nuova fonte di energia*. ([https://www.ge.infn.it/~prati/Fisica%20applicata%20per%20scienze%20dei%20materiali/opuscolo\\_fusione.pdf](https://www.ge.infn.it/~prati/Fisica%20applicata%20per%20scienze%20dei%20materiali/opuscolo_fusione.pdf))
- [5] Ongena, Jef. "Fusion: A true challenge for an enormous reward." *EPJ Web of Conferences*. Vol. 98. EDP Sciences, 2015.
- [6] Ruscelli, Simone. "Reazioni termonucleari negli interni stellari."
- [7] Guzzonato, Alessio. "Modelli filamentari di plasma per codice iterativo di ricostruzione del boundary in macchine da fusione."
- [8] Krane, Kenneth S. *Introductory nuclear physics*. John Wiley & Sons, 1991.
- [9] Sun, Xiang-Xiang, Lu Guo, and A. S. Umar. "Microscopic study of the fusion reactions Ca 40, 48+ Ni 78 and the effect of the tensor force." *Physical Review C* 105(3), 2022.
- [10] Freidberg, Jeffrey P. *Plasma physics and fusion energy*. Cambridge University Press, 2008.
- [11] Miyamoto, Kenro. *Plasma physics and controlled nuclear fusion*. Vol. 38. Springer Science & Business Media, 2005.

- [12] Novak, J., Milko, M., & Radulović, V. (2022). Cross-Section Analysis for Neutron Producing Fusion Reactions in ITER. *Nuclear Energy in Central Europe 2022*.
- [13] Monpriat, Emma, et al. "A new  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  nuclear reaction rate: Impact on stellar evolution." *Astronomy & Astrophysics*, 2022.
- [14] Dell'Aquila, Daniele, et al. "Understanding heavy-ion fusion cross section data using novel artificial intelligence approaches." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2619. No. 1. IOP Publishing, 2023.
- [15] Fondazione Occhialini. *La produzione di energia da reazioni nucleari*. ([https://www.fondazioneocchialini.it/alumni/2014/lezioni/Energia\\_PS\\_2014\\_2.pdf](https://www.fondazioneocchialini.it/alumni/2014/lezioni/Energia_PS_2014_2.pdf))
- [16] Curceanu, Catalina Oana, and Catalina Oana Curceanu. "Imbrigliare l'energia delle stelle: la fusione nucleare." *Dai buchi neri all'adroterapia: Un viaggio nella Fisica Moderna*, 2013.
- [17] Wesson, John, and David J. Campbell. *Tokamaks*. Vol. 149. Oxford university press, 2011.
- [18] ITER Organization. (2020). *How does a tokamak work?* (<https://www.iter.org/mach/Tokamak>)
- [19] Chen, Francis F. *Introduction to plasma physics and controlled fusion*. Vol. 1. New York: Plenum press, 1984.
- [20] Stacey, Weston M. *Fusion: An introduction to the physics and technology of magnetic confinement fusion*. John Wiley & Sons, 2010.
- [21] Lawson, John D. "Some criteria for a power producing thermonuclear reactor." *Proceedings of the physical society. Section B* 70(1), 1957
- [22] Bosch, H-S., and Gerald M. Hale. "Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities." *Nuclear fusion* 32(4), 1992.
- [23] Spitzer, Lyman. "The stellarator concept." *Physics of Fluids* 1(4), 1958.

- [24] Boozer, Allen H. "Physics of magnetically confined plasmas." *Reviews of modern physics* 76(4), 2004.
- [25] Grieger, G., H. Renner, and H. Wobig. "Wendelstein stellarators." *Nuclear fusion* 25(9), 1985.
- [26] Beidler, Craig D., et al. "Stellarator fusion reactors—An overview." *Proceedings of Toki Conference ITC12*. 2001.
- [27] Kaw, P. K., and I. Bandyopadhyay. "The case for fusion." *Fusion Physics*. 2012.
- [28] Max Planck Institute for Plasma Physics. *Wendelstein 7-X*. (<https://www.ipp.mpg.de/w7x>)
- [29] Klinger, Thomas, et al. "Overview of first Wendelstein 7-X high-performance operation." *Nuclear Fusion* 59(11), 2019.
- [30] Beidler, C. D., et al. "Demonstration of reduced neoclassical energy transport in Wendelstein 7-X." *Nature* 596(7871), 2021.
- [31] Krychowiak, Maciej, et al. "Overview of diagnostic performance and results for the first operation phase in Wendelstein 7-X." *Review of Scientific Instruments* 87(11), 2016.
- [32] Wolf, R. C., et al. "Major results from the first plasma campaign of the Wendelstein 7-X stellarator." *Nuclear Fusion* 57(10), 2017.
- [33] Lampasi, Alessandro, et al. "Progress of the plasma centerpost for the PROTO-SPHERA spherical tokamak." *Energies* 9(7), 2016.
- [34] Tuszewski, Michel. "Field reversed configurations." *Nuclear Fusion* 28(11), 1988.
- [35] Coppi, B., et al. "High Density Plasmas for Advanced Fusion Reactors." *Nuclear Fusion* 55(5), 2015
- [36] Damizia, Yacopo. "STUDY OF MAGNETIC RECONNECTION PHENOMENA ON THE PROTO-SPHERA EXPERIMENT THROUGH THE ANALYSIS OF FAST CAMERAS DATA.", 2019.



- [37]Komori, A., et al. "Overview of the large helical device." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 42(11), 2000.
- [38]Mitchell, N., and E. Salpietro. "ITER R&D: magnets: toroidal field model coil." *Fusion Engineering and Design* 55(2-3), 2001.
- [39]Micozzi, Paolo, et al. "Final results of the first phase of the PROTO-SPHERA experiment: obtainment of the full current stable screw pinch and first evidences of the jet+ torus combined plasma configuration." *Plasma Science and Technology* 26(2) 2024.
- [40]ITER Organization. "*Magnet Systems*" ANNUAL REPORT, 2023 ([https://www.iter.org/sites/default/files/media/2024-10/2023\\_iter\\_annual\\_report\\_compressed\\_1.pdf](https://www.iter.org/sites/default/files/media/2024-10/2023_iter_annual_report_compressed_1.pdf))
- [41]ITER Organization, "Divertor." (<https://www.iter.org/mach/divertor>)
- [42]Bellan, Paul M. *Spheromaks: a practical application of magnetohydrodynamic dynamos and plasma self-organization*. 2000.
- [43]Kikuchi, Mitsuru, et al. "Tokamak Fusion Reactor." *Frontiers in Fusion Research II: Introduction to Modern Tokamak Physics*, 2015.
- [44]Stroth, Ulrich, et al. "Overview of ASDEX Upgrade results." *Nuclear Fusion* 53(10), 2013.
- [45]Micozzi, P., et al. "Ideal MHD stability limits of the PROTO-SPHERA configuration." *Nuclear fusion* 50(9), 2010.
- [46]Reynolds Polymer Technology, "*ENEA Project*." (<https://www.reynoldspolymer.com/projects/enea/>)
- [47]Alladio, F., Pieroni, L., Rogier, F., Mancuso, A., & Micozzi, P. *Proto-Sphera*, N. ENEA-RT-ERG-FUS-2001-14, ENEA, 2001
- [48]ITER Organization, "Vacuum Vessel." ([https://www.iter.org/mach/vacuum\\_vessel](https://www.iter.org/mach/vacuum_vessel))
- [49]ITER Organization, "Blanket." (<https://www.iter.org/mach/blanket>)

- [50] Zinkle, Steven J., and G. S. Was. "Materials challenges in nuclear energy." *Acta Materialia* 61(3), 2013.
- [51] Rieth, Michael, et al. "Recent progress in research on tungsten materials for nuclear fusion applications in Europe." *Journal of Nuclear Materials* 432(1-3), 2013.
- [52] Ferrario, Bruno, and Anita Calcatelli. *Introduzione alla tecnologia del vuoto*. Patron, 1999.
- [53] Hoffman, Dorothy, Bawa Singh, and John H. Thomas III. *Handbook of vacuum science and technology*. Elsevier, 1997.
- [54] Umrath, Walter. "Fundamentals of vacuum technology", 1998.
- [55] Fulvio Ricci, *Dispense di Fisica e Tecnologia del Vuoto - Parte I*, Dipartimento di Fisica, Università di Roma La Sapienza, Roma, Italia.
- [56] Fulvio Ricci, *Dispense di Fisica e Tecnologia del Vuoto - Parte III*, Dipartimento di Fisica, Università di Roma La Sapienza, Roma, Italia.
- [57] Brandt, Daniel, and Daniel Brandt-Bessire. *CAS CERN Accelerator School, Vacuum in Accelerators: Platja D'Aro, Spain, 16-24 May 2006: Proceedings*. No. 3. CERN, 2007.
- [58] O'Hanlon, John F. *A user's guide to vacuum technology*. John Wiley & Sons, 2003.
- [59] Kokubun, K., H. Shimizu, and S. Ichimura. "Characteristics of residual gases in an extreme-high vacuum system." *Denshi Gijutsu Sogo Kenkyusho Iho/Bulletin of the Electrotechnical Laboratory* 57(4), 1993
- [60] Leybold. (2020). *Fundamentals of Vacuum Technology*. ([https://www.leyboldproducts.com/media/pdf/87/a8/be/FVT\\_Fundamentals\\_of\\_Vacuum\\_Technology\\_EN58774555441f3.pdf](https://www.leyboldproducts.com/media/pdf/87/a8/be/FVT_Fundamentals_of_Vacuum_Technology_EN58774555441f3.pdf))
- [61] Pfeiffer Vacuum. (2018). *Vacuum Technology: Fundamentals and Applications*.

- [62] Dugan, Tim. Optimizing Five Liquid Ring Vacuum Pumps on a Paper Machine. Blower & Vacuum Best Practices, 2017 (<https://www.blowervacuumbestpractices.com/system-assessments/vacuum-systems/optimizing-five-liquid-ring-vacuum-pumps-paper-machine>)
- [63] Chambers, A., Fitch, R., & Halliday, B. Basic Vacuum Technology, 2nd edition (2nd ed.). CRC Press. 1998
- [64] VAC AERO International, Conductance of vacuum pipelines: A practical approach. (<https://vacaero.com/information-resources/vacuum-pump-technology-education-and-training/9365-conductance-and-throughput-in-vacuum-pipelines.html>)
- [65] Gorley, Michael, et al. "Materials engineering and design for fusion—Towards DEMO design criteria." *Fusion Engineering and Design* 136, 2018
- [66] Ikeda, K. "Progress in the ITER physics basis." *Nuclear Fusion* 47(6), 2007
- [67] ITER Organization. (2020). ITER Vacuum Handbook ([https://www.iter.org/sites/default/files/media/2024-04/iter\\_vacuum\\_handbook.pdf](https://www.iter.org/sites/default/files/media/2024-04/iter_vacuum_handbook.pdf))
- [68] Anashkin, I. O., V. A. Kochin, and I. S. Obraztsov. "Pumping System of the Vacuum Chamber of the Tokamak T-15MD Unit." *Physics of Atomic Nuclei* 87(7), 2024.
- [69] Amrollahi, R., et al. "Alborz tokamak system engineering and design." *Fusion Engineering and Design* 141, 2019.
- [70] Wang, Zhehui, et al. "Physics-informed Meta-instrument for eXperiments (PiMiX) with applications to fusion energy" arXiv, 2024.
- [71] IAEA. AI in Fusion (<https://nucleus.iaea.org/sites/ai4atoms/ai4fusion/SitePages/AI4F.aspx>)
- [72] Wenninger, R., et al. The DEMO wall load challenge. *Nuclear Fusion* 57(4) 2017

- [73] Wong, C. P. C., et al. "Progress on DCLL blanket concept." *Fusion Science and Technology* 64(3), 2013
- [74] Gunn, J. P., et al. "Ion orbit modelling of ELM heat loads on ITER divertor vertical targets." *Nuclear Materials and Energy* 12, 2017.
- [75] Norajitra, Prachai, et al. "Recent progress in the development of helium-cooled divertor for DEMO." *Fusion Science and Technology* 67(4) 2015.
- [76] Abdou, Mohamed, et al. "Physics and technology considerations for the deuterium–tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency." *Nuclear fusion* 61(1) 2020.
- [77] Ahn, Yoonhan, et al. "Review of supercritical CO<sub>2</sub> power cycle technology and current status of research and development." *Nuclear engineering and technology* 47(6), 2015.
- [78] Kovari, M., et al. "Review Article for Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy: Converting energy from fusion into useful forms." *Journal Ref: CCFE-PR 70 (2013)*.
- [79] Rea, Christina, et al. "Progress toward interpretable machine learning–based disruption predictors across tokamaks." *Fusion Science and Technology* 76(8), 2020.
- [80] Consorzio RFX: MHD UN MODELLO PER IMBRIGLIARE LE INSTABILITA', 2021 (<https://www.igi.cnr.it/news/mhd-un-modello-per-imbrigliare-le-instabilita/>)
- [81] Consorzio RFX: La fisica del Tokamak – la centrale a fusione. (<https://www.igi.cnr.it/ricerca/magnetic-confinement-research-in-padova/la-fisica-del-tokamak-la-centrale-a-fusione/>)
- [82] Tang, William, et al. Implementation of AI/DEEP learning disruption predictor into a plasma control system. *Contributions to Plasma Physics* 63(5-6) 2023.

- [83] Ferreira, Diogo R., et al. "Deep learning for the analysis of disruption precursors based on plasma tomography." *Fusion Science and Technology* 76(8) 2020.
- [84] Degraeve, Jonas, et al. "Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning." *Nature* 602(7897), 2022.
- [85] van de Plassche, Karel Lucas, et al. "Fast modeling of turbulent transport in fusion plasmas using neural networks." *Physics of Plasmas* 27(2), 2020.
- [86] Dong, Ge, et al. "Deep learning based surrogate models for first-principles global simulations of fusion plasmas." *Nuclear Fusion* 61(12), 2021.
- [87] Wang, Xiaoyang, et al. "A tungsten deep neural-network potential for simulating mechanical property degradation under fusion service environment." *Nuclear Fusion* 62(12), 2022.
- [88] Zinkle, Steven J., and Lance Lewis Snead. "Designing radiation resistance in materials for fusion energy." *Annual Review of Materials Research* 44(1), 2014
- [89] Butler, Keith T., et al. "Machine learning for molecular and materials science." *Nature* 559(7715), 2018.
- [90] Kates-Harbeck, Julian, Alexey Svyatkovskiy, and William Tang. "Predicting disruptive instabilities in controlled fusion plasmas through deep learning." *Nature* 568(7753), 2019
- [91] Princeton Plasma Physics Laboratory: Engineers use AI to wrangle fusion power for the grid, (<https://engineering.princeton.edu/news/2024/02/21/engineers-use-ai-wrangle-fusion-power-grid>)
- [92] Princeton Plasma Physics Laboratory: AI approach elevates plasma performance and stability across fusion devices (<https://engineering.princeton.edu/news/2024/06/03/ai-approach-elevates-plasma-performance-and-stability-across-fusion-devices>)

- [93] Magnúsdóttir, Magnea Ásta. AI-Assisted Predictive Maintenance For a Critical Asset of Thermal Energy Storage. 2024.
- [94] Xu, Qingfeng, et al. "A Digital Twin Framework for Nuclear Power Equipment Maintenance: Design, Prototyping, and Preliminary Validation." *Digital Twin* 2(14) 2025
- [95] Minetti, Manuela, et al. "Strategies for Real-Time Simulation of Central Solenoid ITER Power Supply Digital Twin." *Energies* 16.13 (2023): 5107.
- [96] Nuclear Engineering International: AI and smart fusion control, 2025. (<https://www.neimagazine.com/analysis/ai-and-smart-fusion-control/>)
- [97] Princeton Engineering: Using AI to wrangle fusion energy, 2024. (<https://engineering.princeton.edu/news/2024/05/10/using-ai-wrangle-fusion-energy>)
- [98] Science Blog: AI Tames Plasma Instabilities in Fusion Reactors, 2024. (<https://scienceblog.com/544950/ai-tames-plasma-instabilities-in-fusion-reactors-boosting-performance>)
- [99] Sutton, George P., and Oscar Biblarz. *Rocket propulsion elements*. John Wiley & Sons, 2011.
- [100] Katz, Ira. *Fundamentals of electric propulsion: ion and hall thrusters*. Wiley, 2008.
- [101] Razin, Yosef S., et al. "A direct fusion drive for rocket propulsion." *Acta Astronautica* 105(1), 2014.
- [102] Slough, John T. *The fusion driven rocket: Nuclear propulsion through direct conversion of fusion energy*. No. HQ-E-DAA-TN63101. 2018.
- [103] Thomas, Stephanie J., et al. "Fusion-enabled pluto orbiter and lander." *AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*. 2017.
- [104] Ahedo, Eduardo, and Mario Merino. "On plasma detachment in propulsive magnetic nozzles." *Physics of Plasmas* 18.5 (2011).

- [105] Rosa, Richard J. Magnetohydrodynamic energy conversion, 1987.
- [106] ENEA: PROTO-SPHERA and future space thrusters based on magnetic controlled fusion. ([https://www.afs.enea.it/project/protosphaera/Proto-Sphaera\\_Full\\_Documents/Motore\\_Spaziale/Simply%20connected%20magnetic%20thruster.pdf](https://www.afs.enea.it/project/protosphaera/Proto-Sphaera_Full_Documents/Motore_Spaziale/Simply%20connected%20magnetic%20thruster.pdf))
- [107] Napoli, Francesco. Proto-Sphaera as a Nuclear Fusion Thruster. C.R. ENEA - FRASCATI ([https://www.afs.enea.it/project/protosphaera/Proto-Sphaera\\_Full\\_Documents/Motore\\_Spaziale/Proto\\_Thruster\\_Francesco\\_Napoli\\_2021.pdf](https://www.afs.enea.it/project/protosphaera/Proto-Sphaera_Full_Documents/Motore_Spaziale/Proto_Thruster_Francesco_Napoli_2021.pdf))
- [108] Perlasca, G. Inizia la costruzione del primo motore spaziale a fusione nucleare. 2023. ([https://scenarieconomici.it/inizia-la-costruzione-del-primo-motore-spaziale-a-fusione-nucleare/#google\\_vignette](https://scenarieconomici.it/inizia-la-costruzione-del-primo-motore-spaziale-a-fusione-nucleare/#google_vignette))
- [109] Miraglia L. Motore spaziale a fusione nucleare: sarà pronto nel 2027. *energiaitalia*. 2023 (<https://www.energiaitalia.news/news/nucleare/motore-spaziale-a-fusione-nucleare-sara-pronto-nel-2027/17921/>)
- [110] Fernández, M. È in costruzione il motore a fusione nucleare che in poche settimane ci porterà su Marte. *METEOREDitalia*. 2023. (<https://www.ilmeteo.net/notizie/attualita/spazio-in-costruzione-motore-a-fusione-nucleare-in-pochesettimane-ci-portera-su-marte.html>)
- [111] ENI, Energia da fusione, Eni e UKAEA realizzeranno il più grande e avanzato impianto mondiale per la gestione del trizio. (<https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2025/03/energia-da-fusione-eni-ukaea-realizzeranno-impianto-mondiale-gestione-del-trizio.html>)