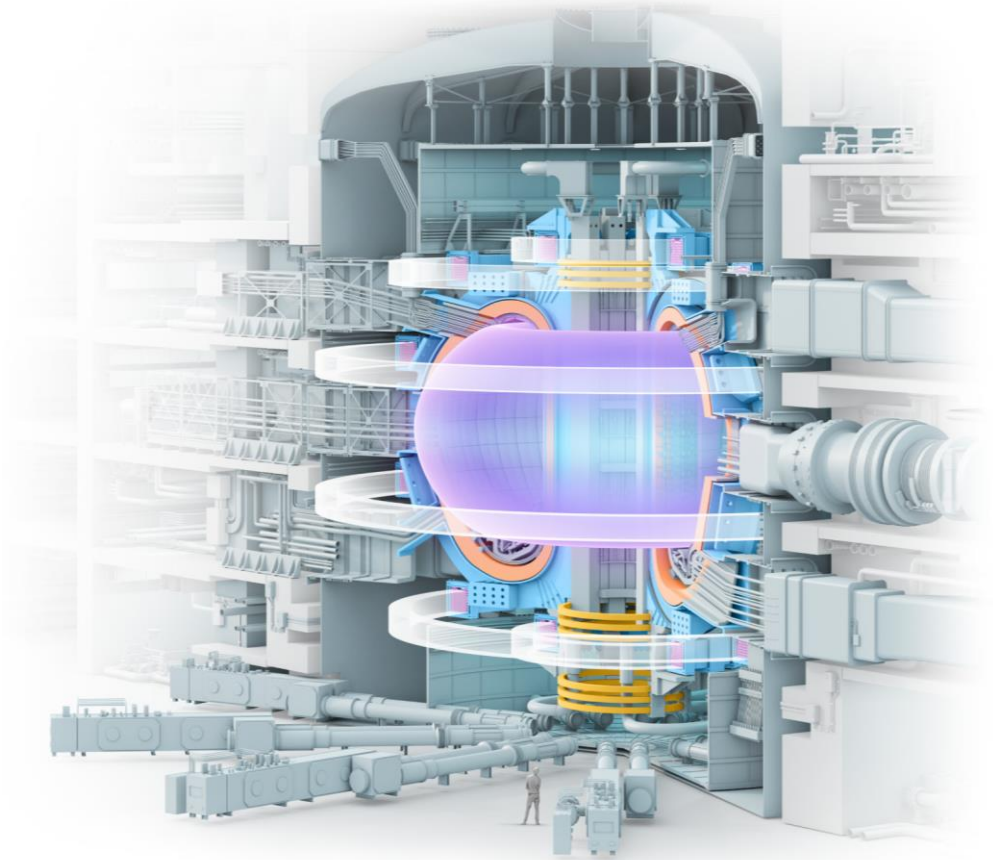

SUPERCONDUCTORS APLICATS A LA FUSIÓ NUCLEAR: EL CAMÍ CAP A UNA ENERGIA NETA I IL·LIMITADA



Treball de recerca
Joel Corominas Baix
Tutora: Dolors Pujol
INS Pla de l'Estany
Cursos 2021/2023

Abstract

This research project has the goal of exploring the potential of nuclear fusion as a fuel source for energy, and how superconductors are involved in it. It connects these two different research fields into what can be the future of energy production. The theoretical body, mostly formed by bibliographical research, exposes the open fronts in science and technology related to nuclear fusion and investigates the different approaches this field has had since its discovery. It also provides a simplified – yet extensive - explanation of the fundamental physics of superconductivity and how these materials can be exploited in nuclear fusion reactors. Secondly, the field research consists of an experiment in which the electrical properties of a superconductor are tested to seek the best-suited superconductor for the magnets in nuclear reactors. Finally, the conclusion to this project is a brief review of the superconducting properties learned in the theoretical body and analyzed in the field research, and carefully comparing the results in the context of a superconducting magnet-powered fusion reactor.

Resumen

Este proyecto de investigación tiene por objetivo explorar el potencial de la fusión nuclear para la obtención de energía limpia e ilimitada, y cómo los superconductores están involucrados en ello. Conecta estos diferentes campos de investigación para mostrar lo que podría ser el futuro de la producción energética. En primer lugar, el marco teórico, formado principalmente por la búsqueda bibliográfica, muestra los frentes abiertos en ciencia y tecnología relacionados con la fusión nuclear y explora los diferentes métodos que este campo ha investigado desde su descubrimiento. También da una simplificada pero detallada explicación de la física que se oculta detrás de los superconductores, y muestra cómo estos pueden ser utilizados en la fusión nuclear. En segundo lugar, la parte práctica consiste en un experimento en el que se comprueban las propiedades eléctricas de un superconductor, para encontrar el que mejor encaja con las necesidades de la fusión nuclear. Finalmente, la conclusión del proyecto es un breve comentario sobre las propiedades de la superconducción aprendidas en el marco teórico y comprobadas en la parte práctica, y compara cuidadosamente los resultados obtenidos en el contexto de un reactor de fusión nuclear con imanes superconductores.

Índex

1 - Introducció	4
1.1 - Objectius i hipòtesis	5
2 - La fusió nuclear.....	6
2.1 - La reacció de fusió.....	6
2.2 - Les estrelles	6
2.3 - Reactors nuclears	7
2.3.1 - Condicions per a la fusió	8
2.3.2 - Tipus de reactors i funcionament.....	9
2.3.3 - Combustibles	15
2.4 - Avantatges i inconvenients	23
3 - ITER	25
3.1 - Què és?	25
3.2 - Reactor.....	25
3.2.1 - Cambra de buit.....	25
3.2.2 - Mantell.....	26
3.2.3 - Desviador.....	28
3.2.4 - Criòstat.....	28
3.2.5 . Imants.....	30
3.2.6 - Sistemes d'escalfament del plasma.....	32
4 - Superconductors	34
4.2 - Superconductivitat.....	34
4.2 - Tipus de superconductors	37
4.3 - Altres aplicacions dels superconductors.....	39
5 - Experiment	41
5.1 - Disseny de l'experiment i materials	41
5.2 - Memòria de l'experiment.....	43
5.3 - Mesures.....	45
5.4 - Anàlisi de dades.....	49
6 – Conclusions.....	53
7 – Bibliografia.....	54

1 - Introducció

La obtenció i transformació de l'energia és un dels reptes científics més importants i amb més impacte social des dels inicis de la humanitat, quan el descobriment del foc va permetre utilitzar-ne la seva energia. Avui en dia, l'energia (en forma d'electricitat) és un dels serveis bàsics al primer món i la utilitzem de maneres molt diverses. Tot i haver evolucionat molt en les formes d'obtenció d'energia, les centrals elèctriques que utilitzem estan molt lluny de ser perfectes. Cremar combustibles fòssils allibera gasos d'efecte hivernacle, la fissió nuclear deixa residus radioactius difícils d'eliminar i les energies renovables, que en un primer moment semblaven la solució, presenten problemes ben diversos: des de la dependència del clima fins a la destrucció d'ecosistemes. A més, les pujades del preu de l'electricitat que recentment estem patint porten a la inflació i redueixen el poder adquisitiu de la classe treballadora.

Amb tot això, l'obtenció d'energia és un tema que afecta tots els àmbits de la societat: l'economia, les desigualtats socials, el medi ambient i la lluita contra el canvi climàtic, l'evolució tecnològica i el repte científic que suposa. És per això que vaig decidir enfocar el meu treball de recerca cap una energia revolucionària: la fusió nuclear.

La fusió nuclear és la reacció que es produeix al nucli de les estrelles i les alimenta. Tota l'energia que ens ve del sol en forma de llum i calor és originada per aquesta reacció, que consisteix en la unió de dos nuclis atòmics per formar-ne un de més pesant. Com que els nuclis inicials tenen més massa que el nucli final, la massa perduda es transforma en energia, tal i com va dir Einstein a la seva famosa equació $E = mc^2$. La fusió nuclear necessita però una pressió i una temperatura molt altes perquè s'arribi a produir. Dins les estrelles, s'assoleixen les condicions gràcies a l'enorme quantitat de massa que tenen, però recrear aquestes condicions a la Terra és més complex.

Actualment hi ha varis projectes en desenvolupament que intenten transformar la fusió nuclear en una energia viable econòmicament, el més gran de tots l'ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), situat a França. Els reactors més avançats utilitzen el confinament magnètic per controlar la reacció, i per produir el camp magnètic necessari, fan servir un material que també està revolucionant la ciència: els superconductors.

Aquest treball tracta d'analitzar i entendre les propietats dels superconductors i les necessitats científicotecnològiques de la fusió nuclear per veure els beneficis que comporten aquests materials en l'obtenció d'energia.

El treball està dividit en dues parts. La primera part, la part teòrica, recull informació bibliogràfica sobre la superconductivitat i la fusió nuclear. I la segona part, la part pràctica, consisteix en la memòria i les conclusions de l'anàlisi experimental d'un superconductor ceràmic d'alta temperatura.

1.1 - Objectius i hipòtesis

Els objectius d'aquest treball són entendre i donar a conèixer l'energia de fusió nuclear i els materials superconductors, com es relacionen aquests dos temes i quin paper poden jugar en el futur. També pretén analitzar amb més profunditat els aspectes teòrics involucrats en el desenvolupament d'aquestes tecnologies i els avenços científics fets els últims anys. Finalment, la part pràctica vol comprovar empíricament les propietats dels superconductors i relacionar les dades obtingudes en la pràctica amb la part teòrica, com és el planteig dels superconductors d'alta temperatura com a alternativa per als reactors de fusió nuclear.

La hipòtesis del treball és que els superconductors d'alta temperatura podrien ser més eficients que els de baixa temperatura en el context d'un reactor de fusió nuclear perquè costarien menys de refrigerar.

2 - La fusió nuclear

2.1 - La reacció de fusió

La fusió nuclear és una reacció en la qual dos nuclis atòmics s'uneixen per formar un nucli més pesant entre altres productes. Tot i que una reacció de fusió pot donar a lloc al mateix nombre de productes que de reactius, almenys un dels productes ha de ser més pesant que qualsevol dels reactius per ser considerat fusió. Aquesta reacció està mediada per la força nuclear forta mitjançant l'intercanvi de gluons. Els gluons interactuen només a distàncies molt curtes (de l'ordre de $1 \cdot 10^{-14}$ m), i per això aquestes interaccions només es donen quan els nuclis atòmics xoquen. (Sutton, C., 2020)

La fusió nuclear necessita unes condicions de temperatura i pressió molt altes. Aquesta necessitat és deguda a que els nuclis dels àtoms són positius, i per això la força electromagnètica fa que es repelin entre ells. Llavors, per generar els xocs necessaris per fer reaccions de fusió cal vèncer la força electromagnètica. La temperatura és el que dona l'energia necessària als nuclis atòmics per vèncer la repulsió, i la pressió incrementa les probabilitats que aquests nuclis xoquin (Bradshaw, A. M., Fischer, U. i Hamacher, T., 2010).

2.2 - Les estrelles

La fusió nuclear no és un fenomen artificial, sinó que també es troba present en la natura. Les estrelles generen energia gràcies a la fusió nuclear. A l'interior de totes les estrelles es produeixen reaccions de fusió constantment, i és l'únic lloc de l'univers on es produeix naturalment.

Les estrelles es formen quan grans núvols de pols provinents de nebuloses s'atrauen entre si i es condensen. Quan la concentració de pols adquireix suficient massa, la gravetat concentra cada vegada més la matèria cap a l'interior, fins que la força de gravetat és tan potent que venç a la força electromagnètica dels nuclis atòmics i aquests comencen a fusionar-se. Quan això passa, es diu que l'estrella s'ha encès.

Al principi, els àtoms que es fusionen són els d'hidrogen, que formen heli. Durant la major part de la vida d'una estrella, aquesta es manté estable. La força de la gravetat que faria col·lapsar l'estrella es veu contrarestatada per la calor que produeix la fusió i que expulsa la matèria cap a fora. El nostre sol, actualment, es troba en aquest estat d'estabilitat.

Però quan tot l'hidrogen que conté una estrella es transforma en heli, les fusions paren i l'estrella es contrau per la gravetat. Quan augmenta la pressió, l'heli prèviament format per l'estrella, comença a fer fusions nuclears que tornen a estabilitzar l'estrella. Amb l'hidrogen esgotat, les estrelles passen un període d'instabilitat durant el qual poden arribar a multiplicar per deu les seves dimensions en els processos d'expansió i contracció.

Les estrelles, quan moren, tenen finals diferents depenent de la massa que tenen. Les estrelles nanes, com el nostre sol, només poden formar elements fins al ferro, i quan ja no poden fer reaccions de fusió, moren, deixant enrere un núvol de pols i una nana blanca. Les estrelles massives, en canvi, quan moren exploten en una supernova i dins la supernova es fusionen més àtoms i es poden arribar a formar elements més pesants que el ferro.

L'equació de la reacció de fusió que es dona a les estrelles durant les primeres etapes de la seva vida, és una reacció en cadena formada per tres reaccions. En la primera, dos àtoms d'hidrogen (isòtop amb un protó i zero neutrons) es fusionen

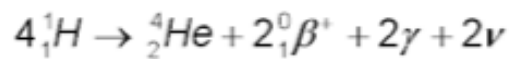
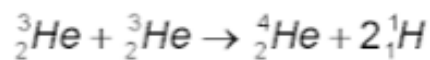
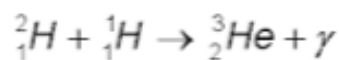
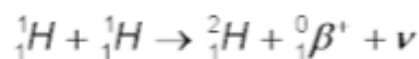


Figura 1 - Equacions de reaccions de fusió amb àtoms lleugers. Font: Nave, R. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/fusion.html>

per formar un àtom de deuteri (isòtop de l'hidrogen amb un protó i un neutró), una partícula beta i un neutrí. En la segona reacció, un àtom de deuteri i un d'hidrogen es fusionen per formar un àtom d'heli 3 (isòtop amb dos protons i un neutró) i una partícula gamma. En la tercera i última reacció, dos àtoms d'heli 3 es fusionen i formen un àtom d'heli 4 (isòtop amb dos protons i dos neutrons, més estable que l'anterior) i dos àtoms d'hidrogen. Quan es combinen les tres reaccions en cadena, com passa a les estrelles, la reacció resultant és la següent: 4 àtoms d'hidrogen formen dos àtoms d'heli 4, dues partícules beta, dues partícules gamma i dos neutrins (Salpeter, E. E., 1952). Les equacions de les reaccions estan explicades més endavant (veure secció 2.3.3.2 - Cicles de reaccions).

2.3 - Reactors nuclears

La història dels reactors de fusió nuclear es remunta al 1951, quan Argentina va assegurar que havia aconseguit la "fusió termonuclear controlada", en un projecte secret anomenat "Proyecto Huemul". El científic que suposadament ho havia aconseguit era Ronald Richter, un científic austríac que havia immigrat a Argentina arran de la segona guerra mundial. Més endavant, es va descobrir que tot era un engany i que Richter va mentir al president argentí

Juan Perón per fer construir el búnquer on feia les seves investigacions (a l'illa Huemul), i que realment no havia aconseguit la fusió nuclear. Aquesta falsa proclamació, però, va impulsar a altres països com Estats Units, França, Japó, Rússia i el Regne Unit a desenvolupar un reactor de fusió nuclear més ràpidament. Al maig de 1951, Lyman Spitzer, un astrofísic estatunidenc, va proposar un model de reactor de fusió nuclear: el “stellarator”.

Aquest model va dominar el camp de la recerca en fusió nuclear fins gairebé una dècada després, quan Ígor Tam i Andréi Sájarov, dos físics soviètics, van idear un nou model: el “Tokamak” (acrònim en rus de “*торoidalная камера с магнитными катушками*”, en català “cambra toroidal amb bobines magnètiques”). Aquest model és actualment el model més eficient, i l'ITER, el reactor de fusió més gran del món, n'és un exemple.

Un altre reactor nuclear completament diferent és el “fusor” de Philo T. Farnsworth, també inventor de la televisió. La característica principal d'aquest reactor és la seva simplicitat. Els materials necessaris per construir-lo estan a l'abast de gairebé tothom, i es pot construir de manera relativament econòmica si es té els coneixements de mecànica i electrònica necessaris per fabricar de manera casolana les parts més bàsiques. Aquest reactor permet fer i detectar una fusió nuclear, però no produeix energia, només en gasta. És per això que a banda d'experiments casolans, aquest tipus de reactor no s'utilitza.

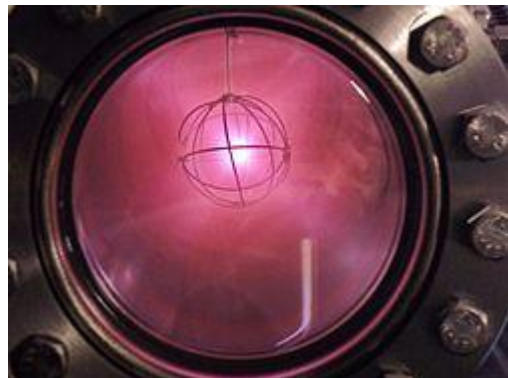


Figura 2 – Exemple de fusor de P. Farnsworth.
Font: Anònim. <https://hmn.wiki/es/Fusor>

2.3.1 - Condicions per a la fusió

Per produir fusions nuclears en un reactor i obtenir-ne energia, es necessiten principalment tres paràmetres:

- la temperatura
- la pressió
- el temps de confinament.

Aquest triple producte es mesura mitjançant el **criteri Lawson**, que examina l'equilibri energètic de qualsevol reactor de fusió que utilitzi plasma. El criteri Lawson mesura l'energia obtinguda i l'energia perduda i permet calcular l'energia neta obtinguda. L'equació és la següent:

Energia neta = eficiència x (energia de fusió - pèrdues de radiació - pèrdues de conducció)

on l'energia neta és la diferència entre l'energia produïda en la reacció, l'eficiència és el percentatge d'energia que el reactor pot aprofitar, l'energia de fusió és l'energia total produïda pel reactor, les pèrdues de radiació són pèrdues energètiques causades per l'emissió de llum i raigs X, i les pèrdues de conducció són pèrdues causades per partícules que es desvien del núvol de plasma.

Cal afegir que l'energia neta es refereix a energia per unitat de temps, ja que no es té en compte el temps que dura la reacció, sinó l'energia que aquest és capaç de produir en un període de temps. Llavors com més temps dura la reacció, més energia és capaç de produir.

L'energia de fusió es determina per la densitat dels combustibles (en partícules per unitat de volum), la secció de creuament, i l'energia de la reacció. La secció de creuament és una mesura de la probabilitat que hi ha de que dos nuclis atòmics es fusionin, i presenta una dependència lineal en funció de la temperatura. L'energia de la reacció, d'altra banda, ve determinada per les equacions energètiques de les reaccions nuclears.

La majoria de tots els paràmetres mencionats en les equacions anteriors o bé són específics de cada reactor o bé són semblants en tots els reactors excepte els tres paràmetres del triple producte mencionat al principi de l'apartat. En els experiments de les darreres dècades, però, la pressió ha arribat a un límit i la majoria d'experiments es situen al voltant d'aquest límit. És per això que tot i que el triple producte inclou la pressió, moltes vegades només s'utilitza la temperatura assolida i el temps de reacció per determinar l'èxit dels experiments.

2.3.2 - Tipus de reactors i funcionament

Els diferents tipus de reactors de fusió nuclear sorgeixen arran del principal problema per recrear la fusió a la Terra, el confinament de la reacció. El triple producte de Lawson requerit per fer la fusió nuclear i obtenir-ne beneficis energètics significatius impedeixen que la reacció estigui continguda per un material sòlid. L'element amb els punts de fusió i ebullició més alts és el tungstè, amb un punt de fusió de 3695 K i un punt d'ebullició de 6203 K, mentre que a dins del reactor es poden arribar a temperatures de fins a $1,5 \cdot 10^8$ K i, encara no s'ha descobert cap material sòlid que pugui resistir el contacte amb el plasma durant la fusió. Per donar solució a aquest problema, el plasma i les reaccions s'han de contenir d'altres

maneres i hi ha principalment dos mètodes, el confinament magnètic i el confinament inercial.

2.3.2.1 - Confinament magnètic

El confinament magnètic és una de les dues branques principals de la recerca en fusió nuclear, i la primera en desenvolupar-se. La primera proposta de reactor de fusió data a 1951, amb el model “Stellarator” de Lyman Spitzer, i aquest utilitza el confinament magnètic, com també ho fa el model amb el triple producte (temperatura, pressió i temps) més elevat, el “tokamak”.

El confinament magnètic, tal com el seu nom indica, utilitza camps magnètics molt potents per confinar i guiar el plasma dins el reactor. A part de contenir la reacció, el flux magnètic creat pels imants també desvia el plasma per conservar l'energia de manera més eficient.

Per obtenir les temperatures necessàries en un reactor de confinament magnètic es necessiten varis sistemes d'escalfament. La principal font de calor és la inducció. El sistema d'imants dels reactors confinen, guien, desvien i també escalfen el plasma. Aquest principi funciona perquè el plasma presenta certa resistència elèctrica, i quan el camp electromagnètic fa passar la corrent per aquest, les pèrdues d'electricitat es transformen en calor, de la mateixa manera que dins una bombeta la resistència del fil de tungstè transforma l'electricitat en calor i llum. Els camps magnètics més potents són els que normalment s'encarreguen de la primera fase de l'escalfament del plasma.

El segon mètode d'escalfament és la compressió. Com que el combustible és un gas, aquest al ser comprimit augmenta la seva temperatura, ja que el nombre de partícules és el mateix, per la llei general dels gasos ideals $PV = nRT$, on P és la pressió, V el volum, n el nombre de partícules, R la constant dels gasos i T la temperatura. Llavors en augmentar la pressió, augmenta la temperatura.

A més d'aquests dos mètodes, en els reactors amb temperatures més altes també es fan servir sistemes auxiliars com la injecció de partícules altament energètiques o l'escalfament per radiofreqüència.

Els problemes tècnics i teòrics presentats per aquests tipus de reactors són principalment les inestabilitats del plasma durant la reacció. Per obtenir beneficis energètics i encaminar els reactors cap a reaccions autosostenibles, es necessiten temperatures extremadament altes que fan el plasma molt inestable. És per això que els camps magnètics han de ser molt precisos i

potents, donant lloc a la necessitat d'utilitzar superconductors per aquesta finalitat. Els camps magnètics han estat objecte d'estudi durant tota la història de la recerca en fusió nuclear, i han presentat un dels majors reptes científics en aquest camp (Huang, C. i Li, L., 2018).

Els diferents reactors de confinament magnètic es classifiquen segons la forma del camp magnètic.

- **Miralls magnètics:** Els reactors anomenats de “miralls magnètics” van ser els primers reactors en ser desenvolupats, juntament amb els “stellarator”. El funcionament d'aquests reactors consisteix en un imant solenoide central compost d'electroimants. Aquests electroimants estan distribuïts de manera que les intensitats de camp són més elevades als extrems del solenoide i rebutgen les partícules carregades cap a l'interior, on el camp és més dèbil. Així, les partícules queden atrapades dins el camp. El principal problema d'aquest tipus de reactor és que només funciona per unes velocitats i energies concretes de les partícules, i això fa que les partícules que no compleixen les condicions escapin del camp magnètic.

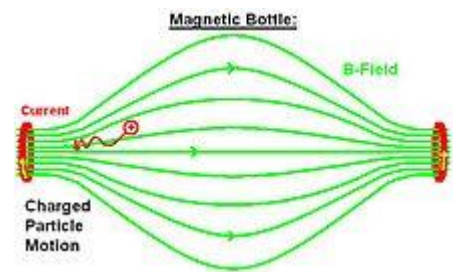


Figura 3 – Línies de camp magnètic d'un reactor amb miralls magnètics. Font: https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_mirror

- **Stellarator:** Aquest model de reactor consistia inicialment en una cambra en forma de torus dividida en dues meitats, i connectada per dos canals creuats en forma de 8, anomenat “figure-8”. Aquest reactor funciona amb varis imants solenoides al voltant de la cambra, originant una rotació del flux del plasma i imants que envolten el mateix flux, confinant aquest dins la cambra. La necessitat de fer els reactors en forma de 8 es va eliminar quan es va descobrir que amb un camp magnètic helicoidal al voltant del flux de plasma es poden fer els reactors en forma de torus perfectes. Aquest tipus de reactor va deixar de ser estudiat a mitjans dels anys seixanta degut a la complicació dels càlculs necessaris per predir el comportament del plasma. Els recents avenços en dinàmica del plasma i el desenvolupament de les simulacions per ordinador han permès la represa de la investigació en aquests tipus de reactors. Un dels reactors “stellarator” més recents i el més gran del món és el Wendelstein 7-X, un projecte de l'institut Max Planck que vol demostrar la viabilitat d'aquests reactors per a la producció energètica. Està situat a la ciutat de Greifswald, al nord d'Alemanya

(Fasoli, A., Brunner, S., Cooper, W. A., Graves, J. P., Ricci, P., Sauter, O. i Villard L., 2016).

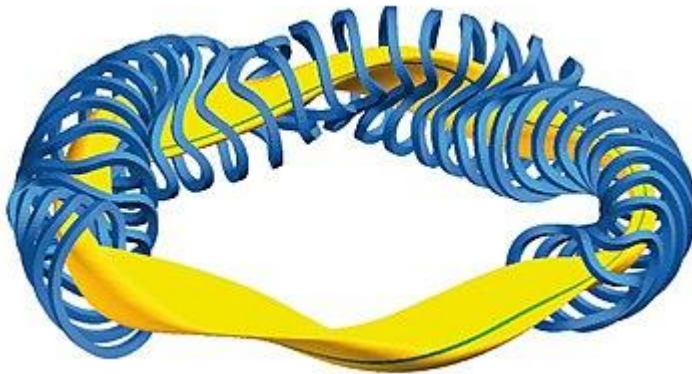


Figura 4 – Imants (en blau) i plasma (en groc) del reactor Wendelstein 7-X, un stellarator. Font: Institut Max Plank. <https://www.ipp.mpg.de/w7x>

- **Z- Pinch:** El sistema de confinament “Z-Pinch” elimina la necessitat d’imants exteriors pel confinament del plasma. Enviant un flux de corrent per l’interior del plasma que creï un camp magnètic suficientment potent, confina el plasma en si mateix. Aquest model va ser investigat principalment per la senzillesa del concepte. Varis reactors experimentals van intentar comprovar la seva viabilitat, però les inestabilitats en el plasma que presenten aquests reactors han impossibilitat la construcció d’un reactor que compleixi els requisits del criteri de Lawson.



Figura 5 – Reactor de fusió Z-Pinch experimental. Font: <https://en.wikipedia.org/wiki/Z-pinch>

- **Tokamak:** El “tokamak” és el reactor de confinament magnètic més eficient actualment, i és el que s’estudia més detalladament en aquest treball, en concret el reactor ITER. El “tokamak” és el model escollit per aquest reactor pels grans avenços tècnics que s’han fet en les últimes dècades en relació en aquest model i perquè és el més avançat científicament en control de plasma. Mentre que amb els “stellarators” el control del plasma encara és una incògnita, els “tokamak” són molt més fiables en

aquest sentit. El disseny d'aquest reactor és semblant al d'un "stellarator" per la forma toroidal que presenten els dos. La principal diferència és la forma del camp magnètic i la distribució dels imants.

Els "tokamaks" tenen tres seccions principals d'imants: els imants toroidals, que recobreixen tota la cambra; els imants poloidals, que dibuixen circumferències en plans horitzontals per l'exterior de la cambra; i l'imant solenoide central, que passa per l'interior del forat del torus. Aquest últim imant ha de ser el més potent i la principal font de camp magnètic, mentre que els altres serveixen de guia per contenir i desviar el plasma cap a l'interior.

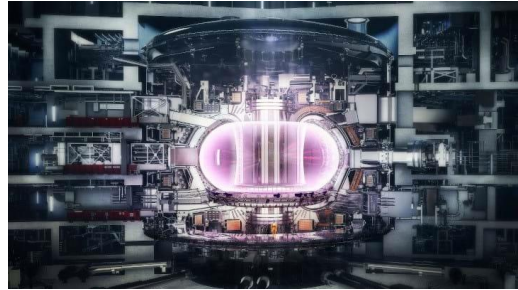


Figura 6 - Reactor tokamak de l'ITER. Font: Sparkes, M., New Scientist. <https://www.newscientist.com/article/2280763-worlds-most-powerful-magnet-being-shipped-to-iter-fusion-reactor/>

Un dels principals problemes del "tokamak" és la manutenció de la temperatura del plasma. Com més es desvia el plasma cap als laterals, més es refreda i ho fa amb molta rapidesa. Un altre problema que presenta el "tokamak" és el desgast de l'interior de la cambra. A diferència dels "stellarators", on el plasma està més allunyat de la part interior, el plasma dins un tokamak està relativament molt a prop de la paret de l'interior del torus i la radiació de neutrons altament energètics pot malmetre el reactor. La solució per aquest tipus de problema es resol augmentant la potència de l'imant solenoide central (que per aquest motiu és el més important), que expulsa el plasma a l'exterior.

2.3.2.2 - Confinament inercial

La fusió per confinament inercial es va descobrir i desenvolupar posteriorment a la fusió per confinament magnètic. Inicialment se'ls va donar més importància, però els resultats obtinguts són més baixos que els de reactors de confinament magnètic. Els valors d'energia obtinguda més alts són del NIF (National Ignition Facility, Livermore, Califòrnia), amb un retorn d'energia del 71%. L'energia gastada va ser de 1,9 MJ i l'energia obtinguda de 1,35 MJ. (Allan Chen, Lawrence Livermore National Laboratory, febrer 2022)

El funcionament d'aquest tipus de reactors és confinar la reacció mitjançant una explosió. El combustible, una mescla gasosa de deuteri i triti, s'insereix dins una càpsula esfèrica de

plàstic d'aproximadament un mil·límetre de radi i llavors es congela. Llavors, la càpsula amb el combustible és disparada amb làsers altament energètics. Al ser escalfats per tots els costats a la vegada, l'esfera de combustible es condensa cap a dins, impulsada per l'energia dels làsers, i al fer-ho augmenta la pressió a l'interior. Amb això s'aconsegueixen la temperatura i pressió necessàries perquè es produeixi la fusió nuclear.

Els experiments més recents en confinament inercial poden utilitzar dos mètodes diferents. El primer mètode, anomenat “direct drive” en anglès, es basa en disparar els làsers directament al combustible. Els desavantatges d'aquest mètode són que al disparar el combustible directament, la precisió dels làsers ha de ser molt alta per no provocar asimetries significatives i perdre l'energia innecessàriament. Per aquest motiu, limita la potència dels làsers, que com més potents són, també són menys precisos.

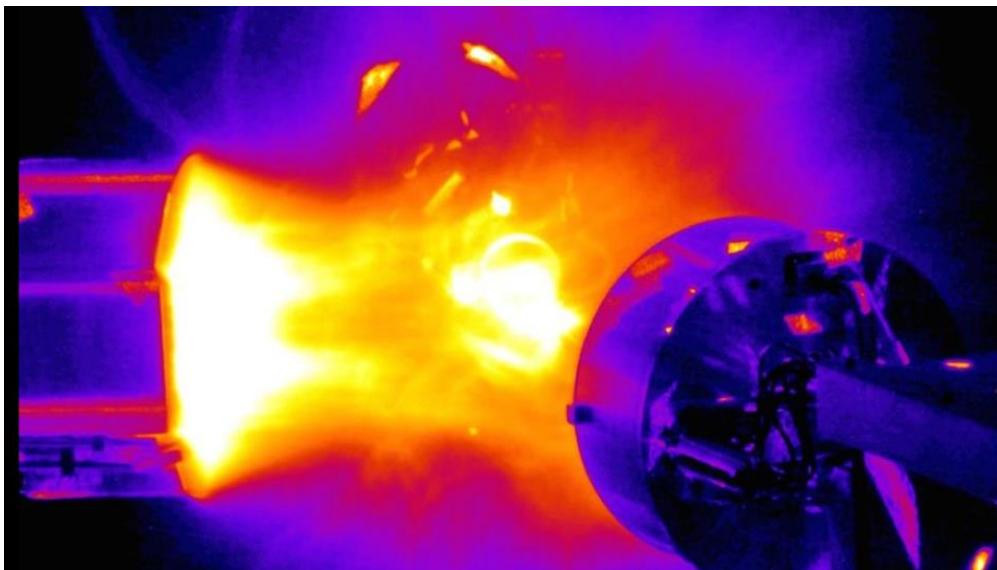


Figura 7 – Imatge d'una ignició del NIF. Font: Anònim, <https://luxel.com/one-many-amazing-experiments-occurring-livermore-national-lab/>

El segon mètode, en anglès “indirect drive” consisteix en dipositar l'esfera de combustible dins una càpsula cilíndrica feta d'un metall pesant, sovint or o plom. Llavors els làsers són disparats al cilindre, que al escalfar-se emet raigs X a l'interior. Aquest mètode permet utilitzar làsers molt més potents i menys precisos. Llavors, la forma mateixa del cilindre fa que s'emetin els raigs X de manera uniforme per així comprimir l'esfera correctament, amb la mateixa energia a totes bandes. Els desavantatges d'aquest mètode són que es perd part de l'energia escalfant el cilindre metàl·lic i tot i que els làsers poden ser més potents, es perd eficiència (Betti, R., Chang, P. Y., Spears, B. K., Anderson, K. S., Edwards, J., Fatenejad, M., Lindl, J. D., McCrory, R. L., Nora, R. i Shvarts, D., 2010).

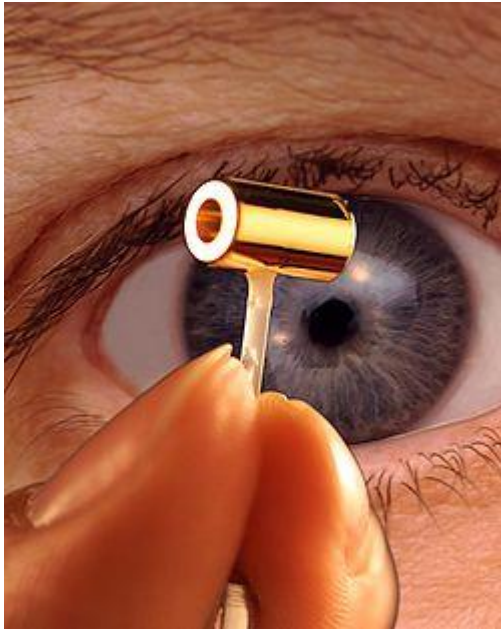


Figura 8 - Imatge d'un cilindre d'or utilitzat per l'"indirect drive". Font: Anònim, https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_confinement_fusion

2.3.3 - Combustibles

2.3.3.1 - Característiques

La fusió nuclear, amb les condicions necessàries es pot fer amb qualsevol parella d'àtoms, però les reaccions poden ser molt diferents. Les principals característiques que fan una reacció de fusió viable per a la producció energètica són l'energia alliberada, la radiació emesa, els residus i la dificultat d'obtenció del combustible.

La primera condició, l'energia, depèn de l'energia d'enllaçament nuclear dels nuclis que reaccionen. L'energia d'enllaçament nuclear és l'energia necessària perquè un nucli atòmic es divideixi en els seus respectius nucleons, i sempre és positiva en àtoms estables. Aquesta energia pot ser calculada mitjançant l'equació de la relativitat d'Einstein $E=mc^2$ on E és l'energia d'enllaçament nuclear, c és la velocitat de la llum i m és la massa perduda durant la formació del nucli. Per aquest motiu, un nucli atòmic sempre té menys massa que els seus nucleons per separat. Aquesta energia és una conseqüència de la força nuclear forta, una de les quatre forces de l'univers, que manté units els nucleons dins el nucli i els quarks dins els nucleons. L'energia d'enllaçament nuclear per nucleó d'un àtom augmenta en funció del nombre de nucleons que té l'àtom fins que arriba al níquel 62, des d'on baixa lleugerament en incrementar el nombre de nucleons. El ferro 56 i el ferro 58 tenen una energia d'enllaçament nuclear per nucleó semblant al níquel 62.

Les reaccions de fusió nuclear que produeixen nuclis més lleugers que el ferro 58 són exotèrmiques i per tant alliberen energia. Les reaccions amb nuclis més pesants són endotèrmiques, absorbeixen energia, i per tant no són viables per a la producció d'energia. A

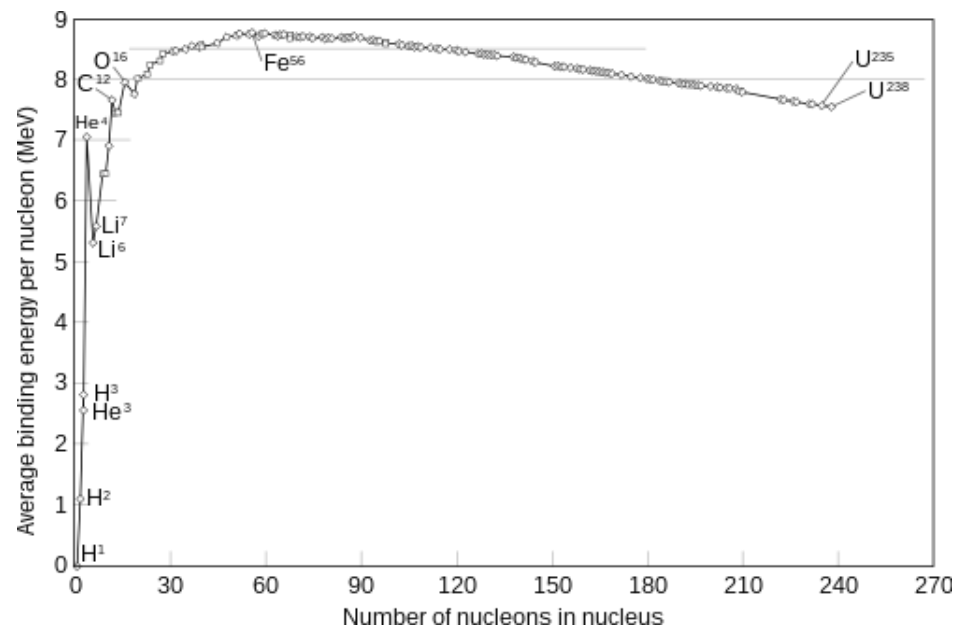


Figura 9 – Gràfic que representa l'energia d'enllaçament nuclear mitjana per nucleó en funció del nombre de nucleons dels àtoms. Font: Abdo, E. Haber, M. Younes, J.
https://www.researchgate.net/figure/The-average-binding-energy-per-nucleon-for-the-nuclei-of-different-elements-fig3_323116700

més, els nuclis més lleugers necessiten menys energia per fusionar-se que els nuclis més pesants. (Abdo, E. i altres, 2017)

La fusió nuclear és el segon procés més energètic per unitat de massa, només superat per l'anihilació de matèria amb antimatèria.

La radiació emesa en una reacció de fusió depèn del combustible però cap dels combustibles viables energèticament emet radiacions perilloses per la salut o el medi ambient. Sovint es dona en forma de neutrins, rajos gamma, partícules alfa o neutrons altament energètics. Aquesta radiació és espontània, és a dir, es produeix en el moment de la reacció i es dissipa gairebé immediatament. En un reactor, la radiació impacta contra l'interior de la cambra i desapareix, i un reactor de fusió no presenta cap mena de risc radioactiu. En contraposició, la fissió nuclear allibera neutrons altament energètics (que no són perillosos) i deixa residus radioactius que emeten altres radiacions activament durant centenars d'anys. Els residus que deixen les reaccions de fusió nuclear són els nuclis formats en les reaccions.

Els diferents combustibles estudiats per fer la fusió nuclear són els següents:

- Deuteri - triti: La reacció del deuteri (hidrogen 2) amb el triti (hidrogen 3) és la reacció que necessita menys energia d'activació, i és la primera que s'intenta aconseguir als reactors nuclears. Els productes de la reacció són un àtom d'heli 4 i un neutró lliure. La reacció produeix 17,59 MeV o $2,82 \cdot 10^{-12}$ J en unitats del sistema internacional (en reaccions nuclears es solen utilitzar els electronvolts perquè es treballa en escala atòmica i les energies són més petites). El neutró lliure és el que absorbeix la major part de l'energia i s'allibera a grans velocitats. Els avantatges d'aquest combustible són la facilitat de la ignició de la reacció i el fet de que els residus no són gens perillosos (de fet, l'heli alliberat es pot arribar a vendre per inflar globus). Els desavantatges, però, són que el triti és un isòtop molt rar a la naturalesa, constitueix només un $1 \cdot 10^{-15}\%$ de l'hidrogen a l'univers, i no n'hi ha suficient a la Terra com per abastir un reactor durant un llarg període de temps. Una solució que s'ha trobat a aquest problema és fabricar el triti dins el reactor mateix. Aquest isòtop també és el producte de la reacció entre un àtom de liti i un neutró, i el reactor en funcionament està alliberant neutrons contra les parets de la cambra constantment. La solució consisteix en cobrir les parets de l'interior del reactor amb liti perquè aquest fabriqui el seu propi combustible.
- Deuteri - deuteri: La reacció de dos nuclis de deuteri és la reacció que més eficiència té dins un reactor, i és la reacció que en un futur es creu que serà la que predominarà en el camp de la fusió nuclear. Aquesta reacció té dos possibles resultats, i cadascun dels dos té un 50% de probabilitat d'ocórrer en un reactor. El primer resultat és un àtom d'heli 3 i un neutró (similar a la reacció deuteri-triti). En aquest cas, allibera 3,27 MeV d'energia, $5,23 \cdot 10^{-13}$ J en el sistema internacional. El segon resultat possible és un àtom d'hidrogen 1 i un àtom de triti, i allibera 4,03 MeV, $6,46 \cdot 10^{-13}$ J en el sistema internacional. Els avantatges d'aquest combustible són l'eficiència de la reacció i l'abundància del combustible. La reacció deuteri-deuteri és la més eficient perquè només té un tipus de reactiu, que reacciona amb si mateix. Això causa que la probabilitat de que dos nuclis es fusionin en un reactor es duplica respecte la reacció deuteri-triti. D'aquesta manera, en el mateix període de temps es fan el doble de reaccions i per tant s'obté un bon rendiment tot i ser una reacció menys energètica. L'altre avantatge, l'abundància del combustible, és deguda a que el deuteri és un isòtop molt més comú que el triti. Es calcula que per cada 6500 àtoms d'hidrogen n'hi

ha un de deuteri i tot i que sembla una fracció molt petita, l'hidrogen és tan abundant que sovint es parla del deuteri com un combustible virtualment il·limitat. Hi ha plantes de producció de deuteri arreu del món que extreuen l'anomenada "aigua pesada" de l'aigua de mar. "L'aigua pesada" és l'aigua formada per dos àtoms de deuteri i un d'oxigen, sovint formulada com a D₂O, i de "l'aigua pesada" se'n pot extreure deuteri fàcilment. En un futur reactor nuclear i amb les instal·lacions adequades, es pot arribar a extreure el combustible directament de l'aigua de mar, fent el deuteri el combustible més fàcil d'obtenir.

- Deuteri - heli 3: La reacció de deuteri amb heli 3 és la reacció que presenta més dificultats tècniques, i els reactors de les pròximes dècades s'estima que encara no utilitzaran aquest combustible. Els productes de la reacció de deuteri amb heli 3 són un àtom d'heli 4 i un àtom d'hidrogen 1. L'energia alliberada és de 18,3 MeV, en sistema internacional són $2,93 \cdot 10^{-12}$ J, i recau principalment en l'àtom d'hidrogen expulsat a gran velocitat. Els problemes tècnics mencionats anteriorment són que l'energia d'activació de la reacció és 2 vegades la del deuteri-deuteri i 20 vegades la del deuteri-triti, i l'heli 3 és un combustible molt complicat d'obtenir. Aquest isòtop de l'heli és molt lleuger, i la seva densitat és tan baixa, que s'escapa de l'atmosfera terrestre i s'escapa a l'espai exterior. Per a futurs projectes, l'heli 3 es troba en grans quantitats a la Lluna, on la falta d'atmosfera permet la seva presència. Un futur reactor de fusió a la Lluna podria funcionar amb aquest combustible i aconseguir l'heli 3 de manera molt més senzilla que a la Terra. Un altre desavantatge d'aquest combustible, però, és que la reacció és la menys eficient de les tres mencionades. El combustible deuteri-triti és un 50% més eficient i el deuteri-deuteri un 150% més eficient. L'únic avantatge que suposa aquesta reacció és que elimina completament la necessitat de treballar amb triti, que és lleugerament radioactiu. Aquest fet converteix el combustible deuteri-heli en l'únic combustible que no allibera cap àtom radioactiu.

Les equacions de les reaccions mencionades són les següents:

- Deuteri-triti: ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1_0\text{n} + 17,59 \text{ MeV} (2,82 \cdot 10^{-12} \text{ J})$
- Deuteri-deuteri: ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H} + 4,03 \text{ MeV} (6,46 \cdot 10^{-13} \text{ J})$ o (50% de probabilitat) ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^1_0\text{n} + 3,27 \text{ MeV} (5,23 \cdot 10^{-13} \text{ J})$

- Deuteri-heli 3: ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + 18,3 \text{ MeV} (2,93 \cdot 10^{-12} \text{ J})$

2.3.3.2 - Cicles de reaccions

A vegades les reaccions de fusió nuclear no es limiten a repetir una sola reacció sinó que encadenen diverses reaccions, normalment augmentant l'energia que produeixen. En el cas dels reactors nuclears s'estudien principalment reaccions aïllades, que són més fàcils de dur a terme, però dins les estrelles, hi ha varies cadenes de reaccions. Aquestes cadenes originades naturalment en estrelles es classifiquen en dos tipus (nota: quan parlem de reaccions nuclears en estrelles, parlar d'àtoms i de nuclis és realment el mateix, ja que els electrons no estan lligats als nuclis dins el plasma):

- Cadenes protó-protó: Les anomenades cadenes protó-protó són un tipus de combinacions de reaccions que es donen a lloc principalment en estrelles similars al sol o de menor massa. Tenen una energia d'activació relativament baixa a la pressió del nucli solar, de $4 \cdot 10^6 \text{ K}$, per això aquestes reaccions predominen en estrelles petites. Les cadenes comencen sempre amb les mateixes reaccions, però llavors tenen varies possibilitats. Les primeres dues reaccions són les comunes. En la primera, dos protons es fusionen i formen un nucli de deuteri, alliberen un positró i un neutrí. En la segona, el nucli de deuteri i un altre protó es fusionen per formar un nucli d'heli 3 i alliberar un altre neutrí. A partir d'aquí, es bifurquen (Fowler, W. A., 1994).

L'equació dels passos comuns és: $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e + 1,442 \text{ MeV}$ (primer pas)
 ${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5,493 \text{ MeV}$ (segon pas).

- Cadena protó-protó I: El tercer pas d'aquesta cadena és fusionar l'heli 3 resultant dels primers passos amb un altre heli 3, també resultant d'aquests passos (ajuntant dues cadenes) per formar un nucli d'heli 4 i dos protons. Aquests protons llavors poden continuar més cadenes. La cadena I és la més abundant de les tres, i constitueix el 83,3% de les cadenes protó-protó en estrelles similars al sol. Sol predominar en estrelles amb temperatures al voltant dels $1 \cdot 10^7 \text{ K}$ i els $1,8 \cdot 10^7 \text{ K}$.

L'equació corresponent és: ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2 {}^1\text{H} + 12,86 \text{ MeV}$

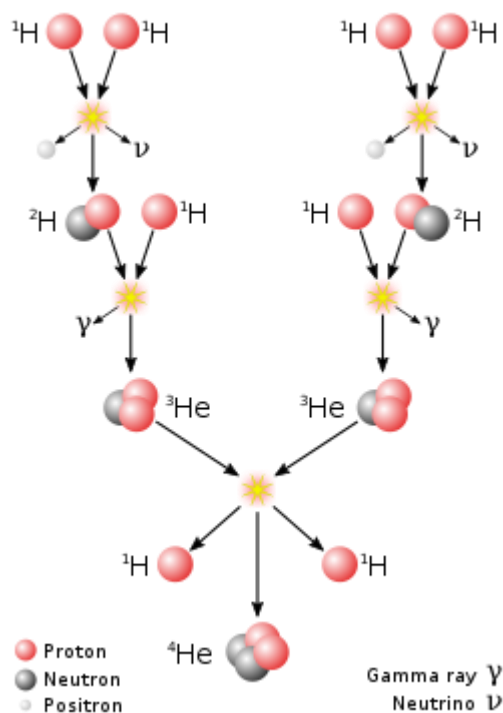


Figura 10 – Esquema de la cadena protó-protó I. Font: Anònim, https://hmn.wiki/es/Nuclear_fusion

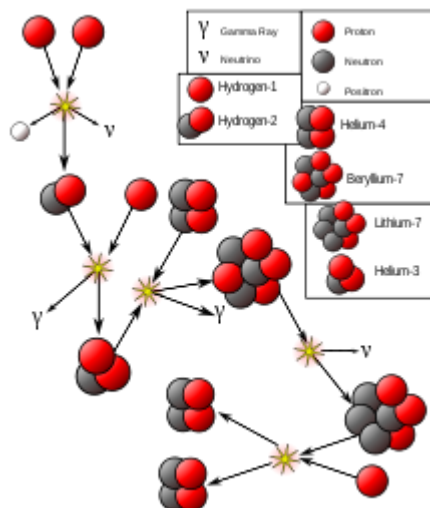
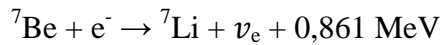
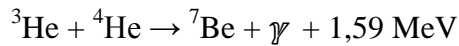


Figura 11 – Esquema de la cadena protó-protó II. Font: Anònim, https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain

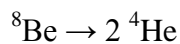
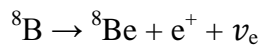
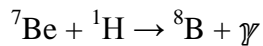
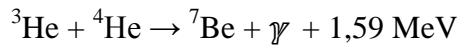
- Cadena protó-protó II: El tercer pas en aquesta variant uneix l'heli 3 dels primers passos amb un heli 4 (pot venir de la cadena I o de les altres dues un cop el procés està en funcionament) per formar beril·li 7 i rajos gamma. Llavors el beril·li 7 allibera un neutrí i es transforma en liti 7. Finalment, el liti 7 es combina amb un protó per formar dos àtoms d'heli 4. Aquesta cadena predomina en estrelles amb temperatures entre els $1,8 \cdot 10^7 \text{ K}$ i els $2,5 \cdot 10^7 \text{ K}$ i

constitueix el 16,68% de les cadenes protó-protó en estrelles similars al sol.

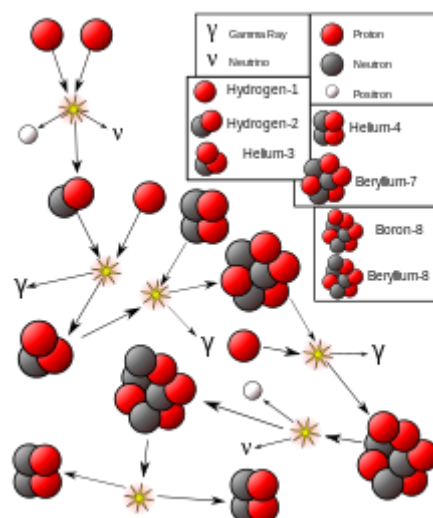
Les equacions corresponents són:



- Cadena protó-protó III: Aquesta cadena és igual que la cadena II fins a la formació de beril·li 7. En aquesta, però, el beril·li 7 es fusiona amb un protó per formar bor 8 i rajos gamma. El bor 8 ràpidament allibera un positró i un neutrí i esdevé beril·li 8. Finalment, el bor 8 es descompon en dos nuclis d'heli 4. Aquesta cadena predomina en estrelles de més de $2,5 \cdot 10^7$ K de temperatura, i constitueix només el 0,02% de les reaccions en estrelles semblants al sol. Les equacions corresponents són:



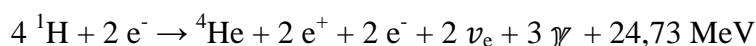
(les últimes tres reaccions en conjunt alliberen 18,23 MeV, però es desconeix



l'energia alliberada per cadascuna d'elles)

Figura 12 - Esquema de la cadena protó-protó III. Font: Anònim, https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain

- **Cicle CNO:** El cicle CNO (de carboni, nitrogen i oxigen) és un cicle tancat de reaccions nuclears que es donen a terme dins les estrelles. Aquest cicle és típic d'estrelles més grans del sol (a partir d'1,3 masses solars). A diferència de la cadena protó-protó, aquest cicle va transformant un àtom de carboni en nitrogen i oxigen, però sempre torna al seu estat original. Això significa que mentre que els altres reactius i productes varien al llarg del cicle, el nucli de carboni acaba sent el mateix i es pot reutilitzar infinites vegades per continuar reaccionant (Wiescher, M., Görres, J., Uberseder, E., Imbriani, G. i Pignatari, M., 2010). Si no es té en compte l'àtom reutilitzat, l'equació és la següent:



Com que els dos electrons i els dos positrons s'anihilen mútuament i alliberen dos rajos gamma cadascun i energia, a vegades els productes de l'equació es presenten així: $\rightarrow \text{ } ^4\text{He} + 2 \text{ } \nu_e + 7 \text{ } \gamma + 26,77 \text{ MeV}$

El cicle complet és el següent: Un àtom de carboni-12 i un àtom d'hidrogen-1 formen un àtom de nitrogen-13 i alliberen rajos gamma. L'àtom de nitrogen-13 es descompon en carboni-13, un positró i un neutrí. El carboni-13 es fusiona amb un protó i formen un àtom de nitrogen-14 i alliberen rajos gamma. El nitrogen-14 es torna a fusionar amb un protó per formar oxigen-15 i rajos gamma. L'oxigen-15 es descompon en

nitrogen-15, un positró i un neutrí. Finalment, el nitrogen-15 es torna a fusionar amb un protó i formen un àtom de carboni-12 i un àtom d'heli-4.

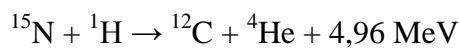
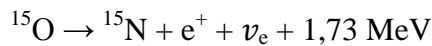
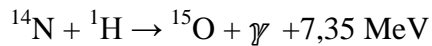
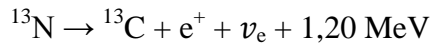
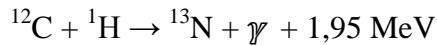
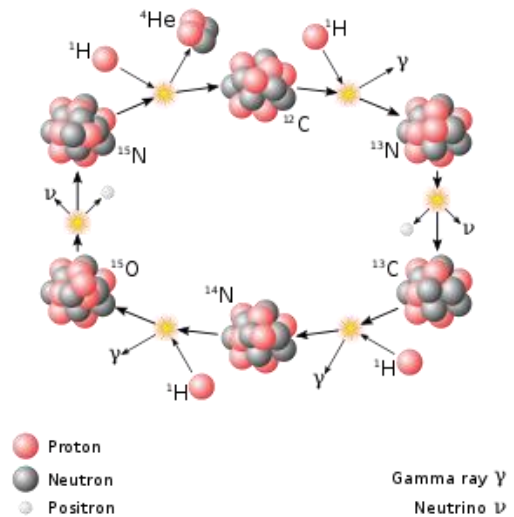


Figura 13 - Esquema del cicle CNO-I. Font: Anònim, https://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle



2.4 - Avantatges i inconvenients

L'energia de fusió nuclear està en fase experimental, però un reactor funcional podria provocar una autèntica revolució en el món de l'energia. Les formes d'obtenció d'energia actuals totes presenten inconvenients, un dels principals, l'emissió de gasos d'efecte hivernacle.

L'any 2021, el 83% de l'energia consumida mundialment provenia del petroli, el carbó i el gas natural. Aquestes fonts d'energia alliberen gasos d'efecte hivernacle, que són perjudicials pel medi ambient, i el combustible que utilitzen és limitat.

L'energia de fissió nuclear, una de les més importants a França, és una de les energies més polèmiques. El principal inconvenient d'aquesta font d'energia són els residus radioactius generats durant les reaccions de fissió. Aquests residus són molt difícils de tractar i sovint poden acabar abocats al mar, on malmeten l'ecosistema. També tenen un risc de catàstrofe nuclear en cas d'accident, com els accidents que van ocórrer a les ciutats de Txernòbil i Fukushima.

Les energies renovables, finalment, són les més respectuoses amb el medi ambient en general. A més, les fonts d'energia que utilitzen són pràcticament il·limitades, d'aquí el nom de renovables. Totes les renovables, però, tenen desavantatges. L'energia hidroelèctrica depèn de l'estat del riu on està situada la central, si hi ha menys aigua, es produeix menys energia. L'inconvenient més gran no és aquest, sinó la destrucció dels ecosistemes de riu

durant la construcció dels pantans artificials així com l'abandonament forçat de pobles sencers. Aquests pantans presents a totes les centrals hidroelèctriques avui en dia, han eliminat bona part de l'ecosistema on estan situats. A més, la regulació del cabal dels rius pot tenir conseqüències a les parts més baixes dels rius. L'energia solar també depèn de les condicions climàtiques. En zones molt allunyades de l'equador, la incidència solar no és suficient per produir energia a gran escala, i la producció també es veu afectada per les hores de sol. En zones properes a l'equador i amb climes amb pocs núvols, l'energia solar (ja sigui tèrmica o fotovoltaica) és una molt bona opció, però moltes vegades no hi ha prou inversió econòmica per dur a terme els projectes. L'energia eòlica, igual que les altres renovables, depèn del clima. Els parcs eòlics han d'estar situats en zones molt concretes on hi hagi suficient vent. Quan estan en zones apartades de la civilització no solen portar problemes, però la presència de molins prop d'habitatges és una gran molèstia pels veïns, que es solen queixar del soroll i l'alteració del paisatge. Les altres energies renovables són més minoritàries però també necessiten unes condicions molt específiques i solen dependre de factors externs com el clima.

La fusió nuclear en canvi, no allibera gasos d'efecte hivernacle, es pot situar a gairebé qualsevol lloc ja que no depèn de factors externs, no malmet l'ecosistema (més enllà del fet de que s'ha de construir l'edifici del reactor), utilitza un combustible virtualment il·limitat i no deixa residus perjudicials per la salut o el medi ambient.

3 - ITER

3.1 - Què és?

El projecte ITER (acrònim en anglès de “*International Thermonuclear Experimental Reactor*”, en català “reactor termonuclear experimental internacional”) és un projecte internacional que té com a objectiu demostrar la viabilitat de l’obtenció d’energia a través de la fusió nuclear. Es va fundar el 24 d’octubre de 2007 i actualment té 35 estats membres: la Unió Europea, Xina, Japó, Índia, Corea del sud, Rússia i els Estats Units. És un dels projectes internacionals més grans i costosos de la història de la humanitat, amb una inversió d’aproximadament 24.000 milions d’euros. La Unió Europea és la que assumeix la major part del cost, un 46%, i els altres membres un 9% cadascun. ITER té un doble significat, a part de l’acrònim també significa “el camí” en llatí, i es refereix al camí cap a una nova energia.

El projecte consisteix en el disseny, construcció i operació d’un “tokamak”. El reactor està actualment en fase de muntatge, i s’està construint a Cadarache, al sud de França.

3.2 - Reactor

El reactor de l’ITER és el “tokamak” més gran del món. Té $2,3 \cdot 10^7$ Kg de massa en total i pot contenir un volum de plasma de 840 m^3 . S’està construint en un complex de 180 hectàrees i 39 edificis. L’edifici central, el que conté el reactor, és un edifici de 7 pisos de formigó armat, amb una altura total de 73 metres.

El rècord d’energia de fusió nuclear en un reactor és de 59 MJ, i actualment el té el JET (Joint European Torus), que va assolir aquest rècord el febrer de 2022 en una activació que va durar 5 segons. L’ITER, en canvi, consumirà 50 MW de potència, és a dir 50 MJ cada segon, i està previst que produeixi 500 MW, multiplicant l’energia gastada per un factor de 10, esdevenint el primer reactor de fusió nuclear en obtenir energia neta.

El reactor està format per varies parts:

3.2.1 - Cambra de buit

La cambra de buit és el lloc on es confina el plasma i es fan les reaccions de fusió nuclear. La cambra de l’ITER pesa uns $8 \cdot 10^6$ Kg, té un radi de 6,2 metres i una capacitat de 1400 m^3 . És una cambra hermètica d’acer en forma de toroide i té dues funcions. La primera actuar com a primera barrera de contenció per la radioactivitat emesa durant les reaccions i la segona és

mantenir el buit per tal de que la contaminació del plasma amb partícules de l'exterior, sigui la mínima possible.

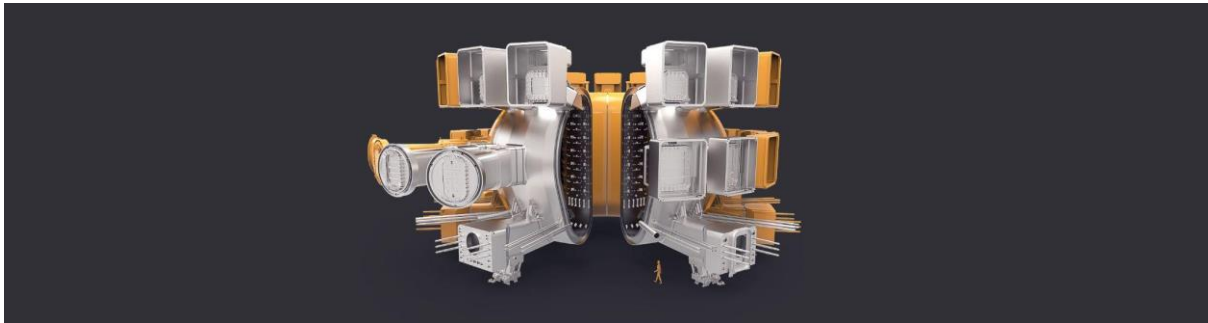


Figura 14 - Representació de la cambra de buit de l'ITER. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/vacuumvessel>

La cambra té 44 obertures per poder accedir als components de l'interior durant les reparacions i el manteniment. També té dues capes de protecció tèrmica per protegir el criòstat (que es troba a l'exterior) de les altes temperatures, ja que aquest opera a 4,2 K (-268,8 °C) i l'interior de la cambra arribarà als $1,5 \cdot 10^8$ K.

Per fer el buit dins la cambra, hi ha un sistema de bombes de buit que s'encarreguen d'eliminar la presència de partícules no desitjades, que poden interferir en el plasma i causar inestabilitats inesperades. Les partícules que causen més problemes són les molècules orgàniques, que al ser més pesades interfereixen més amb el plasma. La pressió dins la cambra un cop s'ha fet el buit és de $1 \cdot 10^{-6}$ atm, una milionèsima part de la pressió atmosfèrica. El sistema de bombes de buit està compost de sis bombes d'escapament per la cambra toroidal, quatre bombes criogèniques pels sistemes d'injecció de rajos neutrals, i dues bombes criogèniques més pels imants superconductors, que operen a baixes pressions.

3.2.2 - Mantell

El mantell és el conjunt de peces que recobreixen la cambra de buit per dins i protegeixen la resta del reactor de la calor del plasma. Està format per 440 mòduls que recobreixen una superfície total de 600m^2 . Cada mòdul mesura $1 \cdot 1,5$ m (de superfície en contacte amb el plasma) i pesa $4,6 \cdot 10^3$ Kg, i existeixen 180 variants de disseny, depenent de la posició dins la cambra. Tot el

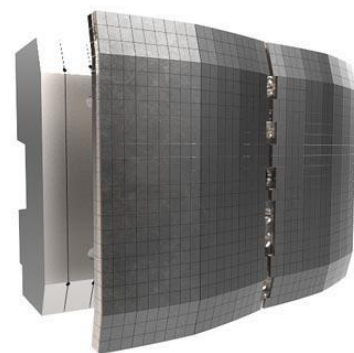


Figura 15 - Representació d'un mòdul del mantell de l'ITER. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/blanket>

mantell estarà refrigerat activament amb aigua, amb una potència de refrigeració de fins a 736 MW.

Els mòduls estan formats per dues parts que es poden separar. La primera part són els panells en contacte amb el plasma. Aquests, són els encarregats d'absorbir l'excés de calor produït pel reactor en funcionament. La primera capa dels panells està feta de beril·li, un dels metalls que menys contamina el plasma de l'interior, i la resta d'un aliatge de coure i acer inoxidable. Existeixen dos tipus de panells, en funció de la calor que han d'absorbir. El primer tipus, pensat per les zones del radi exterior del toroide, poden absorbir fins a 2 MW/m^2 , i el segon tipus, pensat pel radi interior, que està més en contacte amb el plasma, fins a $4,7 \text{ MW/m}^2$. La segona part dels mòduls, el bloc principal, és l'encarregat de protegir la resta del reactor de la radiació de neutrons altament energètics emesa durant les reaccions nuclears. També conté les canonades per on circula l'aigua que refrigera els panells.

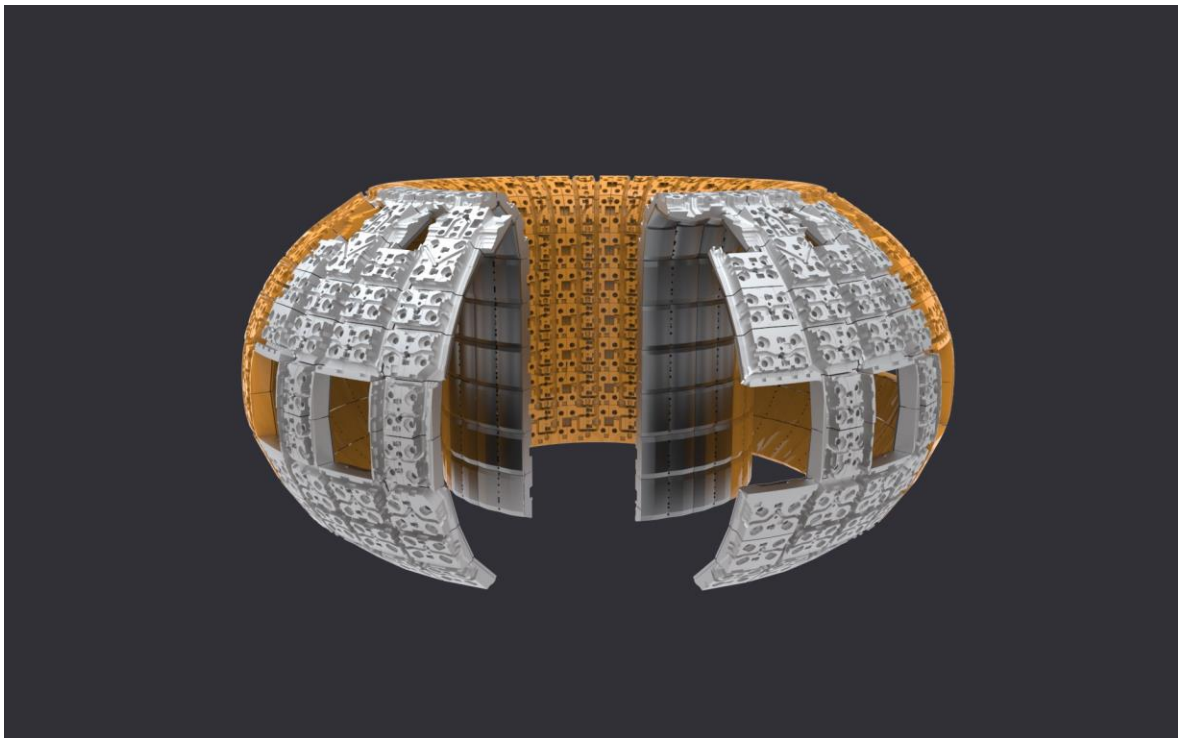


Figura 16 - Representació del mantell del reactor ITER. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/blanket>

3.2.3 - Desviador

El desviador, en anglès “divertor”, és una part situada a sota de la cambra toroidal que s’encarrega de controlar l’excés de gas, eliminar les impureses del plasma i els residus formats durant les reaccions, i protegir els components situats a darrera del desviador de la

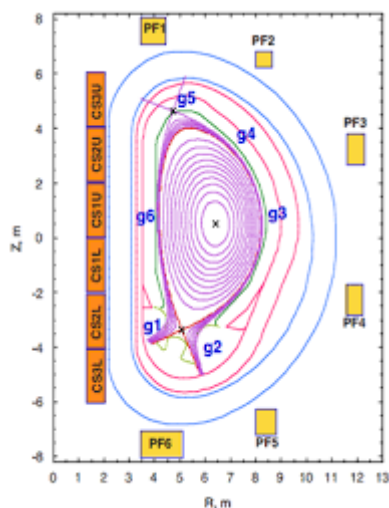


Figura 18 - Representació gràfica de les línies de camp magnètic dins el reactor ITER. Els punts g1 i g2 són els llocs d'impacte amb el desviador. Font: Organització ITER, <https://mappingignorance.org/2013/11/25/iter-engineering-challenges-of-putting-the-sun-into-a-box-part-2/>



temperatura i la radiació. Està format per 54 mòduls situats en forma de circumferència a la part de sota de la cambra de buit. Cada mòdul pesa $1 \cdot 10^4$ Kg i està format de quatre parts. La primera part és l'estructura de suport, feta d'acer inoxidable i les altres tres són les parets encarades cap al plasma. Hi ha una paret a sota enfocant cap a dalt, i dues parets verticals per l'interior i l'exterior. Les parets verticals, estan situades al punt on desemboquen les línies de camp magnètic (g1 i g2 a la figura 18) i són els components que hauran d'aguantar més radiació de tot el reactor. L'energia cinètica dels neutrons, al xocar amb les parets, es transforma en energia calorífica, i les parets hauran de suportar entre 10 i 20 MW/m² de potència per metre quadrat d'energia calorífica, que serà dissipada amb un sistema de refrigeració activa d'aigua com el del mantell. Degut a les condicions en les que es troben, aquests components estan fets de tungstè, el metall amb el punt de fusió més elevat.

3.2.4 - Criòstat

El criòstat és una cambra de buit que engloba tot el reactor. A diferència de l'anterior, que contenia el plasma a altes temperatures, aquesta manté la pressió i la temperatura a nivells molt baixos en tota la part exterior a la cambra interior. És una cambra cilíndrica de 29 metres d'altura i 14,5 m de radi, amb un volum total de $1,6 \cdot 10^4$ m³ (no coincideix amb les mesures anteriors perquè aquestes són mesures màximes de l'exterior del criòstat, i el volum es refereix a la capacitat de l'interior). Pesa al voltant de $3,85 \cdot 10^6$ Kg i és la cambra de buit

més gran del món. A l'interior del criòstat, la pressió serà de $9,87 \cdot 10^{-10}$ atm, i la temperatura variarà en funció dels components. Entre el criòstat i la cambra de buit més interior hi ha espai pensat per la dilatació dels materials durant el funcionament del reactor.

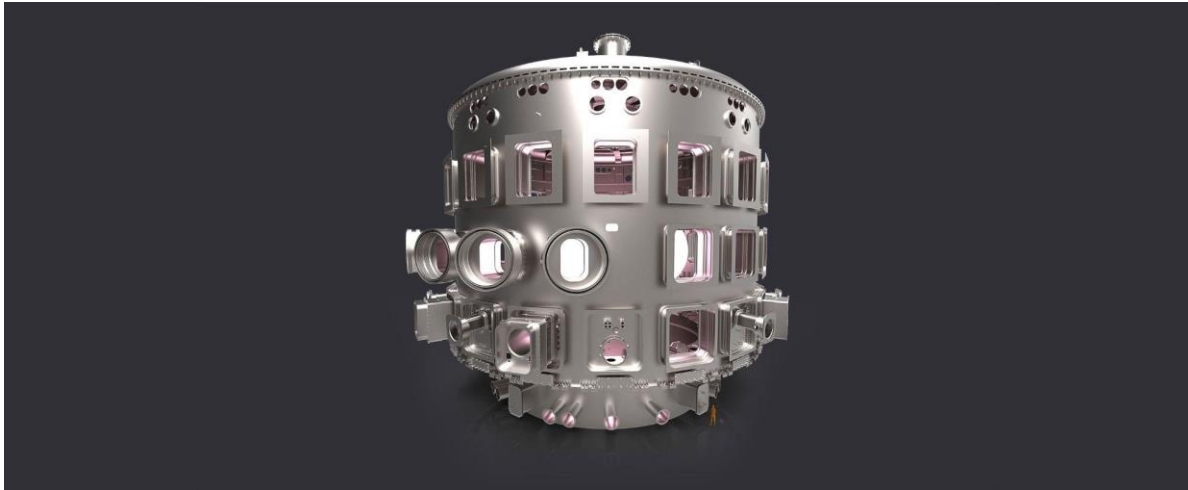


Figura 19 – Representació del criòstat de l'ITER. La persona en taronja a baix a la dreta de la imatge està a escala real. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/crvostat>

L'interior del criòstat està equipat amb sistemes de refrigeració que mantenen les baixes temperatures pels components que ho necessiten. Els sistemes de refrigeració utilitzen nitrogen líquid, heli líquid i heli en estat supercrític per refredar els components. Els components que necessiten més refrigeració són els electroimants superconductors i les bombes de buit criogèniques, amb temperatures de 4 K. Els refrigeradors poden refredar també a temperatures de 50 K i 80 K, per els diferents components, com els escuts tèrmics que protegeixen els imants.

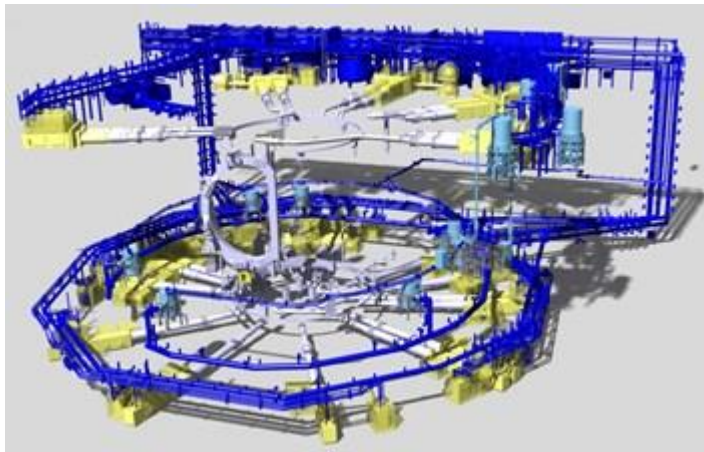


Figura 20 – Representació del sistema de refrigeració de l'ITER. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/cryo>

3.2.5 . Imants

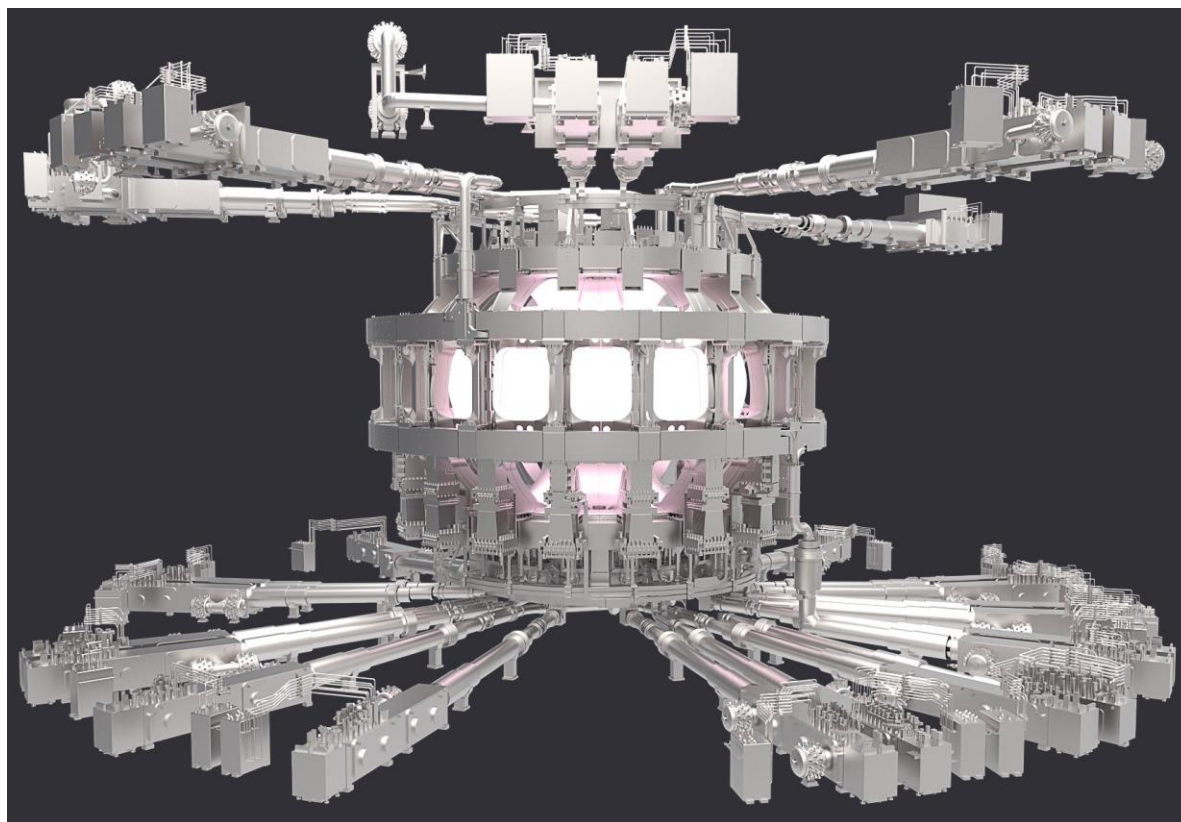


Figura 21 – Representació del sistema d'imants i els seus alimentadors energètics. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/magnets>

Els imants són els encarregats de contenir, guiar, i desviar el plasma dins el reactor. En el cas de l'ITER, són electroimants fets d'un material superconductor. Els electroimants estan fets de cables de Nb₃Sn (triniobi-estany) barrejats amb cables de coure (excepte per alguns imants), i en total hi ha $1 \cdot 10^{11}$ metres de cable, suficient per donar la volta a la Terra dues vegades. Els imants tenen una energia magnètica emmagatzemada total de $8,1 \cdot 10^{10}$ J i estan refrigerats a 4 K.

L'Nb3Sn és un material superconductor de tipus II, i es comporta com a superconductor a baixes temperatures. La seva temperatura crítica (a partir de la qual es comporta com a superconductor) és de 18,3 K. L'alternativa a aquest material és el NbTi (niobi-titani) però l'Nb3Sn té una corrent crítica de 30 T (teslas) a 4 K, mentre que el niobi-titani en té una de només 15 T. Es van descobrir les seves



Figura 22 – Imatge d'un dels cables emprats per la construcció dels imants de l'ITER. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/magnets>

característiques de superconductor el 1954 i és un dels superconductors que pot conduir més densitat de corrent en estat de superconductor.

Els imants estan repartits en varis sistemes amb diferent forma, localització i funció:

3.2.5.1 - Imants poloidals

Els imants poloidals són els únics imants que estan fets de NbTi. Tenen forma de circumferència i estan situats a l'exterior del toroide. La seva funció principal és mantenir el plasma allunyat de les parets exteriors del torus. En total són sis imants, produeixen una

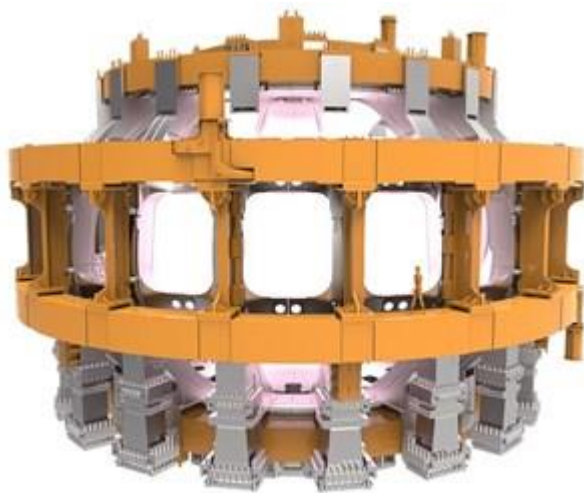


Figura 24 - Representació dels imants poloidals (en taronja) de l'ITER. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/magnets>

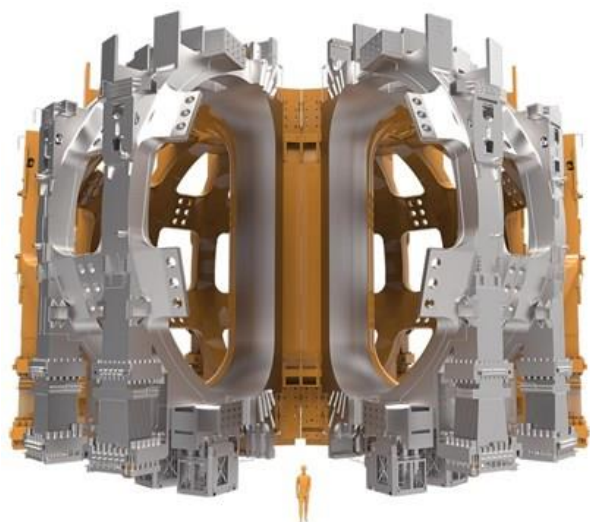


Figura 23 - Representació dels imants toroidals (en taronja) de l'ITER. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/magnets>

energia magnètica de $4 \cdot 10^9$ J i un camp magnètic de 6 T.

3.2.5.2 - Imants toroidals

Els imants toroidals són imants en forma de “D” que cobreixen tot el torus. La seva funció principal és el confinament del plasma. Són divuit imants de 9x17 metres i pesen $3,6 \cdot 10^5$ Kg. En total produeixen un camp magnètic de 11,8 T i una energia magnètica de $4,1 \cdot 10^{10}$ J.

3.2.5.3 - Imant solenoide

L'imant solenoide central és l'imant més important del reactor. És un cilindre de 2 m de radi i 18 m d'altura, i té varies funcions. Per una banda, allunya el plasma de les parets interiors del toroide i el guia cap a un moviment de rotació. Per l'altra banda, és



Figura 25 - Representació de l'imant solenoide de l'ITER. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/magnets>

l'imant encarregat d'induir el plasma amb corrent per escalfar-lo. Té una energia magnètica emmagatzemada de $6,4 \cdot 10^9$ J i pot crear camps de fins a 13 T, cosa que el converteix en l'imant més potent del reactor. També és capaç d'induir corrents de $1,5 \cdot 10^7$ A (ampers) durant 500 segons.

3.2.5.4 - Altres imants

A part dels tres sistemes principals, hi ha dos altres sistemes menys importants que s'encarreguen d'eliminar les impureses i irregularitats del camp magnètic. Aquests dos sistemes consisteixen en un sistema d'imants correctors situat entre els toroidals i els poloidals, i un sistema d'imants no-superconductors (els únics) que es troben dins la cambra. Aquests últims no són superconductors perquè les temperatures de l'interior de la cambra impedeixen la possibilitat de refrigerar-los a la temperatura necessària.

3.2.6 - Sistemes d'escalfament del plasma

Per arribar als $1,5 \cdot 10^8$ K de temperatura (10 vegades més que el nucli del sol) es necessiten diversos sistemes per escalfar el plasma. Un d'ells és l'escalfament per inducció, a càrrec de l'imant solenoide, però amb aquest no és suficient. Hi ha tres altres sistemes per a aquesta finalitat.

3.2.6.1 - Injecció de raigs neutres

El primer mètode consisteix en enviar àtoms a altes velocitats dins el reactor per escalfar el plasma mitjançant els xocs. Els àtoms en qüestió són de deuteri perquè així es confonen amb el combustible. Per accelerar els àtoms, primer se'ls ionitza, perquè sinó no es poden accelerar amb un camp elèctric, i un cop agafen la velocitat necessària, es reverteix el procés de ionització per no interferir amb el corrent magnètic present dins el reactor. Hi haurà dos generadors de raigs neutres que injectaran deuteri amb una potència de $1,65 \cdot 10^7$ W cadascun.

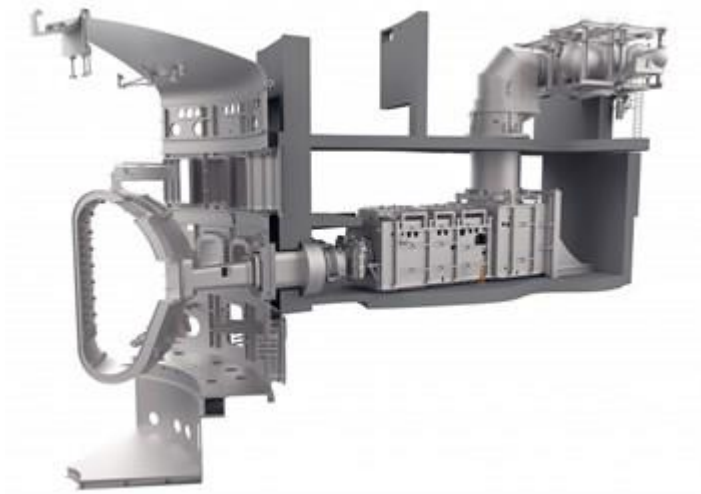


Figura 26 - Representació d'un injector de raigs neutres de l'ITER. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/heating>

3.2.6.2 - Escalfament per radiofreqüència

L'escalfament per radiofreqüència consisteix en enviar ones de ràdio al plasma per escalfar-lo, de manera similar al microones amb el menjar. Hi ha dos tipus d'emissors de radiofreqüències, en funció del blanc. Uns envien ones a una freqüència d'entre 40 i 55 MHz, la freqüència de ressonància dels ions, i els altres a 170 GHz, la freqüència de ressonància dels electrons. Llavors els electrons transfereixen l'energia als ions mitjançant xocs. Hi haurà 2 dispositius per escalfar els ions amb una potència de 10 MW i 24 dispositius per als electrons amb una potència de 1 MW cadascun.

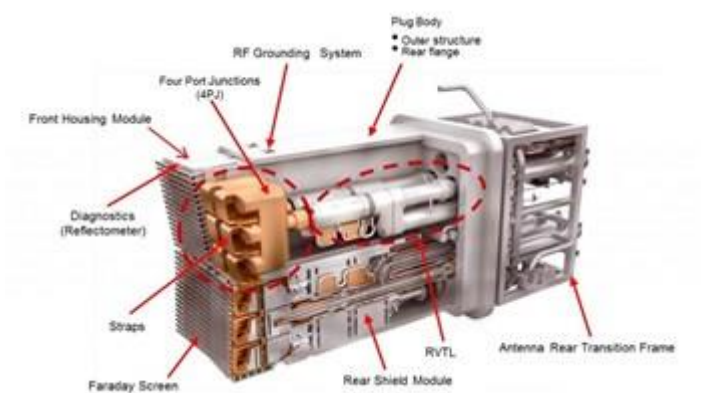


Figura 27 - Representació d'un emissor de radiofreqüència per l'escalfament de ions de l'ITER. Font: Organització ITER, <https://www.iter.org/mach/heating>

4 - Superconductors

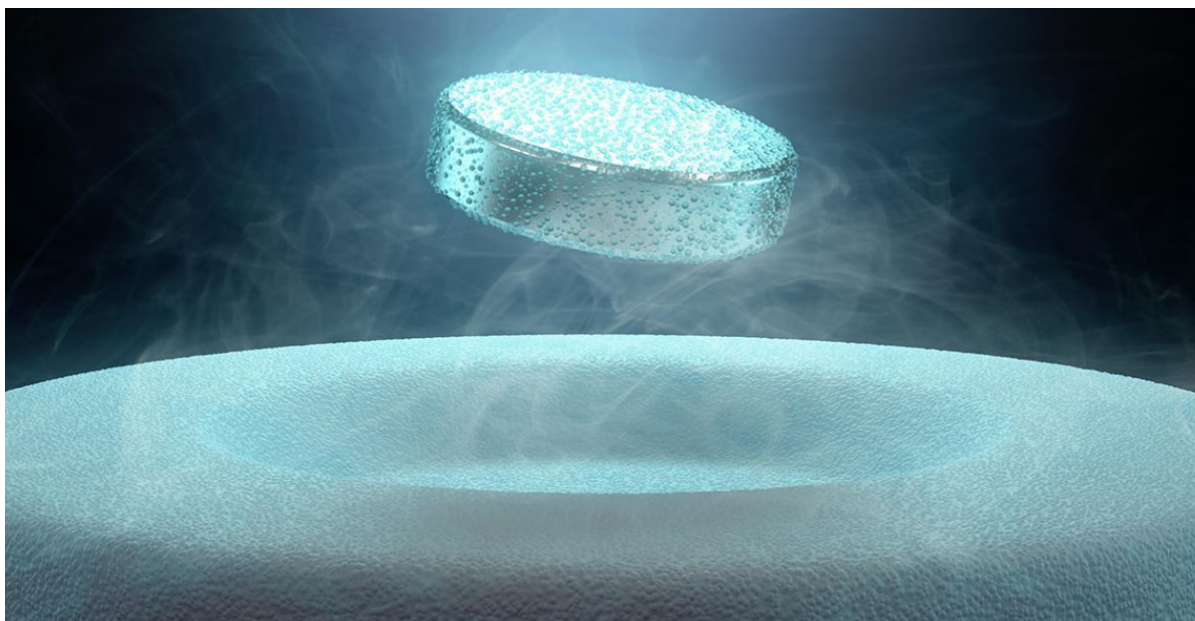


Figura 28 - Superconductor fent levitar un imant gràcies a l'efecte Meissner. Font: Wood, C.
<https://www.investigacionyciencia.es/noticias/observan-por-primera-vez-superconductividad-a-temperatura-ambiente-19117>

Els superconductors són un tipus de materials que, sota certes condicions com les baixes temperatures, presenten característiques com la falta de resistència elèctrica. A diferència d'altres materials conductors, la seva resistència elèctrica no baixa gradualment en reduir la temperatura, sinó que baixa abruptament fins a zero quan es troben per sota d'un llindar de temperatura, que varia en funció del material. Aquest llindar és anomenat "temperatura crítica". La superconductivitat va ser descoberta el 1911 per un físic alemany anomenat Heike Kamerlingh Onnes.

4.2 - Superconductivitat

La superconductivitat és un fenomen que canvia les propietats físiques d'un material sota unes condicions. Aquests materials es diuen superconductors, i presenten la superconductivitat només a baixes temperatures. Les propietats físiques que adquireixen aquests materials són la falta de resistència elèctrica i l'expulsió dels fluxos magnètics a fora del material. Qualsevol material que presenti resistència elèctrica zero és un conductor perfecte, però per ser un superconductor s'han de complir les dues propietats (tots els superconductors, llavors, són conductors perfectes).

L'expulsió dels fluxos magnètics, una de les propietats de la superconductivitat, s'anomena efecte Meissner. L'efecte Meissner diu que un superconductor per sota de la temperatura crítica, expulsa tots els camps magnètics als que està sotmès cap a fora, inclòs el seu propi camp, fins a una longitud de penetració λ . Aquesta longitud sol estar al voltant dels 100 nm. Això provoca que un superconductor sobre d'un camp magnètic és capaç de levitar.

Actualment existeix una teoria que explica microscòpicament el comportament dels superconductors, anomenada teoria BCS (nom que ve de les inicials dels descobridors, John Bardeen, Leon Cooper i John Robert Schrieffer). Aquesta teoria, però, no explica tots els superconductors, només una part. Això significa que encara hi ha superconductors que són un misteri per a la comunitat científica. La teoria diu que quan un electró passa per una xarxa d'ions, la inèrcia provocada per l'electró fa vibrar la xarxa metàl·lica. Aquestes vibracions s'anomenen fonons. Els fonons són quasipartícules, cosa que vol dir que se'ls pot analitzar com a partícules però realment no ho són. Això passa perquè els fonons són una ona que presenta certes qualitats de la dualitat ona-partícula, com els fotons. A diferència dels fotons, els fonons no són partícules. Aquests fonons provoquen una atracció entre electrons, i els electrons s'aparellen formant parelles de Cooper. Les parelles de Cooper es comporten com una sola partícula de spin enter, i per tant no estan sotmesos al principi d'exclusió de Pauli. Per això poden circular per la xarxa iònica sense interactuar amb els ions i perdre energia (Ginsberg, D. M., 2022).

Perquè un material superconductor presenti superconductivitat hi ha tres requisits que aquest ha de complir. El primer requisit és la temperatura. Tots els superconductors tenen una temperatura crítica (expressada com a T_C), i per sobre d'aquesta temperatura, perden la superconductivitat. Quan la temperatura augmenta, l'energia calorífica és capaç de trencar les parelles de Cooper i per tant, eliminar l'estat de superconductivitat. El segon requisit és la intensitat de camp. Quan la intensitat de camp a la que està sotmès un superconductor és massa alta, el camp penetra dins el superconductor per sobre de la longitud de penetració λ i es perd l'efecte Meissner (i consegüentment, la superconductivitat). El valor màxim d'intensitat de camp que pot suportar un superconductor és el camp crític (H_C). L'últim requisit és la densitat de corrent. L'existència d'un camp crític és el que provoca directament l'existència d'un corrent crític. Tots els corrents elèctrics generen un camp magnètic. Llavors, quan el camp magnètic generat pel propi superconductor excedeix el camp crític H_C , es trenca la superconductivitat. El corrent crític (I_C) per això deriva directament del camp crític. La gràfica tridimensional obtinguda amb aquests paràmetres (temperatura, intensitat de camp

i densitat de corrent) s'anomena superfície crítica. Si aquesta superfície s'excedeix, es perd la superconductivitat.

Les equacions per determinar aquests paràmetres estan en funció de la temperatura. La temperatura crítica és específica de cada material, i tot i que hi ha fórmules per calcular-ne algunes, encara no existeix cap fórmula general. La fórmula del camp crític H_C en funció de T és:

$$H_C(T) = H_C(0) \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_C}\right)^2\right]$$

on $H_C(0)$ és el camp crític al zero absolut (també específic de cada material), T la temperatura i T_C la temperatura crítica.

La fórmula de la densitat de corrent crítica (en intensitat elèctrica partida per superfície) I_C és:

$$I_C = \frac{H_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}{\mu_0}$$

on μ_0 és la permeabilitat de l'espai lliure, H_C el camp crític i r el radi del cable ($2\pi r$ és la superfície, i es dona en aquesta forma perquè es sol utilitzar els superconductors en forma de cable. En cas de que tingués una altra forma s'hauria d'expressar en funció de la secció per on circula el corrent). Si es substitueix el camp crític a la seva fórmula per la fórmula de la densitat de corrent crític, ens queda una expressió de la I_C en funció de la temperatura que no depèn de la forma del superconductor: $I_C(T) = I_C(0) \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_C}\right)^2\right]$. Aquestes fórmules permeten fer el gràfic de la superfície crítica, on la variable independent és la temperatura (Casalbuoni, S., Knabbe, E. A., Kötzler, J., Lilje, L., von Sawilski, L., Schmüser, P. i Steffen, B., 2004).

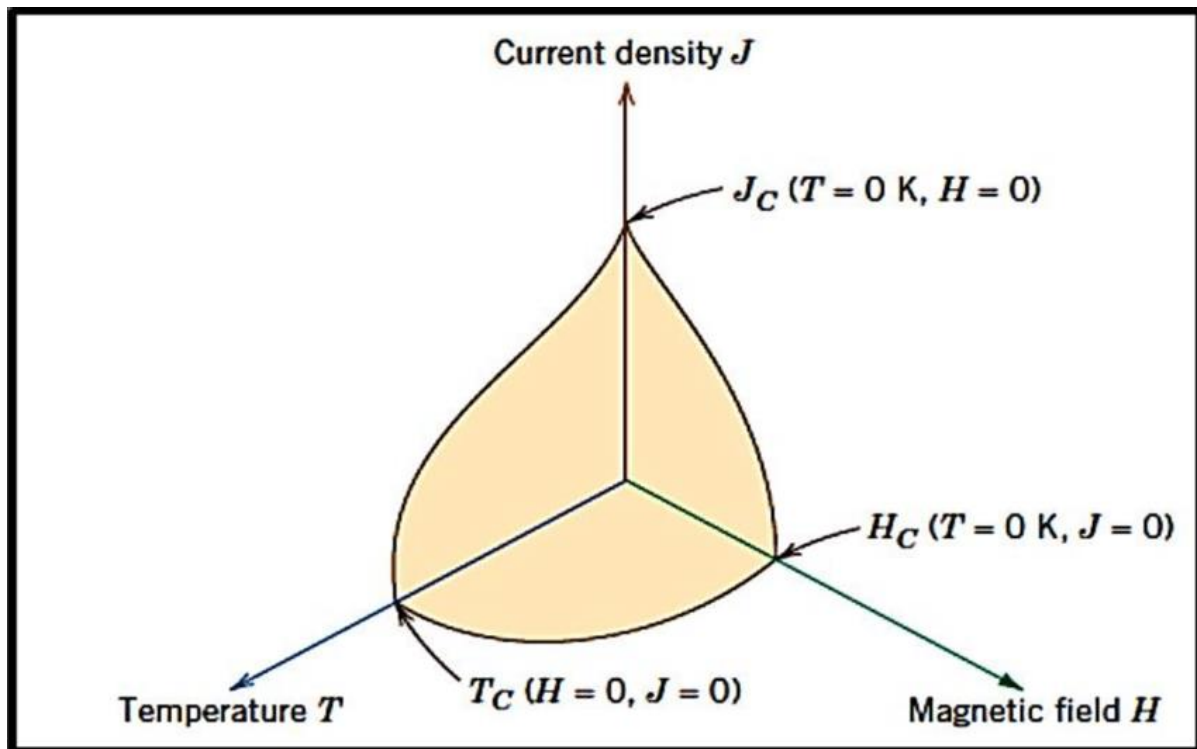


Figura 29 - Representació gràfica de la superfície crítica d'un superconductor. T és la temperatura, H la intensitat de camp magnètic i J la densitat de corrent elèctrica. En algunes fonts la densitat de corrent es representa amb la lletra I, i el camp magnètic es pot representar amb la lletra B. Font: Laheeb, M. i Jasim, K. https://www.researchgate.net/figure/Figure-2-1-the-Superconducting-critical-surface-15_fig3_328733849

4.2 - Tipus de superconductors

Hi ha diverses maneres de classificar els superconductors, i es pot fer segons la seva resposta als camps magnètics o segons la seva temperatura crítica.

- Segons la resposta als camps magnètics (classificació proposada per Alekséi Abrikóssov el 1957):

Seguint aquest criteri es classifiquen els superconductors en tipus I i tipus II. Aquesta classificació és la més significativa perquè aquests dos tipus es comporten de manera diferent a nivell subatòmic. En els superconductors de tipus I, hi ha només un llindar de camp crític, i quan es supera aquest llindar, la superconductivitat desapareix. Amb els de tipus II, hi ha dos llindars, H_{C1} i H_{C2} . Quan es supera el primer llindar H_{C1} , apareix un estat mesclat en què només una part del material presenta efecte Meissner, però tot el material és un conductor perfecte. En aquest estat no es considera que la superconductivitat hagi desaparegut, sinó que només ho ha fet per a certes regions del superconductor. Aquest estat és creat per turbulències en el camp magnètic provocades pel mateix superconductor. Quan es supera el segon llindar H_{C2} , es trenca la superconductivitat per complet. La majoria d'elements purs són de tipus I i la

majoria de compostos són de tipus II, però això no és significatiu perquè té forces excepcions i no té una justificació, és una observació estadística (Strongin, M., Paskin, A., Schweitzer, D. G., Kammerer, O. F. i Craig, P. P., 1964).

- Segons la temperatura crítica:

Aquesta diferenciació no té implicacions en la naturalesa del superconductor, però sí que té implicacions en els experiments. La refrigeració amb nitrogen líquid és relativament poc costosa i assequible, mentre que la refrigeració amb heli és molt més costosa. Per això per fer experiments és més senzill amb els superconductors anomenats d'alta temperatura. El llindar de temperatura crítica perquè un superconductor sigui considerat d'alta temperatura és el punt d'ebullició del nitrogen, 77 K, tot i que algunes classificacions determinen aquest llindar als 30 K. Això és perquè els superconductors de més de 30 K de temperatura crítica comparteixen algunes característiques, però “superconductors d'alta temperatura” es sol referir a superconductors refrigerables amb nitrogen líquid. Tot i no tenir cap relació directe, els superconductors d'alta temperatura són en la gran majoria superconductors ceràmics. Aquests últims es distingeixen per la seva estructura cristal·lina característica i els més comuns són els formats per itri, bari, carboni i oxigen.



Figura 30 - Representació artística del nitrogen líquid. Font: Canariasgourmet, <https://www.pinterest.com/pin/330381322660481006/>

4.3 - Altres aplicacions dels superconductors

Els superconductors són uns materials revolucionaris que tenen molt de potencial per a les



Figura 31 - Fotografia d'un accelerador magnètic del Large Hadron Collider del CERN. Font: Schaeffer, A. <https://home.cern/news/news/accelerators/waltz-lhc-magnets-has-begun>

futures tecnologies. Tant la falta de resistència elèctrica com l'efecte Meissner poden ser explotats per desenvolupar noves tecnologies a costos molt més baixos que amb mètodes convencionals, i els reactors nuclears no en són l'únic exemple.

En el CERN, l'Organització Europea per la Investigació Nuclear, els acceleradors de partícules utilitzen superconductors per crear els camps magnètics que guien i acceleren les partícules. Els avantatges que suposen els superconductors sobre els conductors normals, en aquest cas, és la potència dels camps magnètics que creen, molt superior a la dels conductors normals. Gràcies a aquesta propietat, les partícules són accelerades a velocitats altíssimes amb costos energètics molt més baixos.

Deixant a un costat la física nuclear, els superconductors també tenen aplicacions relacionades amb el dia a dia de les persones. És el cas dels trens de levitació magnètica, una tecnologia molt innovadora que s'està començant a utilitzar sobretot a orient, en països com la Xina, Corea o el Japó. Aquests trens aprofiten l'efecte Meissner per fer levitar els trens per sobre els raïls i així anul·lar la fricció. Poden arribar a velocitats de més de 400 km/h en transports entre ciutats, i ho fan amb més eficiència que els ferrocarrils convencionals. El record de velocitat d'un tren convencional el té el TGV de França amb 574,8 km/h mentre

que el record d'un tren de levitació magnètica el té el L0 Series de Japó, amb 603 km/h. La fricció amb l'aire impedeix que els trens vagin a velocitats més altes sense gastar quantitats enormes d'energia, però s'estan dissenyant túnels de buit per on podrien circular els trens de levitació magnètica sense cap tipus de fricció a velocitats de fins a 8000 km/h.



Figura 32 - Fotografia d'un tren de levitació magnètica d'alta velocitat de Xina. Font: Marcus, L. <https://edition.cnn.com/travel/article/china-fastest-maglev-train-intl-hnk/index.html>

Finalment, una de les aplicacions més directes dels superconductors és el transport d'energia. Des de que l'energia elèctrica és produïda a les centrals fins que arriba als consumidors, l'electricitat ha de recórrer llargues distàncies. Durant aquests recorreguts, molta electricitat és perduda degut a la resistència elèctrica dels cables, i aquest inconvenient seria eliminat completament amb cables superconductors. El principal desavantatge d'això és la refrigeració, però un sistema de cables subterrani podria portar l'electricitat de les centrals a les grans ciutats amb superconductors. La reducció de la pèrdua d'energia augmentaria la producció d'energia neta (en el sentit de producció bruta menys les pèrdues, no en el sentit d'energia sostenible) i per tant reduiria el cost de l'electricitat.

5 - Experiment

Aquest experiment consisteix en la mesura de la resistència d'un superconductor ceràmic YBCO a diferents temperatures per veure les distincions entre l'estat de superconducció i l'estat natural del material. Les dades experimentals llavors poden ser comparades amb les dels superconductors emprats en el reactor nuclear ITER. L'experiment va ser dut a terme a la Universitat de Girona amb l'ajuda del Dr. Josep Duran.

5.1 - Disseny de l'experiment i materials

El material més essencial de l'experiment és el superconductor, que és l'objecte d'estudi. En el cas del meu experiment he utilitzat un superconductor ceràmic d'alta temperatura de la família dels YBCO (*Yttrium Barium Copper Oxide*, òxid de coure, bari i itri) de tipus II. El superconductor té forma de cercle i la seva fórmula química és $\text{YBa}_2\text{C}_3\text{O}_7$

El primer disseny de l'experiment era refredar el superconductor amb nitrogen líquid i mesurar la temperatura. Llavors, deixar-lo escalfar a temperatura ambient i mesurar constantment la temperatura per saber com canviava. Llavors, repetir el procés i aquesta vegada mesurar també la resistència elèctrica a mesura que s'anava escalfant per obtenir un gràfic temperatura-resistència. El principal problema va ser la mesura de la temperatura. Els termòmetres dels que disposàvem només mesuraven temperatures fins a $-40\text{ }^\circ\text{C}$ (233 K), i el nitrogen líquid està a una temperatura de $-196\text{ }^\circ\text{C}$ (77 K). Això suposava una greu limitació ja que l'objectiu de l'experiment era mesurar la resistència a diferents temperatures per veure si hi havia algun tipus de dependència, i si no podíem mesurar la temperatura, això semblava impossible. La primera solució va ser intentar extrapolar la variació de la temperatura com si es tractés d'una funció lineal, però no era un mètode suficientment fiable ja que no teníem manera de calcular aquesta variació de segur.

El disseny final de l'experiment consisteix en mesurar la resistència elèctrica del superconductor amb un tester a certes temperatures que es poden conèixer sense necessitat de mesurar-la. Les temperatures escollides són el punt d'ebullició del nitrogen líquid (77 K), el punt de fusió de l'hexà (177 K), el punt de fusió del cloroform (209,7 K) i temperatura ambient (que es pot mesurar). La base teòrica d'aquest mètode és que quan una substància pura està fent un canvi d'estat, la temperatura es manté constant a la temperatura d'aquell canvi. Per exemple, el gel quan es desfà, encara que s'escalfi sempre estarà a $0\text{ }^\circ\text{C}$ fins que s'hagi fos tot.

Els materials emprats en aquest experiment són els següents:

- El superconductor YBCO

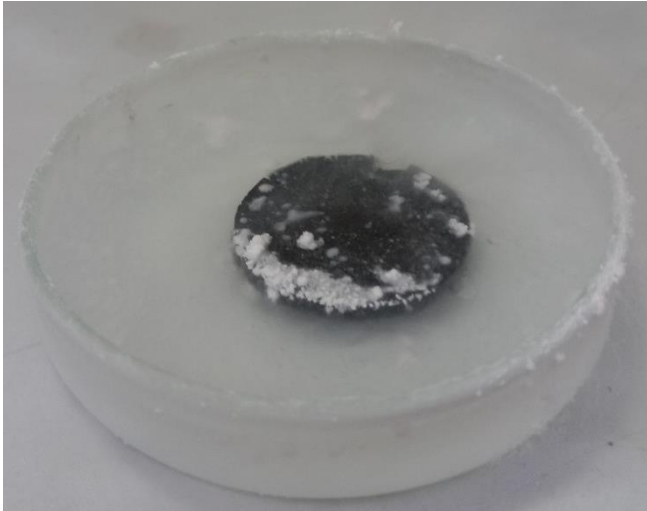


Figura 33 - Superconductor ceràmic YBCO utilitzat durant l'experiment. Font: imatge pròpia.

- Nitrogen líquid



Figura 34 - Nitrogen líquid utilitzat durant l'experiment. Font: Imatge pròpia.

- Hexà
- Cloroform
- Una placa de petri
- Un termòmetre
- Un tester

5.2 - Memòria de l'experiment

El procediment seguit per dur a terme l'experiment és el següent:

1. Per les mesures a temperatura ambient:
 - a. Amb el termòmetre, mesurar la temperatura ambient.
 - b. Amb el tester, mesurar la resistència elèctrica del superconductor a temperatura ambient.
2. Per les mesures a 209,7 K:
 - a. Sota la campana d'extracció de gasos, dipositar el superconductor dins la placa de petri i submergir-lo gairebé completament amb cloroform. És molt important treballar amb el cloroform sota la campana d'extracció, ja que el cloroform és tòxic i pot provocar alteracions en la salut com el càncer de pulmó.
 - b. Abocar nitrogen líquid sobre del cloroform fins que aquest estigui solidificat (nota: el nitrogen líquid s'evaporarà immediatament en contacte amb el cloroform a temperatura ambient, és necessari continuar abocant el nitrogen fins la solidificació del cloroform)



Figura 35 - Imatge del superconductor submergit en cloroform líquid. Els cristalls al voltant de la placa de petri són de cloroform sòlid, que encara no s'ha fos. Font: imatge pròpia.

- c. Deixar reposar la mostra a temperatura ambient fins que el cloroform comenci a fondre's.
- d. Un cop hi hagi cloroform en estat líquid i en estat sòlid en proporcions similars, prendre la mesura de resistència elèctrica amb el tester al superconductor.

3. Per les mesures a 177 K:
 - a. Netejar la placa de petri (o utilitzar-ne una de neta) i el superconductor.
 - b. Submergir el superconductor en hexà dins la placa de petri.
 - c. Abocar nitrogen líquid sobre l'hexà de la mateixa manera que en el pas 2b.



Figura 36 - Superconductor dins l'hexà sòlid. L'hexà es veu poc perquè és majoritàriament transparent, i es pot començar a veure com es fon. Font: imatge pròpia.

- d. Deixar reposar la mostra a temperatura ambient fins que l'hexà comenci a fondre's.
 - e. Un cop l'hexà estigui en equilibri entre sòlid i líquid, mesurar la resistència elèctrica del superconductor amb el tester.
4. Per les mesures a 77 K:
 - a. Netejar la placa de petri (o utilitzar-ne una de neta) i el superconductor.

- b. Dipositar el superconductor a la placa de petri i submergir-lo en nitrogen líquid.



Figura 37 - Imatge del superconductor després de submergir-lo en nitrogen líquid. Es pot observar si es para atenció el vapor de nitrogen que cau de la taula. Font: imatge pròpia.

- c. Quan hi hagi nitrogen líquid dins la placa (cal recordar que en contacte amb superfícies calentes s'evapora, llavors cal abocar més nitrogen del que hi cap a la placa perquè n'hi hagi de líquid a dins), mesurar la resistència del superconductor amb el tester.
5. Repetir les mesures varies vegades per fer repeticions de l'experiment seguint el mètode científic i així minimitzar l'error.

5.3 - Mesures

Vaig prendre 5 mesures per a cada nivell de temperatura i el valor mesurat és la mitjana de les mesures. Llavors també hi ha indicats els valors màxims mesurats, els mínims, els errors absoluts i els errors relatius.

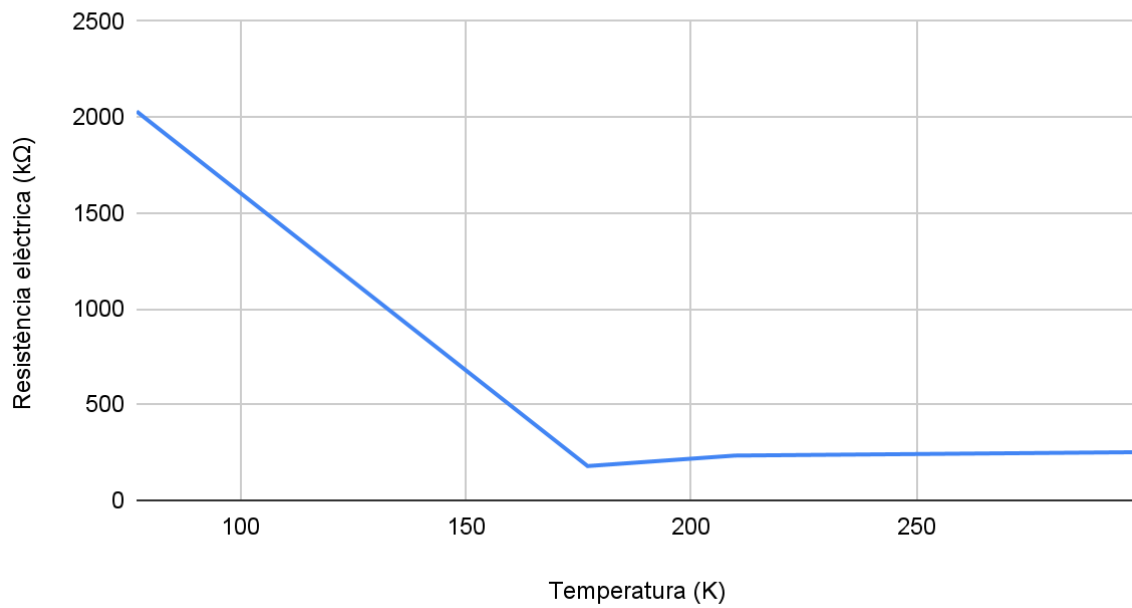
Les mesures obtingudes durant l'experiment són les següents:

- Per a temperatura ambient (299 K, 26 °C):
 - Mitjana → 251,3 k Ω

- Màxim $\rightarrow 252,1 \text{ k}\Omega$
- Mínim $\rightarrow 249,7 \text{ k}\Omega$
- Error absolut $\rightarrow 1,6 \text{ k}\Omega$
- Error relatiu $\rightarrow 0,64 \%$
- Per a $209,7 \text{ K}$ ($-63,3 \text{ }^\circ\text{C}$):
 - Mitjana $\rightarrow 233,6 \text{ k}\Omega$
 - Màxim $\rightarrow 237,8 \text{ k}\Omega$
 - Mínim $\rightarrow 230,1 \text{ k}\Omega$
 - Error absolut $\rightarrow 4,2 \text{ k}\Omega$
 - Error relatiu $\rightarrow 1,80 \%$
- Per a 177 K ($-96 \text{ }^\circ\text{C}$):
 - Mitjana $\rightarrow 178,8 \text{ k}\Omega$
 - Màxim $\rightarrow 190,2 \text{ k}\Omega$
 - Mínim $\rightarrow 170,4 \text{ k}\Omega$
 - Error absolut $\rightarrow 11,4 \text{ k}\Omega$
 - Error relatiu $\rightarrow 6,38 \%$
- Per a 77 K ($-196 \text{ }^\circ\text{C}$):
 - Mitjana $\rightarrow 2,03 \text{ M}\Omega$
 - Màxim $\rightarrow 3,20 \text{ M}\Omega$
 - Mínim $\rightarrow 1,56 \text{ M}\Omega$
 - Error absolut $\rightarrow 1,17 \text{ M}\Omega$
 - Error relatiu $\rightarrow 53,64 \%$

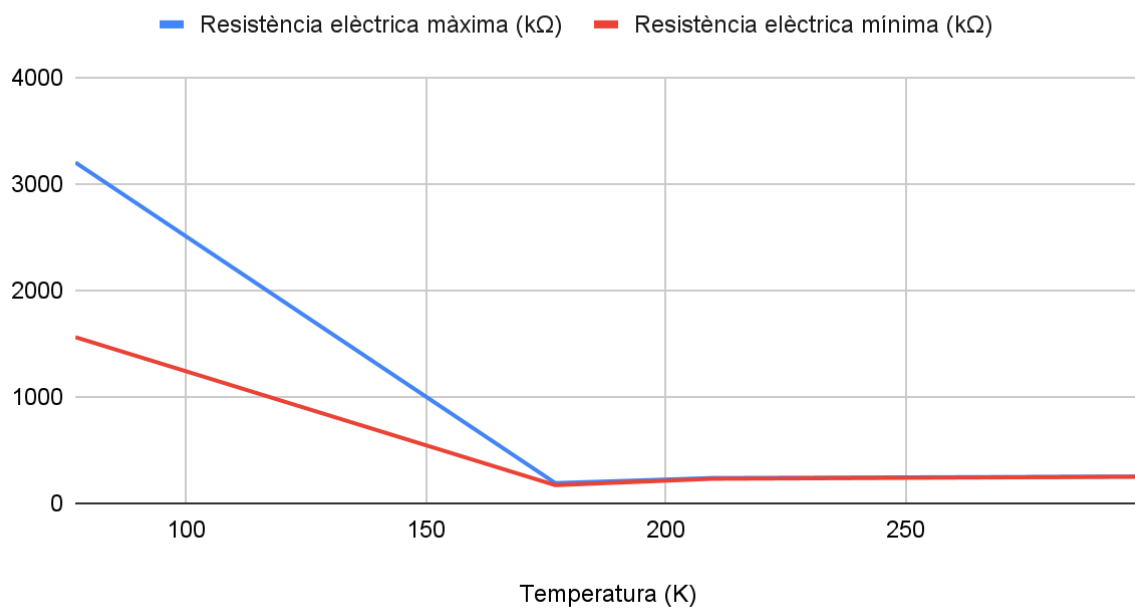
Gràfic 1 (valors mitjans en funció de la temperatura):

Valors mitjans de resistència



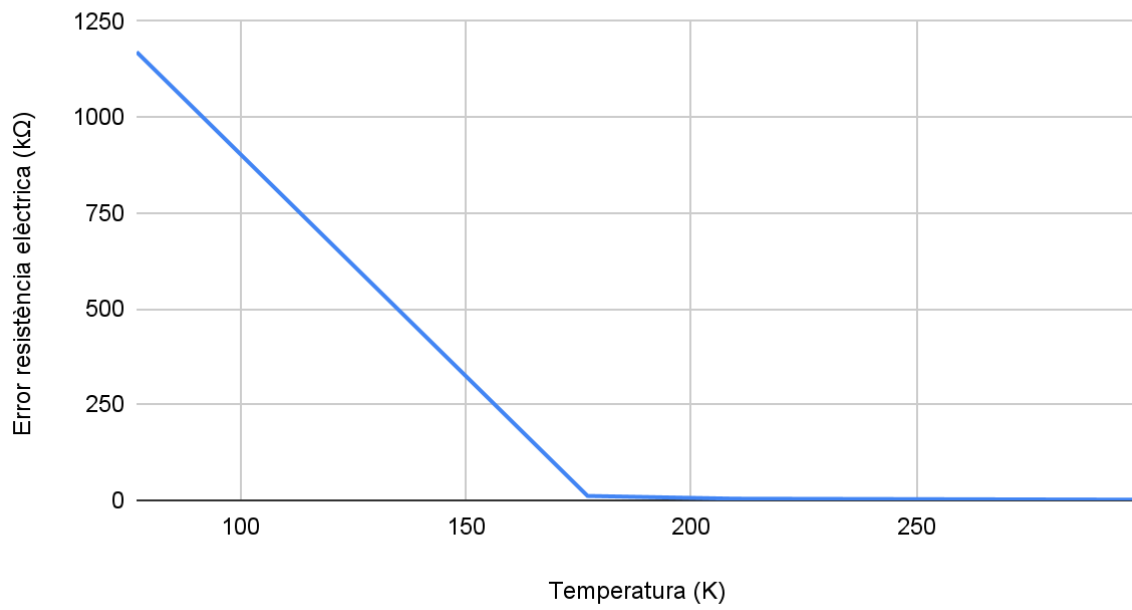
Gràfic 2 (valors màxims i mínims en funció de la temperatura):

Mesures màximes i mínimes en funció de la temperatura



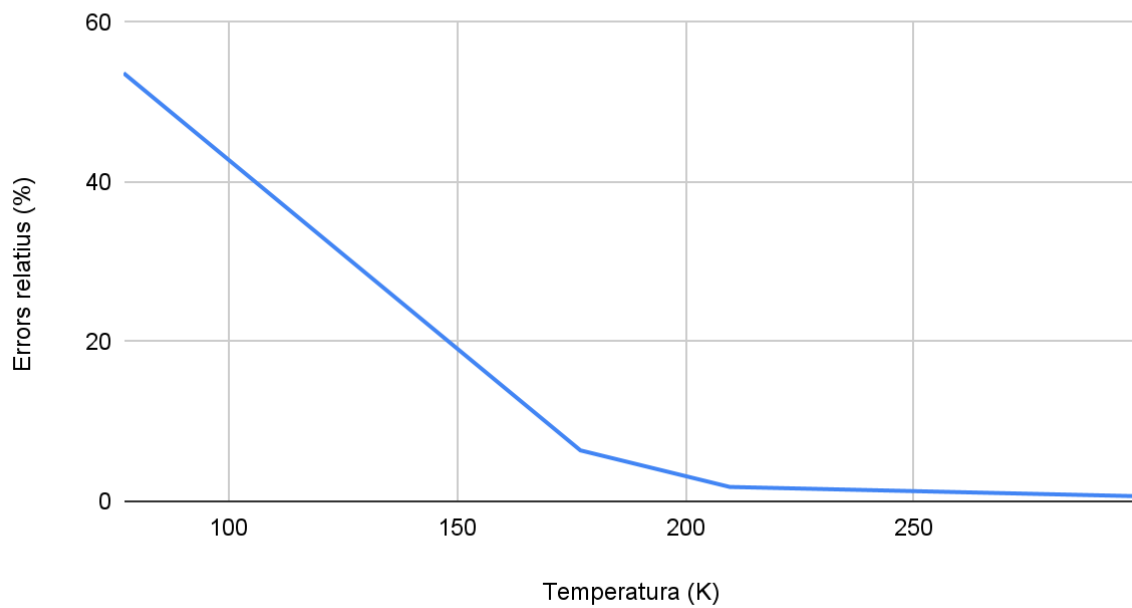
Gràfic 3 (errors absoluts en les diferents mesures):

Errors absoluts de les mesures



Gràfic 4 (errors relatius en les diferents mesures):

Errors relatius de les mesures



5.4 - Anàlisi de dades

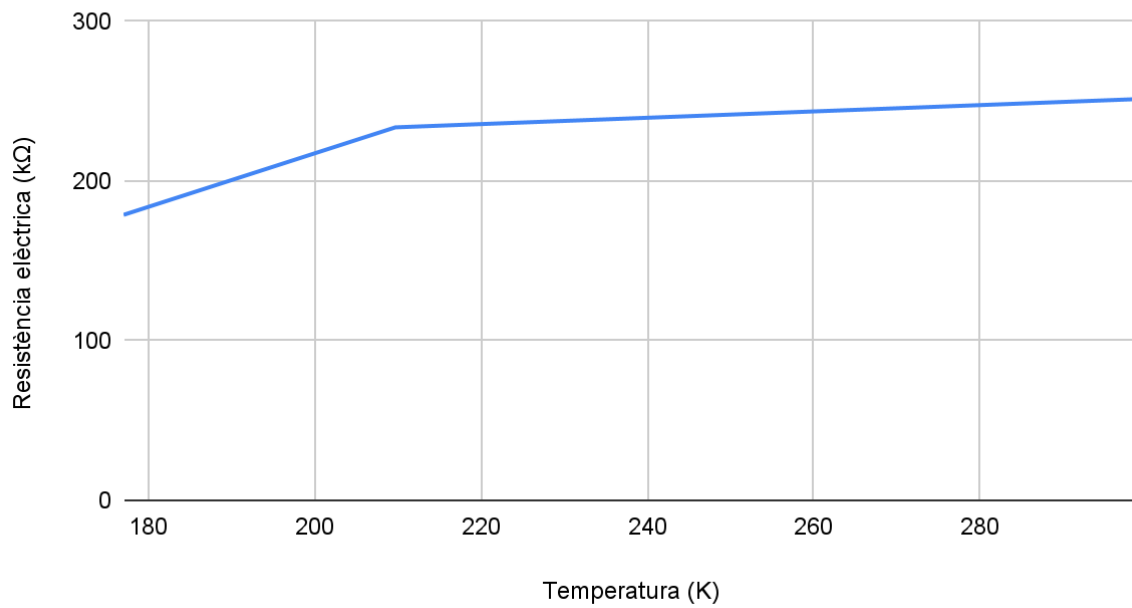
Després de veure totes les mesures preses, està clar que hi ha alguna cosa que no encaixa amb la teoria. El superconductor d'alta temperatura, al ser refrigerat amb nitrogen líquid, adquireix propietats de superconductor, i segons la recerca realitzada al marc teòric, hauria de presentar resistència elèctrica nul·la. A les mesures, veiem tot el contrari: quan el refrigerem amb nitrogen líquid, la resistència es dispara. Aquesta discrepància dels valors experimentals i els teòrics suggereix algun error durant l'experiment.

Per comprovar que el material amb el que treballem és realment un superconductor, el vam submergir en nitrogen líquid i llavors hi vam dipositar un imant a sobre. Com és d'esperar en un superconductor d'alta temperatura, l'imant va levitar perfectament sobre el superconductor. Aquesta levitació sense utilitzar cap mena de font d'energia és característica de l'efecte Meissner. Per extensió, el material es comporta com a superconductor quan és refrigerat amb nitrogen líquid. Si l'error no està en el material, la següent opció és que es troba en l'instrument de mesura, el tester. Per comprovar si el tester mesura correctament vam mesurar a temperatura ambient la resistència elèctrica d'un utensili metàl·lic qualsevol que hi havia al laboratori, en concret una espàtula utilitzada per moure el superconductor sense tocar-lo dins el nitrogen líquid. Llavors, vam repetir el procés, però aquesta vegada, amb l'espàtula refrigerada amb el nitrogen líquid. Els valors obtinguts no tenien res a veure amb el valor anterior i el tester indicava valors molt superiors als prèviament mesurats. Les primeres mesures eren de poc més de 200Ω i les segones mesures de l'ordre dels $M\Omega$ i molt caòtiques. Amb aquestes observacions vam poder deduir que el tester no mesurava correctament a temperatures al voltant o inferiors als 77 K .

Per analitzar les dades sense les mesures errònies, podem fer els gràfics anteriors sense les mesures de 77 K :

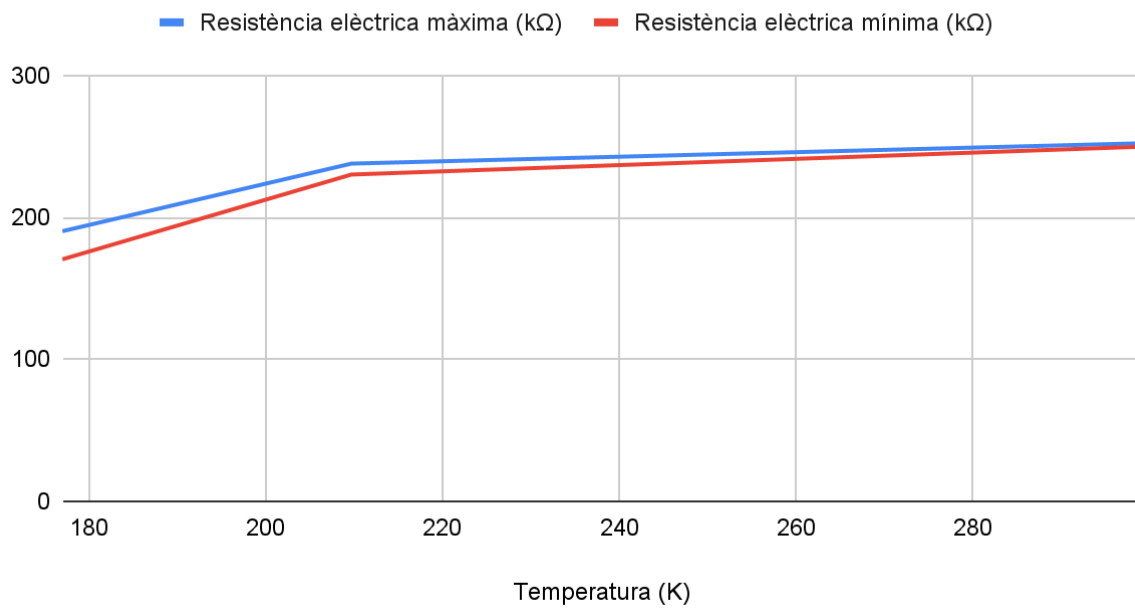
Gràfic 1.2 (valors mitjans en funció de la temperatura, sense $T = 77 \text{ K}$):

Valors mitjans resistència elèctrica



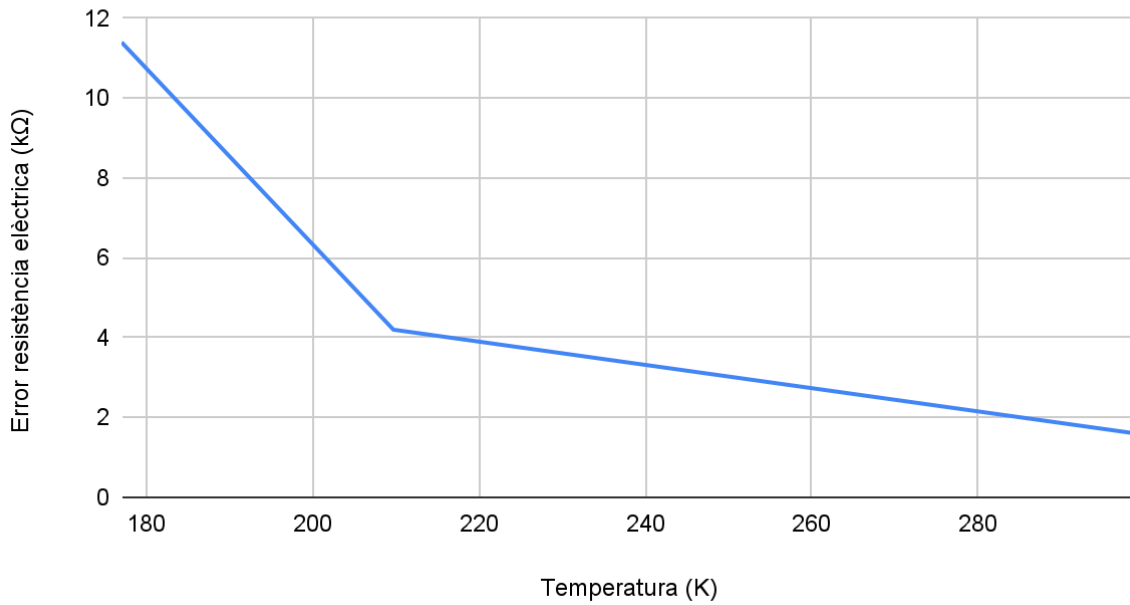
Gràfic 2.2 (valors màxims i mínims en funció de la temperatura, sense $T = 77 \text{ K}$):

Valors màxims i mínims de les mesures



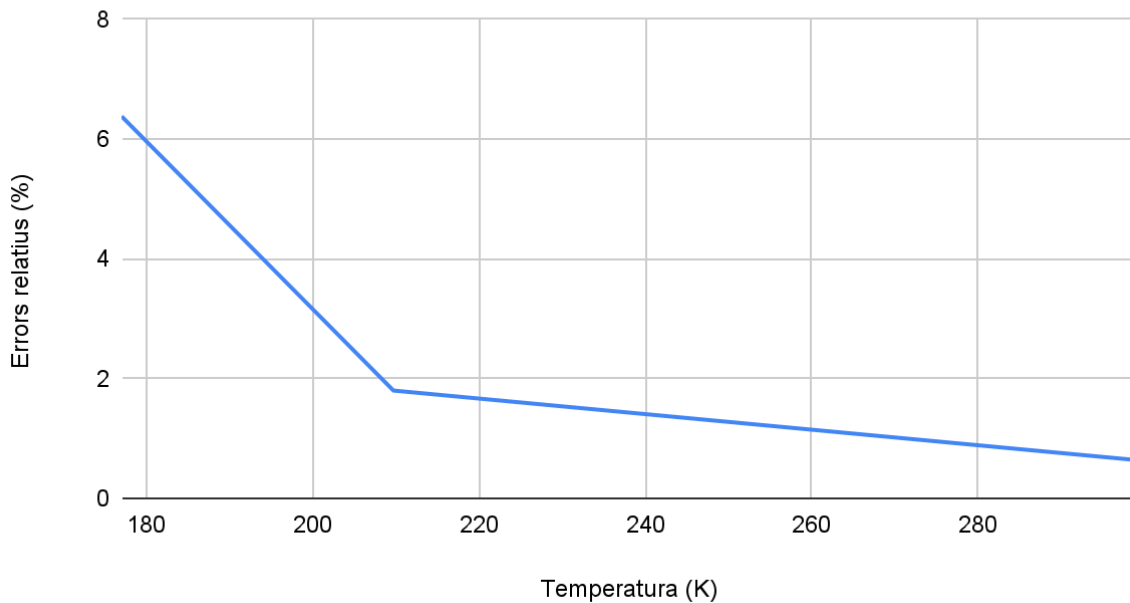
Gràfic 3.2 (errors absoluts en les diferents mesures, sense $T = 77 \text{ K}$):

Errors absoluts de les mesures



Gràfic 4.2 (errors relatius en les diferents mesures, sense $T = 77 \text{ K}$):

Errors relatius de les mesures



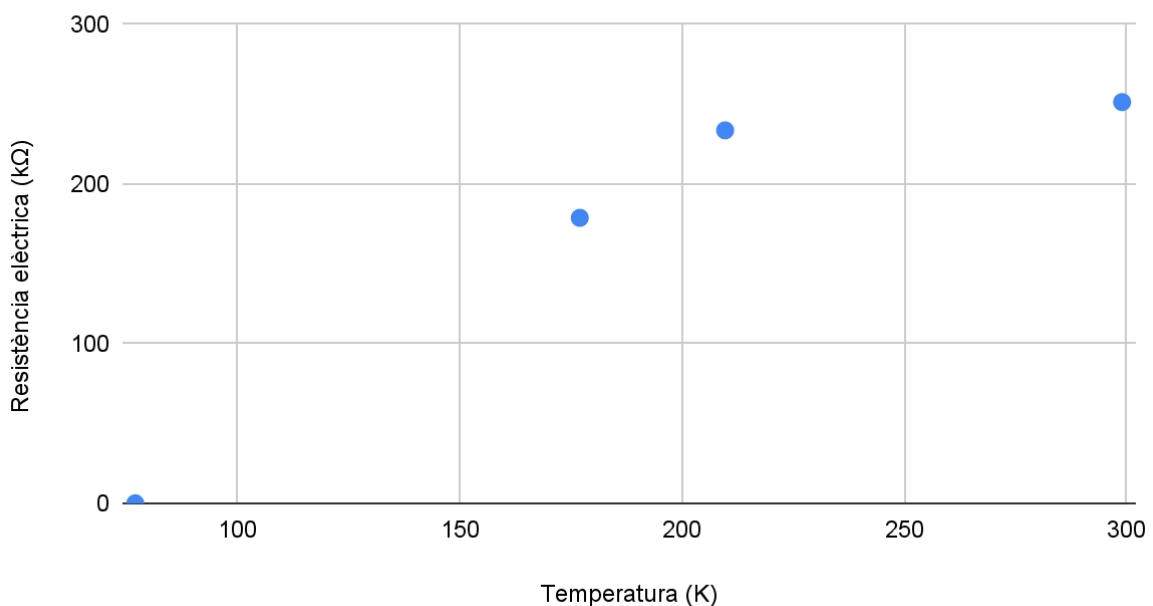
Un cop eliminades les mesures errònies, els gràfics concorden amb els valors esperats. En el gràfic 1.2, podem veure que el comportament de la resistència elèctrica és semblant al dels

conductors normals, amb l' excepció que la resistència és molt més elevada en aquest cas. El que caldria esperar de la mesura a 77 K és una caiguda sobtada de la resistència elèctrica. La superconductivitat, però, queda demostrada amb l' observació de l' efecte Meissner. Llavors, es podria fer un gràfic considerant la resistència igual a zero per a 77 K (gràfic 1.3).

Els altres gràfics, els valors màxims i mínims i els errors, són un indicatiu de la precisió de les mesures. Per a $T = 77$ K, les mesures són molt caòtiques, però per temperatures més altes els errors es minimitzen. Deixant de banda els extrems, les mesures a temperatures més altes tendeixen a ser més precises que les mesures a temperatures més baixes (gràfics 2.2, 3.2 i 4.2). Aquesta apreciació es veu en la diferència de les dues línies en el gràfic 2.2, que tendeix a ser més gran a temperatures més baixes, i per els valors en els gràfics 3.2 i 4.2, que també són més grans a menys temperatura.

Gràfic 1.3 (valors mitjans en funció de la temperatura, agafant el zero per a $T = 77$ K):

Valors mitjans de les mesures, agafant el 0 per a $T = 77$ K



Aquest gràfic es mostra en forma de punts de dispersió perquè el salt entre la conductivitat normal i la superconductivitat és sobtat, no lineal, i amb les mesures preses, no es pot apreciar en un gràfic lineal.

6 – Conclusions

La hipòtesi inicial del treball és que els superconductors d'alta temperatura podrien ser més eficients que els de baixa temperatura en un reactor de fusió nuclear. Després de veure tots els aspectes de la fusió nuclear, l'obtenció d'energia i el paper dels superconductors, he vist que els superconductors són un material molt més complex, com també ho són els reactors de fusió. El paper que juguen els superconductors és crucial, i fa moltes de les funcions necessàries per al reactor (contenir, guiar i escalfar el plasma). Durant la recerca bibliogràfica he vist que per complir aquests requeriments, es necessita un material gairebé fet a mida. Els requisits necessaris són que generi un camp magnètic potent (i per tant un camp crític H_C elevat), que se'n pugui fer cables per als imants i que no sigui car de produir i mantenir. Tot i que els superconductors d'alta temperatura redueixen el cost de refrigeració, el camp magnètic el Nb_3Sn és molt més potent, i aquest últim és més fàcil per a la producció industrial de imants que els seus cosins d'alta temperatura. En conclusió, l'estructura ceràmica dels superconductors d'alta temperatura dificulta la seva producció i adaptació al reactor, mentre que el Nb_3Sn és un material apte per fer-ne cables, i per tant, més apte per al reactor de fusió nuclear.

Una altra de les observacions d'aquest treball és la posada en pràctica del mètode científic. La part pràctica ha suposat haver d'afrontar tot un seguit de complicacions per la factibilitat de l'experiment, i la solució no ha sigut fàcil de trobar. Fer servir els punts de fusió dels dissolvents orgànics per mesurar la temperatura finalment m'ha permès tirar endavant l'experiment, però tot i això, els resultats no han sigut els esperats. Amb tot plegat, he après la importància d'analitzar curosament les dades obtingudes i saber interpretar els resultats de l'experiment, que tot hi haver-hi discrepàncies amb la teoria, ha resultat en conclusions interessants.

Finalment, la fusió nuclear i els superconductors són dos camps de la ciència molt innovadors i interessants, que podrien portar solucions a problemes de l'actualitat i que prometen jugar un paper en les nostres vides en un futur potser no tan llunyà.

7 – Bibliografia

- Betti, R., Chang, P. Y., Spears, B. K., Andersón, K. S., Edwards, J., Fatenejad, M., Lindl, J. D., McCrory, R. L., Nora, R. i Shvarts, D. (2010). *Thermonuclear ignition in inertial confinement fusion and comparisón with magnetic confinement*
<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3380857>
- Bradshaw, A. M., Fischer, U. i Hamacher, T. (2010). *Is nuclear fusion a sustainable energy form?* https://pure.mpg.de/rest/items/item_2139700/component/file_2139699/content
- Casalbuoni, S., Knabbe, E. A., Kötzer, J., Lilje, L., von Sawilski, L., Schmäser, P. i Steffen, B. (2004). *Surface Superconductivity in Niobium for Superconducting RF Cavities*
<https://arxiv.org/pdf/physics/0403045.pdf>
- Fasoli, A., Brunner, S., Cooper, W. A., Graves, J. P., Ricci, P., Sauter, O. i Villard L. (2016). *Computational challenges in magnetic-confinement fusion physics*
<https://www.nature.com/articles/nphys3744>
- Fowler, W. A., (1994). *Completion of The Proton-Proton Reaction Chain and The Possibility of Energetic Neutrino Emission by Hot Stars*
<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780429502811-62/completion-proton-proton-reaction-chain-possibility-energetic-neutrino-emission-hot-stars-william-fowler>
- Ginsberg, D. M. (2022). *superconductivity*. *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/superconductivity>
- Huang, C. i Li, L. (2018). *Magnetic confinement fusion: a brief review*
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11708-018-0539-1#citeas>
- Kopin, N. B., Heikkilä, T. T. I Volovik, G. E. (2018). *High-temperature surface superconductivity in topological flat-band systems* <https://arxiv.org/pdf/1103.2033.pdf>
- Moshchalkov, V. V., Menghini, M., Nishio, T., Chen, Q. H., Silhanek, A. V., Dao, V. H., Chibotaru, L. F., Zhigadlo, N. D. i Karpinski, J. (2018). *Type-1.5 Superconductors*
<https://arxiv.org/pdf/0902.0997.pdf>
- Salpeter, E. E., (1952). *Nuclear Reactions in the Stars. I. Proton-Proton Chain*
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.88.547>
- Strongin, M., Paskin, A., Schweitzer, D. G., Kammerer, O. F. i Craig, P. P. (1964). *Surface Superconductivity in Type I and Type II Superconductors*
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.12.442>
- Sutton, C. (2020). *strong force*. *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/strong-force>

Wiescher, M., Görres, J., Überseder, E., Imbriani, G. i Pignatari, M. (2010). *The Cold and Hot CNO Cycles*

<https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.nucl.012809.104505>