



INSTITUT
PUIG CASTELLAR

LA FUSIÓ NUCLEAR, ÉS VIABLE A LA TERRA?

TREBALL DE RECERCA
Anuel BB

“M'agradaria que la fusió nuclear es convertís en una font d'energia pràctica.
Proveiria una font inesgotable d'energia, sense contaminació i escalfament global.”

Stephen Hawking

RESUM/RESUMEN/ABSTRACT

RESUM

Aquest treball investiga la viabilitat de la fusió nuclear com a font d'energia neta i sostenible a llarg termini, i analitza la possibilitat de construir un reactor de fusió a Catalunya. La part teòrica explora els fonaments de la fusió nuclear, des dels avenços històrics, com els experiments de Mark Oliphant i el desenvolupament del tokamak, fins als projectes actuals com ITER i el NIF, que han assolit guanys energètics positius. S'explica el funcionament de les estrelles mitjançant reaccions de fusió, els tipus de reaccions nuclears (com D-T i D-D), i els obstacles tècnics com la barrera de Coulomb i els criteris de Lawson, que estableixen les condicions necessàries per a una fusió autosostenible.

En la part pràctica, s'avalua la possible ubicació d'un reactor a Catalunya, considerant factors geogràfics, riscos naturals, accessibilitat i proximitat a centres d'investigació. Es proposa Cerdanyola del Vallès com a ubicació òptima, per la seva bona connexió, la presència de la UAB i el sincrotró ALBA, i la disponibilitat de terrenys. Es descriu detalladament la instal·lació del reactor tokamak, amb els seus components principals, i es presenta un pressupost aproximat de 6.900 M€, incloent contingències. El treball conclou que, tot i els alts costos i reptes tècnics, la fusió nuclear representa una opció prometedora per al futur energètic, i Catalunya té el potencial per acollir un reactor experimental.

RESUMEN

Este trabajo investiga la viabilidad de la fusión nuclear como fuente de energía limpia y sostenible a largo plazo, y analiza la posibilidad de construir un reactor de fusión en Cataluña. La parte teórica explora los cimientos de la fusión nuclear, desde los adelantos históricos, como los experimentos de Mark Oliphant y el desarrollo del tokamak, hasta los proyectos actuales como ITER y el NIF, que han logrado ganancias energéticas positivas. Se explica el funcionamiento de las estrellas mediante reacciones de fusión, los tipos de reacciones nucleares (como D-T y D-D), y los obstáculos técnicos como la barrera de Coulomb y los criterios de Lawson, que establecen las condiciones necesarias para una fusión autosostenible.

En la parte práctica, se evalúa la posible ubicación de un reactor en Cataluña, considerando factores geográficos, riesgos naturales, accesibilidad y proximidad a centros de investigación. Se propone Cerdanyola del Vallès como ubicación óptima, por su buena conexión, la presencia de la UAB y el sincrotrón ALBA, y la disponibilidad de terrenos. Se describe en detalle la instalación del reactor tokamak, con sus componentes principales, y se presenta un presupuesto aproximado de 6.900 M€, incluyendo contingencias. El trabajo concluye que, a pesar de los altos costes y retos técnicos, la fusión nuclear representa una opción prometedora para el futuro energético, y Cataluña tiene el potencial para acoger un reactor experimental.

ABSTRACT

This work investigates the feasibility of nuclear fusion as a clean and sustainable long-term energy source, and analyzes the possibility of building a fusion reactor in Catalonia. The theoretical part explores the fundamentals of nuclear fusion, from historical advances, such as Mark Oliphant's experiments and the development of tokamak, to current projects such as ITER and NIF, which have achieved positive energy gains. The functioning of stars is explained by fusion reactions, types of nuclear reactions (such as D-T and D-D), and technical obstacles such as the Coulomb barrier and Lawson criteria, which establish the necessary conditions for self-sustainable fusion.

In the practical part, the possible location of a reactor in Catalonia is evaluated, considering geographical factors, natural risks, accessibility and proximity to research centers. Cerdanyola del Vallès is proposed as an optimal location, due to its good connection, the presence of the UAB and the ALBA synchrotron, and the availability of land. The installation of the tokamak reactor, with its main components, is described in detail and a budget of approximately 6,900 M€ is presented, including contingencies. The work concludes that, despite the high costs and technical challenges, nuclear fusion represents a promising option for the energy future, and Catalonia has the potential to host an experimental reactor.

ÍNDEX

RESUM/RESUMEN/ABSTRACT.....	2
ÍNDEX.....	4
INTRODUCCIÓ.....	6
HIPÒTESI I OBJECTIUS.....	7
PART TEÒRICA.....	7
FUSIÓ NUCLEAR.....	7
1. EIX CRONOLÒGIC.....	8
1.1. Anys 30.....	8
1.2. Anys 40.....	9
1.3. Anys 50 (aplicacions militars).....	10
1.4. Anys 50 i 60.....	11
1.5. Anys 70 i 80.....	11
1.6. Anys 90.....	12
1.7. Segle XXI.....	12
1.8. 2022: Punt d'inflexió en la fusió per confinament inercial.....	13
1.9. Actualitat (2023-2025) Nous projectes.....	13
2. FUSIÓ A L'UNIVERS.....	14
2.1. Tipus de reaccions nuclears.....	14
2.2. Funcionament de les estrelles.....	15
2.2.1. Fusió d'hidrogen (fase principal).....	16
2.2.2. Fusió d'heli (fase gegant).....	18
2.2.3. Combustió d'elements pesants.....	19
2.2.4. Síntesi d'elements més pesants que el ferro.....	20
2.2.5 Control de les reaccions.....	20
2.2.6 Fi de la fusió (final vida de l'estel).....	21
3. REACTORS DE FUSIÓ.....	21
Principals reaccions de fusió.....	22
3.1 Barrera de Coulomb.....	23
3.1.1. Fonaments físics de la Barrera Coulombiana.....	24
3.1.1.1. Potencial electroestàtic entre dos nuclis.....	24
3.1.1.2. Altura de la Barrera Coulombiana.....	24
3.1.2. Superació de la Barrera Coulombiana.....	25
3.1.2.1. Efecte túnel (Mecànica quàntica).....	25
3.1.2.2. Dependència de la temperatura.....	26
3.1.3. Comparació entre reaccions de fusió.....	26
3.1.4. Mètodes per a reduir l'impacte de la Barrera Coulombiana.....	27
3.1.4.1. Confinament magnètic (Tokamaks).....	27
3.1.4.2. Fusió inercial (Làzers).....	27
3.1.4.3. Fusió Freda (No Provada Científicament).....	28
3.2. Criteris de Lawson.....	28
3.2.1. Producte de la densitat d'ions i el temps de confinament.....	29

3.2.1.1 Triple producte (n·T·E).....	30
3.2.2. Ignició.....	31
3.2.2.1. Temperatura crítica d'ignició.....	31
4. INSTAL·LACIÓ DELS REACTORS DE FUSIÓ.....	32
4.1. Tipus de reactors.....	33
4.1.1. Confinament magnètic.....	33
4.2.2. Confinament inercial.....	34
PART PRÀCTICA.....	35
1. SITUACIÓ GEOGRÀFICA DE CATALUNYA.....	35
2. RISCOS, TERRENY I ACCESSIBILITAT.....	37
2.1. Zones naturals i riscos naturals.....	37
2.1.1. Zones muntanyoses.....	37
2.1.2. Zones sísmiques.....	38
2.1.3. Zones inundables.....	40
2.2. Accessibilitat/zones urbanes.....	41
2.2.1. Carreteres.....	41
2.2.2. Ferrocarrils.....	42
2.3 Llocs d'interès.....	43
3. LLOC DE CONSTRUCCIÓ DEL REACTOR.....	47
4. INSTAL·LACIÓ.....	48
4.1. Recinte.....	48
4.2. Reactor.....	52
4.3. Edificis.....	58
4.4. Preu.....	62
4.4.1. Reactor.....	63
4.4.2. Edificis i infraestructura.....	63
4.4.3. Costos addicionals i contingències.....	64
4.5. Distribució.....	66
4.6. Cartell.....	68
CONCLUSIONS.....	70
AGRAÏMENTS.....	71
BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA.....	71

INTRODUCCIÓ

Es diu que la fusió nuclear és l'energia neta i inacabable del futur, però de moment no és una energia que a curt termini pugui solucionar la crisi climàtica. Aquest estudi cerca saber si, a llarg termini, la fusió nuclear podria ser una font d'energia rendible i duradora, i pot competir amb les fonts d'energia típiques. Es creu que, tot i que els alts costos d'inici i els reptes tècnics són grans problemes, els avenços en tecnologia i materials podrien fer que la fusió sigui possible en algun moment, si s'arreglen els problemes com l'eficiència energètica.

La raó d'aquesta indagació es basa a trobar una font energia que sigui capaç de solucionar el canvi climàtic i que pugui abastir a la població d'energia neta, ja que aquesta no genera els nivells de radiació que poden arribar a fer les centrals nuclears de fissió. També anar-me formant per a un futur, ja que la física, especialment, la física nuclear és l'àmbit de la física que m'agradaria especialitzar-me.

La importància de la fusió és a escala mundial. Crec que és important parlar d'aquest tema perquè pot beneficiar globalment a la població. Pel que fa als diners, cal veure si els guanys futurs valen la pena la gran despesa en proves i creació, sobretot si l'energia nova és més barata.

Per fer aquesta recerca, utilitzarem tots els medis possibles per poder trobar informació sobre la fusió nuclear:

- Enciclopèdies
- Llibres
- Llocs web
- Estudis universitaris

El treball majoritàriament serà en l'àmbit teòric per aquest motiu la recerca d'informació és tan important.

HIPÒTESI I OBJECTIUS

Aquest treball té dues hipòtesis a investigar i resoldre. En primer lloc, és possible que la fusió nuclear a llarg termini sigui una font d'energia eficient. L'altra hipòtesi s'enfoca més en la part pràctica: és possible crear un reactor de fusió a Catalunya. El meu objectiu principal amb aquest treball està enfocat sobretot a la formació professional de la física, sobretot la física nuclear, que em sembla un dels temes més interessants que puc estudiar i que en un futur puc dedicar-me.

Per altra banda, un objectiu secundari més en l'àmbit col·lectiu seria poder veure amb el treball a fer, és de quina manera es podria arribar a trobar com es pot fer rendible la fusió nuclear, que sigui una font d'energia que pugui abastir els estats. Per últim, m'agradaria fer un treball que sigui precursor per la construcció d'un reactor de fusió a Catalunya.

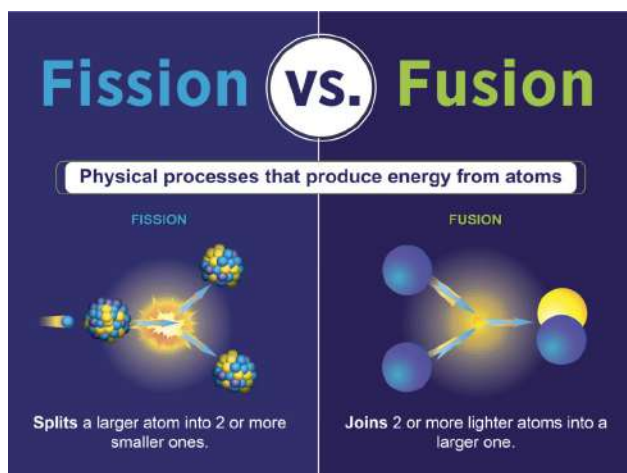
PART TEÒRICA

FUSIÓ NUCLEAR

Què és la fusió nuclear?

La fusió nuclear consisteix en un procés en què 2 nuclis atòmics (no àtom), s'uneixen creant un nucli atòmic més pesat i alliberant energia o absorbint energia.¹ Aquest procés és el contrari a la fissió nuclear que consisteix en la separació d'un nucli d'un àtom generant 2 nuclis de menor nombre màssic, i és l'energia nuclear que de la qual s'obté energia

¹Cultura Científica. *¿Que 100 años no es nada? O por qué aún no tenemos una central nuclear de fusión* [en línia]. Cultura Científica, 30 de gener de 2015 [Consultat: 19 de març de 2025]. Disponible a: <https://culturacientifica.com/2015/01/30/que-100-anos-no-es-nada-o-por-que-aun-no-tenemos-una-central-nuclear-de-fusion/>



Imatge 1. Reacció de fissió i reacció de fusió. Extreta de <https://www.nucleonova.es/que-es-la-fision-o-fusion-nuclear/>

1. EIX CRONOLÒGIC

No hi ha un any exacte en el qual es comenci a parlar de la fusió nuclear en l'àmbit científic. S'estima que en la primera meitat del s. XX durant la dècada dels 20 Arthur Eddington, a partir de la mesura de la massa d'àtoms lleugers de F.W. Aston i la teoria de l'equivalència de massa-energia d'Einstein proposa que les reaccions de fusió o la unió entre nuclis petits generen una gran quantitat d'energia.²



Imatge 2. Albert Einstein (esquerra) i Arthur Eddington (dreta). Imatge extreta de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48401484>

1.1. Anys 30

A la dècada de 1930, Mark Oliphant, deixeble d'Ernest Rutherford, du a terme el primer experiment de fusió nuclear amb isòtops d'hidrogen (deuteri i triti) (explicat a Principals reaccions de fusió) mitjançant un accelerador de partícules. Aquest fet demostra per primera vegada la possibilitat d'alliberar energia a partir de la fusió

² Wikipedia contributors. *Timeline of nuclear fusion* [en línia]. Wikimedia Foundation, 2005 [Consultat: 22 de març de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_nuclear_fusion#References

nuclear.³ ⁴ Hans Bethe durant entre 1938 i 1939 desenvolupa la teoria del cicle protó-protó i del cicle CNO (explicat a 2.2.1. Fusió d'hidrogen (fase principal)), explicant d'aquesta manera com les estrelles generen energia mitjançant la fusió d'hidrogen en heli.⁵



Imatge 3. Mark Oliphant. Imatge estreta de <https://www.science.org.au/news-and-events/events/public-speaker-series/the-journey-of-australian-science/oliphant-and-nuclear-physics>



Imatge 4. Hans Brethe. Imatge extreta de https://ca.wikipedia.org/wiki/Hans_Bethe

1.2. Anys 40

A partir de la dècada dels 40 es comença a plantejar la possibilitat de la fusió nuclear com a font d'energia i fins com a arma de destrucció massiva.⁶ L'any 1942 es comença a realitzar el projecte Manhattan, dirigit per Robert Oppenheimer, a partir d'investigacions preliminars sobre fusió per a l'ús en armes nuclears.⁷

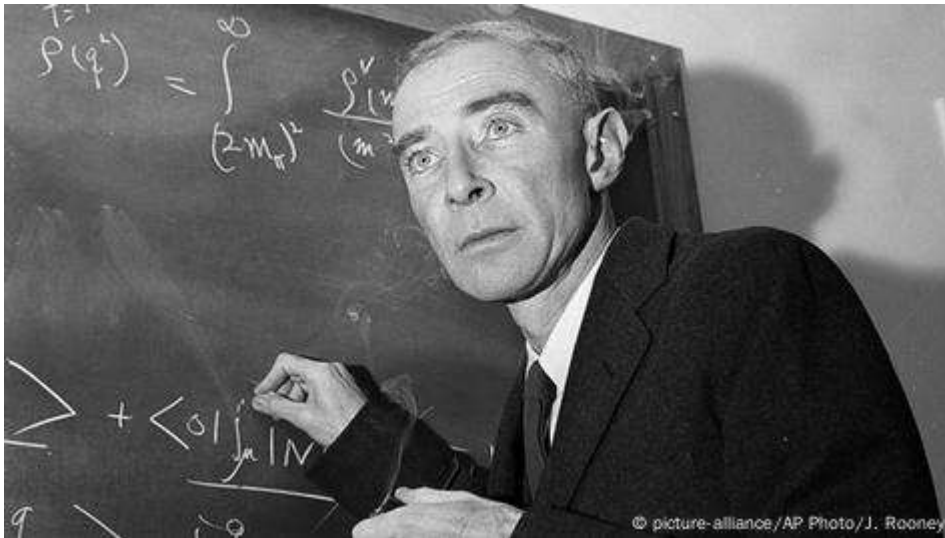
³ Freire, Noelia. National Geographic. *Fusión nuclear: la energía de las estrellas* [en línia]. National Geographic, s.d. [Consultat: 21 d'abril de 2025]. Disponible a: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/fusion-nuclear-energia-estrellas_20603

⁴ Wikipedia contributors. *History of nuclear fusion* [en línia]. Wikimedia Foundation, 2005 [Consultat: 21 d'abril de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_nuclear_fusion

⁵ IBIDEM

⁶ Schoijet, Mauricio. *La energía nuclear de fusión: aspectos históricos* [en línia]. Universidad Nacional de Quilmes, octubre de 2005 [Consultat: 20 de març de 2025]. Disponible a: <https://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/596?locale-attribute=en>

⁷ Freire, Noelia. National Geographic. *Fusión nuclear: la energía de las estrellas* [en línia]. National Geographic, s.d. [Consultat: 21 d'abril de 2025]. Disponible a: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/fusion-nuclear-energia-estrellas_20603



Imatge 5. Robert Oppenheimer. Imatge extreta de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48401484>

1.3. Anys 50 (aplicacions militars)

No seria fins a l'1 de novembre de 1952 que els Estats Units fa explotar la primera bomba d'hidrogen (termonuclear) coneguda pel nom de "Ivy Mike", la qual es va utilitzar una bomba de fissió per després iniciar una reacció de fusió de deuteri i triti. Aquest mateix any la Unió soviètica crea la seva pròpia bomba termonuclear, amb un diferent disseny a partir de deuterur de liti.⁸



Imatge 6. Núvol de fong de la bomba Ivy Mike. Imatge estreta de https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:%22Ivy_Mike%22_atmospheric_nuclear_test_-_November_1952_-_Flickr_-_The_Official_CTBTO_PhotoStream.jpg

⁸ IBIDEM

1.4. Anys 50 i 60

Entre les dècades 1950-60 apareixen els que són els primers reactors experimentals: l'any 1950 el físic nuclear soviètic Andrei Sàkharov proposa el disseny del tokamak, un reactor toroidal que utilitza camps magnètics per confinar el plasma ⁹ ¹⁰. Sis anys més tard, Oleg Lavréntiev, a l'institut de Física i Tecnologia de Khàrkiv (URSS), desenvolupa les teories sobre trampes electromagnètiques per a la fusió.¹¹ L'any 1968 el reactor tokamak T-3 estableix un rècord de temperatura que arriba fins als 10 milions de graus celsius durant 10 mil·lisegons, confirmant la superioritat d'aquest disseny sobre l'Stellator.¹²



Imatge 7. Andrei Sàkharov. Imatge extreta de <https://www.hoover.org/research/moral-clarity-andrei-sakharov>

1.5. Anys 70 i 80

Durant aquests anys el confinament magnètic es millora per part de països com els Estats Units. En 1977 els Estats Units llancen el projecte Làser Shiva al Laboratori Nacional Lawrence Livermore, buscant la fusió mitjançant el confinament inercial.¹³ L'any 1983 entra en funcionament el *Joint European Torus (JET)* al Regne Unit, el tokamak més gran del món fins avui.¹⁴ A partir d'aquest mateix any el *TFTR* (Princeton Plasma Physics Laboratory) assoleix 10,7 MW de potència de fusió i temperatures de 150 milions de °C.

⁹ Wikipedia contributors. *History of nuclear fusion* [en línia]. Wikimedia Foundation, 2005 [Consultat: 27 d'abril de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_nuclear_fusion

¹⁰ IBIDEM

¹¹ IBIDEM

¹² IBIDEM

¹³ Wikipedia contributors. *Historia de la fusión nuclear* [en línia]. Wikimedia Foundation, s.d. [Consultat: 27 d'abril de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3n_nuclear

¹⁴ IBIDEM



Imatge 8. Exterior del reactor JET. Imatge extreta de https://es.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus

1.6. Anys 90

Als anys 90, exactament, 9 de novembre de 1991, el reactor JET aconsegueix la primera fusió controlada amb deuteri-triti, alliberant 1,8 MW durant 2 segons. L'any 1994 El TFTR (EUA) aconseguiria 10,7 MW de potència de fusió. L'any 1997 el JET estableix un nou rècord amb 16 MW de fusió, tot i requerir 24 MW per escalfar el plasma.¹⁵

1.7. Segle XXI

Al segle XXI es comencen a trobar si és viable la producció d'energia amb els reactors. L'any 2005 es decideix construir el reactor ITER a Cadarache (França), amb un pressupost inicial de 4.700 milions d'euros i participació de 35 països.¹⁶ 5 anys després, l'any 2010 el National Ignition Facility (*NIF*) inicia experiments amb làsers per a fusió inercial.¹⁷ Any 2018: s'acaba la construcció principal de l'ITER, tot i que els experiments amb deuteri-triti es posposen als següents anys.¹⁸ L'any 2021 les empreses emergents de fusió nuclear reben 2.600 milions de dòlars en inversions privades. Entre aquests destaquen els següents:

- Commonwealth Fusion Systems: desenvolupa imants superconductors d'alta temperatura.

¹⁵ IBIDEM

¹⁶ IBIDEM

¹⁷ Wikipedia contributors. *History of nuclear fusion* [en línia]. Wikimedia Foundation, 2005 [Consultat: 28 d'abril de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_nuclear_fusion

¹⁸ ITER Organization. *The ITER Machine* [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 28 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/machine>

- Helion Energy: treballa en reactors de fusió magneto inercial.
- TAE Technologies: Investiga fusió amb protons de bor.¹⁹



Imatge 9. Recinte de l'ITER. Imatge extreta de <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/que-es-el-iter/>

1.8. 2022: Punt d'inflexió en la fusió per confinament inercial

El 5 de desembre de 2022, es dona un esdeveniment històric, el National Ignition Facility (NIF) (EUA) assoleix un *factor de guany energètic positiu* ($Q > 1$) (la Q significa guany energètic) en un experiment amb làsers. S'injecten 2,05 MJ al combustible i s'obtenen 3,15 MJ, superant per primera vegada el llindar d'ignició (s'ha de tenir en compte que l'energia gastada amb els làsers era de 500 MJ). 8 dies més tard, el 13 de desembre de 2022, el Departament d'Energia dels EUA anuncia oficialment l'èxit del NIF, qualificant-lo de "pas històric cap a l'energia neta il·limitada".²⁰

1.9. Actualitat (2023-2025) Nous projectes

Actualment, a l'ITER (2025) s'espera finalitzar la construcció i iniciar proves amb plasma aquest any. El reactor, amb un cost total previst de 22.000 milions d'euros,

¹⁹ Kardoudi, Omar. El Confidencial. *Logran la 'fusión nuclear fría' por primera vez en la historia* [en línia]. 29 de març de 2022 [Consultat: 29 d'abril de 2025]. Disponible a: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-03-29/logran-fusion-nuclear-fria-por-primera-vez-historia_3399718/

²⁰ Stallard, Esme. *Fusión nuclear: el prometedor hito que lograron los científicos y qué significa para el futuro de la energía limpia* [en línia]. BBC News Mundo, 13 de desembre de 2022 [Consultat: 29 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-63963737>

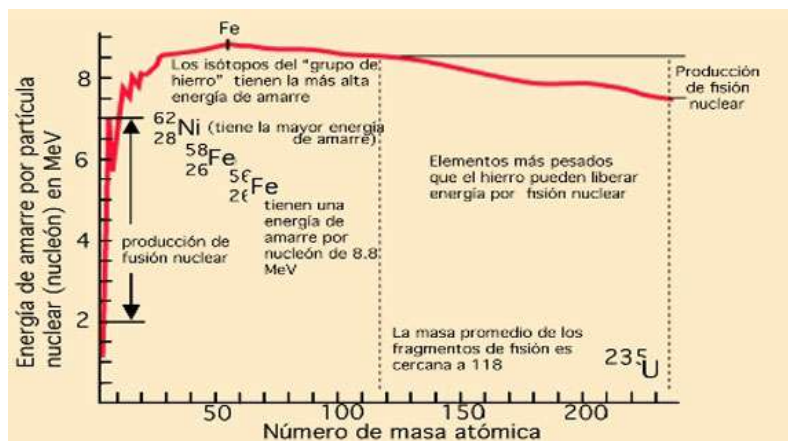
pretén demostrar la viabilitat tècnica de la fusió magnètica, amb una producció objectiva de 500 MW. L'SPARC (2025): reactor de Commonwealth Fusion Systems (EUA), basat en imants superconductors, amb l'objectiu d'aconseguir $Q > 10$ abans de 2030.²¹ HB11 Energy (2023): empresa emergent australiana que utilitza làsers per induir fusió freda amb protons de bor, evitant la necessitat de triti.²²

2. FUSIÓ A L'UNIVERS

2.1. Tipus de reaccions nuclears

Les reaccions de fusió es poden dividir segons si alliberen energia en formar un nou àtom (exotèrmiques) i les que necessiten energia (endotèrmiques).

- Reaccions exoenergètiques
 - Dominen en la fusió d'elements fins al ferro (${}^{56}\text{Fe}$)
 - Alliberen energia neta ($\Delta H < 0$)
- Reaccions endoenergètiques (formació de nuclis pesants)
 - Esdevenen en la formació d'elements més pesants que el ferro.
 - Absorbeixen energia ($\Delta H > 0$)
 - Requereixen fonts d'energia externes com una supernova.



Imatge 10. Taula d'energia d'amarratge. <https://inin.gob.mx/temasdeinteres/fusionnuclear.cfm>

²¹ Wikipedia contributors. *Fusión nuclear* [en línia]. Wikimedia Foundation, s.d. [Consultat: 29 d'abril de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3n_nuclear

²² Kardoudi. Omar. El Confidencial. *Logran la 'fusión nuclear fría' por primera vez en la historia* [en línia]. 29 de març de 2022 [Consultat: 29 d'abril de 2025]. Disponible a: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-03-29/logran-fusion-nuclear-fria-por-primera-vez-historia_3399718/

2.2. Funcionament de les estrelles ^{23 24}

Les estrelles generen energia (calor, llum, etc.) mitjançant processos de fusió nuclear que transformen elements més lleugers en elements més pesants, i alliberant una gran quantitat d'energia. Aquests mecanismes poden variar segons els anys de vida i massa de l'estel. ²⁵

La fusió nuclear en els estels es basa en la conversió massa-energia descrita per $E = mc^2$.^{26 27} Quan dos nuclis atòmics superen la repulsió electroestàtica (els nuclis han de superar la força de repulsió, ja que els nuclis són de càrrega positiva i es repel·leixen) i s'uneixen sota condicions extremes de temperatura i pressió, una fracció de la seva massa es transforma en energia radiant. Aquest fenomen requereix:

1. Temperatures superiors a 10 milions de graus centígrads per iniciar la reacció.
2. Altes densitats que augmenten la probabilitat de col·lisions nuclears.
3. Confinament gravitacional que manté el plasma estable.^{28 29 30 31}

²³ Wikipedia contributors. *Nucleosíntesis estelar* [en línia]. Wikimedia Foundation, s.d. [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleos%C3%ADntesis_estelar

²⁴ Noticias del la Ciencia. *Los procesos físicos que alimentan la energía de las estrellas* [en línia]. Noticias del la Ciencia, s.d. [Consultat: 15 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://noticiasdelaciencia.com/art/52235/los-procesos-fisicos-que-alimentan-la-energia-de-las-estrellas>

²⁵ Serra, Salvador. Armengol, Montserrat. Mercadé, Joan M. (2018). *Física 2n de batxillerat*. Madrid: McgrawHill

²⁶ IBIDEM

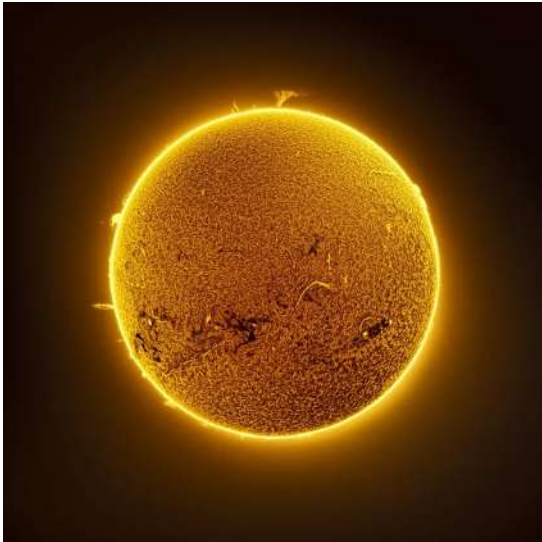
²⁷ Wikipedia contributors. *Fusión nuclear* [en línia]. Wikimedia Foundation, s.d. [Consultat: 15 d'abril de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3n_nuclear

²⁸ Freire, Noelia. National Geographic. *Fusión nuclear: la energía de las estrellas* [en línia]. National Geographic, s.d. [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/fusion-nuclear-energia-estrellas_20603

²⁹ Moncada, Arturo. Vertigo Politico. *Fusión nuclear: la energía de las estrellas para el futuro* [en línia]. Vertigo Político, s.d. [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://www.vertigopolitico.com/ciencia/ciencia/notas/fusion-nuclear-la-energia-de-las-estrellas-para-el-futuro>

³⁰ Wikipedia contributors. *Fusión nuclear* [en línia]. Wikimedia Foundation, s.d. [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3n_nuclear

³¹ Tomé, César. Cultura Científica. *Fusión nuclear en el Sol* [en línia]. Cuaderno de Cultura Científica, 9 de març de 2021 [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://culturacientifica.com/2021/03/09/fusion-nuclear-en-el-sol/>



Imatge 11. El Sol. Imatge extreta de <https://www.nationalgeographic.com.es/>

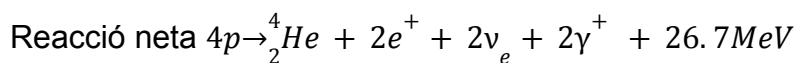
2.2.1. Fusió d'hidrogen (fase principal)

El 90% de l'energia estel·lar prové de la transformació d'hidrogen en heli.

A. Cadena protó-protó. Reaccions donades a estrelles de baixa massa com el Sol.

- a. Dos protons fusionen formant deuteri (2H)
- b. El deuteri s'uneix a un altre deuteri per crear heli-3 (3He)
- c. Dos nuclis d'heli-3 es combinen formant heli-4 (4He) més protons residuals. Alliberant una energia de 26,7 MeV per cada 4 protons (p o 1H).^{32 33}

Reacció:

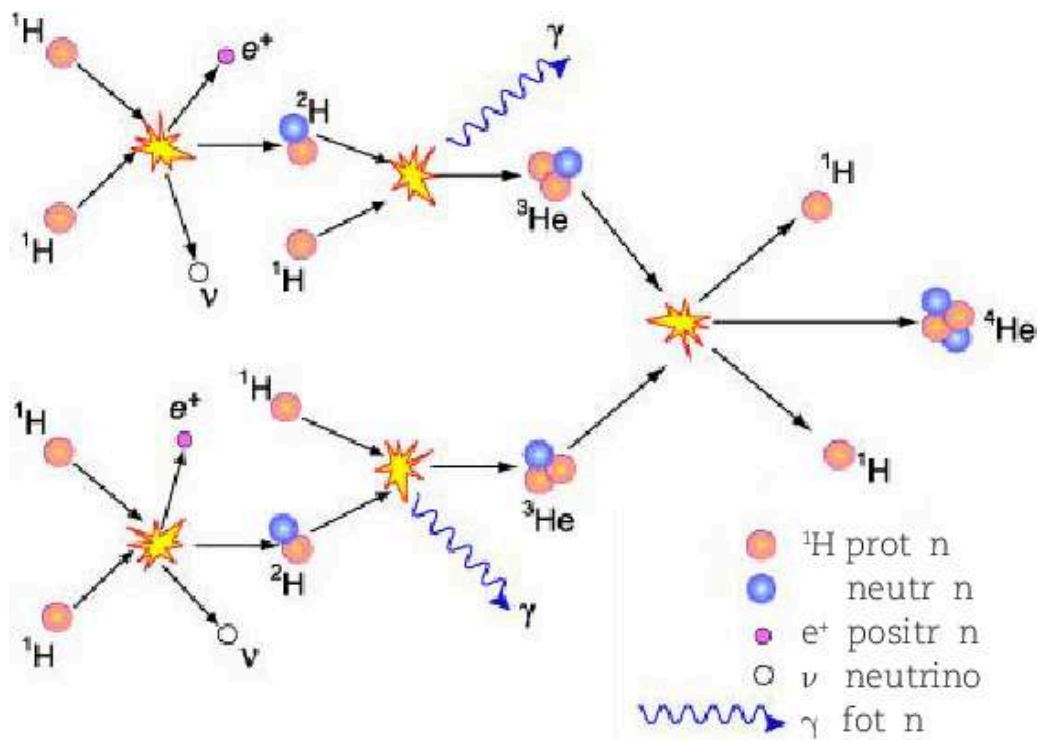


Etales principals:

1. Fusió inicial: $p + p \rightarrow {}^2_1H + e^+ + \nu_e$
2. Formació d'heli-3 (3He): $p + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He + \gamma$
3. Finalització: ${}^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + 2{}^1_1H$

³² Wikipedia contributors. *Nucleosíntesis estelar* [en línia]. Wikimedia Foundation, s.d. [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleos%C3%ADntesis_estelar

³³ Noticias del la Ciencia. *Los procesos físicos que alimentan la energía de las estrellas* [en línia]. Noticias del la Ciencia, s.d. [Consultat: 15 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://noticiasdelaciencia.com/art/52235/los-procesos-fisicos-que-alimentan-la-energia-de-las-estrellas>



Imatge 12. Reacció cadena protó-protó. Imatge extreta de https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Forma-principal-de-una-reaccion-en-cadena-proton-prot-on-PP-en-el-Sol_fig1_317435310

e^+ (positró): és l'antipartícula de l'electró (amb càrrega positiva) i aquestes s'anihilen.

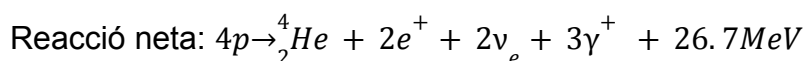
ν_e (neutrí electrònic): partícula subatòmica elemental, elèctrica i neutra pràcticament indetectable.

γ (fotó d'alta energia): radiació electromagnètica (radiació gamma).

B. Cicle CNO. En estrelles massives

- Utilitza carboni, nitrogen i oxigen com a catalitzadors.
- Transforma 4 protons en heli-4 mitjançant reaccions cícliques
- Requereix temperatures més altes (> 17 milions de K).³⁴

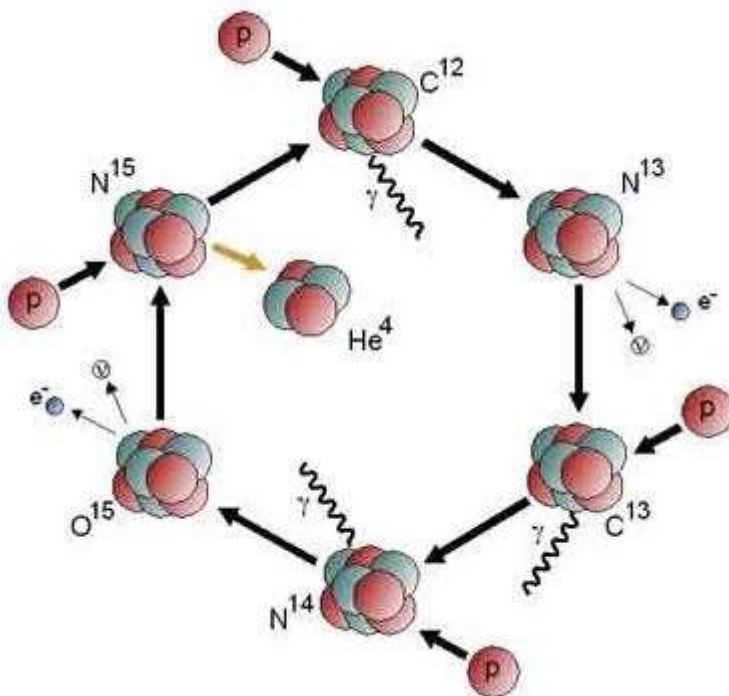
Reacció:



Etapes (catalitzades per C (carboni), N (nitrogen) i O (oxigen)):

³⁴ Tomé, César. Cultura Científica. *Fusión nuclear en el Sol* [en línia]. Cuaderno de Cultura Científica, 9 de març de 2021 [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://culturacientifica.com/2021/03/09/fusion-nuclear-en-el-sol/>

1. ${}^{12}_6\text{C} + p \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + \gamma$
2. ${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + e^+ + \nu_e$
3. ${}^{12}_6\text{C} + p \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \gamma$
4. ${}^{14}_7\text{N} + p \rightarrow {}^{15}_8\text{O} + \gamma$
5. ${}^{15}_8\text{O} \rightarrow {}^{15}_7\text{N} + e^+ + \nu_e$
6. ${}^{15}_7\text{N} + p \rightarrow {}^{12}_6\text{O} + {}^4_2\text{He}$



Imatge 13. Reacció cicle CNO. Imatge extreta de https://astronomia.fandom.com/wiki/Ciclo_CNO

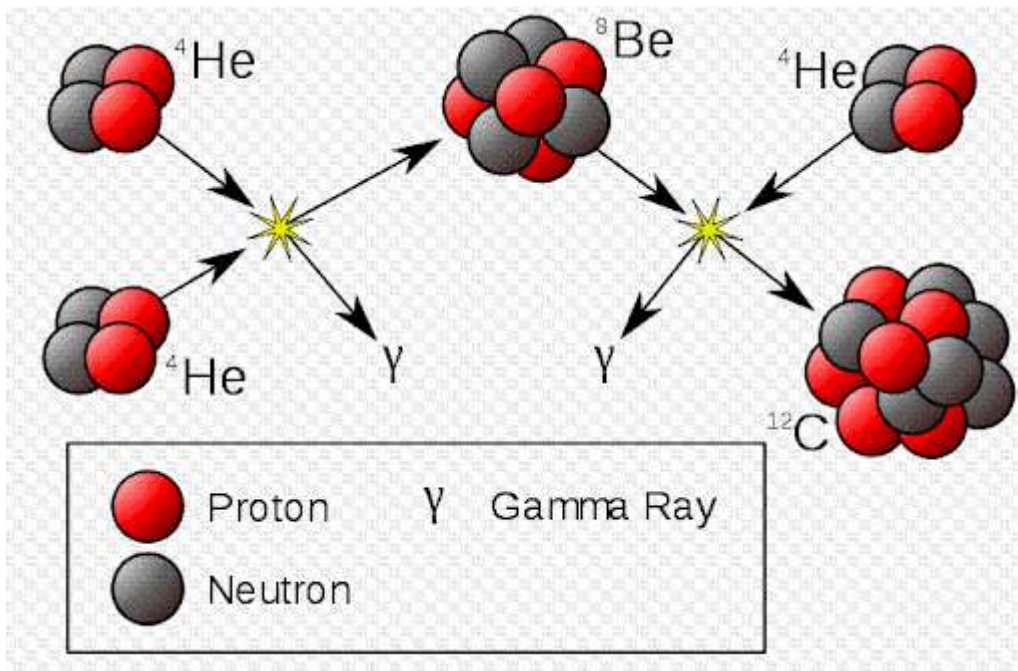
2.2.2. Fusió d'heli (fase gegant)

Una vegada l'hidrogen del nucli de l'estel s'esgota, la contracció gravitatòria eleva la temperatura fins a uns 100-200 milions K, iniciant la fusió d'heli.

A. Procés triple-alfa

- a. Dos nuclis d'heli-4 formen beril·li-8 (${}^8\text{Be}$), inestable.
- b. Abans de desintegrar-se, ${}^8\text{Be}$ captura un altre heli-4 produint carboni-12 (${}^{12}\text{C}$).

c. Reaccions secundàries generen oxigen-16 (^{16}O)³⁵



Imatge 14. Procés triple-alfa. Imatge extreta de <http://www.letraherido.com/13050206evolucionestrellas.htm>

Aquesta fase dura aproximadament el 10% de la vida de l'estel.

2.2.3. Combustió d'elements pesants

En els estels massius (>8 masses solars), el nucli experimenta fases successives de fusió:

Element	Temperatura (K)	Duració	Productes
Carboni	600 milions K	600 anys	Neó, sodi i magnesi
Neó	1,2 bilions K	1 any	Oxigen i Magnesi
Oxigen	1,5-2 bilions K	6 mesos	Silici i sofre
silici	2,7-3,5 bilions K	1 dia	Ferro i níquel

³⁵ Noticias del la Ciencia. *Los procesos físicos que alimentan la energía de las estrellas* [en línia]. Noticias del la Ciencia, s.d. [Consultat: 15 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://noticiasdelaciencia.com/art/52235/los-procesos-fisicos-que-alimentan-la-energia-de-las-estrellas>

La taula explica la formació d'elements pesants, és a dir, que no solen formar-se en les reaccions normals donades a les estrelles.

2.2.4 Síntesi d'elements més pesants que el ferro

Els processos exotèrmics de fusió s'aturen el ferro (^{56}Fe) perquè la seva formació absorbeix energia (un dels motius del fet que la fusió artificial es faci amb elements no pesants). Els elements més pesants es generen per:

- Captura ràpida de neutrons (procés r) en supernoves.
- Captura lenta de neutrons (procés S) en estrelles AGB (Branca asimptòtica de les gegants).
- Fotodesintegració de nuclis pesants a temperatures extremes.³⁶

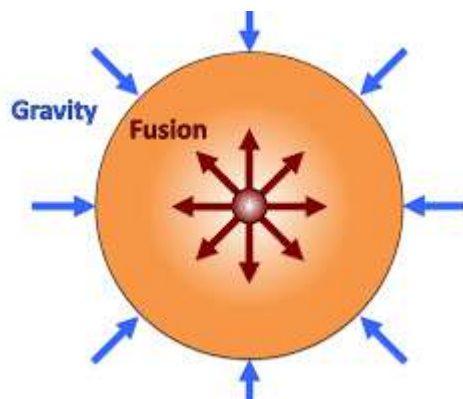
2.2.5 Control de les reaccions

Els estels mantenen equilibri dinàmic (que fan que l'estel no col·lapsi) entre:

1. Pressió de radiació, que fa força cap a l'exterior.
2. Força gravitatòria, que fa força cap a l'interior.

Aquest balanç s'autoregula mitjançant:

- Dependència exponencial del ritme de fusió amb la temperatura.
- Transport d'energia per radiació/convecció.³⁷



Imatge 15. Equilibri dinàmic d'estels. Imatge extreta de https://cesar.esa.int/index.php?Section=SSE_The_Hertzsprung_Rusell_Diagram&ChangeLang=es

³⁶ Wikipedia contributors. *Nucleosíntesis estelar* [en línia]. Wikimedia Foundation, s.d. [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleos%C3%ADntesis_estelar

³⁷ Tomé, César. Cultura Científica. *Fusión nuclear en el Sol* [en línia]. Cuaderno de Cultura Científica, 9 de març de 2021 [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://culturacientifica.com/2021/03/09/fusion-nuclear-en-el-sol/>

2.2.6 Fi de la fusió (final vida de l'estel)

Quan un estel esgota el combustible pot acabar de dues maneres depenen la seva massa:

- Estels de baixa massa (≤ 8 masses solars):
Expulsen les capes externes formant nebuloses planetàries, deixant un nucli de carboni/oxigen com enana blanca.
- Estels massius (> 8 masses solars):
Experimenten un col·lapse catastròfic del nucli de ferro, provocant una supernova i formant estels de neutrons o forats negres.³⁸



Imatge 16. Classificació espectral clàssica dels estels segons la massa i la temperatura. Imatge extreta de <https://telescopioschile.cl/tipos-de-estrellas/?srsItid=AfmBOorTi2BBXgvH0xQjKteIX1NYVKhcOF4RL5FUQcihxUbbg9sppJoH>

3. REACTORS DE FUSIÓ

A l'espai les estrelles realitzen la fusió d'una manera bastant diferent de la forma que es pot donar aquesta reacció a la Terra. A causa de les circumstàncies adverses que hi ha en la Terra per donar aquestes reaccions durant anys s'han fet diverses teories i proves per intentar que aquesta energia sigui profitosa.

³⁸ IBIDEM

El principal objectiu dels reactors és obtenir la quantitat més gran d'energia possible i per poder obtenir-la s'ha de tenir en compte diferents paràmetres.

Per poder entendre millor la següent part es necessiten saber les principals reaccions estudiades per a aplicacions energètiques per obtenir energia:

Principals reaccions de fusió

1. Fusió Deuteri (2_1H)-Triti (3_1H)

- Reacció: $D + T \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n + 17,6 \text{ MeV}$
- Mecanisme:
 - Reactius: nucli de deuteri (2_1H) i nucli de triti (3_1H).
 - Productes: Heli-4 (4_2He) i un neutró (1_0n)
 - Energia alliberada: 17,6 MeV, distribuïda com
 - 14,1 MeV en l'energia cinètica del neutró.
 - 3,5 MeV en l'energia cinètica de l'heli-4.
 - Temperatura mínima: 10^8 K (100 milions de graus).

2. Fusió Deuteri (2_1H)-Deuteri (2_1H)

- Reaccions: 1. $D + D \rightarrow T + {}^1_1H + 4,03 \text{ MeV}$
2. $D + D \rightarrow {}^3_2He + {}^1_0n + 3,27 \text{ MeV}$
- Mecanisme:
 - Probabilitat: amb dues branques tenen probabilitat similar (~50%).
 - Reactius: dos deuteris.
 - Productes:
 - 1. Triti i un protó (1_1H o p)
 - 2. Heli-3 i un neutró
 - Energia alliberada mitjana: 3,65 MeV
 - Temperatura mínima: $>10^8 \text{ K}$, més alta que la reacció D-T.

3. Fusió Deuteri (2_1H)-Heli-3 (3_2He)

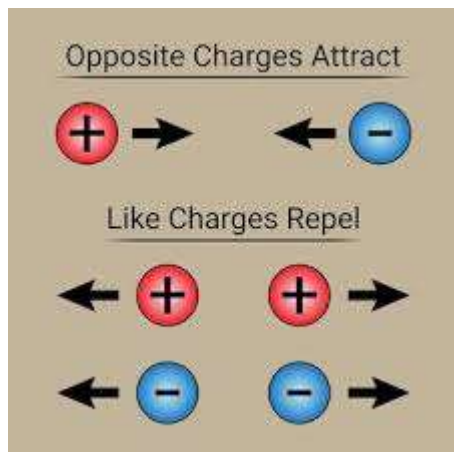
- Reacció: $D + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + p + 18,3 \text{ MeV}$

- Mecanisme:
 - Reactius: deuteri i heli-3
 - Productes: heli-4 i un protó
 - Energia alliberada: 18.3 MeV, emesa com a energia cinètica de les partícules carregades.
 - Temperatura mínima: $> 10^9$ K (1.000 milions de graus).
- Dificultats
 - Heli-3 escàs.
 - Requisits tèrmics extremadament alts.

3.1 Barrera de Coulomb

En la fusió nuclear la barrera de Coulomb és el principal obstacle que impedeix que dos nuclis atòmics es fusionin espontàniament. Aquesta barrera sorgeix de la repulsió electroestàtica entre els protons dels nuclis, els quals tenen càrrega positiva. Perquè ocorri la fusió, els nuclis han d'acostar-se prou perquè la força nuclear forta (de curt abast) superi aquesta repulsió.³⁹

En el següent apartat s'explica el càlcul per saber l'energia necessària per superar la repulsió electroestàtica entre dos àtoms.



Imatge 17. Explicació simple de la repulsió electroestàtica. Imatge extreta de https://www.freepik.es/vector-premium/ley-atraccion-repulsion-electrostatica_74500135.htm

³⁹ *HyperPhysics*. La barrera coulombiana en les reaccions nuclears [en línia]. Atlanta: Georgia State University, 2023 [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/coubar.html>

3.1.1. Fonaments físics de la Barrera Coulombiana

3.1.1.1. Potencial electroestàtic entre dos nuclis

L'energia potencial coulombiana (V_C) entre dos nuclis amb càrregues $Z_1 e$ i, separats per una distància r , és a dir, l'energia necessària per moure d'un punt a un altre dins d'un camp sense que hi hagi acceleració, està donada per: ⁴⁰

$$V_C(r) = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right) \cdot \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}\right)$$

On:

- Z_1, Z_2 = nombre atòmic dels nuclis (ex: $Z = 1$ per a deuteri, $Z = 2$ per a heli).
- e = càrrega del protó ($1,602 \cdot 10^{-19} C$)
- ϵ_0 = permitivitat del buit ($8,854 \cdot 10^{-12} F/m$).⁴¹

3.1.1.2. Altura de la Barrera Coulombiana

La barrera aconseguix el seu màxim quan els nuclis estan a una distància igual a la suma dels seus radis nuclears (mida del nucli) ($r \approx R_1 + R_2$), és a dir, quan aquests nuclis estan molt junts i estan a punt de fusionar-se. Per a dos protons ($Z_1 = Z_2 = 1$):

$$V_C \approx e^2 / 4\pi\epsilon_0 R \text{ amb } R \approx 1.2 fm \cdot (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$$
⁴²

Per a deuteri (D) (2H) i triti (T) (3H):

$$V_C \approx \frac{(1.6 \cdot 10^{-19})^2}{4\pi(8.85 \cdot 10^{-12})(3fm)} \approx 400 \text{ KeV}$$

eV: electronvolts, energia per mesurar en l'àmbit atòmic.

Interpretació:

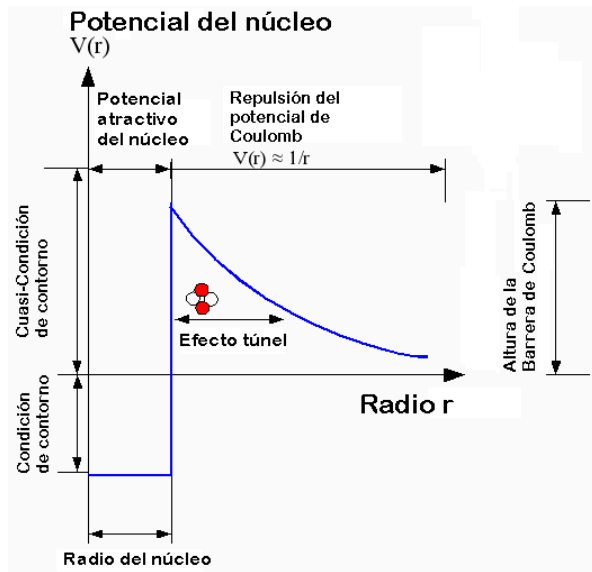
- Els nuclis necessiten superar ~400 keV d'energia cinètica per a fusionar-se.
- No obstant això, a causa d'aquest efecte túnel quàntic, la fusió pot ocórrer a energies menors (~10-20 keV).⁴³

⁴⁰ IBIDEM

⁴¹ IBIDEM

⁴² IBIDEM

⁴³ Valors de la barrera per a diferents reaccions: IAEA. Fonaments de la fusió nuclear [en línia]. Viena: Agència Internacional de l'Energia Atòmica, 2023 [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://www.iaea.org/topics/energy/fusion>

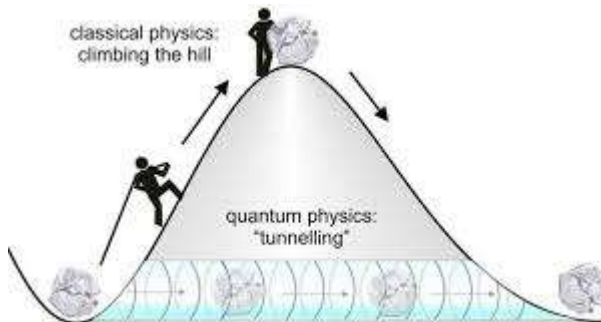


Imatge 18. Esquema potencial d'un nucli. Imatge extreta de https://es.wikipedia.org/wiki/Barrera_de_Coulomb

3.1.2. Superació de la Barrera Coulombiana

3.1.2.1. Efecte túnel (Mecànica quàntica)

L'efecte túnel consisteix en un efecte de la física quàntica que permet fer canvis o transicions a través de nivells energètics impossibles d'aconseguir a través de la física clàssica.⁴⁴



Imatge 19. Representació de l'efecte túnel. Imatge extreta de https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-06-30/fisica-cuantica-coche-atraviesa-muro-intacto_3452117/

La probabilitat que dos nuclis superin la barrera per efecte túnel està donada pel factor de Gamow:

⁴⁴ Viquipèdia. *Efecte túnel* [en línia]. Wikimedia Foundation, 2001 [Consultat: 28 de setembre de 2025]. Disponible a: https://ca.wikipedia.org/wiki/Efecte_t%C3%BAnel

$$P \propto e^{-\sqrt{EG/E}} \text{ on } EG = 2\pi^2 \alpha^2 Z_1^2 Z_2^2 \mu c^2$$

- EG = energia de Gamow (~493 keV per a D-T).
- μ = massa reduïda dels nuclis.
- α = constant d'estructura fina (~1/137).

Conseqüència:

Encara que la barrera és de ~400 keV, la fusió D-T ocorre eficientment a ~10-25 KeV (~100-200 milions de °C) a causa de l'efecte túnel. ⁴⁵

3.1.2.2. Dependència de la temperatura

La secció eficaç de fusió (σ) depèn fortament de l'energia cinètica dels nuclis. El següent càlcul estableix una relació entre la secció eficaç i l'energia cinètica dels nuclis (calor). ⁴⁶

$$\langle \sigma v \rangle \propto \left(\frac{1}{T^{2/3}} \right) e^{-(3EG^{1/3})/T^{1/3}}$$

Aquest mateix càlcul estableix per què la fusió només és significativa a temperatures extremes. ⁴⁷

3.1.3. Comparació entre reaccions de fusió

Reacció	Z1Z2	Altura de barrera (KeV)	$\langle \sigma v \rangle$ màx (m^3/s)
D-T	1	~400	10^{-22} (a 100 KeV)
D-D	1	~400	10^{-24} (a 100 KeV)
D- ³ He	2	~800	10^{-26} (a 200 KeV)
p-p	1	~400	10^{-49} (a 10 KeV)

⁴⁵ ITER Organization. Base física del projecte ITER [en línia]. Saint-Paul-lès-Durance: ITER, 2023 [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/sci/physics>

⁴⁶ IBIDEM

⁴⁷ IBIDEM

D=deuteri (2H)

T=triti (3H)

3He = heli 3

p=protó

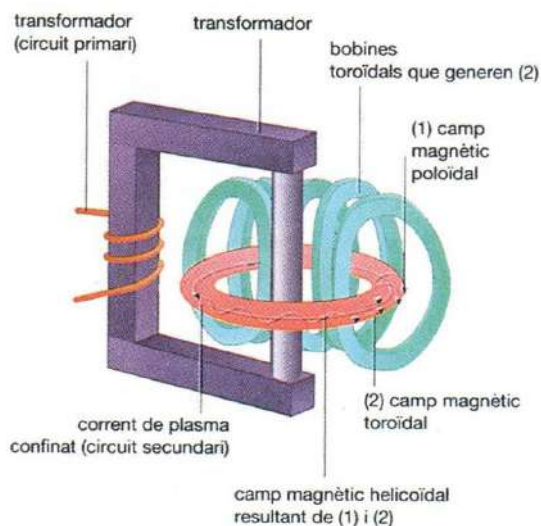
La taula mesura quina de les reaccions anteriors és la més eficient per generar energia. Quan l'altura de barrera és menor i la secció eficaç és major més eficaç i energètica és la reacció. En aquesta taula la reacció més eficient és la D-T.

3.1.4. Mètodes per a reduir l'impacte de la Barrera Coulombiana

Existeixen diferents mètodes per reduir la barrera de Coulomb alguns d'aquests utilitzats en reactors actuals.

3.1.4.1. Confinament magnètic (Tokamaks)

- Escalfa el plasma a ~ 162 milions de $^{\circ}C$ perquè els nuclis aconseguixin prou energia cinètica.
- Exemple: ITER busca $T \approx 15KeV$ o $14keV$.

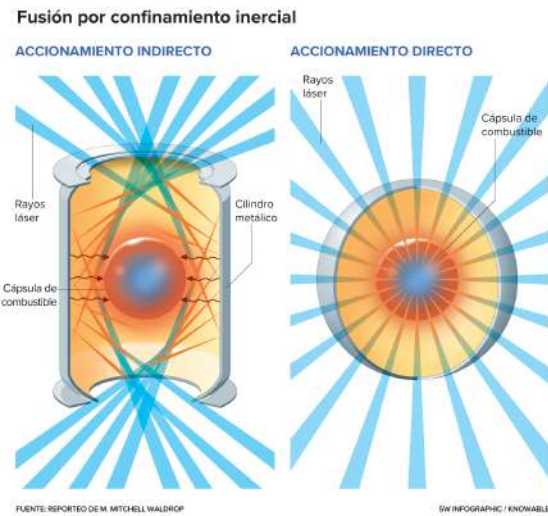


Imatge 20. Confinament magnètic en una cambra toroidal. Imatge extreta de <https://www.encyclopedia.cat/gran-encyclopedia-catalana/confinament-0>

3.1.4.2. Fusió inercial (Làzers)

- Comprimeix el combustible a densitats extremes ($n \approx 10^{31} m^{-3}$) per a augmentar les col·lisions.

- Exemple: NIF va aconseguir ignició en 2022.⁴⁸



Imatge 21. Confinament inercial. Imatge extreta de <https://es.knowablemagazine.org/content/articulo/mundo-fisico/2024/retos-energia-de-fusion-nuclear>

3.1.4.3. Fusió Freda (No Provada Científicament)

- Hipòtesi controvertida que suggereix mecanismes alternatius (ex. catàlisi muònica).
- Sense evidència reproduïble en condicions estàndard.⁴⁹

3.2. Criteris de Lawson

Per posar una mica en context, els criteris de Lawson, formulats pel físic britànic John D. Lawson l'any 1955, mateix any en què va ser classificat. En 1957 el treball va ser desclassificat i publicat. Els criteris de Lawson estableixen les condicions mínimes necessàries perquè un reactor de fusió nuclear pugui produir més energia

⁴⁸ LLNL. Assoliment de la ignició a la National Ignition Facility [en línia]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 13 de desembre de 2022 [Consultat: 4 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition>

⁴⁹ IAEA. Fonaments de la fusió nuclear [en línia]. Viena: Agència Internacional de l'Energia Atòmica, 2023 [Consultat: 4 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iaea.org/topics/energy/fusion>

de la qual es gasta. En el treball de Lawson es determina la relació entre la densitat del plasma(n), la temperatura(T) i el temps de confinament de l'energia(τE).^{50 51 52}



Imatge 22. John D. Lawson. Imatge extreta de <https://www.iter.org/node/20687/john-d-lawson-passed-away>

Lawson va partir d'un principi termodinàmic bàsic:

Energia produïda per fusió > pèrdues energètiques

La seva anàlisi va quantificar aquest balanç per al plasma de fusió, considerant:

- Energia de fusió generada: depenent de la densitat de partícules i la secció eficaç de reacció.
- Pèrdues energètiques: inclouen radiació (bremsstrahlung) i conducció tèrmica.

El criteri de Lawson, com la majoria d'estudis, no era perfecte i aquest va anar variant amb el pas dels anys.

3.2.1. Producte de la densitat d'ions i el temps de confinament

Per un plasma compost per deuteri-triti (D-T) (la reacció més utilitzada als reactors) o deuteri-deuteri (D-D), la condició de Lawson s'expressa com:

⁵⁰ "Criterios de Lawson". In: *Wikipedia, la enciclopedia libre* [en línia]. San Francisco: Wikimedia Foundation, darrera actualització: 15 de juliol de 2025 [Consultat: 5 d'agost de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Criterios_de_Lawson

⁵¹ "Critère de Lawson : définition et explications". In: *Techno-Science.net* [en línia]. s.l.: Techno-Science, 12 de març de 2024 [Consultat: 5 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.techno-science.net/definition/3612.html>

⁵² "Lawson criterion". In: *Wikipedia* [en línia]. s.l.: Wikimedia Foundation, darrera actualització: 20 de juliol de 2025 [Consultat: 5 d'agost de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Lawson_criterion

$$n \cdot \tau E \geq \frac{12}{E_{ch}} \frac{T}{\langle \sigma v \rangle}$$

on:

- n : densitat electrònica (partícules/m³)
- τE : temps de confinament d'energia (s)
- T : temperatura del plasma (KeV o K)
- E_{ch} : energia útil per reacció (3,5 Mev per D-T, corresponent al nucli d'heli)
- $\langle \sigma v \rangle$: valor mitjà del producte secció eficaç-velocitat (m³/s)

Per a D-T el valor mínim requerit:

$$n \cdot \tau E \geq 1,5 \cdot 10^{20} \text{ s/m}^3 \text{ (o } 10^{14} \text{ s/cm}^3 \text{)}$$

a una temperatura òptima de 26 KeV ($\approx 3 \cdot 10^8$ K)

3.2.1.1 Triple producte ($n \cdot T \cdot \tau E$)

Igual que l'anterior el triple producte donar la temperatura òptima per poder fer la reacció, però de manera més exacta. En investigacions posteriors es va mostrar que el triple producte ($n \cdot T \cdot \tau E$) és un indicador més precís per D-T: ⁵³

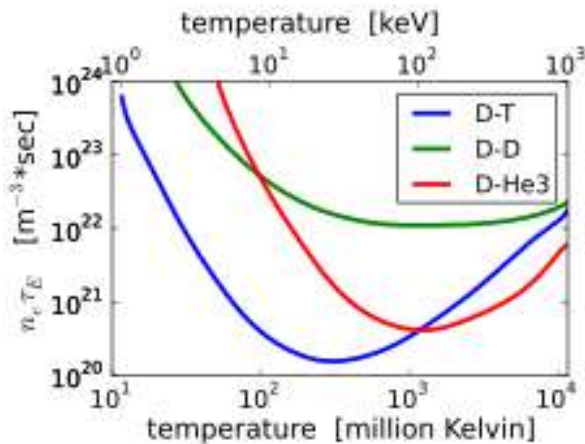
$$n \cdot \tau E \cdot T \geq \frac{12}{E_{ch}} \frac{T^2}{\langle \sigma v \rangle}$$

En l'equació anterior es canvia el factor $\frac{T}{\langle \sigma v \rangle}$ pel factor $\frac{T^2}{\langle \sigma v \rangle}$. D'aquesta manera dona un resultat més exacte i de menor temperatura.

La temperatura ideal és 14 KeV (temperatura de crítica d'ignició). ⁵⁴

⁵³ "Critère de Lawson : définition et explications". In: *Techno-Science.net* [en línia]. s.l.: Techno-Science, 12 de març de 2024 [Consultat: 5 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.techno-science.net/definition/3612.html>

⁵⁴ "Lawson criterion". In: *Wikipedia* [en línia]. s.l.: Wikimedia Foundation, darrera actualització: 20 de juliol de 2025 [Consultat: 5 d'agost de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Lawson_criterion



Imatge 23. Comparació de temperatures necessàries per realitzar les reaccions de fusió. Imatge extreta de https://en.wikipedia.org/wiki/Lawson_criterion

En arribar a aquesta temperatura el valor mitjà de $\langle \sigma v \rangle$ obté el següent valor:

$$\langle \sigma v \rangle = 1,1 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3 / \text{s T}^2$$

I a partir d'aquí es pot obtenir el valor mínim del triple producte

$$n \cdot \tau_E \cdot T \geq \frac{12 \cdot 14^2 \text{ KeV}^2}{1,1 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3 / \text{s} \cdot 14^2 \cdot 3500 \text{ KeV}}$$

El triple producte per a reactors inercials es pot expressar d'una manera diferent.⁵⁵

3.2.2. Ignició

La ignició és el moment quan una reacció de fusió controlada produeix més energia de la que es necessita per a iniciar-la, assolint que el plasma generi la calor necessària perquè la reacció continuï de forma autònoma.

3.2.2.1. Temperatura crítica d'ignició

La temperatura crítica d'ignició es defineix com la temperatura mínima a la qual la potència tèrmica generada per les reaccions de fusió en un plasma és suficient per mantenir la temperatura del mateix plasma sense necessitat d'una aportació externa addicional d'energia. És a dir, és el punt on la reacció esdevé autosostenible.

Aquesta temperatura depèn del combustible emprat. La reacció més prometedora és D-T.⁵⁶

⁵⁵ IBIDEM

⁵⁶ Nuclear fusion reaction [en línia]. *ScienceDirect*, s. d. [Consultat: 8 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nuclear-fusion-reaction>

- Reacció D-T: temperatures majors a 10^8 K, aquest valor pot variar segons la densitat del plasma i el temps de confinament.⁵⁷

Factors que influeixen en la temperatura d'ignició:

La temperatura d'ignició no és un valor absolut ni únic. Depèn de diversos factors:

- Tipus de combustible: altres reaccions, com la D-D o $D-^3He$ requereixen temperatures significativament més elevades, cosa que les fa menys accessibles tecnològicament a curt termini.^{58 59}
- Pèrdues d'energia: la temperatura del plasma no depèn només de l'energia que s'hi injecta i de la fusió que es genera, sinó també de com perd energia. Els mecanismes de pèrdua, com la radiació de frenada (bremsstrahlung), són crucials. A temperatures molt altes, aquest tipus de radiació augmenta, requerint una generació de potència encara major per compensar-ho.
- Configuració del confinament: l'eficiència amb què es confina el plasma, ja sigui amb camps magnètics (tokamaks, stellarators) o per inèrcia (confinament inercial) afecta directament la temperatura necessària.⁶⁰

4. INSTAL·LACIÓ DELS REACTORS DE FUSIÓ

Un reactor de fusió és una instal·lació dissenyada per contenir i controlar reaccions de fusió atòmica, on els nuclis lleugers s'uneixen per formar nuclis més pesants, alliberant grans quantitats d'energia. Els reactors intenten imitar el procés de les estrelles, tot i no tenir la mateixa forma. L'objectiu principal és generar energia elèctrica a partir d'un combustible abundant com són els isòtops d'hidrogen. Aquests reactors són projectes d'experimentació viables, a causa del fet que encara no es pot generar energia suficient, però s'espera que a curt termini s'arribi als objectius de generació d'energia.⁶¹

⁵⁷ IBIDEM

⁵⁸ IBIDEM

⁵⁹ Física nuclear [en línia]. a *quimica.es: enciclopedia*, s. d. [Consultat: 8 d'agost de 2025]. Disponible a: https://www.quimica.es/enciclopedia/F%C3%ADsica_nuclear.html

⁶⁰ Hanif, Muhammad Asif; et al. *Nuclear Fusion* [en línia]. A: *Renewable and Alternative Energy Resources*, 2022 [Consultat: 28 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nuclear-fusion-reaction>

⁶¹ Consejo de Seguridad Nuclear (España). *Fusión nuclear* [en línia]. Madrid: CSN, s.f. [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.csn.es/fusion-nuclear>

4.1. Tipus de reactors

Hi ha dos grups principals de reactors de fusió:

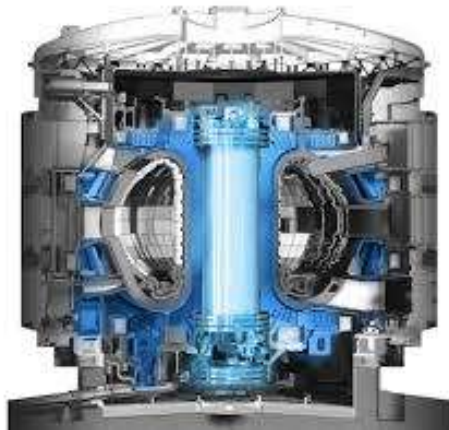
- Confinament magnètic (MCF).
- Confinament inercial (ICF).

Altres reactors:

- Fusió d'objectius magnetitzats (MTF): combina confinament magnètic i inercial.
- Reactors privats.

4.1.1. Confinament magnètic

- Tokamak: utilitza camps magnètics toroidals i poloidals per confinar el plasma en forma de dònut.⁶²

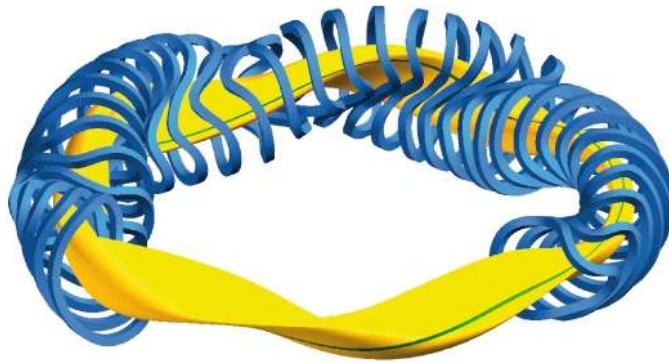


Imatge 24. Reactor tokamak. Imatge extreta de <https://www.iter.org/machine/what-tokamak>

- Estel·larador: empara bobines helicoidals per generar un camp magnètic estable sense corrents interns del plasma.⁶³

⁶² International Atomic Energy Agency (IAEA). *What is nuclear fusion?* [en línia]. IAEA, s.f. [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion>

⁶³ Viquipèdia. *Reactor de fusión nuclear* [en línia]. Wikimedia Foundation, 2005 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor_de_fusi%C3%B3n_nuclear

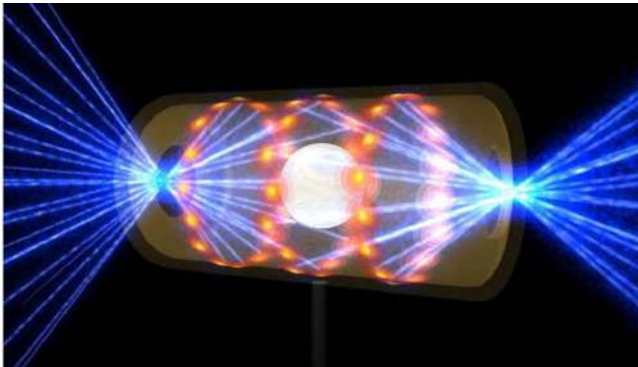


Imatge 25. Estel-larador representació. Imatge extreta de <https://es.wikipedia.org/wiki/Stellarator>

- Altres dispositius: miralls magnètics i configuracions compactes.⁶⁴

4.2.2. Confinament inercial

- Làsers d'alta energia: comprimeix una càpsula de combustible mitjançant per assolir la ignició.⁶⁵



Imatge 26. Reactor de làsers d'alta energia. Imatge extreta de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-58257395>

- Conductors de partícules: feixos d'ions o electrons, per comprimir el combustible, encara en fase experimental.⁶⁶

⁶⁴ Vedantu. *Nuclear Fusion Reactor* [en línia]. Vedantu, 2025 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.vedantu.com/physics/nuclear-fusion-reactor>

⁶⁵ Wikipedia. *Nuclear fusion* [en línia]. Wikimedia Foundation, 25 de juliol de 2003 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion

⁶⁶ Vedantu. *Nuclear Fusion Reactor* [en línia]. Vedantu, 2025 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.vedantu.com/physics/nuclear-fusion-reactor>

PART PRÀCTICA

Com a part pràctica el meu objectiu seria situar on es podria construir un reactor de fusió a Catalunya. Per poder fer-lo el més realista possible, és a dir, com si és fos a fer de veritat, es tindrà en compte 3 paràmetres: Situació geogràfica de Catalunya (fenòmens naturals, terres construïdes i expropiació de terres), instal·lació de l'edifici i el reactor (mides del reactor, mesures de seguretat, etc.) i per últim el preu que podria arribar a costar. Aquest reactor no seria per generar energia, sinó per dur a terme experimentació amb la fusió nuclear, tot i això, se seguirà el model del reactor ITER que té les expectatives molt altes per produir electricitat de forma neta. També és tindre reactors com el JET (Joint European Torus) o el JT-60SA. He de dir que com no soc un professional de l'enginyeria les mesures establertes als edificis, energies i preus seran aproximacions a partir dels altres reactors mencionats.

1. SITUACIÓ GEOGRÀFICA DE CATALUNYA

En primer lloc, Catalunya és una de les 17 comunitats autònomes del regne d'Espanya. Aquesta està situada al Nord-est d'Espanya.



Imatge 27. Mapa d'Espanya remarcant Catalunya. Imatge extreta de https://es.123rf.com/photo_14606044_mapa-de-espa%C3%B1a-en-catalu%C3%B1a-se-resalta.html

Catalunya consta de 41 comarques, és a dir, divisions administratives territorials. A l'hora d'analitzar els millors llocs per poder construir el reactor es descartaren les comarques menys favorables per la seva construcció.



Imatge 28. Mapa polític de Catalunya. Imatge extreta de <https://geografiabatxillerat.wordpress.com/material-addicional/mapa-de-comarques-de-catalunya/>

2. RISCOS, TERRENY I ACCESSIBILITAT

2.1. Zones naturals i riscos naturals

2.1.1. Zones muntanyoses

Les principals zones muntanyoses de Catalunya es troben al Nord de Catalunya on es troba els Pirineus, una serralada on les muntanyes arriben a més de 3000 metres d'altitud.

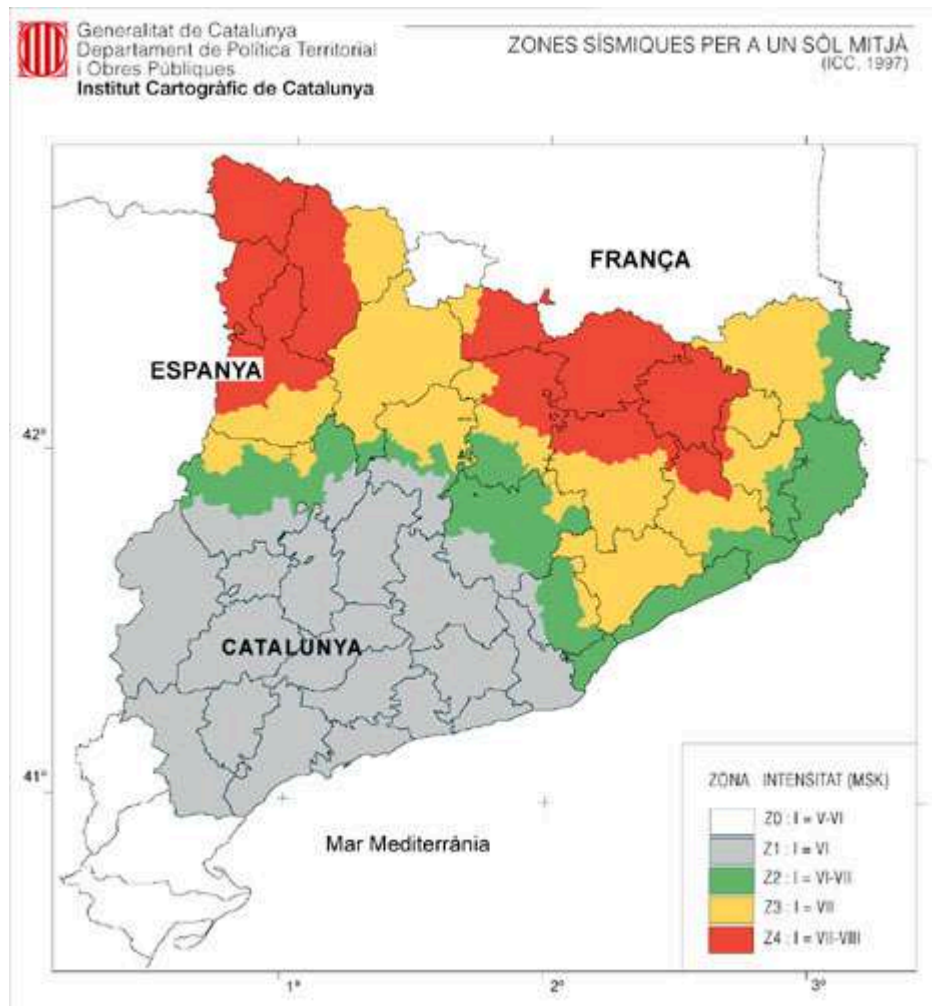


Imatge 29. Comarques muntanyoses de Catalunya. Imatge extreta de https://territori.gencat.cat/ca/06_territori_i_urbanisme/politica_de_muntanya/territoris_de_muntanya/index.html#comarques-de-muntanya

D'aquesta manera descartem 10 comarques per a la construcció del reactor: la Vall d'Aran.

2.1.2. Zones sísmiques

Catalunya no sol tenir terratrèmols molt potents i amb molta capacitat de destrucció, però, tot i això, i zones més propenses a tenir terratrèmols i de més intensitat.



Imatge 30. Mapa d'intensitat de sismes en escala MSK a Catalunya. Imatge extreta de <https://www.icgc.cat/ca/Geoinformacio-i-mapes/Dades-i-productes/Geoinformacio-geologica-i-geofisica/Sismologia/Mapes-depicentres-i-altres-informacions-sismiques/Avaluacio-del-risc-sismic-Catalunya>

En el mapa anterior es mostra la màxima intensitat probablement percebuda des del s. XIII, en escala MSK (escala Medvédev-Sponheuer-Karnik).⁶⁷

⁶⁷ Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Mapes d'epicentres i altres informacions sísmiques: Avaluació del risc símic a Catalunya [en línia]. Barcelona: ICGC, 2010 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.icgc.cat/ca/Geoinformacio-i-mapes/Dades-i-productes/Geoinformacio-geologica-i-geofisica/Sismologia/Mapes-depicentres-i-altres-informacions-sismiques/Avaluacio-del-risc-sismic-Catalunya>

L'escala MSK mesura la intensitat dels terratrèmols a través de tres paràmetres segons l'Institut Cartogràfic i Geogràfic de Catalunya (ICGC):

1. Efectes de percepció en les persones
2. Efecte sobre objectes i percepció
3. Danys a construccions.⁶⁸

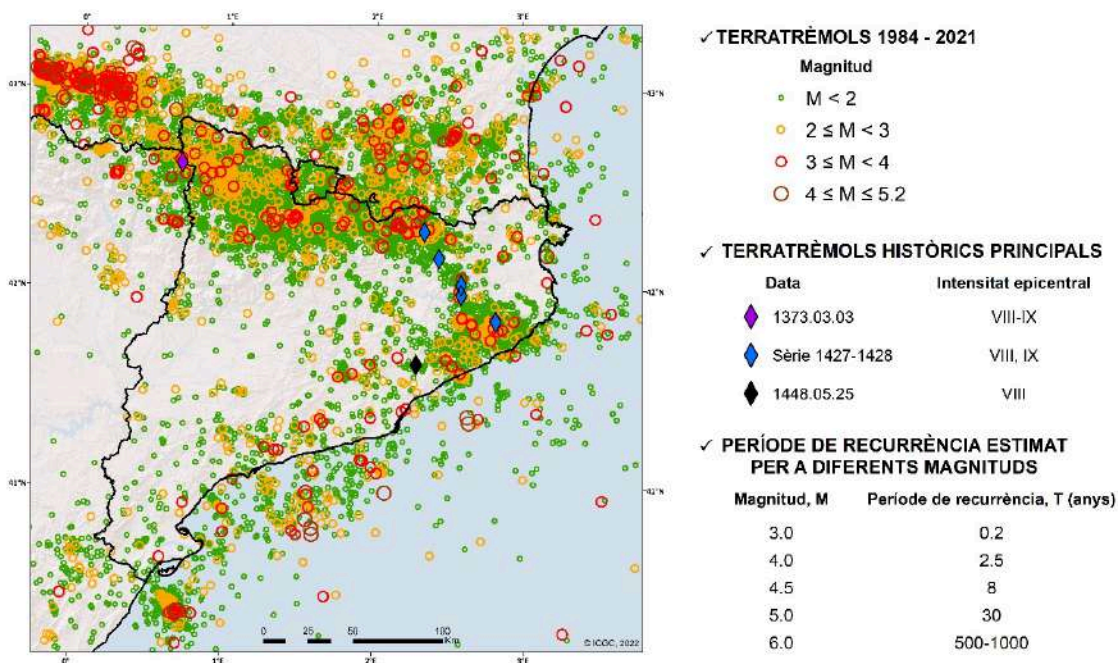
En el mapa la intensitat oscil·la entre V fins a VIII

- Grau V: sisme percebut per la majoria de persones, els edificis es mouen lleugerament i els danys són mínims.
- Grau VI: quasi la totalitat de les persones perceben el sisme, els mobles pesats arriben a moure's i les construccions més simples poden arribar a tenir danys moderats.
- Grau VII: la gent pràcticament no es pot mantenir dret, apareixen danys en juntes de canalitzacions i esquerdes en els murs. Les construccions més simples poden arribar a destruir-se, la resta de construccions arriben a tenir danys moderats
- Grau VIII: la gent entra en pànic incloent la gent que està a dins dels cotxes. Els mobles pesats arriben a caure i les llums penjades sofreixen danys parcials. Succeeixen petits lliscaments de terres. La majoria d'edificis són destruïts o amb danys greus. Únicament els edificis més preparats sofreixen danys moderats.⁶⁹

Per una altra banda, també està el mapa dels sismes succeïts entre 1984 i 2021.

⁶⁸ Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Escala d'Intensitats MSK [en línia]. Barcelona: ICGC, 2014 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <http://www.icgc.cat/en/European-Macroseismic-Scale-1998-EMS-98>

⁶⁹ IBIDEM



Imatge 31. Mapa dels sismes entre 1984-2021. Imatge extreta de <https://govern.cat/salaprensa/notes-premsa/556463/el-govern-recorda-el-centenari-del-sisme-de-la-v-al-d-aran-de-1923-un-dels-mes-intensos-registrats-a-catalunya?v=>

La majoria de sismes estan ubicats en les comarques muntanyoses (els Pirineus) i comarques com el Gironès, la Selva i Pla de l'estany.

2.1.3. Zones inundables

Les zones inundables principals són les costes i els parcs fluvials. El problema és que és recomanable que el reactor estigui situat a prop d'aigua per poder refrigerar materials. Aquesta part s'haurà de tenir en compte sobretot a l'hora de situar el recinte reactor. Tot i això, poso el mapa amb els parcs fluvials amb més possibilitats d'inundació.



Imatge 32. Mapa zones inundables de Catalunya. Imatge extreta de <https://www.pressdigital.es/articulo/sociedad/2023-09-14/4438900-video-zonas-catalunya-podrian-inundarse-cause-cambio-climatico>

2.2. Accessibilitat/zones urbanes

2.2.1. Carreteres

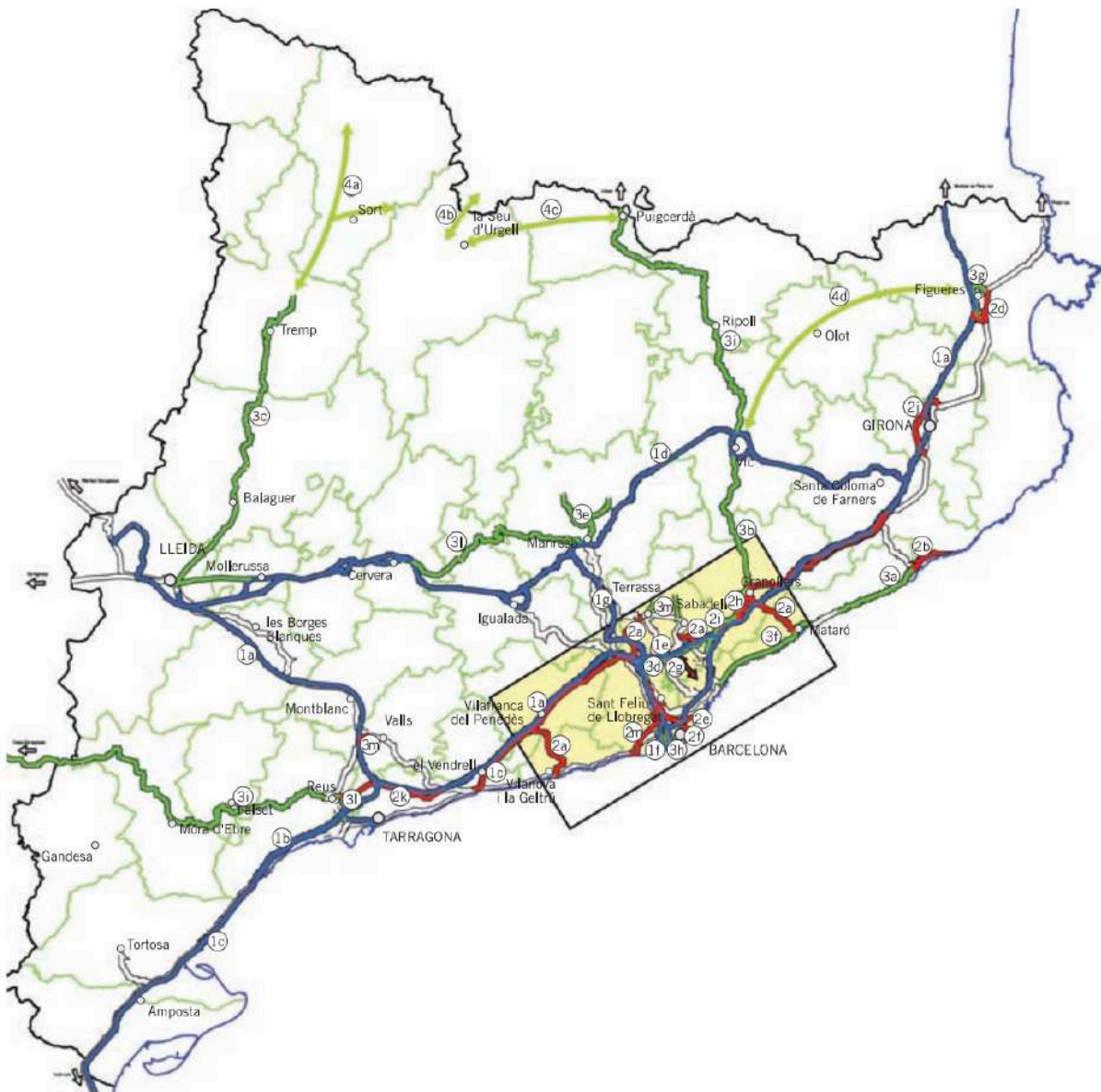
Les zones més accessibles per a transports de carreteres la part del litoral i prelitoral de Catalunya, l'eix transversal (marcat amb la línia rosa) i les connexions entre les capitals de províncies (marcades en vermell). El principal lloc de connexió de les carreteres és la ciutat de Barcelona que conjuntament amb la seva àrea metropolitana és on connecten les principals vies urbanes.



Imatge 33. Mapa de les carreteres principals de Catalunya. Imatge extreta de <https://www.icgc.cat/es/Geoinformacion-y-mapas/Mapas/Mapas-de-comunicaciones>

2.2.2. Ferrocarrils

Igual que amb les carreteres les principals xarxes de ferrocarrils connecten estan distribuïdes entre el litoral i prelitoral, l'eix transversal i les connexions entre capitals de província. Un altra vegada l'àrea metropolitana de Barcelona acapara la majoria connexió entre ferrocarrils catalans.



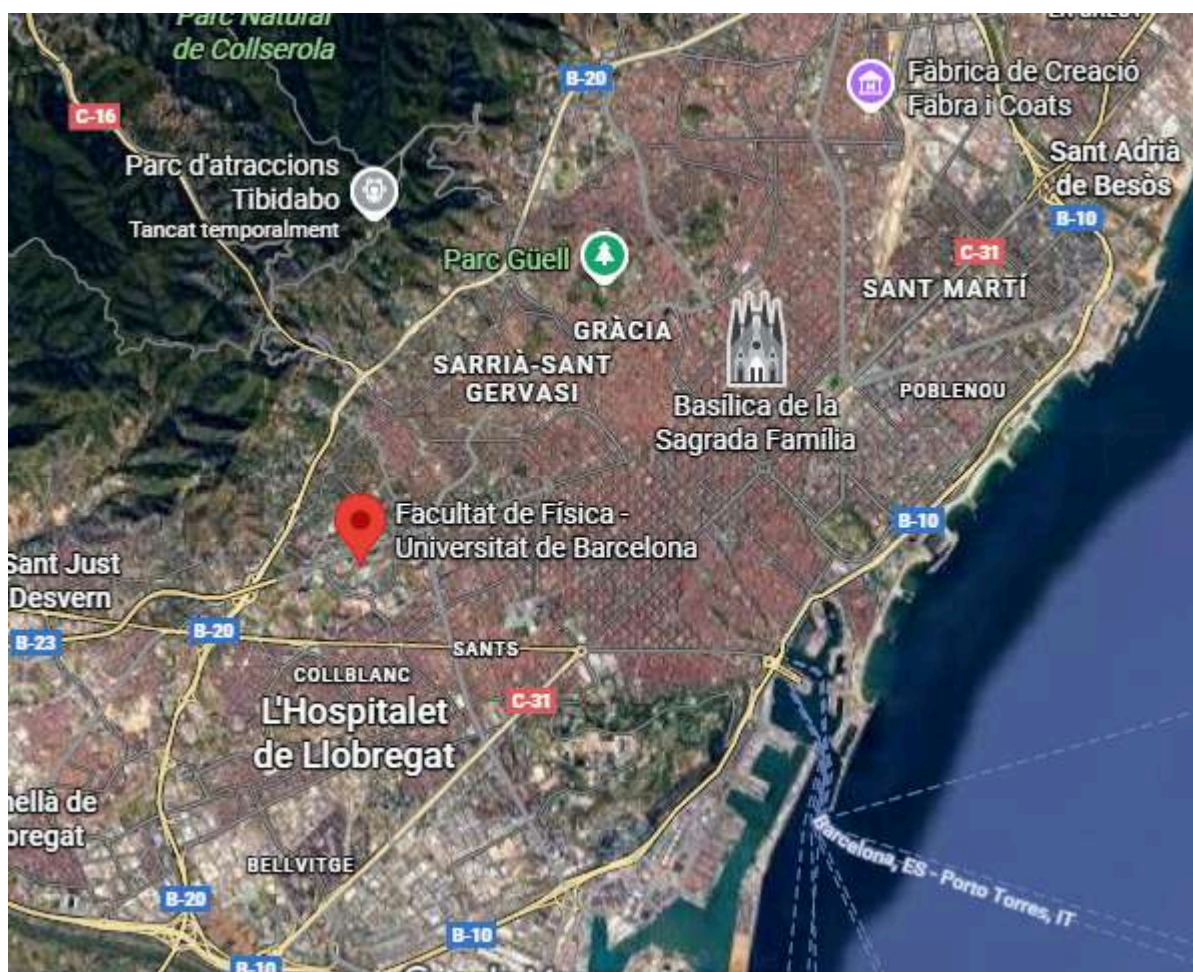
Imatge 34. Mapa de les principals línies de ferrocarrils de Catalunya. Imatge extreta de <https://unilateral.cat/2022/09/15/quines-millors-i-ampliacions-de-la-xarxa-ferroviaria-de-catalunya-ve-urem-els-anys-vinents/>

2.3 Llocs d'interès

Les dues universitats següents són les úniques de Catalunya amb departament de física.

- Universitat de Barcelona (UB)

La Universitat de Barcelona està situada al centre de Barcelona, a prop de plaça Catalunya.



Imatge 35. Imatge satèl·lit de Barcelona i la marca de la Facultat de Física. Imatge extreta de https://www.google.com/maps/place/Facultat+de+F%C3%ADsica+-+Universitat+de+Barcelona/@41.3973785,2.1381135,14424m/data=!3m2!1e3!5s0x12a49859d1cb8081:0x80414e5b572d450d!4m6!3m5!1s0x12a4985939f1ab75:0x51254092607919e3!8m2!3d41.3844004!4d2.1171889!16s%2Fg%2F1q5bk50vc?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI2MDEyMC4wIKXMDSokLDEwMDc5MjA2OUgBUAM%3D

El principal problema la situació geogràfica és que la UB està ubicada a la ciutat de Barcelona que està densament urbanitzada fent pràcticament impossible i més car la construcció del recinte del reactor.

- Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)

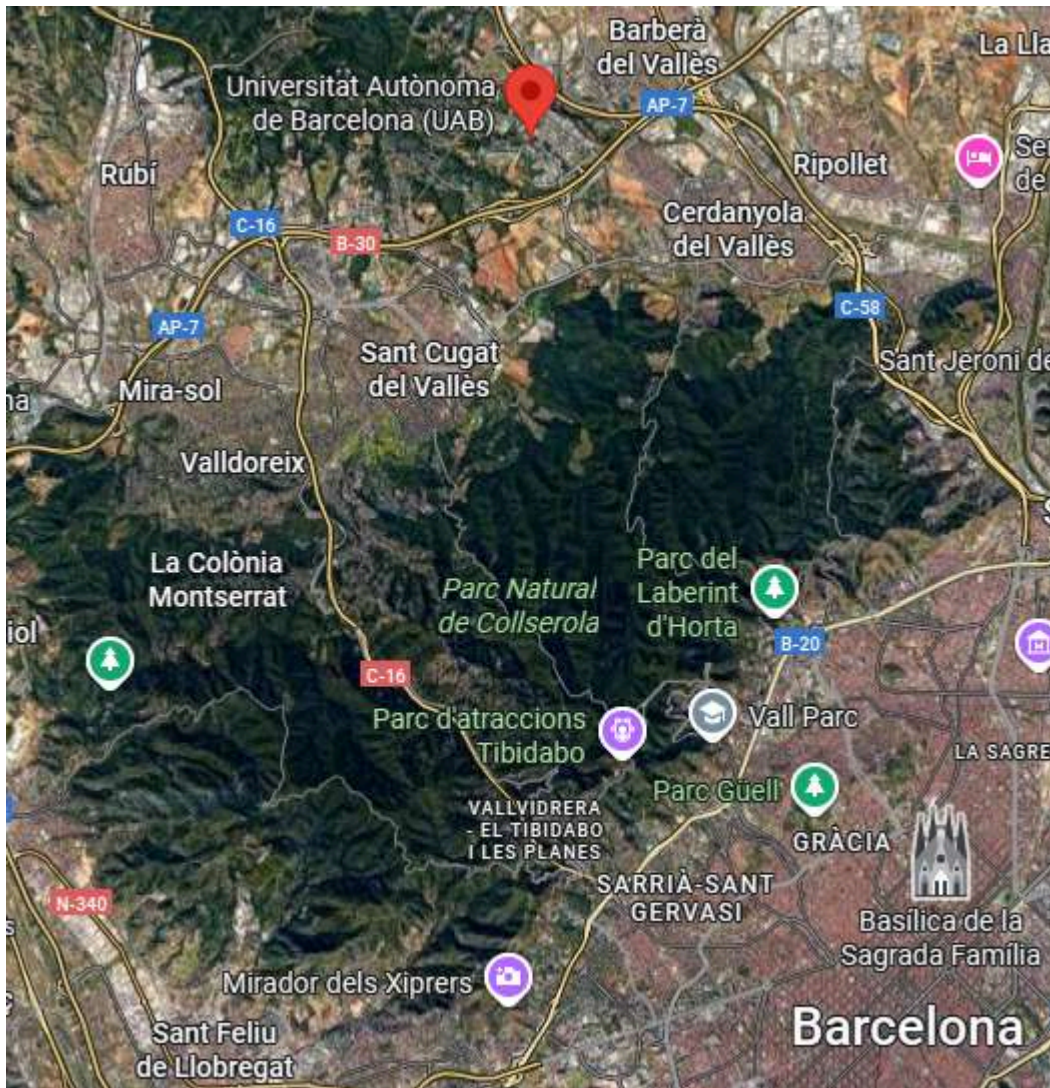
La UAB està situada en Cerdanyola del Vallès en un municipi de la comarca del Vallès Occidental. Aquest municipi és pròxim a la ciutat de Barcelona i a més a més, en el mateix municipi està el sincrotró ALBA, un accelerador de partícules de forma circular que exerceix diferents funcions que permet l'estudi d'empreses privades i estudiants.



Imatge 36. Sincrotró ALBA. Imatge extreta de <https://www.cells.es/es/acerca-de/bienvenida-a-alba>



Imatge 37. Cerdanyola del Vallès (marcat en vermell). Imatge extreta de https://es.wikipedia.org/wiki/Sarda%C3%B1ola_del_Vall%C3%A9s



Imatge 38. Imatge satèl·lit de Cerdanyola de Vallès i la UAB. Imatge extreta de [https://www.google.com/maps/place/Universitat+Aut%C3%B2noma+de+Barcelona+\(UAB\)/@41.445735,2.1082605,17141m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x12a4942a9b7b8f63:0x8a51bd1095fe826d!8m2!3d41.5021421!4d2.1038536!16zL20vMGduNDg?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDgyNS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/Universitat+Aut%C3%B2noma+de+Barcelona+(UAB)/@41.445735,2.1082605,17141m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x12a4942a9b7b8f63:0x8a51bd1095fe826d!8m2!3d41.5021421!4d2.1038536!16zL20vMGduNDg?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDgyNS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D)

A diferència de la UB, és més viable la construcció del recinte perquè hi ha encara espais sense construccions com camps agrícoles o boscos. A més tot i no ser la capital catalana, el municipi està relativament a prop d'aquesta i amb bona accessibilitat.

3. LLOC DE CONSTRUCCIÓ DEL REACTOR

Analitzant tots els perills i conveniències dels diferents llocs de Catalunya els millors llocs per la construcció són els següents: la comarca del Segrià (la construcció hauria de ser a prop de la capital) i les comarques del voltant de Barcelona (Baix Llobregat, Barcelonès, el Maresme, Vallès Occidental i Vallès Occidental)



Imatge 39. Mapa polític de Catalunya. Imatge extreta de <https://geografiabatxillerat.wordpress.com/material-addicional/mapa-de-comarques-de-catalunya/>

Veient les comarques que hi queden descartaria la comarca del Segrià i la del Barcelonès:

- Segrià: seria la comarca menys accessible i la que està més lluny d'on se situa la majoria de la població.

- Barcelonès: quasi tot l'espai del Barcelonès està urbanitzat complicant molt la construcció del recinte, exemple: La Sagrada Família la qual per ser acaba s'ha d'expropiar habitatges on i viu gent actualment.

La meua proposta personal veient les quatre comarques que queden seria construir-lo al Vallès Occidental, exactament al municipi de Cerdanyola del Vallès. El municipi té una bona comunicació, amb autopistes importants com l'AP-7 i la C-58 i diferents línies de ferrocarrils, on entren l'R4, R7 i l'R8 per part de Renfe i per part de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC), la S2 i la S6.⁷⁰

Cal afegir que la localitat consta de la UAB la qual té departament de física i el sincrotró ALBA.

4. INSTAL·LACIÓ

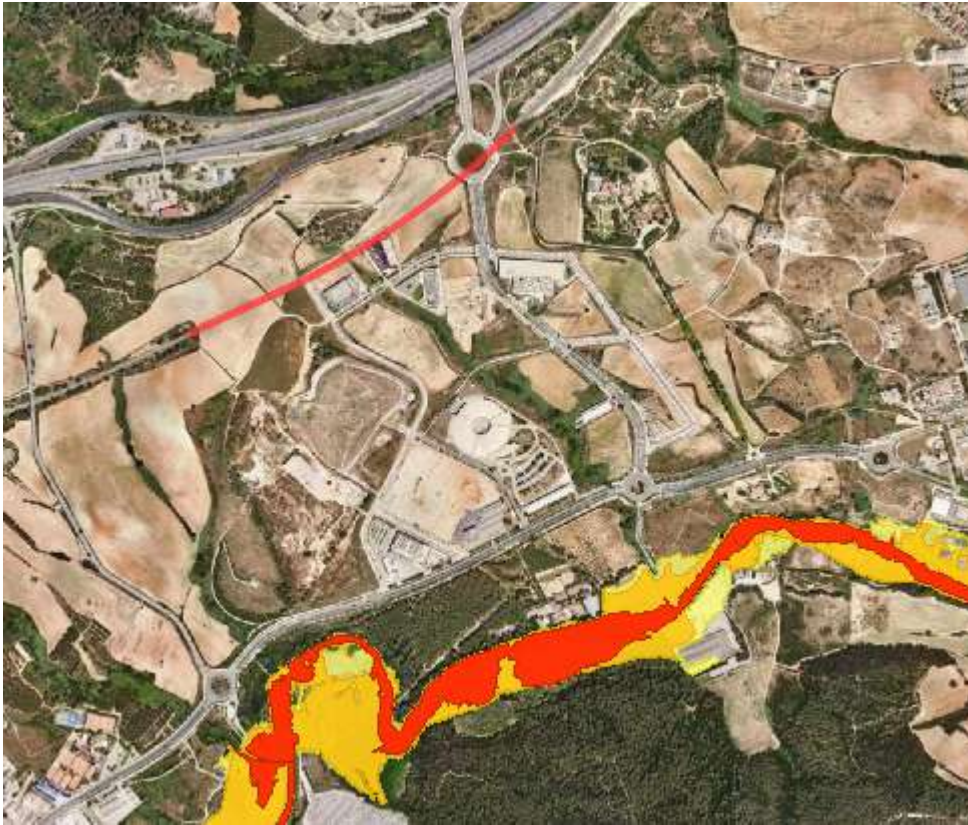
La instal·lació està dividida en 5 principals parts: recinte, reactor, edificis, preu i distribució.

4.1. Recinte

Sabent que el reactor es construiria en Cerdanyola del Vallès, s'ha de decidir en quina part de la localitat s'hauria de posar l'estructura.

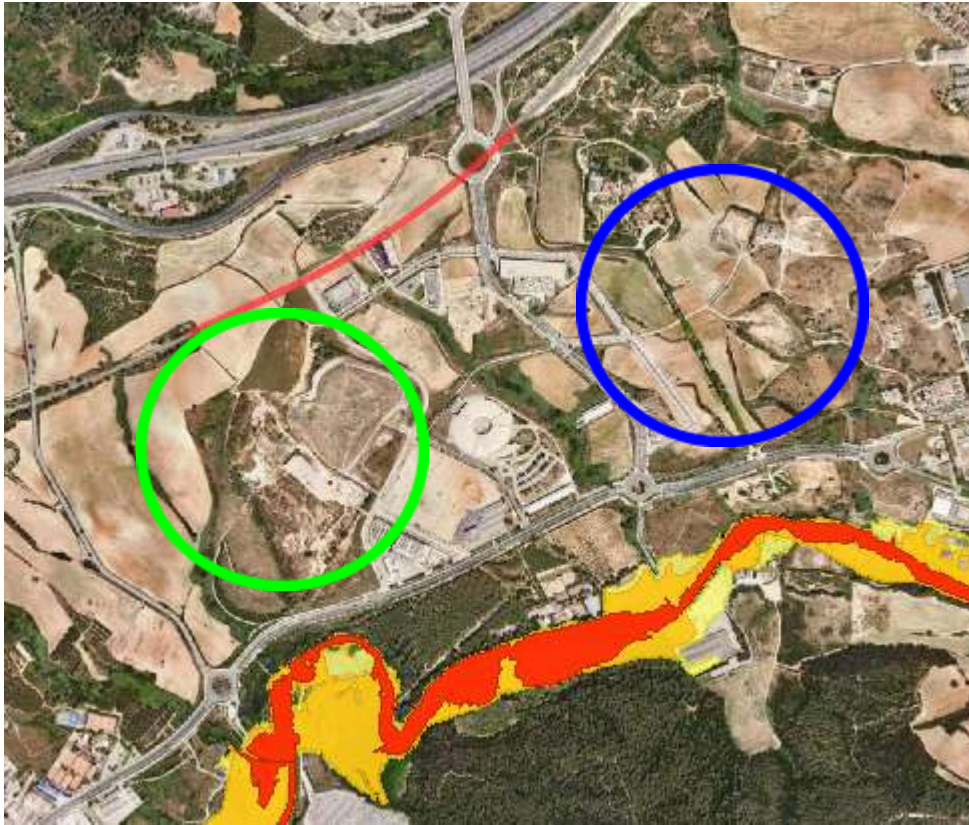
La meua opció personal seria posar-lo al costat del sincrotró ALBA i tenir un gran centre d'investigació de física.

⁷⁰ Viquipèdia. *Cerdanyola del Vallès#Serveis* [en línia]. Wikimedia Foundation, 2001 [Consultat: 31 d'agost de 2025]. Disponible a: https://ca.wikipedia.org/wiki/Cerdanyola_del_Vall%C3%A8s#Serveis



Imatge 40. Voltant del recinte del sincrotró ALBA. Imatge extreta de <https://pcivil.icgc.cat/pcivil/v2/index.html#41.48676,2.09799,8z>

En la imatge es veu una línia vermella que representa un túnel de ferrocarril on no es podria construir el reactor perquè part de l'estructura va sota terra. I també es veu, de color groc flux, fins on ha arribat l'aigua els últims 500 anys, en taronja els últims 100 anys, i en taronja fort els últims 10 anys. Veient la imatge queden dues zones per poder construir:



Imatge 41. Voltant del recinte del sincrotró ALBA. Imatge extreta de <https://pcivil.icgc.cat/pcivil/v2/index.html#41.48676,2.09799,8z>

La zona més favorable és la zona verda, ja que la zona blava consta amb un castell i amb un camí que fa que es pugui accedir, mentre que la zona verda és una zona en desús.



Imatge 42. Recinte de l'hipotètic reactor de fusió. Imatge extreta de <https://www.calcmaps.com/es/map-area/>

A través de la web [CalcMaps.com](https://www.calcmaps.com) he obtingut l'àrea de la zona verda. Aquesta dona que la superfície total equival a unes 51,04 hectàrees, més que suficient per al recinte que tenia plantejat d'un es 20 hectàrees. De totes maneres s'hauria d'expropiar o comprar tot el terreny (les 51,04 ha) per així evitar problemes administratius.

El recinte seria un rectangle les següents mesures: 350m·588m que dona una àrea de 20,58 ha.



Imatge 43. Recinte principal de l'hipotètic reactor de fusió. Imatge extreta de <https://www.calcmaps.com/es/map-area/>

4.2. Reactor

De tots els tipus de reactors que hi ha el reactor triat és el reactor tokamak el qual funciona a través del confinament magnètic de forma toroidal.

El reactor per funcionar consta de les següents parts:

1. Cambra de plasma toroidal

És el nucli del reactor on es produeix el plasma. Té forma de torus i està conjunta amb la cambra de buit, dissenyada per mantenir un alt buit ($\leq 10^{-6}$ Pa) per a evitar impureses i permetre l'escalfament del plasma.^{71 72}

Mesures

- Volum de la cambra: 200 m³
- Radi major: 3,5 metres
- Radi menor: el radi menor es calcula a partir de la següent equació:

$$V = 2\pi^2 Rr^2$$

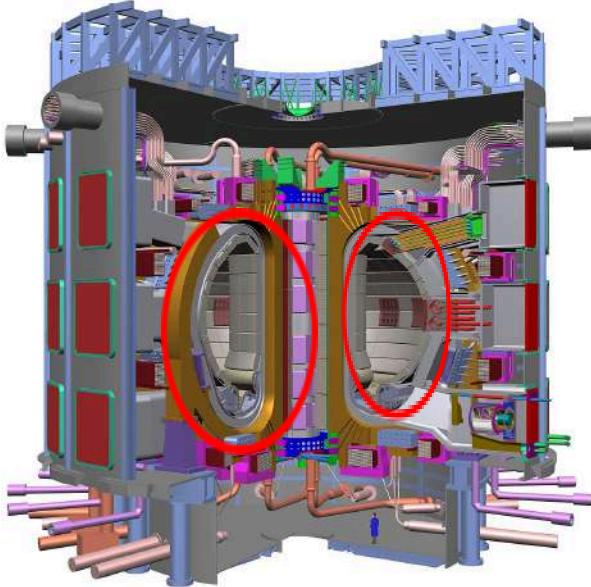
Amb les dades anteriors aquesta dona el següent resultat:

⁷¹ ITER Organization. *Facts & Figures* [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 26 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/facts-figures>

⁷² Wikipedia contributors. *ITER* [en línia]. Wikimedia Foundation, 28 de juny de 2005 [Consultat: 26 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/ITER>

$$200 = 2\pi^2 3,5r^2 \Rightarrow r = \sqrt{\frac{200}{2\pi^2 \cdot 3,5}} = 1,70143791m \approx 1,7m$$

Els materials de la cambra per la part interior serien de tungstè i les estructures d'acer inoxidable.



Imatge 44. Imatge d'un reactor tokamak, marcant la cambra de plasma toroidal. Imatge extreta de <https://es.wikipedia.org/wiki/Tokamak>

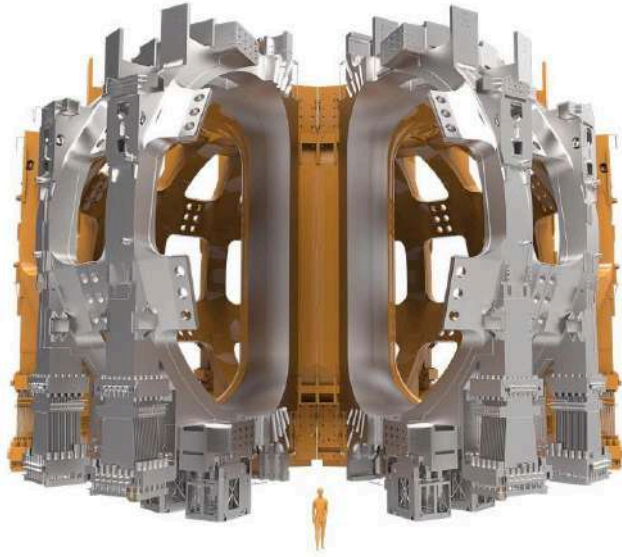
2. Bobines magnètiques

a. Bobines toroidals (TF)

generen un camp magnètic intens per a confinar el plasma en la direcció toroidal. Són fetes de materials superconductors (com niobi-estany) i requereixen refrigeració criogènica.⁷³

En el reactor plantejat hi hauria unes 12 bobines toroidals. La mida d'aquesta haurien de ser 6 i 7 metres d'alçada.

⁷³ ITER Organization. *Facts & Figures* [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 26 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/facts-figures>

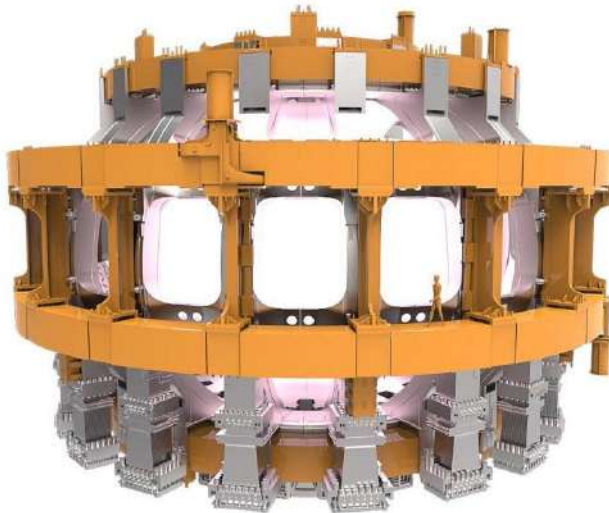


Imatge 45. Bobines toroidals del reactor ITER. Imatge extreta de <https://www.iter.org/machine/magnets>

b. Bobines poloidals (PF)

Controlen la posició i l'estabilitat del plasma. Com també les bobines toroidals estan fetes del mateix material. ^{74 75}

Hi hauria entre 5 i 6 bobines poloidals anirien al voltant del reactor.



Imatge 46. Bobines poloidals del reactor ITER. Imatge extreta de <https://www.iter.org/machine/magnets>

c. Selenoide central

⁷⁴ IBIDEM

⁷⁵ U.S. Department of Energy. *DOE Explains...Tokamaks* [en línia]. Office of Science, 2025 [Consultat: 26 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.energy.gov/science/doe-explainstokamaks>

Indueix el corrent elèctric en el plasma i contribueix en el seu escalfament. Aquest és la columna del funcionament del sistema magnètic.

Aquest actuaria amb una intensitat de 10 tesles (T) i tindria una altura de 9 metres i un diàmetre màxim de 3,6 metres per no interferir amb la capacitat de la cambra de plasma toroidal.⁷⁶



Imatge 47. Selenoide central del reactor ITER. Imatge extreta de <https://www.iter.org/machine/magnets>

3. Sistemes d'escalfament

a. Escalfament per ones de radiofreqüència (RF)

Transmet energia al plasma mitjançant radiació electromagnètica.

La seva potència oscil·laria entre 15-20 MW per assolir temperatures de 10^8 K.

b. Escalfament per feixos de neutrons (NBI)

Injecta Partícules energètiques al plasma per a augmentar la seva temperatura.

Aquest tindria una potència entre 10-15 MW amb una freqüència d'entre 3-5 GHz.

c. Escalfament per corrent induït

⁷⁶ IBIDEM

Generat pel selenoide central.^{77 78}

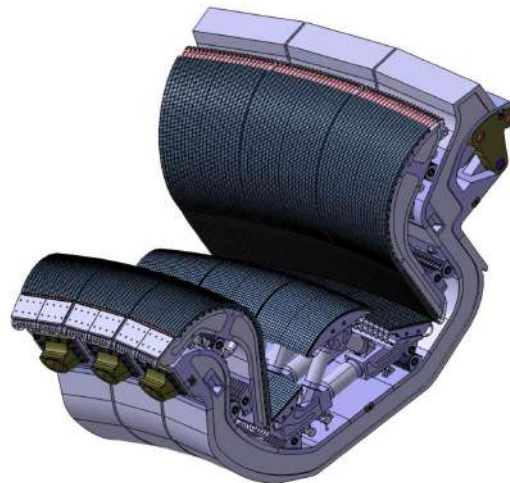
4. Divertor

Extrau les impureses i les partícules residuals del plasma. És exposat a fluxos tèrmics intensos i requereix materials resistents a les altes temperatures (com tungstè o carboni). Aquest està situat al fons de la cambra.

En el reactor tindria una superfície d'uns 30 m².^{79 80}



Imatge 48. Divertor del reactor ITER. Imatge extreta de <https://www.iter.org/machine/divertor>



Imatge 49. Peça del divertor. Imatge extreta de <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-fusion/tokamaks/divertor>

5. Blanket (manta reproductora)

Absorbeix l'energia dels neutrons generats per la fusió i produeix triti mitjançant reaccions amb la manta reproductora de liti. És clau per l'autosuficiència del combustible en reactors futurs.⁸¹

El blanket tindria una superfície d'uns 300 m² per cobrir tot l'interior de la càmera.

Estaria feta de liti i ceràmiques avançades per produir triti.

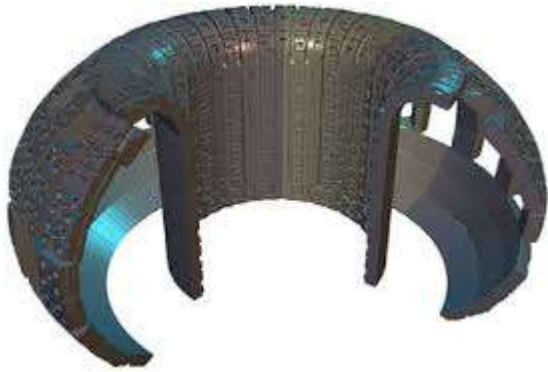
⁷⁷ Viquipèdia. *Tokamak* [en línia]. Wikimedia Foundation, 28 de desembre de 2004 [Consultat: 26 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak>

⁷⁸ ITER Organization. *What will ITER do?* [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 27 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/fusion-energy/what-will-iter-do>

⁷⁹ Wikipedia contributors. *ITER* [en línia]. Wikimedia Foundation, 28 de juny de 2005 [Consultat: 27 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/ITER>

⁸⁰ ITER Organization. *What will ITER do?* [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 27 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/fusion-energy/what-will-iter-do>

⁸¹ Wikipedia contributors. *ITER* [en línia]. Wikimedia Foundation, 28 de juny de 2005 [Consultat: 27 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/ITER>



Imatge 50. Blanket o manta reproductora. Imatge extreta de https://wiki.fusion.ciemat.es/wiki/Breeding_blanket

6. Criostat

És una estructura aïlla tèrmicament les bobines superconductores, mantenint-les a temperatures criogèniques (properes al zero absolut). Aquest tindria una alçada de 15 m i un diàmetre de 12 m perquè la resta d'elements càpiguen dins d'aquest dispositiu.^{82 83}



Imatge 51. Criostat del reactor ITER. Imatge extreta de <https://www.xataka.com/investigacion/reactor-fusion-nuclear-iter-pieza-a-pieza-asi-funcionara-mayores-obras-ingenieria-creadas-hombre-1>

7. Sistemes de suport

a. Sistemes de refrigeració

⁸² IBIDEM

⁸³ ITER Organization. *What will ITER do?* [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 27 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/fusion-energy/what-will-iter-do>

Gestionen la calor residual generada pel plasma i els components del reactor. Aquestes tindrien una capacitat per a dissipar 100-150 MW tèrmics.

b. Sistemes elèctrics

Subministren energia als imants i als sistemes d'escalfament. Aquestes tindrien una potència elèctrica de 150-200 MW per alimentar els sistemes.⁸⁴

Imatge del reactor en conjunt:



Imatge 52. Plànol del reactor amb les parts indicades. Imatge extreta de <https://telosworld.com/reactores-de-fusion-nuclear/>

4.3. Edificis

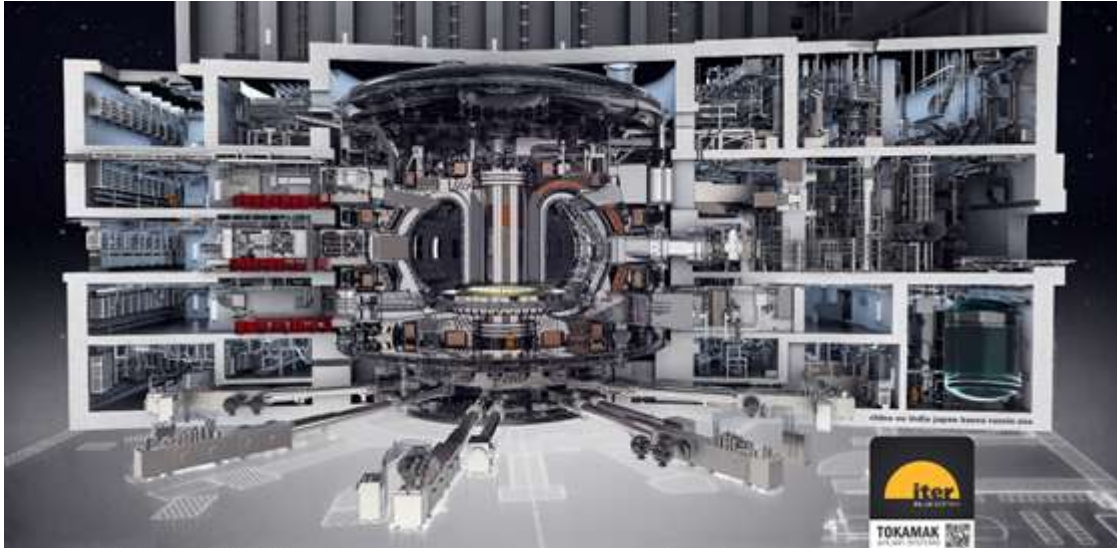
1. Edifici del tokamak

És l'edifici principal que allotja el reactor, aquest es fan amb una estructura de formigó armat dissenyat per suportar càrregues pesades i resistir terratrèmols. A

⁸⁴ Wikipedia contributors. *ITER* [en línia]. Wikimedia Foundation, 28 de juny de 2005 [Consultat: 27 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/ITER>

més, l'edifici consta amb escuts biològics per a protecció contra radiacions de neutrons alliberades pel reactor.⁸⁵

L'edifici del Tokamak tindria una altura de 40 m dels quals 10 m són sota terra. També tindria una longitud d'uns 80 metres i uns 55 metres d'amplada.⁸⁶



Imatge 53. Edifici del tokamak per dins. Imatge extreta de <https://ifmif-dones.es/es/updates/cruzando-la-frontera-de-la-fusion-el-proyecto-iter/>

2. Sala d'assemblatge

Serveix per a l'assemblatge preliminar dels components del tokamak abans de la seva instal·lació.⁸⁷

La sala d'assemblatge tindria uns 25 m d'altura (en total uns 55 m sobre terra) i estaria a sobre de l'edifici del tokamak per poder muntar el reactor i canviar peces. Tindria una longitud d'uns 60 metres i una amplada de 40 metres.

⁸⁵ ITER Organization. *Building ITER* [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 27 d'agost 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/building-iter>

⁸⁶ Wikipedia. *Energia de fusió* [en línia]. Wikimedia Foundation, 15 de desembre de 2004 [Consultat: 27 d'agost de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_de_fusi%C3%B3n

⁸⁷ ITER Organization. *Building ITER* [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 28 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/building-iter>



Imatge 54. Sala d'assemblatge marcat en vermell. Imatge extreta de <https://newsroom.ferrovial.com/es/notas-prensa/el-consorcio-integrado-por-ferrovial-firma-contrato-construccion-francia/>

3. Plantes auxiliars

a. Planta criogènica

La seva funció és, refreda les bobines superconductores mitjançant heli líquid i mantenint-les a temperatures properes al zero absolut.⁸⁸ Les mesures de la planta serien 60 m de llarg, 40 m d'ample i 25 metres d'altura. Ocuparia una superfície de 2400 m².



Imatge 55. Planta criogènica, plànol. Imatge extreta de <https://principia.es/proyectos/iter/>

b. Sistemes de refrigeració

⁸⁸ IBIDEM

Inclou torres de refrigeració i intercanviadors de calor per a dissipar la calor residual del reactor i dels sistemes de refrigeració mitjançant refrigeració per a evaporació.⁸⁹ Per fer-lo més senzill el disseny de les torres tindrien forma cilíndrica. Serien dues torres de 20 m de diàmetre i 35 m d'altura.⁹⁰

c. Subestació elèctrica

Té diferents funcions de la subestació elèctrica: rebre i distribuir l'energia elèctrica des de l'energia externa, convertir tensions i distribuir energia als diferents sistemes del reactor, proveir energia de reserva per a situacions de reserva i gestionar la qualitat de l'energia i la protecció contra sobretensions. La subestació tindria una llargada 100 metres i uns 70 metres d'ample, ocupant una superfície de 7000 m².



Imatge 56. Subestació elèctrica. Imatge extreta de https://www.freepik.es/fotos-premium/vista-aerea-subestacion-electrica-brasil_124297150.htm

4. Edifici de control

Des d'aquest edifici es posa en funcionament el tokamak, es prenen resultats de les fusions i es tenen en compte les anomalies succeïes o problemes. Les mesures 50 m de llarg, 30 m d'ample i 15 m d'altura (3 plantes).⁹¹

⁸⁹ IBIDEM

⁹⁰ Wikipedia. *Energia de fusió* [en línia]. Wikimedia Foundation, 15 de desembre de 2004 [Consultat: 28 d'agost de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_de_fusi%C3%B3n

⁹¹ Princeton Plasma Physics Laboratory. *Tokamak Experimental Science* [en línia]. Princeton, NJ: Princeton University, 2025 [Consultat: 4 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.pppl.gov/tokamak-experimental-science>

5. Edifici de visites i museu

La funció del museu seria servir com a centre d'interpretació per a visitants, amb exposicions sobre fusió nuclear, àrees educatives i zones interactives. Aquest tindria una amplada de 40 m, 60 m de llarg i 12 m d'altura (2 pisos). En total ocuparia una superfície de 2400 m².⁹²

6. Pàrquing

Al recinte hauria d'haver-hi un pàrquing perquè treballadors, científic i visites puguin accedir. Posaríem unes 400 places per a cotxes (2,2·4,5 m = 9,9 m²)⁹³ i unes 20 per a autocars (3,5·16,5 m = 57,75 m²)⁹⁴. Els aparcaments ocuparien 5115 m² (sol contant places) aquesta estaria dividida en 4 fileres de cotxes on cada filera caben 100 cotxes (filera doble) i una filera d'autobusos. Les carreteres serien de 6 m d'amplada i 15 m a l'entrada perquè els autocars puguin maniobrar. Llavors les mesures del pàrquing serien les següents 97,5·122 m = 11895 m².



Imatge 57. Pàrquing. Imatge extreta de <https://www.parkingascars.com/es/outdoor.php>

4.4. Preu

Aquesta anàlisi sintetitza dades de projectes similars (com l'ITER, el JT-60SA i el JET) i adapta els costos a l'escala i complexitat del reactor proposat. Els costos s'expressen en milions d'euros (M€) i inclouen desglossaments per a components, edificis i factors addicionals.

⁹² Wiper, Alastair Philip. *Return to the ITER Experimental Nuclear Fusion Reactor, France* [en línia]. Alastair Philip Wiper, 7 de novembre de 2019 [Consultat: 5 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://alastairphilipwiper.com/blog/return-to-the-iter-experimental-nuclear-fusion-reactor-france>

⁹³ Motor Mapfre. *¿Qué medidas tiene una plaza de garaje en España?* [en línia]. MAPFRE, 7 de novembre de 2015 [Consultat: 4 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.motor.mapfre.es/consejos-practicos/consejos-de-mantenimiento/medidas-plaza-garaje/>

⁹⁴ Innovative Worker. *Legislación general: Legislación emergent* [en línia]. Economist Jurist, 2025 [Consultat: 4 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://innovativeworker.economistjurist.es/BDI/legislacion/legislaciongeneral/emergentelegislacion.php?id=150570>

4.4.1. Reactor

El reactor requereix components d'alta tecnologia dissenyats per a suportar temperatures extremes, camps magnètics intensos, i condicions de radiació. Els costos es basen en referències de projectes existents, ajustats per a la mida del reactor.

Cambra de plasma toroidal (800 M€)

Justificació: la complexitat de la fabricació amb materials resistents a la radiació i les altes temperatures incrementen el cost. Projectes com l'ITER destinen ~4000 M€ per una cambra similar però molt més gran. ⁹⁵

Bobines magnètiques superconductores (1200 M€)

Justificació: les bobines superconductores requereixen tecnologia criogènica i materials especials. El cost és inferior al de l'ITER (6000 M€) a causa de la menor mida d'aquest i l'ús de HTS (High temperature superconductors; Superconductors d'alta temperatura) més eficients. ⁹⁶

Sistemes d'escalfament (400 M€)

Justificació: els sistemes d'escalfament representen el 10-15% del cost total en reactors com el JT-60SA. ^{97 98}

Divertor i blanket (500 M€)

Justificació: aquests components estan sotmesos a fluxos tèrmics alts i requereixen materials avançats. En l'ITER, el cost és de 2000 M€ per una escala major. ⁹⁹

Criostat i sistemes criogènics (500 M€)

Justificació: inclou el criostat i les plantes criogèniques. Les plantes criogèniques industrials poden arribar a costar 3 M€, però a comparació de les necessitats de refredament d'un reactor són obsolets. Això fa que s'elevi moltíssim el preu. ¹⁰⁰

4.4.2. Edificis i infraestructura

Edifici del reactor del tokamak (400 M€)

⁹⁵ *ITER Cost Estimates* [en línia]. ITER Organization, [consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/sci/Budget>

⁹⁶ IBIDEM

⁹⁷ *JT-60SA Construction Costs* [en línia]. Japan Atomic Energy Agency, [consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://jaea.go.jp/english/press/2021/010800/>

⁹⁸ IBIDEM

⁹⁹ *ITER Cost Estimates* [en línia]. ITER Organization, [consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/sci/Budget>

¹⁰⁰ IBIDEM

Justificació: construcció amb formigó armat i escuts biològics. Cost similar al d'instal·lacions com el JT-60SA, ajustat per la mida. ¹⁰¹

Planta criogènica (150 M€)

Justificació: el preu de les plantes criogèniques varien segons la seva capacitat i per mantenir les temperatures requerides es necessita una gran capacitat.

Torres de refrigeració (100 M€)

Justificació: les torres per a projectes industrials grans poden arribar a costar 50 M€ cadascuna. ¹⁰²

Edifici de control (80 M€)

Justificació: inclou equips electrònics avançats i d'alta seguretat. Està basat en costos de centres de control de reactors.

Edifici de visites i museu (70 M€)

Justificació: museus tecnològics similars com l'ITER Visitor Centre tenen costos que ronden els 50-100 M€.

Subestació elèctrica (200 M€)

Justificació: les subestacions per a projectes d'energia tenen costos que varien segons la seva capacitat. Dades de Scribd indiquen costos de 15-56 milions de dòlars (si són complexes) per a subestacions de 40 MVA (MegaVolt-Amperi), i s'ha de tenir en compte que la subestació del reactor seria de 200 MVA.

Pàrquing (2 M€)

Justificació: en estar a l'aire lliure no agafar un preu molt excessiu i pràcticament no afecta el preu final total.

4.4.3. Costos addicionals i contingències

Investigació i desenvolupament (R+D) (200M€)

Justificació: cobreix simulacions, proves de materials, i optimització de disseny. Projectes com l'ITER destinen una gran quantitat.

Contingències (50% del cost final)

Justificació: els projectes de fusió solen tenir sobre costos deguts a complexitats tecnològiques i retards. L'ITER per exemple, ha tingut sobre costos superiors al 100%.

¹⁰¹ Wikipedia contributors. *JT-60* [en línia]. Wikimedia Foundation, 2005 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/JT-60>

¹⁰² ITER Cost Estimates [en línia]. ITER Organization, [consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/sci/Budget>

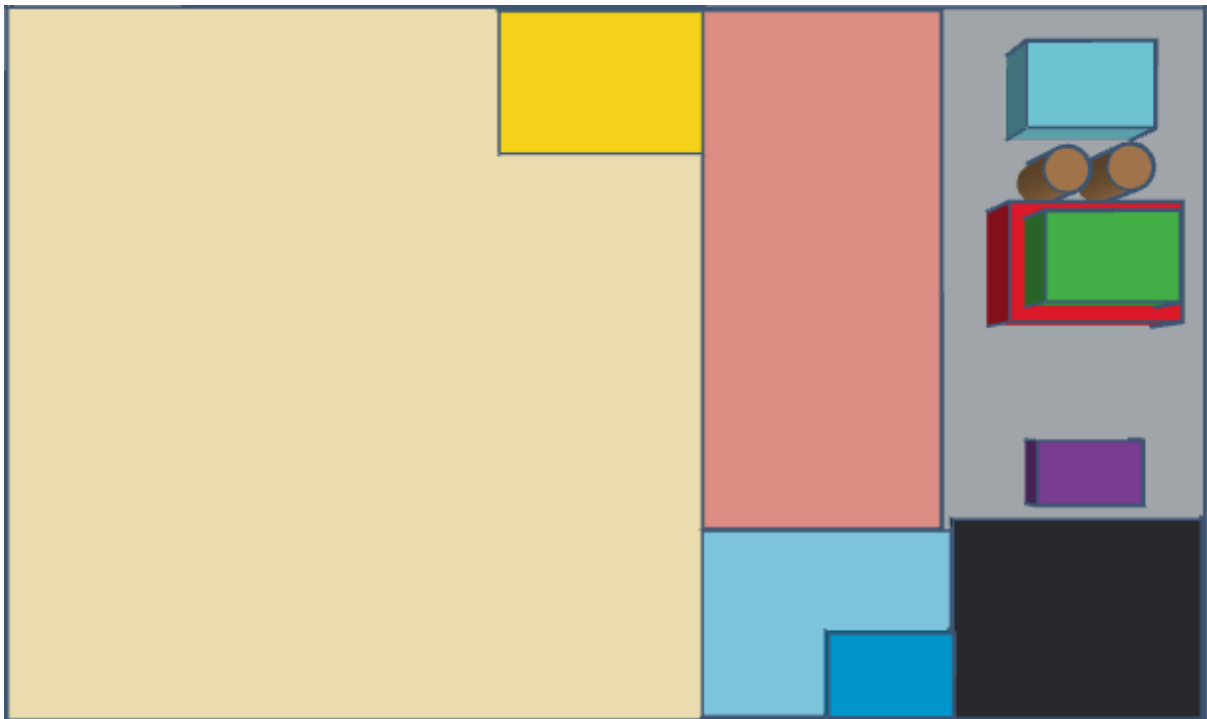
Taula de preus

Part	Estructura/element	Preu (M€)	Preu en tan per cent (%)
Reactor	Cambra de plasma toroidal	800	17,3837%
Reactor	Bobines magnètiques superconductores	1200	26,0756%
Reactor	Sistemes d'escalfament	400	8,6919%
Reactor	Divertor i blanket	500	10,8648%
Reactor	Criostat i sistemes criogènics	500	10,8648%
Edificis i infraestructura	Edifici del reactor tokamak+sala d'assemblatge	400	8,6919%
Edificis i infraestructura	Planta criogènica	150	3,2595%
Edificis i infraestructura	Torres de refrigeració	100	2,1729%
Edificis i infraestructura	Edifici de control	80	1,7384%
Edificis i infraestructura	Edifici de visites i museu	70	1,5211%

Edificis i infraestructura	Subestació elèctrica	200	4,3459%
Edificis i infraestructura	Pàrquing	2	0,0434%
Costos addicionals i contingències	Investigació i desenvolupament (R+D)	200	4,3459%
Costos addicionals i contingències	Contingències	50% del pressupost total (en el cas que hi hagi problemes)	+50%
Total	-	4602	100%
Total+contingències	-	6903 (es podria augmentar fins a 7000)	150%

4.5. Distribució

A partir de l'aplicació Tinkercad he distribuït els edificis i construccions del recinte segons les dimensions i necessitats de cada edifici.



Imatge 58. Distribució del recinte principal de l'hipotètic reactor de fusió. Imatge pròpia.

Edificis

1. Edifici del reactor tokamak (vermell).
2. Sala d'assemblatge (verd).
3. Planta criogènica (blau fluix).
4. Torres de refrigeració (marró).
5. Edifici de control (lila).
6. Edifici de visites i museu (blau).
7. Subestació elèctrica (groc).
8. Pàrquing (negre).

Zones

1. **Zona vermella:** zona de futures construccions d'edificis de refrigeració, seguretat o subministrament d'energia.
2. **Zona groga:** zona de futures subestacions o generació d'energia en el cas que es necessiti més energia per encendre el reactor.
3. **Zona blava:** zona d'una futura d'ampliació de l'edifici de visites i museu.

Aquesta distribució no seria definitiva, ja que podria haver-hi altres edificis i subestacions que podrien aportar millores al funcionament del reactor.

A la següent foto es veuria com es veuria el plànol a imatge satèl·lit:



Imatge 59. Recinte principal de l'hipotètic reactor de fusió amb la distribució realitzada. Imatge extreta de <https://www.calcmaps.com/es/map-area/>

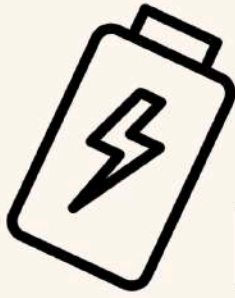
4.6. Cartell

Per ampliar la part pràctica, faré un cartell amb els beneficis que comportaria construir un reactor de fusió a Cerdanyola del Vallès.

El cartell es divideix en tres parts:

1. Benefici econòmic.
2. Projecció local (com es veuria el projecte en l'àmbit global).
3. La fusió nuclear com a energia neta.

Aquest cartell faria de dissuasiu d'inseguretat de la població local, perquè la construcció del reactor no molestessi a la població.



FUSIÓ NUCLEAR A CERDANYOLA: L'ENERGIA DEL FUTUR



QUINS BENEFICIS TINDRIA CERDANYOLA DEL VALLÈS AMB UN
REACTOR DE FUSIÓ?

1

REACTIVACIÓ DE L'ECONOMIA

- Es crearien milers de llocs de treball directes per a enginyers, tècnics, personal de suport i també indirectament a partir del turisme i la necessitat de mà d'obra.
- Inversions milionàries que rejuvenirien el comerç local i atrauran noves empreses de tecnologia.



2

EL FUTUR ÉS COL·LECTIU

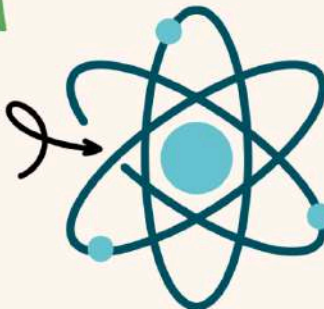
- Es treballaria amb centres d'excel·lència com el Sincrotró ALBA, creant un centre d'investigació únic.
- Es formarien els professionals del futur i oferint oportunitats als nostres joves.
- Projectaria el nom de Cerdanyola i Catalunya com a referent en generació d'energia neta a través de la fusió nuclear.



3

ENERGIA NETA I SEGURA

- Energia verda i abundant, sense contaminar l'aire que respirem.
- Tecnologia intrínsecament segura, sense risc d'accidents greus i afectacions a la població propera.
- Independència energètica amb una font de futur pràcticament inesgotable.



Imatge 60. Cartell de propaganda per al reactor a Cerdanyola del Vallès. Imatge pròpia.

CONCLUSIONS

El treball de recerca ha permès analitzar la viabilitat de la fusió nuclear com a font d'energia neta i sostenible a llarg termini, així com la possibilitat de construir un reactor de fusió a Catalunya. Les conclusions es resumeixen en tres eixos principals:

En primer lloc, voldria dir que la recerca del treball ha sigut molt difícil a causa de diferents paràmetres com la classificació de la informació o la dificultat per trobar informació, fent que el treball sigui una mica limitat.

En segon lloc, la investigació realitzada confirma que la fusió nuclear és una font d'energia viable i amb un gran potencial per al futur. Tot i els importants reptes tècnics, la superació de la barrera de Coulomb, el compliment dels criteris de Lawson i l'assoliment de la ignició, els avenços recents són esperançadors. Projectes com l'ITER o el NIF han demostrat progressos significatius, com l'obtenció d'un guany energètic net ($Q > 1$) en el cas del NIF en l'any 2022. A més del desenvolupament de nous materials i tècniques de confinament magnètic i inercial obren la porta a què, en un futur no massa llunyà, es puguin assolir reactors autosostenibles i eficients. Per tant, es pot afirmar que la fusió nuclear és tècnicament viable com a font d'energia amb el pas dels anys.

En tercer lloc, pel que fa a la possible construcció del reactor de fusió a Catalunya, l'estudi realitzat conclou que també és viable. S'ha identificat el municipi de Cerdanyola del Vallès com a ubicació òptima, a causa de la seva bona accessibilitat viària i ferroviària, la baixa exposició a riscos naturals rellevants (com sismicitat forta o inundacions), i la presència d'infraestructures d'investigació i desenvolupament com la UAB i el sincrotró ALBA. El disseny detallat del reactor tipus tokamak, amb els seus components principals i els edificis auxiliars, és tècnicament coherent i s'ha elaborat un pressupost aproximat de 6900 M€, tot i la manca d'informació de preus. Tot i la complexitat i el cost elevat, no s'identifiquen obstacles insuperables que impedeixen la seva construcció des d'una perspectiva tècnica i logística per la majoria d'estats.

En definitiva, aquest treball verifica les dues hipòtesis plantejades: la fusió nuclear és una font d'energia eficient a llarg termini i és possible construir un reactor experimental a Catalunya. També el projecte posa de manifest reptes pendents com la necessitat de majors avenços en l'eficiència energètica i la reducció de costos. A més, els objectius com la formació per al futur, s'han complert, fent d'aquesta manera que m'hagi format en l'àmbit que m'agradaria estudiar en un futur.

AGRAÏMENTS

En primer lloc, voldria dir que aquest treball ha requerit esforç i temps en moments en què la motivació era nul·la i costava trobar la motivació per portar endavant el treball.

En primer lloc, vull agrair a les dues tutores del treball de recerca, Gisela Garcia i Sonia Terol, que han estat quan necessitava indicacions per fer el treball de manera correcta i rectificar els errors també.

També voldria agrair a la meva família, principalment al meu pare, Francisco i la meva mare, Olga, que constantment m'han donat suport a l'hora d'estudiar i que també em va dir no deixes de costat el treball. A més, vull agrair-les que m'hagin ajudat en els moments de frustració i desmotivació durant tot l'any, us estimo molt.

Per altra banda, no puc oblidar-me dels meus amics amigues que han estat durant aquest any amb mi i m'ho han fet passar també al llarg del curs.

BIBLIOGRAFIA I WEBGRAFIA

1. "*Criterios de Lawson*". In: Wikipedia, la enciclopedia libre [en línia]. San Francisco: Wikimedia Foundation, darrera actualització: 15 de juliol de 2025 [Consultat: 5 d'agost de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Criterios_de_Lawson

2. "*Critère de Lawson : définition et explications*". In: Techno-Science.net [en línia]. s.l.: Techno-Science, 12 de març de 2024 [Consultat: 5 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.techno-science.net/definition/3612.html>
3. "*Lawson criterion*". In: Wikipedia [en línia]. s.l.: Wikimedia Foundation, darrera actualització: 20 de juliol de 2025 [Consultat: 5 d'agost de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Lawson_criterion
4. Cultura Científica. ¿Que 100 años no es nada? O por qué aún no tenemos una central nuclear de fusión [en línia]. Cultura Científica, 30 de gener de 2015 [Consultat: 19 de març de 2025]. Disponible a: <https://culturacientifica.com/2015/01/30/que-100-anos-no-es-nada-o-por-que-aun-no-tenemos-una-central-nuclear-de-fusion/>
5. Consejo de Seguridad Nuclear (España). Fusión nuclear [en línia]. Madrid: CSN, s.f. [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.csn.es/fusion-nuclear>
6. Física nuclear [en línia]. a química.es: enciclopedia, s. d. [Consultat: 8 d'agost de 2025]. Disponible a: https://www.quimica.es/enciclopedia/F%C3%ADsica_nuclear.html
7. Freire, Noelia. National Geographic. Fusión nuclear: la energía de las estrellas [en línia]. National Geographic, s.d. [Consultat: 21 d'abril de 2025]. Disponible a: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/fusion-nuclear-energia-estrellas_20603
8. Hanif, Muhammad Asif; et al. Nuclear Fusion [en línia]. A: *Renewable and Alternative Energy Resources*, 2022 [Consultat: 28 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nuclear-fusion-reaction>
9. HyperPhysics. La barrera coulombiana en les reaccions nuclears [en línia]. Atlanta: Georgia State University, 2023 [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/coubar.html>
10. IAEA. Fonaments de la fusió nuclear [en línia]. Viena: Agència Internacional de l'Energia Atòmica, 2023 [Consultat: 4 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iaea.org/topics/energy/fusion>

- 11.** International Atomic Energy Agency (IAEA). What is nuclear fusion? [en línia]. IAEA, s.f. [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion>
- 12.** Innovative Worker. Legislación general: Legislació emergent [en línia]. Economist Jurist, 2025 [Consultat: 4 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://innovativeworker.economistjurist.es/BDI/legislacion/legislaciongeneral/emergentelegislacion.php?id=150570>
- 13.** Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Escala d'Intensitats MSK [en línia]. Barcelona: ICGC, 2014 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <http://www.icgc.cat/en/European-Macroseismic-Scale-1998-EMS-98>
- 14.** Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Mapes d'epicentres i altres informacions sísmiques: Avaluació del risc sísmic a Catalunya [en línia]. Barcelona: ICGC, 2010 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.icgc.cat/ca/Geoinformacio-i-mapes/Dades-i-productes/Geoinformacio-geologica-i-geofisica/Sismologia/Mapes-depicentres-i-altres-informacions-sismiques/Aluacio-del-risc-sismic-Catalunya>
- 15.** ITER Cost Estimates [en línia]. ITER Organization, [consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/sci/Budget>
- 16.** ITER Organization. Base física del projecte ITER [en línia]. Saint-Paul-lès-Durance: ITER, 2023 [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/sci/physics>
- 17.** ITER Organization. Building ITER [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 28 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/building-iter>
- 18.** ITER Organization. Facts & Figures [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 26 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/facts-figures>
- 19.** ITER Organization. The ITER Machine [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 28 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/machine>

- 20.** ITER Organization. What will ITER do? [en línia]. ITER Organization, 2025 [Consultat: 27 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.iter.org/fusion-energy/what-will-iter-do>
- 21.** Kardoudi, Omar. *El Confidencial*. Logran la 'fusión nuclear fría' por primera vez en la historia [en línia]. 29 de març de 2022 [Consultat: 29 d'abril de 2025]. Disponible a: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-03-29/logran-fusion-nuclear-fria-por-primera-vez-historia_3399718/
- 22.** LLNL. Assoliment de la ignició a la National Ignition Facility [en línia]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 13 de desembre de 2022 [Consultat: 4 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition>
- 23.** Moncada, Arturo. *Vertigo Politico*. Fusión nuclear: la energía de las estrellas para el futuro [en línia]. Vertigo Politico, s.d. [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://www.vertigopolitico.com/ciencia/ciencia/notas/fusion-nuclear-la-energia-de-las-estrellas-para-el-futuro>
- 24.** Motor Mapfre. ¿Qué medidas tiene una plaza de garaje en España? [en línia]. MAPFRE, 7 de novembre de 2015 [Consultat: 4 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.motor.mapfre.es/consejos-practicos/consejos-de-mantenimiento/medidas-plaza-garaje/>
- 25.** Noticias del la Ciencia. Los procesos físicos que alimentan la energía de las estrellas [en línia]. Noticias del la Ciencia, s.d. [Consultat: 15 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://noticiadelaciencia.com/art/52235/los-procesos-fisicos-que-alimentan-la-energia-de-las-estrellas>
- 26.** Princeton Plasma Physics Laboratory. Tokamak Experimental Science [en línia]. Princeton, NJ: Princeton University, 2025 [Consultat: 4 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://www.pppl.gov/tokamak-experimental-science>

- 27.** Schoijet, Mauricio. La energía nuclear de fusión: aspectos históricos [en línia]. Universidad Nacional de Quilmes, octubre de 2005 [Consultat: 20 de març de 2025]. Disponible a: <https://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/596?locale-attribute=en>
- 28.** Serra, Salvador. Armengol, Montserrat. Mercadé, Joan M. (2018). *Física 2n de batxillerat*. Madrid: McgrawHill
- 29.** Stallard, Esme. Fusión nuclear: el prometedor hito que lograron los científicos y qué significa para el futuro de la energía limpia [en línia]. BBC News Mundo, 13 de diciembre de 2022 [Consultat: 29 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-63963737>
- 30.** Tomé, César. Cultura Científica. Fusión nuclear en el Sol [en línia]. Cuaderno de Cultura Científica, 9 de març de 2021 [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: <https://culturacientifica.com/2021/03/09/fusion-nuclear-en-el-sol/>
- 31.** U.S. Department of Energy. DOE Explains...Tokamaks [en línia]. Office of Science, 2025 [Consultat: 26 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.energy.gov/science/doe-explainstokamaks>
- 32.** Vedantu. Nuclear Fusion Reactor [en línia]. Vedantu, 2025 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://www.vedantu.com/physics/nuclear-fusion-reactor>
- 33.** Viquipèdia. Cerdanyola del Vallès#Serveis [en línia]. Wikimedia Foundation, 2001 [Consultat: 31 d'agost de 2025]. Disponible a: https://ca.wikipedia.org/wiki/Cerdanyola_del_Vall%C3%A8s#Serveis
- 34.** Viquipèdia. Efecte túnel [en línia]. Wikimedia Foundation, 2001 [Consultat: 28 de setembre de 2025]. Disponible a: https://ca.wikipedia.org/wiki/Efecte_t%C3%BAnel
- 35.** Viquipèdia. Tokamak [en línia]. Wikimedia Foundation, 28 de desembre de 2004 [Consultat: 26 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak>
- 36.** Viquipèdia. Reactor de fusión nuclear [en línia]. Wikimedia Foundation, 2005 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor_de_fusi%C3%B3n_nuclear

- 37.** Wikipedia. Energia de fusió [en línia]. Wikimedia Foundation, 15 de desembre de 2004 [Consultat: 28 d'agost de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_de_fusi%C3%B3n
- 38.** Wikipedia. Nuclear fusion [en línia]. Wikimedia Foundation, 25 de juliol de 2003 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion
- 39.** Wikipedia contributors. Fusión nuclear [en línia]. Wikimedia Foundation, s.d. [Consultat: 29 d'abril de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3n_nuclear
- 40.** Wikipedia contributors. History of nuclear fusion [en línia]. Wikimedia Foundation, 2005 [Consultat: 21 d'abril de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_nuclear_fusion
- 41.** Wikipedia contributors. ITER [en línia]. Wikimedia Foundation, 28 de juny de 2005 [Consultat: 27 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/ITER>
- 42.** Wikipedia contributors. JT-60 [en línia]. Wikimedia Foundation, 2005 [Consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://en.wikipedia.org/wiki/JT-60>
- 43.** Wikipedia contributors. Nucleosíntesis estelar [en línia]. Wikimedia Foundation, s.d. [Consultat: 16 d'abril de 2025]. Disponible a: https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleos%C3%ADntesis_estelar
- 44.** Wikipedia contributors. Timeline of nuclear fusion [en línia]. Wikimedia Foundation, 2005 [Consultat: 22 de març de 2025]. Disponible a: https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_nuclear_fusion#References
- 45.** Wiper, Alastair Philip. Return to the ITER Experimental Nuclear Fusion Reactor, France [en línia]. Alastair Philip Wiper, 7 de novembre de 2019 [Consultat: 5 de setembre de 2025]. Disponible a: <https://alastairphilipwiper.com/blog/return-to-the-iter-experimental-nuclear-fusion-reactor-france>

46. *JT-60SA Construction Costs* [en línia]. Japan Atomic Energy Agency, [consultat: 29 d'agost de 2025]. Disponible a: <https://jaea.go.jp/english/press/2021/010800/>

Imatges:

Imatge portada: imatge del Sol radiant. Imatge extreta de <https://fixthephoto.com/es/sun-ray-overlay>

Imatge 1. Reacció de fissió i reacció de fusió. Extreta de <https://www.nucleonova.es/que-es-la-fision-o-fusion-nuclear/>

Imatge 2. Albert Einstein (esquerra) i Arthur Eddington (dreta). Imatge extreta de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48401484>

Imatge 3. Mark Oliphant. Imatge estreta de <https://www.science.org.au/news-and-events/events/public-speaker-series/the-journey-of-australian-science/oliphant-and-nuclear-physics>

Imatge 4. Hans Bethe. Imatge extreta de https://ca.wikipedia.org/wiki/Hans_Bethe

Imatge 5. Robert Oppenheimer. Imatge extreta de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48401484>

Imatge 6. Núvol de fong de la bomba Ivy Mike. Imatge estreta de https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:%22Ivy_Mike%22_atmospheric_nuclear_test_-_November_1952_-_Flickr_-_The_Official_CTBTOT_PhotoStream.jpg

Imatge 7. Andrei Sàkharov. Imatge extreta de <https://www.hoover.org/research/moral-clarity-andrei-sakharov>

Imatge 8. Exterior del reactor JET. Imatge extreta de https://es.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus

Imatge 9. Recinte de l'ITER. Imatge extreta de <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/que-es-el-iter/>

Imatge 10. Taula d'energia d'amarratge. <https://inin.gob.mx/temasdeinteres/fusionnuclear.cfm>

Imatge 11. El Sol. Imatge extreta de <https://www.nationalgeographic.com.es/>

Imatge 12. Reacció cadena protó-protó. Imatge extreta de https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Forma-principal-de-una-reaccion-en-cadena-proton-proton-PP-en-el-Sol_fig1_317435310

Imatge 13. Reacció cicle CNO. Imatge extreta de https://astronomia.fandom.com/wiki/Ciclo_CNO

Imatge 14. Procés triple-alfa. Imatge extreta de <http://www.letraherido.com/13050206evolucionestrellas.htm>

Imatge 15. Equilibri dinàmic d'estels. Imatge extreta de https://cesar.esa.int/index.php?Section=SSE_The_Hertzsprung_Russel_Diagram&ChangeLang=es

Imatge 16. Classificació espectral clàssica dels estels segons la massa i la temperatura. Imatge extreta de <https://telescopioschile.cl/tipos-de-estrellas/?srsItid=AfmBOorTi2BBXgvH0xQjKteIX1NYVKhcOF4RL5FUQcihxUbbg9sppJoH>

Imatge 17. Explicació simple de la repulsió electroestàtica. Imatge extreta de https://www.freepik.es/vector-premium/ley-atraccion-repulsion-electrostatica_74500135.htm

Imatge 18. Esquema potencial d'un nucli. Imatge extreta de https://es.wikipedia.org/wiki/Barrera_de_Coulomb

Imatge 19. Representació de l'efecte túnel. Imatge extreta de https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-06-30/fisica-cuantica-coche-atraviesa-muro-intacto_3452117/

Imatge 20. Confinament magnètic en una cambra toroidal. Imatge extreta de <https://www.encyclopedia.cat/gran-encyclopedia-catalana/confinament-0>

Imatge 21. Confinament inercial. Imatge extreta de <https://es.knowablemagazine.org/content/articulo/mundo-fisico/2024/retos-energia-d-e-fusion-nuclear>

Imatge 22. John D. Lawson. Imatge extreta de <https://www.iter.org/node/20687/john-d-lawson-passed-away>

Imatge 23. Comparació de temperatures necessàries per realitzar les reaccions de fusió. Imatge extreta de https://en.wikipedia.org/wiki/Lawson_criterion

Imatge 24. Reactor tokamak. Imatge extreta de <https://www.iter.org/machine/what-tokamak>

Imatge 25. Estel·larador representació. Imatge extreta de <https://es.wikipedia.org/wiki/Stellarator>

Imatge 26. Reactor de làsers d'alta energia. Imatge extreta de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-58257395>

Imatge 27. Mapa d'Espanya remarcant Catalunya. Imatge extreta de https://es.123rf.com/photo_14606044_mapa-de-espa%C3%B1a-en-catalu%C3%B1a-se-resalta.html

Imatge 28. Mapa polític de Catalunya. Imatge extreta de <https://geografiabatxillerat.wordpress.com/material-addicional/mapa-de-comarques-de-catalunya/>

Imatge 29. Comarques muntanyoses de Catalunya. Imatge extreta de https://territori.gencat.cat/ca/06_territori_i_urbanisme/politica_de_muntanya/territoris_de_muntanya/index.html#comarques-de-muntanya

Imatge 30. Mapa d'intensitat de sismes en escala MSK a Catalunya. Imatge extreta de <https://www.icgc.cat/ca/Geoinformacio-i-mapes/Dades-i-productes/Geoinformacio-geologica-i-geofisica/Sismologia/Mapes-depicentres-i-altres-informacions-sismiques/Avuacio-del-risc-sismic-Catalunya>

Imatge 31. Mapa dels sismes entre 1984-2021. Imatge extreta de <https://govern.cat/salaprensa/notes-premsa/556463/el-govern-recorda-el-centenari-del-sisme-de-la-val-d-aran-de-1923-un-dels-mes-intensos-registrats-a-catalunya?v=>

Imatge 32. Mapa zones inundables de Catalunya. Imatge extreta de <https://www.pressdigital.es/articulo/sociedad/2023-09-14/4438900-video-zonas-catalunya-podrian-inundarse-cause-cambio-climatico>

Imatge 33. Mapa de les carreteres principals de Catalunya. Imatge extreta de <https://www.icgc.cat/es/Geoinformacion-y-mapas/Mapas/Mapas-de-comunicaciones>

Imatge 34. Mapa de les principals línies de ferrocarrils de Catalunya. Imatge extreta de <https://unilateral.cat/2022/09/15/quines-millores-i-ampliacions-de-la-xarxa-ferroviaria-de-catalunya-veurem-els-anys-vinents/>

Imatge 35. Imatge satèl·lit de Barcelona i la marca de la Facultat de Física. Imatge extreta de https://www.google.com/maps/place/Facultat+de+F%C3%ADsica+-+Universitat+de+Barcelona/@41.3973785,2.1381135,14424m/data=!3m2!1e3!5s0x12a49859d1cb8081:0x80414e5b572d450d!4m6!3m5!1s0x12a4985939f1ab75:0x51254092607919e3!8m2!3d41.3844004!4d2.1171889!16s%2Fg%2F1q5bk50vc?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI2MDEyMC4wIKXMDSoKLDEwMDc5MjA2OUgBUAM%3D

Imatge 36. Sincrotró ALBA. Imatge extreta de <https://www.cells.es/es/acerca-de/bienvenida-a-alba>

Imatge 37. Cerdanyola del Vallès (marcat en vermell). Imatge extreta de https://es.wikipedia.org/wiki/Sarda%C3%B1ola_del_Vall%C3%A9s

Imatge 38. Imatge satèl·lit de Cerdanyola de Vallès i la UAB. Imatge extreta de [https://www.google.com/maps/place/Universitat+Aut%C3%B2noma+de+Barcelona+\(UAB\)/@41.445735,2.1082605,17141m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x12a4942a9b7b8f63:0x8a51bd1095fe826d!8m2!3d41.5021421!4d2.1038536!16zL20vMGduNDg?e ntry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDgyNS4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/place/Universitat+Aut%C3%B2noma+de+Barcelona+(UAB)/@41.445735,2.1082605,17141m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x12a4942a9b7b8f63:0x8a51bd1095fe826d!8m2!3d41.5021421!4d2.1038536!16zL20vMGduNDg?e ntry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDgyNS4wIKXMDSOASAFQAw%3D%3D)

Imatge 39. Mapa polític de Catalunya. Imatge extreta de <https://geografiabatxillerat.wordpress.com/material-addicional/mapa-de-comarques-de-catalunya/>

Imatge 40. Voltant del recinte del sincrotró ALBA. Imatge extreta de <https://pcivil.icgc.cat/pcivil/v2/index.html#41.48676,2.09799,8z>

Imatge 41. Voltant del recinte del sincrotró ALBA. Imatge extreta de <https://pcivil.icgc.cat/pcivil/v2/index.html#41.48676,2.09799,8z>

Imatge 42. Recinte de l'hipotètic reactor de fusió. Imatge extreta de <https://www.calcmaps.com/es/map-area/>

Imatge 43. Recinte principal de l'hipotètic reactor de fusió. Imatge extreta de <https://www.calcmaps.com/es/map-area/>

Imatge 44. Imatge d'un reactor tokamak, marcant la cambra de plasma toroidal. Imatge extreta de <https://es.wikipedia.org/wiki/Tokamak>

Imatge 45. Bobinas toroidals del reactor ITER. Imatge extreta de <https://www.iter.org/machine/magnets>

Imatge 46. Bobines poloidals del reactor ITER. Imatge extreta de <https://www.iter.org/machine/magnets>

Imatge 47. Selenoide central del reactor ITER. Imatge extreta de <https://www.iter.org/machine/magnets>

Imatge 48. Divertor del reactor ITER. Imatge extreta de <https://www.iter.org/machine/divertor>

Imatge 49. Peça del divertor. Imatge extreta de <https://www.energyencyclopedia.com/en/nuclear-fusion/tokamaks/divertor>

Imatge 50. Blanket o manta reproductora. Imatge extreta de https://wiki.fusion.ciemat.es/wiki/Breeding_blanket

Imatge 51. Criostat del reactor ITER. Imatge extreta de <https://www.xataka.com/investigacion/reactor-fusion-nuclear-iter-pieza-a-pieza-asi-funcionara-mayores-obras-ingenieria-creadas-hombre-1>

Imatge 52. Plànol del reactor amb les parts indicades. Imatge extreta de <https://telosworld.com/reactores-de-fusion-nuclear/>

Imatge 53. Edifici del tokamak per dins. Imatge extreta de <https://ifmif-dones.es/es/updates/cruzando-la-frontera-de-la-fusion-el-proyecto-iter/>

Imatge 54. Sala d'assemblatge marcat en vermell. Imatge extreta de <https://newsroom.ferrovial.com/es/notas-prensa/el-consorcio-integrado-por-ferrovial-firma-contrato-construccion-francia/>

Imatge 55. Planta criogènica, plànol. Imatge extreta de <https://principia.es/proyectos/iter/>

Imatge 56. Subestació elèctrica. Imatge extreta de https://www.freepik.es/fotos-premium/vista-aerea-subestacion-electrica-brasil_124297150.htm

Imatge 57. Pàrquing. Imatge extreta de <https://www.parkingascars.com/es/outdoor.php>

Imatge 58. Distribució del recinte principal de l'hipotètic reactor de fusió. Imatge pròpia.

Imatge 59. Recinte principal de l'hipotètic reactor de fusió amb la distribució realitzada. Imatge extreta de <https://www.calcmaps.com/es/map-area/>

Imatge 60. Cartell de propaganda per al reactor a Cerdanyola del Vallès. Imatge pròpia.

