

Fusió nuclear i ITER

Carlos Alejandre

Deputy Director General. ITER Organization

Resum

El projecte ITER és una gran iniciativa internacional que, en una col·laboració sense precedents entre Rússia, el Japó, Europa, Corea del Sud, els Estats Units, l'Índia i la Xina, pretén construir un Gran Laboratori de Recerca on es demostrï per primera vegada la viabilitat d'obtenir energia al nostre planeta fent servir la mateixa font d'energia que alimenta el Sol des de fa milers de milions d'anys i que ho seguirà fent durant uns altres milers: la Fusió. Al llarg del present article s'analitzen els principis teòrics explicatius del procés de fusió termonuclear així com les passes i les fites aconseguides al llarg d'aquest projecte de recerca experimental de primera línia encaminada a comprendre i dominar una font d'energia que apareix en el futur com una alternativa segura, potent i mediambientalment acceptable.

Abstract

The ITER project is a great and unprecedented international joint initiative between Russia, Japan, the European Union, South Korea, the United States, India and China that aims to build a huge research laboratory to demonstrate for the first time the feasibility of obtaining energy for our planet by using the same source of energy that has fuelled the sun for billions of years and will continue to do so for thousands more: fusion power. This article aims to analyse the theoretical principles that explain the process of thermonuclear fusion, along with the milestones reached over the course of this groundbreaking experimental research project that is aimed at understanding and controlling an energy source that appears to be a safe, powerful and environmentally acceptable alternative in the future.

D'ençà que l'home va controlar el foc, el progrés humà ha estat íntimament lligat a l'ús eficaç de les cada cop més sofisticades i potents fonts d'energia al nostre abast.

En aquest moment, en què l'home ha esdevingut un àvid consumidor d'energia, ens trobem en la disjuntiva de trobar en un termini relativament curt un substitut energètic al motor del nostre progrés recent: el petroli.

No són molts els candidats que apareixen per substituir el petroli a llarg termini: Energies anomenades *renovables* a causa fonamentalment de la seva difusió i intermitència no semblen adequades en aquest moment perquè realitzin una aportació superior al 20% del consum global. L'anomenada «energia nuclear», és a dir, aquella que aprofita processos de fisió nuclear per a l'obtenció d'energia, malgrat ser una tecnologia llesta per ser desenvolupada a gran escala, desperta una oposició que n'està limitant la implantació. Per últim, les centrals tèrmiques productores d'electricitat per mitjà de la crema de carbó/gas, també són qüestionades, ja que malgrat existir prou reserves d'aquest material per a uns quants segles, i tenir una tecnologia «coneguda», els problemes mediambientals associats: pluja àcida, producció de CO₂ i el seu impacte en el canvi climàtic... desaconsellen l'ús massiu d'aquest tipus de centrals per a la producció d'electricitat.

És comprensible, doncs, que aquesta preocupació per trobar noves fonts d'energia, transcendeixi els nivells polítics i ja en la primera reunió que van mantenir a Ginebra el 1985 els líders americà i soviètic, Ronald Reagan i Mikhaïl Gorbatxov, van acordar publicar en el comunicat final conjunt:

«Els dos líders van emfasitzar la potencial importància del treball encaminat a utilitzar fusió termonuclear controlada per a fins pacífics, i en aquest context, van advocar el més extens desenvolupament de cooperació internacional per obtenir aquesta font d'energia, que és pràcticament inexhaustible, per al benefici de tota la Humanitat.»¹

i van donar *de facto* el tret de sortida per al projecte de fusió ITER.

Fusió Termonuclear

Fusió és el procés pel qual dos nuclis s'uneixen per formar un tercer a la vegada que s'allibera una gran quantitat d'energia. En particular, el nostre interès radica en la fusió de dos isòtops de l'hidrogen, el Deuteri, que es forma naturalment, dos de cada 2500 molècules d'aigua contenen deuteri, i el Triti, que és radiactiu, vida mitjana de 12,3 anys, i que serà consumit en la mateixa cambra de reacció en què és produït. Simbòlicament:



on He és el símbol de l'element Heli i n és el del neutró (partícula fonamental constituent dels nuclis atòmics).

La qüestió és: d'on surt aquesta energia? Per què és tan elevada? La resposta a aquestes dues preguntes cal buscar-la en la famosa fórmula que va obtenir Albert Einstein a la seva teoria de la relativitat:

$$E = mc^2$$

on E representa l'Energia, m la massa i c la velocitat de la llum (300.000.000 m/s). Essencialment, aquesta fórmula prediu la possibilitat de convertir massa en energia i si els processos de fusió alliberen tanta energia és perquè les «masses» dels elements resultants és menor que la suma de les «masses» dels elements originals, i aquest excés de massa multiplicat per la velocitat de la llum al quadrat es converteix en una energia tal que *un grapat de deuteri és capaç de produir tanta energia com 20 tones de carbó*.

Un panorama tan prometedor com aquest només es pot espatllar per aquest costum de la natura de lligar íntimament recompensa i esforç. Els nuclis atòmics no s'uneixen espontàniament; per contra, en estar carregats elèctricament amb el mateix tipus de càrrega es repelen fortament amb una força que augmenta com menor és la distància de separació (barrera culombiana) i únicament quan aquesta barrera és travessada i les forces nuclears d'atracció, molt fortes però d'un abast curt, superen les

¹ Traducció literal de The New York Times, 22 de novembre del 1985

elèctriques de repulsió, la fusió es produeix. El problema apareix immediatament. Com se supera aquesta barrera? L'únic mitjà fins ara concebut al nostre planeta és el d'escalfar el combustible perquè l'excitació tèrmica obligui els nuclis a assolir velocitats prou altes per travessar la barrera coulombiana i aconseguir així entrar en el rang d'acció de les forces nuclears que finalment produeixen la fusió. El problema que sorgeix és immediat: la temperatura necessària per superar la barrera i produir prou reaccions és de l'ordre de 100 a 200 milions de graus! i crea el problema fonamental associat amb la producció controlada d'energia usant fusió: cap material a la Terra és capaç de suportar aquestes temperatures.

Confinament magnètic de la fusió

Per entendre com aconseguir solucionar el problema exposat anteriorment, hem d'introduir un nou concepte: el plasma.

A temperatura ambient, la matèria s'aplega en àtoms, que consisteixen essencialment en un nucli carregat positivament i electrons, carregats negativament, girant al voltant del nucli sota la influència de les forces elèctriques d'atracció d'aquest. Totes dues càrregues són tals que, si les sumem, es cancel·len (tenen la mateixa magnitud, però signes oposats), per això es diu que els àtoms són elèctricament neutres. Ara bé, si escalfem aquests àtoms, alguns electrons adquireixen prou energia com per abandonar la disciplina de l'àtom que els lliga, el deixen amb un excés de càrrega positiva (ionitzat) i l'electró es converteix en un «electró lliure»... Si la temperatura és prou elevada, es pot arribar a la situació en què tots els electrons abandonen els àtoms i es forma un «núvol» de partícules carregades positivament, els nuclis, i partícules carregades negativament, els electrons sense cap estructura atòmica que els lligui. Aquest estat que s'ha anomenat de vegades «el quart estat de la matèria», i en el qual es troba més del 95% de l'univers conegut, és el que anomenem «plasma».

L'existència d'aquest gas, el plasma, barreja de partícules positives i negatives és el que va donar origen a la idea del confinament magnètic de control de la fusió:

una partícula carregada, quan és col·locada en un camp magnètic, es veu obligada a rotar al llarg de les línies de camp però no pot abandonar-les. Si d'alguna manera aconseguim confinar aquestes línies de camp sobre una superfície, la partícula seguirà en principi indefinidament la línia, i quedarà per tant confinada. A tots els efectes, haurem creat una «ampolla magnètica» capaç de contenir el plasma mentre es produeixen les reaccions de fusió.

El disseny i perfeccionament d'aquestes «ampolles magnètiques» ha dominat la investigació en fusió en les últimes dècades i en particular el concepte Tokamak, del rus *toroidalnaya kamera ee magnitnaya katushka*, ha experimentat un desenvolupament espectacular arreu del món. En aquesta idea, inicialment proposada per I. Tamm i A. Sakharov el 1951 en l'antiga Unió Soviètica, és en la que està fonamentat el projecte ITER, tot i que el seu disseny actual, des d'un punt de vista científic, està avalat i determinat pel coneixement obtingut a través de l'extensa operació de tokamaks en el món durant les passades dècades i molt particularment per les investigacions realitzades en el tokamak europeu JET, el major tokamak del món en l'actualitat, on ja s'han aconseguit generar 16 MW tèrmics utilitzant reaccions de fusió. Així mateix, la tecnologia proposada per a ITER ha estat validada per un ampli programa de R+D que ha construït prototipus de pràcticament tots els seus components crítics.

ITER («camí» en llatí) és un gran projecte internacional que, en una col·laboració sense precedents entre Rússia, el Japó, Europa, Corea del Sud, els Estats Units, l'Índia i la Xina, pretén construir un Gran Laboratori de Recerca on es demostrï per primera vegada la viabilitat d'obtenir energia al nostre planeta utilitzant la mateixa font d'energia que alimenta el Sol des de fa milers de milions d'anys i ho seguirà fent durant uns altres milers: la Fusió.

Els components principals del tokamak ITER són les bobines superconductores que generen el camp magnètic utilitzat per confinar, conformar i controlar el plasma dins d'una cambra de buit toroidal en forma de *donut*. Aquest sistema comprèn divuit bobines de camp toroidal, un solenoide central, sis bobines de camp poloidal i

unes bobines anomenades de correcció, la missió de les quals és corregir possibles desviacions sorgides en la resta de bobines durant la fase de construcció. Els enrollaments de les bobines de camp toroidal i poloidal estan col·locats en carcasses molt resistents que impedeixen moviments mil·limètrics que altrament es produirien a causa de les importants forces electromagnètiques d'interacció a què estan sotmeses les bobines. Aquestes, juntament amb la cambra de buit, que té una estructura de doble paret, i els components interns, estan acoblades mecànicament a suports gravitatoris on es dipositen les aproximadament 19.000 tones de pes d'aquests sistemes. Tot el tokamak està immers en un criostat, amb aïllament tèrmic entre els components calents i les bobines refrigerades a temperatures de Heli líquid. Podem imaginar el desafiament tecnològic que suposa haver de mantenir cent milions de graus en el centre del Tokamak i temperatures properes al zero absolut (4,5 °K) a les bobines superconductores a uns escassos dos metres de distància.

Dins de la cambra de buit trobarem els diferents components interns, majoritàriament reemplaçables:

a) Els mòduls d'apantallament i producció de triti, la missió dels quals és absorbir la calor irradiada i protegir la cambra, i sobretot les bobines superconductores, dels neutrons generats pel plasma. Alguns mòduls demostraran també que és possible produir triti (isòtop de l'hidrogen) en la mateixa cambra on posteriorment serà consumit.

b) Els mòduls del diverdor, on es «desvien» i extrauen les impureses generades a les parets del tokamak i l'heli produït en les reaccions de fusió, mantenint «pur» el plasma.

c) Els elements auxiliars instal·lats a les finestres d'accés a l'interior del tokamak, com ara limitadors per controlar la posició del plasma, antenes per realitzar l'escalfament o mòduls de diagnòstics que ens donaran informació sobre el comportament del combustible mentre reacciona.

El calor dipositat en els elements interns i en la cambra de buit és extret de la cambra mitjançant un sistema de refrigeració convencional per aigua.

El funcionament d'ITER és relativament senzill: a l'interior de la cambra d'aproximadament 1000 m³ de volum, introduïrem escassament un gram (d'aquí el nom de «cambra de buit») d'hidrogen o els seus isòtops, deuteri, triti; aleshores, bé per l'acció del camp elèctric induït pel solenoide central, bé per la injecció de potents feixos de microones, el nostre combustible, injectat en estat gasós, es transformarà a l'estat «plasma», formant el «núvol» de partícules carregades positivament i negativament, a la vegada que l'ampolla magnètica es va formant com a conseqüència dels camps magnètics generats per les bobines superconductores i el produït pel corrent elèctric d'uns quants milions d'ampers, fins a 17 MA, induïda en el mateix plasma pel solenoide central. El plasma, simultàniament, anirà evolucionant des d'una secció circular fins a la seva forma final molt més allargada amb forma de D.

Els diferents sistemes d'escalfament, fins a 50 MW, entraran aleshores en funcionament portant el plasma a les temperatures, de l'ordre de cent milions de graus, necessàries perquè les reaccions de fusió s'iniciïn, i es pugui demostrar que és possible generar fins a un equivalent de 500 MW d'aquestes reaccions. La durada de la majoria dels experiments serà inferior a deu minuts amb períodes de pausa entre experiments d'una mitja hora, tot i que sota certes maneres de funcionament es podran realitzar experiments amb una durada de gairebé una hora.

Pot resultar frustrant comprovar que, després de tot aquest esforç, no s'haurà generat ni un sol kWh d'electricitat, però hem d'entendre que estem parlant d'un Laboratori de Recerca i *no* d'una planta productora d'energia elèctrica. Perquè aquesta sigui possible, cal que abans ITER demostrï que la fusió és tecnològicament viable.

És molt important destacar que una característica essencial del disseny d'ITER és que ha estat influït decidivament per la constant preocupació que reflectís en la versió final les favorables condicions de la fusió en matèria de seguretat i impacte mediambiental, conscients com som els que treballem en aquesta àrea de recerca, que ITER serà l'aparador en el qual la tecnologia de fusió serà examinada.

ITER és un projecte tecnològicament complex la construcció del qual s'estima que necessitarà deu anys i almenys vint d'exploració posterior. Les tecnologies que ITER necessita per a la seva construcció i posterior operació i manteniment són fonamentalment totes aquelles que tradicionalment anomenem d'alta tecnologia: superconductivitat, nous materials, robòtica, alt buit, tota mena d'electrònica micro i macro, microones, acceleradors, sistemes de control i un llarg etcètera. A més, també necessita fonamentalment utilitzar les tecnologies associades al desenvolupament de la nova economia ja que, en ser un projecte internacional experimental, els socis diferents de l'amfitrió han mostrat interès a tenir accés remot des dels seus laboratoris.

El 21 de novembre de 2006, els set socis van signar a París, en presència del president francès i del president de la Comissió Europea, l'acord de construcció del projecte ITER a la Unió Europea, concretament a Cadarache, França. Seguint la negociació que va fer possible arribar a aquest acord, la direcció general és exercida per un representant japonès juntament amb un europeu, responsable tècnic del projecte, i cadascun dels altres socis aporta un director general adjunt, responsable d'una àrea específica: l'Índia, els estudis sobre escalfament; Corea del Sud, l'enginyeria central; els Estats Units, l'experiència amb el Tokamak; Rússia, ciència i tecnologia; la Xina, l'administració del projecte, i la Unió Europea, la seguretat nuclear.

Un dels reptes del projecte ITER és sens dubte la pròpia gestió ja que cal tenir en compte que els socis construiran el 90 per cent de tot el projecte, amb els seus propis recursos a través de contribucions «en espècie». Aquest model és sens dubte molt atractiu per als països participants, però també és un desafiament per a la seva integració.

Les expectatives que aquest projecte ha generat en les empreses i institucions espanyoles són altes. Un protagonista fonamental per part del nostre país és el CIEMAT, on es realitza la recerca experimental en fusió i on es troba un dels tres *stellarators* més importants del món, el TJ-II, que va ser construït en un 60% per empreses espanyoles. La capacitat de la nostra indústria de béns d'equipament, de les enginyeries, de les construc-

tores i de la indústria elèctrica és indubtable i en particular a l'àrea de fusió va ser demostrada en la construcció del TJ-II i en la preparació de la candidatura per acollir ITER a Vandellós. Són precisament aquestes empreses les que hauran d'estar preparades per acudir a les ofertes que es plantegin per a la construcció de l'ITER, formant part dels consorcis europeus que ja s'estan començant a constituir. A més, existeixen els recursos necessaris dins dels organismes oficials per recolzar una col·laboració entre el sector públic i la iniciativa privada.

El 22 de febrer del 2006, es va constituir al CIEMAT la Plataforma Tecnològica de Fusió, promoguda per l'aleshores ministeri d'Educació i Ciència, que té com a objectiu aplegar els esforços d'universitats, centres de recerca i indústria interessats en la instal·lació experimental ITER i en altres grans instal·lacions d'alta tecnologia de fusió. La Plataforma Tecnològica de Fusió, en la qual estan integrats les empreses i els organismes espanyols interessats en aquesta matèria, ha de ser el nucli del qual sorgeixin les propostes de col·laboració i de participació en els consorcis internacionals.

Reproduir al nostre planeta els processos que nodreixen d'energia el nostre Sol no és problema fàcil, però el problema de l'energia és el problema del progrés humà. Amb el projecte ITER, a través del treball científic i tecnològic que realitza i coordina CIEMAT, i la instal·lació a Barcelona de l'agència europea que gestionarà tot l'esforç europeu per a ITER, Espanya s'uneix a un reduït grup de països que realitzen una recerca experimental de primera línia encaminada a comprendre i dominar una font d'energia que apareix en el futur com una alternativa segura, potent i mediambientalment acceptable, veritable promesa per a la Humanitat.

Bibliografia:

COMISSIÓ EUROPEA (2007): «*Fusion Research: an energy option for Europe's Future*». Directorate-General for Research. European Commission.

Informació complementària sobre el projecte ITER:

<http://www.iter.org/>

<http://www.itercad.org>

http://europa.eu.int/comm/research/energy/fu/article_1122_en.htm