



Institut  
d'Estudis  
Catalans

## **Informe sobre l'energia nuclear a Catalunya**

per al CAPCIT

Institut d'Estudis Catalans

Novembre 2011 – gener 2012

## Índex

	pàgina
Introducció .....	3
Comissió redactora.....	4
1 La situació energètica a Catalunya .....	5
2 L'energia nuclear de fissió .....	10
3 Les centrals nuclears a Catalunya.....	15
4 El cicle de combustible .....	18
5 La seguretat nuclear .....	22
6 Els residus radioactius .....	28
7 L'energia nuclear de fusió .....	32
8 Comparativa entre les fonts d'energia.....	34
9 Fonts documentals .....	45
10 Principals qüestions plantejades sobre l'energia.....	46
Annex I Distribució geogràfica dels elements del sistema elèctric a Catalunya .....	49
Annex II Els reactors nuclears.....	64
Annex III El combustible dels reactors nuclears.....	67
Annex IV Principals accidents nuclears .....	69

## Introducció

L'Institut d'Estudis Catalans, com a acadèmia catalana de les ciències i les humanitats al servei del país, va acceptar l'encàrrec de realitzar un informe sobre l'energia nuclear a Catalunya, una tasca que ha estat duta a terme a través de la Secció de Ciències i Tecnologia, que enguany commemora els cent anys de la seva creació.

Aquest informe inclou, primerament, una visió global de la situació energètica a Catalunya, la seva estructura productiva i els seus consums; en segon lloc, una visió general sobre la tecnologia nuclear, els seus principis, la forma de generació d'energia elèctrica, els residus i la seva gestió, i, finalment, presenta una comparativa amb les altres fonts d'energia.

La finalitat d'aquest document és aportar unes dades objectives sobre la situació energètica a Catalunya i el seu grau de dependència de la tecnologia nuclear i, d'aquesta manera, facilitar al Parlament de Catalunya la presa responsable de decisions sobre aquesta qüestió en el futur.

Barcelona, novembre de 2011

## Comissió redactora

**David Serrat**, president de la Comissió, membre de l'IEC i, actualment, president de la Secció de Ciències i Tecnologia d'aquesta institució; doctor en Geologia i catedràtic de Geodinàmica i Geofísica de la UB.

**Alícia Casals**, coordinadora de la Comissió, membre de l'IEC (Secció de Ciències i Tecnologia), doctora en Informàtica, catedràtica d'Arquitectura i Tecnologia de Computadors de la UPC.

**Josep Amat**, membre de l'IEC (Secció de Ciències i Tecnologia), doctor Enginyer Industrial, catedràtic emèrit de la UPC.

**Lluís Coll**, enginyer industrial, antic director de les centrals nuclears d'Ascó i Vandellòs.

**Javier Dies**, doctor en Enginyeria Industrial, catedràtic d'Enginyeria Nuclear de la UPC.

**Pere Roca**, membre de l'IEC (Secció de Ciències i Tecnologia), doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports, catedràtic d'Enginyeria de la Construcció de la UPC.

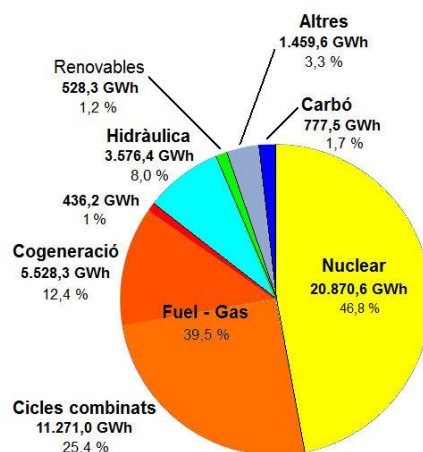
**Pere Santanach**, membre de l'IEC (Secció de Ciències i Tecnologia), doctor en Geologia, catedràtic de Geodinàmica i Geofísica de la UB fins al 2010.

## 1. La situació energètica a Catalunya

Actualment la potència instal·lada a Catalunya, que correspon a la suma de les potències de totes les centrals de producció d'energia elèctrica, té una capacitat global de 12.764 MW<sup>1</sup>; si aquestes centrals estiguessin productives ininterrompudament durant tot l'any, produirien una energia de 111.812 GWh<sup>2</sup>, si bé el consum del 2007 va ser de 44.557,8 GWh i el del 2010, de 43.935 GWh. D'això es desprèn que, des del punt de vista del balanç energètic de producció d'energia elèctrica a Catalunya, la capacitat potencial de producció és força superior a la demanda.

**Taula I. Producció d'energia elèctrica a Catalunya**

Tipus de Central	Energia GWh	
Nuclear	20.870,6	46,8 %
Centrals tèrmiques	17.235,4	38,7 %
Cicle combinat	11.271,0	25,4 %
Cogeneració	5.528,2	12,4 %
Convencionals	436,2	1 %
Carbó	777,5	1,7 %
Altres no renovables	1.459,6	3,3 %
Hidràulica	3.576,4	8,0 %
Altres renovables	538,3	1,2 %
<b>Total produït</b>	<b>44.557,8 GWh</b>	



La taula II mostra la capacitat de producció dels diferents tipus de centrals elèctriques a Catalunya corresponent als anys 2003, l'actual 2011 i les previsions per al 2015, segons el Pla energètic de Catalunya 2006-2015. A partir d'aquestes dades s'observa que la capacitat de producció d'energia elèctrica d'origen nuclear representa actualment el 24,6 % del total de la potència instal·lada, però si s'analitza el balanç de l'energia produïda segons les dades disponibles del 2007 de l'Institut Català d'Energia (ICAEN) (vegeu la taula I), aquest percentatge augmenta. Això es deu, per una part, al fet que el cost de producció de l'energia nuclear és més baix que el de les centrals tèrmiques; per altra part, que l'energia hidràulica, que té encara un cost de producció inferior, té una disponibilitat que depèn de la variació de les reserves hídriques durant l'any, i, finalment, al fet que el funcionament de les centrals nuclears, per la seva tecnologia, no és de producció variable sinó de funcionament estable a

<sup>1</sup> Els conceptes de potència i energia (treball) de vegades es confonen. Es pot dir que la potència és la quantitat amb què es genera o s'utilitza l'energia. Per exemple, si una llum de 100 watts està encesa durant mitja hora, l'energia consumida és de 50 watts per hora (Wh).

<sup>2</sup> La potència d'una central energètica es mesura en MW, però l'energia generada anualment es mesurarà en Megawatts per hora (MWh), o en gigawatts per any (GW any), i depèn del temps que ha estat operativa.

ple rendiment, amb la qual cosa la regulació de potència produïda per adaptar-se contínuament a la demanda es realitza bàsicament amb les centrals hidroelèctriques i les tèrmiques. Fins i tot quan el consum en hores nocturnes és molt baix, i la producció de les centrals nuclears pot superar la demanda, alguna central hidroelèctrica es pot comportar de manera reversible, bombejant aigua a llacs superiors de la zona pirenaica per tornar a disposar de més reserves hídriques en les hores pic, de major consum.

**Taula II. Potència instal·lada de producció d'energia elèctrica a Catalunya**

(Dades: Pla de l'Energia de Catalunya 2008-2015)

Unitat: MW	Dades		Previsió del pla			Comentaris
	2003	Maig 2011	2015			
<b>Energies no renovables</b>	<b>7.402,5</b>	<b>9.140,1</b>	<b>71,6 %</b>	<b>9.655,4</b>	<b>50,7 %</b>	Tancament de Cercs abans del 2015 Tancament centrals convencionals abans del 2015  3 noves centrals previstes  Manteniment de les centrals existents
Centrals de carbó	160,0	160,0	1,2 %	0,0	0 %	
Centrals de fuel-gas i gasoil	1.235,9	530,9	4,1 %	0,0	0 %	
Cicles combinats	1.579,3	4.157,6	32,5 %	4.932,0	25,9 %	
Cogeneració	1.156,3	970,7	7,6 %	1.405,8	7,4 %	
Altres no renovables	124,2	174,1	1,3 %	171,7	0,9 %	
Nuclear	3.146,9	3.146,9	24,6 %	3.146,9	16,6 %	
<b>Energies renovables</b>	<b>2.477,2</b>	<b>3.624,2</b>	<b>28,4 %</b>	<b>9.375,9</b>	<b>49,2 %</b>	Objectius del Pla
Hidràulica	2.319,1	2.360,9	18,5 %	2.473,5	12,9 %	
- en règim ordinari	2.088,5	2.088,6	16,4 %	2.088,4	10,9 %	
- en règim especial i amb contracte privat	230,6	272,3	2,1 %	385,1	2,0 %	
Residus sòlids urbans (RSU)	45,2	44,3	0,34 %	44,4	0,23 %	
Biogàs	23,5	46,8	0,36 %	131,8	0,69 %	
Biomassa forestal i agrícola	0,5	0,5		50,3	0,26 %	
Eòlica	86,7	965,3	7,6 %	3.500,4	18,3 %	
Solar fotovoltaica	2,2	206,4	1,6 %	500,0	2,6 %	
Solar termoelèctrica	0,0	0,0		202,5	1,1 %	
<b>Total</b>	<b>9.879,8</b>	<b>12.764,3</b>		<b>19.031,3</b>		

Catalunya no disposa de recursos energètics d'origen mineral (carbó, petroli i gas) i la captació de l'energia eòlica i solar fotovoltaica és encara molt incipient. La figura 1 mostra la font de producció d'energia primària i la figura 2 mostra el consum d'energia primària a Catalunya, on es pot veure la forta dependència del petroli i del gas natural, que ha de ser importat.

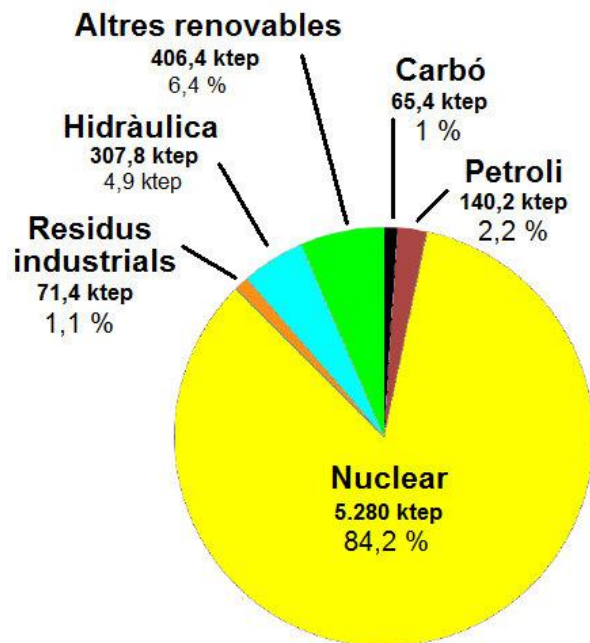


Fig. 1. Fonts d'energia primària produïda a Catalunya

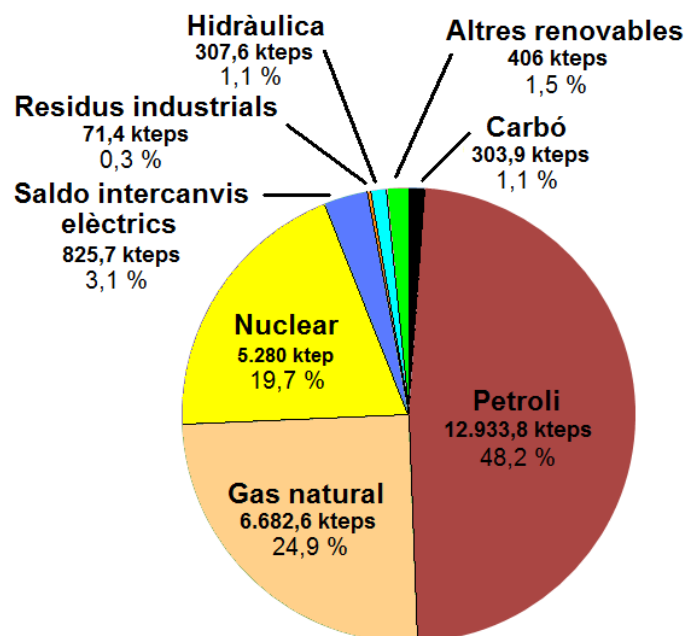


Fig. 2. Fonts d'energia primària consumida a Catalunya. Dades del 2007 de l'ICAEN

Nota: kept (kilo equivalent a petroli tones) és la forma de mesura d'energia equivalent a la produïda utilitzant petroli, en milers de tones.

La distribució del consum d'aquesta energia elèctrica ha anat variant en els últims anys, segons les gràfiques que es mostren a les figures 3a i 3b, sense que hagi experimentat grans augments, ja que, per una part, s'han aplicat mesures d'estalvi energètic, i, per altra part, també reflecteixen la situació de crisi actual.

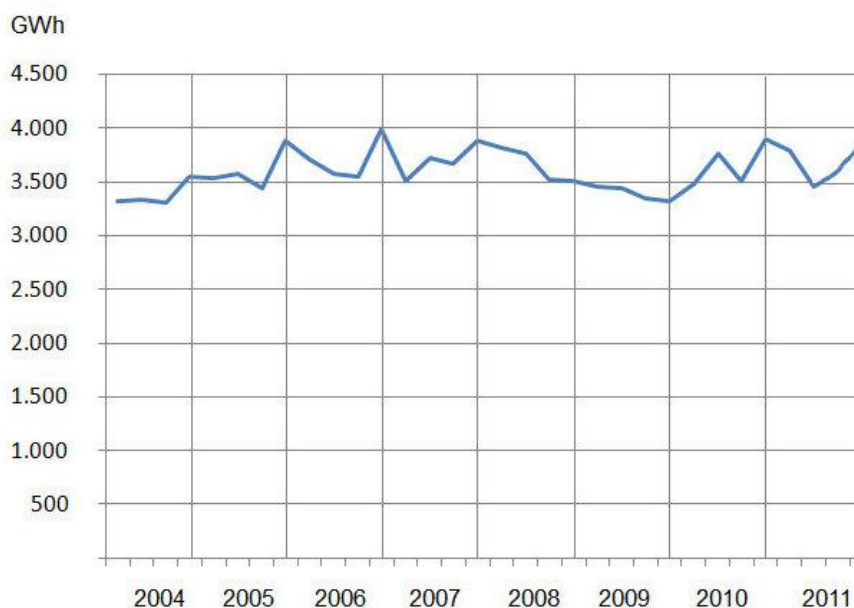


Fig. 3a. Evolució del consum elèctric a Catalunya. Dades ICAEN

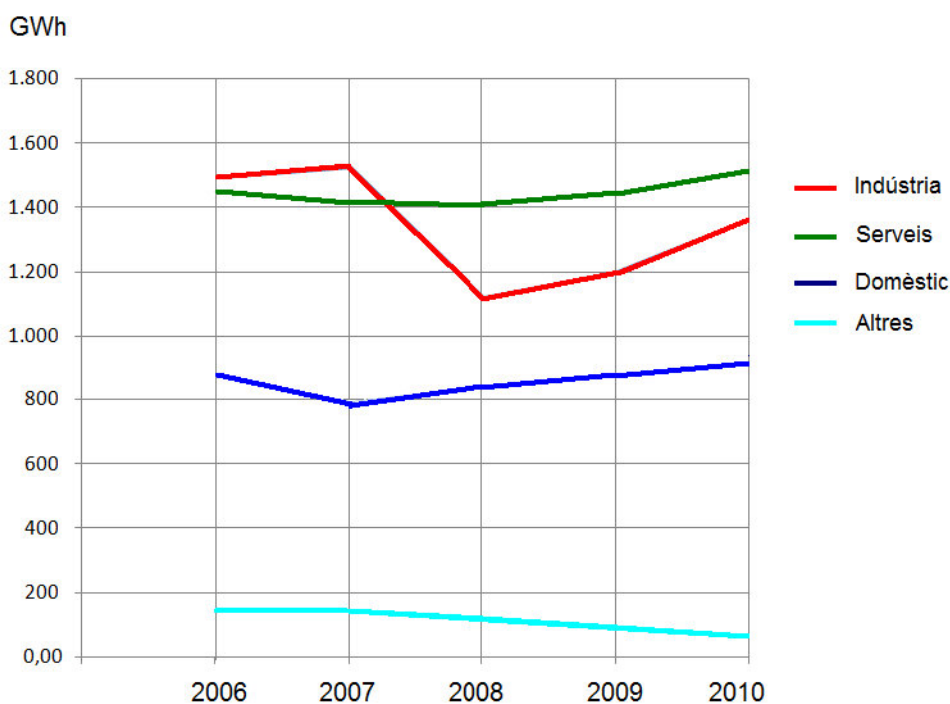
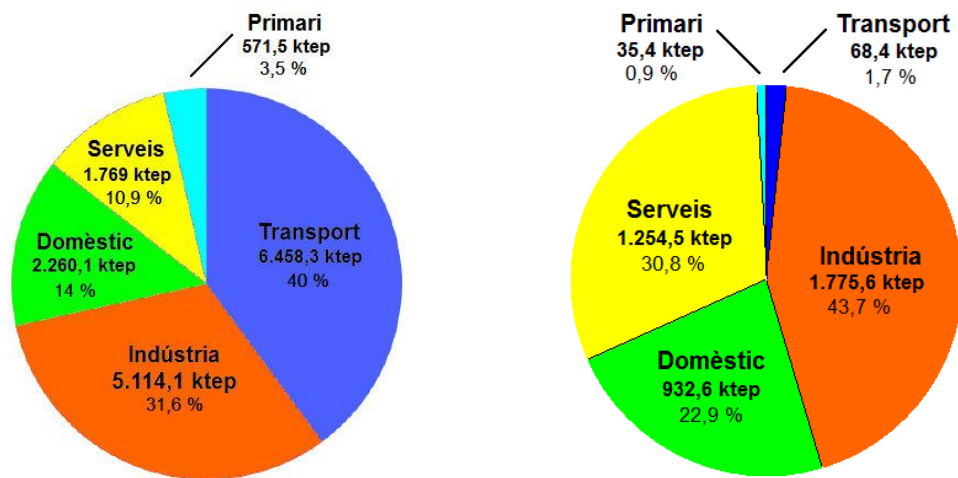


Fig. 3b. Evolució del consum elèctric a Catalunya, per sectors. Dades ICAEN

El consum total d'energia a Catalunya, prescindint de la font energètica que la genera, es distribueix entre els diferents sectors tal com s'indica a la figura 4a, mentre que la figura 4b mostra solament el consum d'energia elèctrica en els diferents sectors.





a) Consum per sectors

b) Consum per sectors, només energia elèctrica

Fig. 4. Consum d'energia a Catalunya per sectors. Dades 2007

De l'anàlisi d'aquestes dades —tot i que són de l'any 2007, es preveu que les més actuals, encara no publicades per l'ICAEN, seran similars— es desprèn que el 19,7 % de l'energia consumida és produïda a les centrals nuclears, però aquesta proporció puja fins al 46,8 % de l'energia elèctrica produïda a Catalunya. Per reduir aquest elevat percentatge sense incrementar el consum d'energies no renovables, caldria incrementar la producció d'energia eòlica i d'altres energies renovables i, al mateix temps, intensificar-ne la racionalització del consum.

A l'annex I s'aporten mapes sobre la situació de les estructures de producció i generació d'energia elèctrica a Catalunya.

## 2. L'energia nuclear de fissió

La fissió nuclear consisteix en el trencament de certs nuclis pesants (urani o plutoni) en incidir sobre ells neutrons d'una determinada energia. Com a resultat de la fissió, el trencament del nucli pesant produeix dos nuclis més lleugers (productes de fissió) i s'allibera una gran quantitat d'energia (calor). En aquesta reacció, representada esquemàticament a la figura 5, també s'emeten nous neutrons, que poden produir noves fissions quan incideixen novament sobre altres àtoms pesants de l'entorn. L'objectiu fonamental del disseny d'un reactor nuclear és assegurar que aquesta reacció es mantingui sota control, per tal de produir, de forma segura, la calor necessària per a generar el vapor que, mitjançant unes turbines, generi, al seu torn, energia elèctrica.

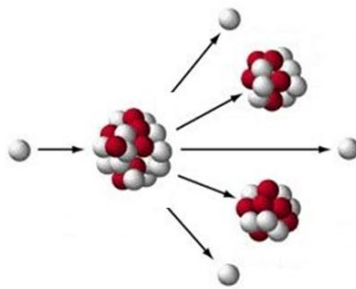


Fig. 5. Fissió d'un nucli d'urani en incidir-hi un neutró

L'interès que als anys 50 va despertar l'ús de l'energia nuclear per a la producció d'energia elèctrica rau en el fet que l'energia produïda per la fissió de l'urani genera una elevada quantitat de calor que és dos milions de vegades superior a la que s'obtidria a partir del mateix pes amb petroli.

### **Evolució de la tecnologia termonuclear**

Les centrals nuclears estan constituïdes per un reactor on es produeix la calor de la fissió nuclear. Aquesta calor produïda s'extreu mitjançant el circuit primari de refrigeració, que transforma en vapor l'aigua del circuit secundari, mitjançant un intercanviador de calor (figura 6). D'aquesta manera, el vapor produït que mou les turbines està separat físicament de l'aigua que banya el reactor. El vapor a la sortida de les turbines és condensat per obtenir l'aigua de retorn del circuit secundari, a través d'un segon intercanviador de calor, que és refrigerat per un tercer circuit que es refrigera en les típiques torres de refrigeració que caracteritzen les centrals nuclears. Atès que en les torres de refrigeració part de l'aigua s'ha alliberat en forma de vapor, cal disposar d'abundant aigua de reposició, motiu pel qual les centrals nuclears han d'estar a la vora de rius prou cabalosos, o del mar (vegeu l'annex II).

El nucli del reactor consta de:

- el combustible (on es produeixen les fissions nuclears): urani natural o enriquit

- el refrigerant que transporta la calor fora del nucli: aigua lleugera, aigua pesant (en la qual els àtoms d'hidrogen se substitueixen pel seu isòtop, el deuteri), l'anhidrid carbònic, l'heli o el sodi
- el moderador, que permet alentir els neutrons i augmentar la probabilitat de produir fissions en els nuclis d'urani 235: aigua lleugera, aigua pesant o grafit
- les barres de control que permeten controlar la reacció en cadena

Tot i que el principi de funcionament de les centrals nuclears no ha variat al llarg dels anys, sí que, tecnològicament, les centrals han anat evolucionant, de manera que es poden distingir ja quatre generacions de reactors: els de primera generació són els que van ser construïts entre el 1950 i el 1965; els reactors de segona generació són els que van ser construïts entre el 1965 i el 1995 i constitueixen el grup més gran de reactors en operació actualment; anomenem reactors de tercera generació els que, començats a construir a partir del 1995, previsiblement es continuaran implantant fins el 2030 (aquests reactors introdueixen conceptes de seguretat passiva, amb què s'aconsegueixen cotes de seguretat més elevades, són de disseny més senzill, més econòmics i també tenen uns terminis de construcció més curts); finalment, els reactors de quarta generació seran els que es construiran a partir de l'any 2030, i actualment estan en fase d'investigació i desenvolupament.

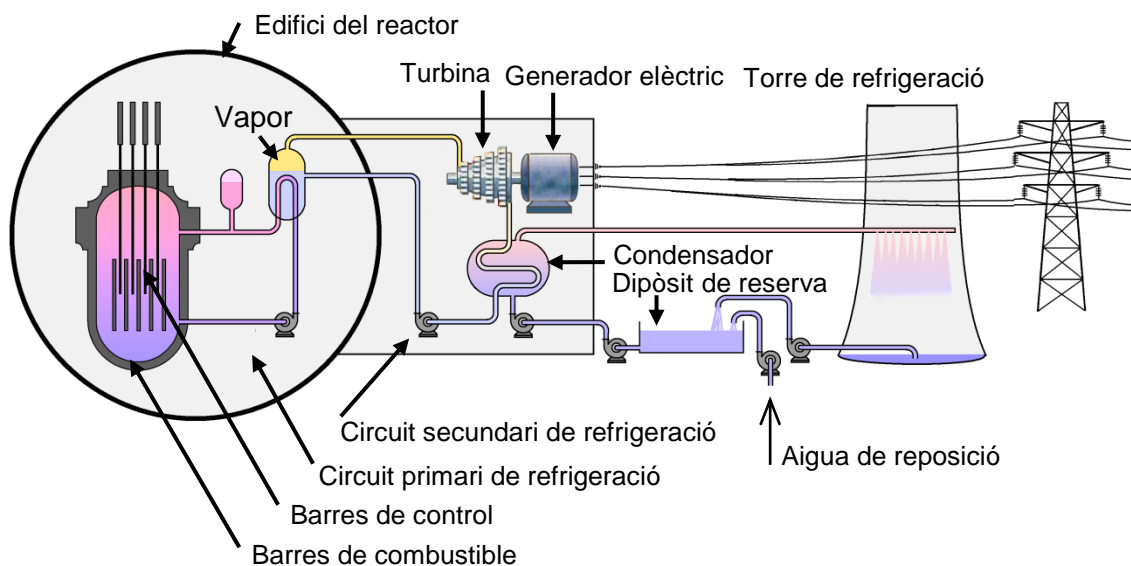


Fig. 6. Estructura bàsica d'una central nuclear

Fins ara, els reactors nuclears utilitzen l'isòtop U235 com a combustible, que és un dels isòtops que constitueixen l'urani natural, constituït pel 99,3% d'U238, el 0,7% d'U235 i també el 0,06% d'un altre isòtop, l'U234. Actualment, en els reactors de fins a la tercera generació s'utilitza l'isòtop U235, però cal enriquir-lo fins a obtenir-ne concentracions del 3 al 5%. Els reactors de quarta generació podran transformar l'isòtop U238, el més abundant, en plutoni, material físsil en reactors reproductors, i per aquesta via s'obtindrà molta més energia a partir de l'urani que la que s'obté ara.

Actualment al món hi ha 440 reactors nuclears en operació, amb una potència instal·lada de 376.791 MWe, els quals l'any 2010 van produir 2.630 bilions de kWh, cosa que representa el 13,8% de l'electricitat produïda al món. Bàsicament són reactors de segona generació (vegeu la taula III).

**Taula III. Reactors en operació, en construcció, encarregats o planificats, i proposats, per països**

PAÍS	POTÈNCIA PRODUÏDA EL 2010		REACTORS OPERATIUS		REACTORS EN CONSTRUCCIÓ		REACTORS PLANIFICATS		REACTORS PROPOSATS	
	bilions kWh	% e	Set 2011		Set 2011		Set 2011		Set 2011	
			No.	MWe net	No.	MWe brut	No.	MWe brut	No.	MWe brut
Alemanya	133.0	28.4	17	20339	0	0	0	0	0	0
Argentina	6.7	5.9	2	935	1	745	2	773	1	740
Armènia	2.3	39.4	1	376	0	0	1	1060		
Bangladesh	0	0	0	0	0	0	2	2000	0	0
Bielorússia	0	0	0	0	0	0	2	2000	2	2000
Bèlgica	45.7	51.2	7	5943	0	0	0	0	0	0
Brasil	13.9	3.1	2	1901	1	1405	0	0	4	4000
Bulgària	14.2	33.1	2	1906	0	0	2	1900	0	0
Canadà	85.5	15.1	17	12044	3	2190	3	3300	3	3800
Egipte	0	0	0	0	0	0	1	1000	1	1000
Eslovàquia	13.5	51.8	4	1816	2	880	0	0	1	1200
Eslovènia	5.4	37.3	1	696	0	0	0	0	1	1000
Espanya	59.3	20.1	8	7448	0	0	0	0	0	0
EUA	807.1	19.6	104	101421	1	1218	7	8640	27	37400
Finlàndia	21.9	28.4	4	2741	1	1700	0	0	2	3000
França	410.1	74.1	58	63130	1	1720	1	1720	1	1100
Holanda	3.75	3.4	1	485	0	0	0	0	1	1000
Hongria	14.7	42.1	4	1880	0	0	0	0	2	2200
Índia	20.5	2.9	20	4385	6	4600	17	15000	40	49000
Indonèsia	0	0	0	0	0	0	2	2000	4	4000
Iran	0	0	1	915	0	0	2	2000	1	300
Israel	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200
Itàlia	0	0	0	0	0	0	0	0	10	17000
Japó	280.3	29.2	51	44642	2	2756	10	13772	5	6760
Jordània	0	0	0	0	0	0	1	1000		
Kazakhstan	0	0	0	0	0	0	2	600	2	600
Korea DPR (Nord)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	950
Korea RO (Sud)	141.9	32.2	21	18785	5	5800	6	8400	0	0
Lituània	0	0	0	0	0	0	1	1350	0	0
Malàisia	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200
Mèxic	5.6	3.6	2	1600	0	0	0	0	2	2000
Pakistan	2.6	2.6	3	725	1	340	1	340	2	2000
Polònia	0	0	0	0	0	0	6	6000	0	0
Regne Unit	56.9	15,7	18	10745	0	0	4	6680	9	12000
Rep. Txeca	26.4	33.2	6	3722	0	0	2	2400	1	1200
Romania	10.7	19.5	2	1310	0	0	2	1310	1	655
Rússia	159.4	17.1	32	23084	10	8960	14	16000	30	28000
Sud Àfrica	12.9	5.2	2	1800	0	0	0	0	6	9600
Suècia	55.7	38.1	10	9399	0	0	0	0	0	0
Suïssa	25.3	38.0	5	3252	0	0	0	0	3	4000
Tailàndia	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5000
Turquia	0	0	0	0	0	0	4	4800	4	5600
Ucraïna	83.95	48.1	15	13168	0	0	2	1900	20	22800
UAE	0	0	0	0	0	0	4	5600	10	14400
Vietnam	0	0	0	0	0	0	2	2000	12	13000
Xile	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4400
Xina	71.0	1.8	14	11271	26	28710	52	59990	120	123000
<b>MÓN</b>	<b>2630</b>	<b>13.8</b>	<b>440</b>	<b>376,791</b>	<b>62</b>	<b>63,724</b>	<b>155</b>	<b>173,535</b>	<b>341</b>	<b>388,455</b>

Operatius: connectats a la xarxa

En construcció: obra civil

Planificat: aprovat amb compromís de pagament en 8 o 10 anys

Proposat: programa específic o proposta d'ubicació, amb una previsió inferior a 15 anys

Font: WNA 12/9/11

També es pot veure que, actualitzat al mes de setembre de 2011, hi ha 62 reactors nuclears en construcció, 155 reactors encarregats o planificats, i 341 proposats; i tots són reactors de tercera generació.

### Tipus de reactors clàssics

Una altra manera de classificar els reactors nuclears és segons el moderador que utilitzen. Així, apareixen tres famílies de reactors nuclears:

- reactors grafit-gas: el grafit actua com a moderador i el gas com a refrigerant
- reactors d'aigua lleugera: l'aigua lleugera ( $H_2O$ ) actua tant de moderador com de refrigerant. Aquesta tipologia de reactors es divideix en dos tipus: els reactors d'aigua a pressió (PWR) i els reactors d'aigua en ebullició (BWR). Fan servir com a combustible urani enriquit entre un 3% i un 5% d'isòtop U235. Aquesta és la tecnologia de reactors més estesa al món: dels 440 reactors en operació, uns 252 són reactors d'aigua a pressió PWR i uns 94 són d'aigua en ebullició (BWR). Actualment, els tres reactors de Catalunya són del tipus PWR.
- reactors d'aigua pesada: l'aigua pesada ( $D_2O$ ) és el moderador que utilitzen. És una tecnologia que s'ha desenvolupat al Canadà, i aquest país l'ha exportada als seus clients.

### El cost de l'energia

En la quantificació dels costos de producció dels diferents tipus d'energia, cal distingir entre els costos directes i els costos indirectes. Els costos directes són el resultat de repercutir en els KW produïts l'amortització dels costos de construcció i manteniment de la central i el cost del combustible utilitzat. Els costos indirectes tenen en compte molts altres factors, però al ser alguns difícilment quantificables, com poden ser el cost d'ocupació de les valls per les aigües de la presa per a la producció hidroelèctrica, el cost de l'emissió del  $CO_2$  en el cas de les centrals tèrmiques, o en les centrals nuclears el cost de l'emmagatzematge a llarg termini i el dels riscos. Les diferències de criteri en l'avaluació d'aquests costos i les diferències entre instal·lacions i països, fa que es presentin aquestes discrepàncies entre les diferents fons d'informació.

Els costos indirectes tenen en compte altres factors difícilment quantificables, com poden ser el cost d'ocupació de les valls per les aigües embassades en la producció hidroelèctrica, el cost de l'emissió del  $CO_2$ , en el cas de les centrals tèrmiques, o el cost de l'emmagatzematge o el reciclatge del combustible gastat, en el cas de centrals nuclears.

Si dins del cost de la producció d'energia elèctrica a partir del gasoil o del gas, s'hagués d'incloure el cost de captura i compressió del  $CO_2$  s'estima que representaria un encariment d'entre el 8 i el 13% del cost de producció. Si als costos de producció de l'energia nuclear es contemplés el cost estimat d'una assegurança del risc associat a l'energia nuclear avaluat després del desastre de Fukushima, s'avalua que el cost podria encarir-se entre 2 i 2,5 €/KWh. Més difícil encara és la quantificació de l'emmagatzematge de residus de llarga vida (més de 300 anys).

La taula IV mostra el cost de l'energia segons diferents fonts. La figura 7 mostra l'interval de costos corresponents a quatre fonts. La font **A** correspon al *EIA report: Annual Energy Outlook*

2011 DOE/EIA-0383(2010). La font **B** correspon a l'estudi realitzat per la *German Renewable Energy Sources Act-EEG* del 2010. La font **C** correspon a l'estudi del cost de les centrals angleses avaluada per DECC el juny de 2010. La font **D** correspon al report anual de l'*Energy Information Administration, DOE/EIA-0383 (2010)*. La font **E** correspon al report de la *Nuclear Energy Agency (NEA)*, de costos previstos per a centrals que entrin en funcionament el 2015.

**Taula IV. Estimacions del preu de producció de diferents tipus de plantes**

Tipus de planta	Font A €/MWh*	Font B €/MWh	Font C €/MWh	Font D €/MWh	Font E €/MWh**
Carbó convencional	94,8	88 - 97	-	70,2	46 - 89
Carbó en pols	109 - 136	104 - 107	118 - 183	80,9	-
Gas natural (cicle combinat)	66,1	-	64 - 130	48,0	59 - 89
Gas natural (turbina)	124,5	106 - 118	70 - 153	91,7	-
Nuclear	113,9	107 - 124	94 - 123	84,3	37 - 59
Vent terrestre	97,0	50 - 96	94 - 141	71,8	63 - 121
Vent fora costa	243,2	35 - 150	176 - 247	179,8	-
Solar fotovoltaica	210,7	284 - 391	147 - 211	155,4	-
Solar tèrmica	311,8	-	-	230,0	-
Geotèrmica	101,7	-	-	75,2	-
Biomassa	112,5	77 - 116	70 - 130	82,9	-
Hidroelèctrica	86,4	35 - 127	-	64,0	-
Mareomotriu	-	-	182 - 458	-	-

\* Costos estimats per a centrals que entrin en funcionament el 2016

\*\* Costos estimats per a centrals que entrin en funcionament el 2015

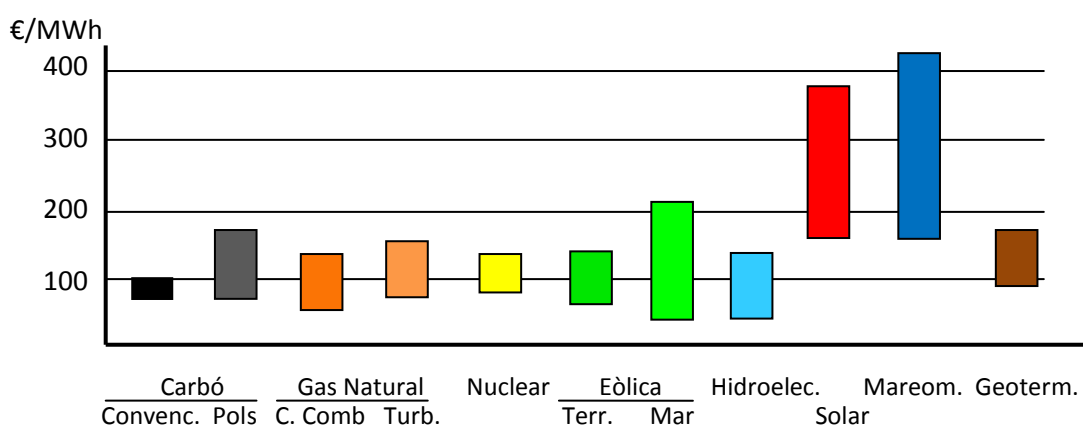


Fig. 7. Visió comparativa dels costos de producció de diferents tipus de plantes

### 3. Les centrals nuclears a Catalunya

A Catalunya actualment hi ha tres centrals nuclears en funcionament: Vandellòs II localitzada a la comarca del Baix Camp, les centrals d'Ascó I i Ascó II, localitzades a la comarca de la Ribera d'Ebre (figura 7).

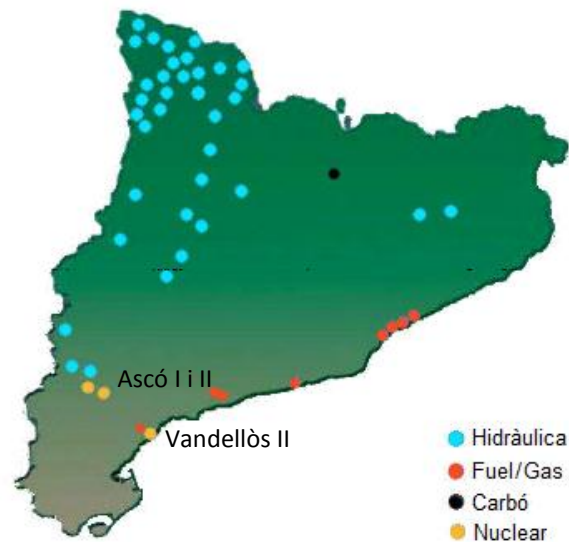


Fig. 8. Localització de les centrals més grans de producció d'energia elèctrica a Catalunya

**La central nuclear Vandellòs I** va ser la primera que es va construir. La seva construcció va ser duta a terme entre 1967 i 1972 per l'empresa HIFRENSA i per un grup de constructors francesos amb la participació de nombroses empreses espanyoles, sota la modalitat de "claus en mà", i es va connectar per primera vegada a la xarxa el març de 1972. Aquesta central del tipus GCR (grafit-urani natural i refrigerada per gas) i de 1.670 MW de potència, juntament amb la de José Cabrera (Zorita), també del tipus PWR, i la de Garoña, del tipus BWR, formen el grup de centrals nuclears espanyoles de primera generació.

El 19 d'octubre de 1989 es produí un incendi en un grup turboalternador causat per una fallada mecànica i l'abril de 1990 el *Consejo de Seguridad Nuclear* emetia un informe en el qual s'indicaven els requisits de seguretat necessaris perquè la planta pogués reiniciar l'operació a potència. A causa de l'elevat cost d'aquesta intervenció, i considerant el temps d'utilització romanent previst de la central, la inversió no fou aprovada per HIFRENSA, titular del permís d'exploració, la qual renuncià expressament a la concessió, i així, el 29 de maig de 1990 es va efectuar la parada definitiva de la central, després de més de 17 anys de funcionament.

Un cop clausurada la central, el febrer de 1998 se n'inicià el desmantellament al nivell 1 que, d'acord amb la terminologia de l'Organisme Internacional de l'Energia Atòmica, consisteix en l'extracció del combustible i dels líquids dels circuits de refrigeració que tenen diferents nivells de contaminació.

Acabades aquestes operacions, s'inicià el desmantellament al nivell 2, cosa que va significar la construcció d'un caixó protector del reactor (tasca que va finalitzar el juny de 2003) per deixar-



lo confinat a l'espera que la radioactivitat de les estructures internes decaigui de forma natural, durant un període d'espera d'uns 25 anys, després del qual es pugui iniciar el definitiu desmantellament, al nivell 3, que haurà de realitzar-se amb equips teleoperats, per evitar els riscos de la radiació residual.



Fig. 9. La central nuclear de Vandellòs abans d'iniciar-se'n el desmantellament

Durant aquesta fase de desmantellament es gestionaren 300.000 Tm de materials, la major part formigons, que es reutilitzaren per a la restauració de terrenys de l'emplaçament. El procés generà 15.906 Tm de ferralles convencionals que s'evacuaren de l'emplaçament cap a plantes de reciclatge i es generaren 1.763 Tm de residus radioactius de mitjana i baixa activitat, enviats en la seva totalitat al centre d'emmagatzematge d'"El Cabril" a la província de Còrdova. Per realitzar totes aquestes tasques intervingueren 2.700 persones pertanyents a 63 empreses diferents.



Fig. 10. La central nuclear de Vandellòs després que es construí el caixó protector durant l'etapa de latència



**La central nuclear Vandellòs II** és una de les més joves d'Espanya. El permís de construcció de la planta es va atorgar l'any 1980, però no va ser fins el 1987 quan es va acabar de construir la central. El mes de desembre d'aquell mateix any es va produir el primer acoblament a la xarxa elèctrica i el 8 de març de 1988, la CN Vandellòs II va iniciar l'operació comercial. Aquesta central és del tipus PWR, de 1.087 MW de potència elèctrica instal·lada i està gestionada per l'Associació Nuclear Ascó-Vandellòs, participada per Endesa i Iberdrola. Pel que fa a la renovació de les autoritzacions d'explotació, el juliol de 2010, el Ministeri d'Indústria, Turisme i Comerç va emetre l'ordre ministerial que concedeix la renovació de l'autorització de la seva explotació per un període de 10 anys més, fins el 2020. Els únics incidents ocorreguts en aquesta central són la detecció de problemes de corrosió en el sistema de refrigeració, el 2004, (considerat un incident de nivell 2), i un incendi a l'edifici de turbines, el 2008, sense cap conseqüència radiològica (considerat un incident de nivell 0).

**Les centrals nuclears Ascó I i Ascó II** són del tipus PWR amb escasses diferències entre elles, conjuntament disposen de 2.060 MW de potència elèctrica instal·lada i varen ser construïdes entre el 1974 i el 1983. Ascó I va rebre el permís de construcció el 1974 i un any més tard, Ascó II. La posada en servei comercial d'Ascó I es va produir el desembre de 1984. Aquestes centrals, que també estan gestionades per l'*Asociación Nuclear Ascó-Vandellòs*, participada per Endesa i Iberdrola, porten operant més de 20 anys sense incidències, i tenen autorització d'explotació fins el 2020 i 2021, respectivament, després de la renovació de l'autorització atorgada el juliol de 2010.

Recentment, ha estat autoritzada la construcció d'un magatzem transitori individual (MTI) a Ascó que serà dut a terme per la companyia nord-americana Holtec, especialitzada en la fabricació d'aquests equipaments. A partir del 2012 aquest magatzem podrà contenir residus radioactius en contenidors a l'aire lliure sobre plataformes antisísmiques. Fins avui, aquests residus s'estan emmagatzemant en piscines a l'interior de la central, però la seva capacitat quedarà saturada el 2014. Aquest magatzem transitori individual tindrà capacitat per emmagatzemar els residus generats durant uns quinze anys i es considera transitori fins que no quedi resolta la construcció del definitiu (MTC), la ubicació del qual encara no s'ha decidit.

Com a referent, val a dir que l'impacte econòmic que aquestes plantes generen en el territori on estan ubicades, suposa més de 2.000 llocs de treball, entre personal propi i d'empreses col·laboradores estables.

## 4. El cicle de combustible

Per tal que les fissions es produeixin a l'interior del reactor d'una manera eficient i segura, l'urani es col·loca en unes beines formant les barres de combustible que s'insereixen verticalment a l'interior del nucli (figura 11). Cada cert temps (generalment entre un i dos anys) és necessari renovar el nucli, substituint part dels seus elements combustibles per altres de nous, tot reordenant-los per a formar un nou nucli. Aquesta operació es coneix amb el nom de recàrrega de combustible.

La funció primària de l'element combustible és generar i transferir calor al refrigerant de forma estable i segura. A part d'aquesta funció primària, l'element combustible ha de complir les funcions següents (vegeu l'annex III):

- Facilitar el flux del refrigerant i la transmissió de calor.
- Constituir la primera barrera als productes de fissió i confinar el combustible i els productes de fissió generats en les reaccions de fissió dins el seu contenidor (beina).
- Facilitar el control del procés de fissió, permetent la inserció i l'extracció de les barres de control.
- Facilitar la manipulació, el transport i la càrrega en el nucli.

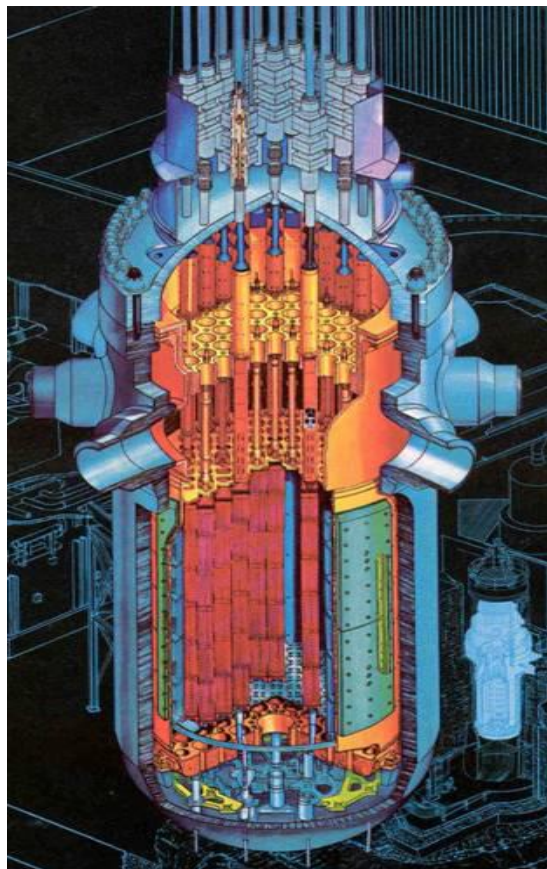


Fig. 11. Estructura d'un reactor nuclear

## **El combustible fresc**

L'urani lleugerament enriquit es col·loca en els elements combustibles en forma d'òxid d'urani conformat en petits cilindres ceràmics anomenats pastilles (vegeu l'annex I).

El combustible destinat a reactors d'aigua lleugera, ja sigui dels tipus PWR o BWR, es fabrica a partir d'òxid d'urani en pols que es barreja amb un material que permet que es formin porus dins de les pastilles. Aquesta operació rep el nom de barreja. Mitjançant un procés de sinterització i sotmetent posteriorment les pastilles resultants a temperatures d'uns 1800° C entre 15 i 20 hores, s'obtenen les pastilles de la mida i la densitat adequades per carregar les barres de combustible.

Aquestes barres estan constituïdes per uns tubs metàl·lics d'aliatge de zirconi de 4 metres de longitud, aproximadament, per assegurar la robustesa mecànica necessària d'estanqueïtat i la baixa capacitat d'absorció de neutrons. Una vegada aquestes beines han estat carregades i segellades, reben el nom de barres de combustible.

La reactivitat dels elements combustibles, l'urani 235 inicialment present en el combustible fresc i que ha estat enriquit amb una concentració del 3 al 5%, disminueix a mida que desapareix per fissió i es converteix en àtoms més lleugers, fenomen que es coneix com a cremat del combustible, i per això, periòdicament, s'han de reemplaçar els elements més cremats per altres de frescos, en successius processos de recàrrega.

Per tal que el reactor pugui operar durant períodes suficientment llargs —requisit bàsic per a l'economia del cicle— la configuració inicial del nucli ha de disposar d'un excés de reactivitat que pot ser vigilat mitjançant diferents sistemes de control. En els reactors d'aigua a pressió (PWR), com són les centrals de Vandellòs i Ascó, la reactivitat es controla utilitzant àcid bòric dissolt en el refrigerant que és absorbent de neutrons, i òxid de gadolini com a verí consumible integrat.

La disposició dels elements combustibles en el nucli, juntament amb el disseny nuclear dels elements combustibles, és el factor que determina la distribució de potència en el nucli. Existeixen diferents tipus de configuració dels esquemes de recàrrega, depenent de la longitud del cicle i d'altres requisits de l'explotador.

## **El combustible gastat**

En finalitzar el seu període útil d'irradiació, les barres de combustible contenen material reutilitzable, productes de fissió i un potencial tèrmic elevat, com a conseqüència de la desintegració radioactiva, per això han de ser emmagatzemats a les piscines, durant un període de temps que va des d'uns mesos fins a diversos anys. Això permet el decaïment dels radionúclids de vida més curta i la reducció, tant de la calor generada, com de l'emissió de radiació gamma, cosa que facilita la posterior manipulació i gestió del combustible gastat.

Existeixen diferents estratègies per a la gestió del combustible gastat:

- Cicle obert: el combustible gastat s'emmagatzema en instal·lacions temporals específiques. Queda oberta la possibilitat d'un reproced posterior o la recol·locació en un magatzem definitiu.
- Cicle tancat: el combustible gastat es reutilitza parcialment mitjançant el reprocessament. Es recuperen els components amb potencial energètic,

fonamentalment l'urani i el plutoni, que poden ser empleats de nou en un reactor. La resta de components del combustible gastat (productes de fissió, actínids, etc.) es condicionen i transporten a un magatzem temporal. El volum a guardar, en aquest cas, és molt inferior al del cicle obert.

Inicialment a Espanya s'optà pel reprocessament del combustible gastat, però posteriorment es decidí realitzar una gestió de tipus cicle obert. En qualsevol cas, fins que el combustible gastat no es reprocessa o s'emmagatzema definitivament, és necessari fer-ho de manera temporal. La instal·lació de magatzems temporals pot estar lligada a les pròpies centrals nuclears, que a Espanya s'anomenen «Magatzem Temporal Individualitzat» (ATI, Almacén Temporal Individualizado), com el que s'ha aprovat recentment a Ascó, o també es poden construir de manera independent de les centrals, en el que es coneix com a «Magatzem Temporal Centralitzat» (ATC, Almacén Temporal Centralizado). L'objectiu d'aquesta instal·lació és emmagatzemar durant anys el combustible gastat de diverses centrals nuclears, ja que els residus generats poden ser de curta, mitjana o llarga durada. Per exemple, el iode 131, que és un residu de vida curta, té un temps de semidesintegració de 8 dies, però altres elements tenen temps de vida llargs, com el plutoni 240 que té un temps de semidesintegració de 6.800 anys, o el del plutoni 239 que és de 24.000 anys.

Es pot emmagatzemar temporalment en humit o en sec:

- En l'emmagatzematge en humit l'aigua proporciona refrigeració, blindatge i confinament. Requereix l'existència de sistemes auxiliars que assegurin la refrigeració de l'aigua, la seva purificació, el tractament dels residus i l'aportació d'aigua addicional en cas d'emergència. Les piscines són fetes de formigó armat, amb parets recobertes internament de làmines d'acer inoxidable, i són dissenyades per a suportar les situacions extremes pròpies de l'emplaçament. Aquest tipus d'emmagatzematge consisteix en una piscina de construcció modular, per tal que se'n pugui augmentar la capacitat en funció de les necessitats. Un exemple d'aquest sistema és el magatzem de la planta de Diablo Canyon, a Califòrnia. També han optat per aquest tipus de plantes països com Suècia i Finlàndia.
- En l'emmagatzematge en sec s'utilitza l'aire o un gas com a mitjà per a la transferència de calor. Si aquest gas és inert (generalment heli) permet minimitzar les reaccions entre components interns i la corrosió. Existeixen tres models conceptuals bàsics d'emmagatzematge en sec:
  - Contenedors segellats (de formigó o metàl·lics), ja sigui en magatzems especials o sepultats sota terra.
  - Sitges o mòduls, que són estructures monolítiques de formigó armat, de construcció modular, ubicades a la superfície, on se situen les càpsules segellades per a contenir els elements radioactius, preparades per a assolir una durabilitat d'entre 300 i 1.000 anys.
  - Càmeres o túnels soterrats o en aïllaments geològics profunds, en zones d'alta estabilitat geològica, on se situen les càpsules també segellades. L'evacuació de la calor es realitza normalment mitjançant la circulació natural o forçada d'aire, que entra des de l'exterior a les cavitats i surt per una xemeneia.

Aquesta solució és estudiada per diferents països, com en el projecte en estudi als EUA a *Yucca Nevada's Mountains*. A França, el 1999, es va crear el centre d'emmagatzematge a Bure per al qual es preveu que el 2025 hagi arribat a assolir una extensió de 30 km<sup>2</sup>.

A les nostres centrals nuclears, cada central disposa d'una piscina d'emmagatzematge humit per al confinament temporal dels residus de més alta activitat (vegeu la figura 12). I tal com s'ha mencionat anteriorment, a Ascó s'ha aprovat la construcció d'un magatzem transitori individual (MTI) per poder emmagatzemar, a partir del 2012, residus de baixa i mitjana intensitat en contenidors a l'aire lliure sobre plataformes antisísmiques. A la figura 13 es presenta aquesta situació, així com l'any de saturació de les piscines de cada central nuclear.



Fig. 12. Piscina d'emmagatzematge d'una central nuclear

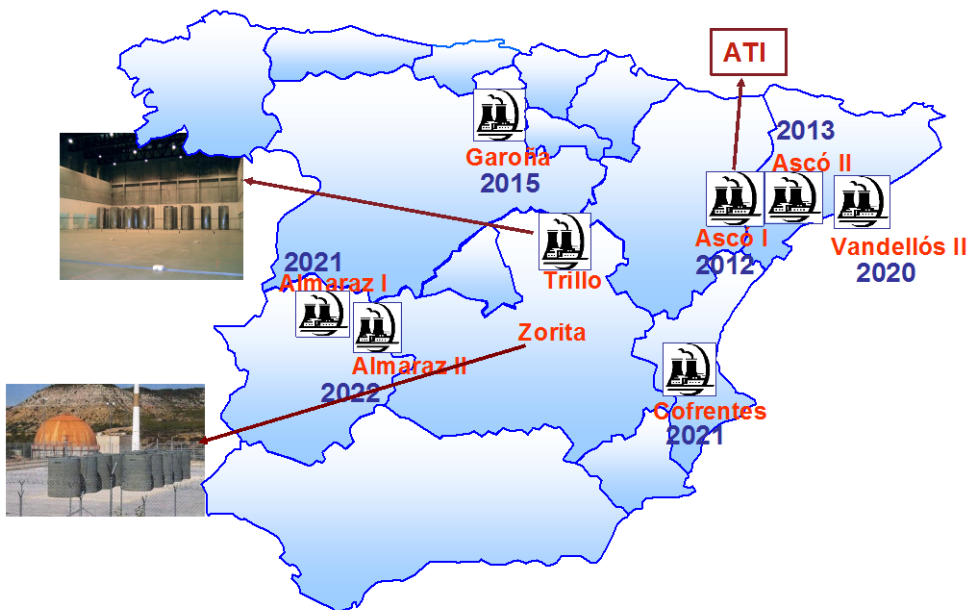


Fig. 13. Situació d'emmagatzematge de residus en les diferents centrals nuclears

## 5. La seguretat nuclear

Els reactors nuclears funcionen dividint àtoms d'urani i plutoni per produir àtoms més petits i energia. La majoria dels àtoms més petits es formen quan els àtoms separats són inestables, i aquests àtoms inestables emeten radiació fins que s'estabilitzen. Aquesta radiació, atès que constitueix un perill per a la salut de les persones, exigeix disposar de les mesures de seguretat adequades.

La producció d'energia elèctrica mitjançant l'energia atòmica per fissió és una tecnologia considerada madura, ja que les primeres centrals nuclears es varen començar a desenvolupar fa més de 50 anys, i actualment n'hi ha 443, distribuïdes en 31 països del món, el conjunt de les quals produeix un 17% de l'energia elèctrica.

Aquesta tecnologia no es pot considerar com un procés complex, ja que en una central nuclear el procés de la fissió es produeix per si sol si es disposa d'una concentració mínima de material radioactiu (el combustible). La calor que es produeix és extreta pels circuits de refrigeració i genera vapor, el qual impulsa les turbines que mouen els alternadors que produeixen l'energia elèctrica (vegeu la figura 6).

Els riscos associats a les centrals nuclears no deriven, doncs, de la complexitat tècnica d'explotar-los, sinó de les greus conseqüències que es poden derivar d'un hipotètic accident en què hi hagués alliberament de material radioactiu, pel risc que suposa la radiació per a les persones, fins i tot a distàncies considerables del punt d'emissió. Les radiacions que es produeixen en la desintegració nuclear poden ser del tipus alfa, beta i gamma, radiacions que produeixen efectes biològics diferents:

- La radioactivitat alfa, composta per dos protons i dos neutrons, és la menys penetrant i de curt abast. Però és també la més perillosa, perquè és la que es considera la causant de més casos de càncer, ja que té capacitat per a modificar l'ADN d'una cèl·lula i pot provocar-hi una mutació. No penetra a la pell ni produeix cremades, però en canvi pot entrar al cos humà per inhalació i sobretot per ingestió, per exemple d'aigua o aliments contaminats.
- La radioactivitat beta, composta per electrons, té un abast major que l'alfa i pot penetrar per la pell uns quants mil·límetres i en altres teixits humans. Pot comportar la destrucció local de cèl·lules o parts de teixits exposats, i pot produir cremades. Com les altres radiacions ionitzants, també té capacitat per a modificar l'ADN d'una cèl·lula i hi pot provocar mutacions, cosa que pot afavorir l'aparició de càncer, si bé la seva perillositat és molt inferior a la de la radioactivitat gamma.
- La radioactivitat gamma, composta per fotons, és una radiació electromagnètica més energètica que els raigs X i és la més invasiva de les tres ja que pot penetrar fins a vint-i-cinc centímetres dins del teixit humà. Té una elevada capacitat per a destruir enllaços químics, molt superior a la d'altres radiacions, a més de modificar l'ADN d'una cèl·lula, en el nucli de la qual pot causar danys importants. Si la radioactivitat alfa es pot considerar la més perillosa pel fet d'augmentar el risc de càncer, la gamma ho és pels seus efectes immediats, molt agressius. Ataca fortament els teixits externs i interns, provoca intenses cremades i cicatrius, i té els efectes a mitjà i llarg termini propis de la radioactivitat en general.

A causa dels perills derivats de l'ús de materials radioactius, les regulacions sobre les mesures de seguretat de les centrals nuclears són molt estrictes, i la inspecció i vigilància sobre el seu acompliment és realitzat per agències externes independents.

Independentment del poc probables que siguin, els principals riscos que es contempen per les centrals nuclears en cas d'accident o fallades, són:

a) Riscos tecnològics:

- Fusió del nucli del reactor amb alliberament massiu de material radioactiu. És el risc potencial més greu, derivat de múltiples fallades dels sistemes o circuits d'extracció de la calor generada, que actuen com a refrigeració.
- Alliberament accidental o controlat de gasos contaminats amb productes radioactius. Aquestes emissions podrien arribar a ser necessàries per evitar riscos d'explosions en cas de fallades dels sistemes de refrigeració.
- Vessaments accidentals de líquids contaminats amb productes radioactius a l'exterior de la central.
- Emissions en les piscines d'emmagatzematge del combustible nuclear gastat, degudes a fallades dels sistemes de refrigeració.

b) Riscos derivats de l'explotació:

- Alliberament de materials radioactius fora del recinte, per errors de manipulació.
- Problemes en el control del reactor, derivats d'errors humans en operacions manuals.

c) Riscos derivats de fets externs:

- Afectacions derivades d'incendis, inundacions, terratrèmols i tsunamis.
- Accidents derivats d'hipotètics sabotatges interns.
- Accions terroristes externes.

## La regulació sobre la seguretat de les centrals nuclears

En l'àmbit mundial existeix la *International Atomic Energy Agency* (IAEA), que va ser creada com una organització autònoma, el 29 de juliol de 1957, i funciona com un fòrum intergovernamental per a la cooperació científica i tècnica en l'ús pacífic de l'energia nuclear a tot el món. Encara que es va establir de forma independent, els informes de l'IAEA són presentats tant a l'Assemblea General de l'ONU com al seu Consell de Seguretat.

El 1946, als Estats Units, va ser creada una comissió governamental per impulsar i supervisar l'ús militar de l'energia atòmica, la *United States Atomic Energy Commission* (AEC). Aquesta comissió, després del discurs del president Eisenhower "Àtoms per la pau", del 1953, es va orientar més a l'ús pacífic de l'energia atòmica, però en anys posteriors va començar a ser qüestionada pel seu vessant armamentístic i la seva poca independència. Aquest fet va provocar que el 1974 fos creada la *Nuclear Regulatory Commission* (NRC), una comissió independent per supervisar la seguretat dels reactors, la concessió i renovació de llicències d'explotació, la seguretat dels materials radioactius, la seguretat i la concessió de llicències i la gestió del combustible gastat (emmagatzematge, seguretat, reciclatge i eliminació). Les normes regulatòries de la NRC es poden trobar a l'adreça <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr>.

La regulació europea sobre l'energia nuclear dimana del Tractat Euratom del 1960, que estableix la Comunitat Europea d'Energia Atòmica (Euratom) com l'entitat de coordinació dels

programes dels estats membres per a la investigació, l'elaboració de normes de seguretat i l'ús pacífic de l'energia nuclear.

Tots els estats membres de la Unió Europea són part de la Convenció Internacional sobre Seguretat Nuclear, segons el conveni establert pel Tractat Euratom que estableix la competència compartida amb els estats membres en els àmbits regulats per la Convenció. La Comunitat es va adherir a la Convenció el 30 de gener de 2000. L'última directiva sobre seguretat nuclear va ser aprovada el juny del 2009.

A l'Estat espanyol, el *Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)* és la institució independent de l'administració de l'Estat creada el 1964 per vetllar per la seguretat nuclear. La llei de creació i regulació és la 25/1964 sobre Energia Nuclear, amb les modificacions introduïdes per la llei 33/2007 de reforma de la llei de creació del CSN.

### **Mesures de seguretat de la planta**

A causa del potencial perill que suposa la utilització de materials radioactius, les mesures de seguretat en les centrals nuclears són molt elevades i supervisades per agències independents. Aquestes mesures de seguretat s'estenen a:

- El transport i la manipulació del combustible a utilitzar i el gastat
- El reactor i el control de la reacció nuclear
- Els circuits de refrigeració i producció d'energia elèctrica
- Les piscines d'emmagatzematge del combustible gastat
- El control d'accés a persones autoritzades
- La prevenció d'accions externes de sabotatge
- La prevenció de fets naturals com incendis, aiguats o terratrèmols

Per implementar les mesures de seguretat, s'apliquen dos tipus de tècniques:

- Els sistemes de protecció passius són els que estan basats en les lleis pròpies de la física i no necessiten cap dispositiu de control ni energia externa per a la seva actuació.
- Els sistemes actius són el conjunt de dispositius que realitzen, per una part, el control del procés productiu i dels sistemes auxiliars i, per altra part, el control dels accessos de persones autoritzades i materials.

El principal sistema passiu de seguretat és la composició del propi combustible que, en estar enriquit per sota del 5%, no reuneix la massa crítica per desenvolupar per si sol la reacció en cadena descontrolada. Altres mesures de seguretat passives poden ser dispositius de caiguda per gravetat de les barres moderadores que aturen la reacció nuclear, o també les estructures de contenció, que eviten la dispersió de materials en cas de vessaments. Els reactors d'última generació, que són els que actualment estan en fase de construcció o estan planificats, també incorporen sistemes de seguretat passiva en el seu sistema de refrigeració, ja que en cas d'accident, la calor residual s'extreu per sistemes de conducció i convecció natural. Aquests sistemes de seguretat passiva són considerats intrínsecament segurs.

La seguretat activa està associada als sistemes de comandament, que realitzen el control del procés i fan també les funcions de supervisió i control tant dels elements bàsics del reactor, com el de tots els elements auxiliars, i estan destinats a garantir la seguretat de les persones i la integritat del reactor. Aquests sistemes no són intrínsecament segurs i estan subjectes a fallades associades a les tecnologies utilitzades. Per evitar que una fallada en un d'aquests



elements pugui tenir conseqüències per a la seguretat, s'implementen sistemes redundants, és a dir, sistemes duplicats o triplicats, de forma que es pugui detectar i suplir l'element defectuós sense que quedi afectat el funcionament de la instal·lació. La redundància va acompanyada de separació física, per evitar, per exemple, que un incendi que pogués provocar una fallada afecti també l'element redundat.

La utilització de les tècniques de redundància permet que les instal·lacions esdevinguin tolerants a fallades, és a dir, que la fallada d'un element es converteixi en una incidència que, tot i que requereix una acció de manteniment, permet seguir operant a ple rendiment. Per altra part, també són utilitzades tècniques de manteniment predictiu, que consisteixen en la realització d'operacions de manteniment abans que es produeixi una fallada, ja sigui perquè el seguiment dels seus paràmetres de funcionament evidencia una degradació, o perquè es consideri que el seu temps de vida ja no permet garantir el seu bon funcionament.

D'aquesta manera s'aconsegueix un alt nivell de seguretat que es pot quantificar amb el paràmetre "temps mitjà entre fallades". S'estima que en una central nuclear la probabilitat d'una fallada d'efectes greus o molt greus es pot produir en un interval de 10.000 anys. Aquesta alta fiabilitat, que aparentment sembla prou elevada, es veu globalment més reduïda: com que hi ha en funcionament 440 centrals, la probabilitat en termes estadístics que en alguna d'elles s'hi produeixi un accident greu és de 10.000/440 anys, és a dir, menys de 23 anys, sense tenir en compte una possible acció terrorista. Aquesta situació és actualment motiu d'estudi i planificació per introduir noves mesures de seguretat per fer front a possibles atemptats, com el de les Torres Bessones el 2001.

### **Accidents, tipus i nivell d'incidència**

Els accidents que es poden produir en les centrals nuclears poden tenir conseqüències molt diverses, que es classifiquen en una escala del 0 al 7, definida per la l'Agència Internacional d'Energia Atòmica el 1990. En aquesta escala, els nivells de l'1 al 3 es consideren incidències, i des del nivell 4 (sense conseqüències a l'exterior de la central) fins al nivell 7, es consideren accidents (on el nivell 7 són els accidents més greus).

L'incident més rellevant produït en una central nuclear a Catalunya es va produir a la central de Vandellòs el 1989, un incident que va ser classificat de nivell 3. Tot i les estrictes mesures de seguretat de què disposen les centrals nuclears, ja s'han produït en altres indrets diversos accidents nuclears greus, i alguns d'ells amb grans danys humans, com els de Mayak, a Rússia, el 1957 i posteriorment el 1967; els de Windscale a Anglaterra, el 1957, i el de Txernòbil, el 1968, a Ucraïna. Els accidents de Three Mile Island, als Estats Units el 1979, i especialment el més recent de Fukushima, al Japó, han provocat un elevat nombre de desplaçats, uns grans danys materials i una gran alarma social.

A l'annex IV s'aporta més informació sobre les causes i els efectes d'aquests accidents.

### **Lliçons derivades d'accidents**

D'entre aquests accidents, el de conseqüències més greus va ser el de Txernòbil, tant per la virulència de l'explosió com pels seus devastadors efectes sobre les persones i l'entorn. Després d'aquest accident hi va haver el convenciment que un altre accident així ja no seria possible, perquè es van incrementar les mesures de seguretat introduïdes en els anys posteriors i perquè es va implementar un major rigor en la gestió del seu funcionament.

Però l'atemptat de Nova York del 2001 va obligar a replantejar també les condicions de seguretat de les centrals nuclears, per fer front a possibles atacs terroristes d'aquest estil, una possibilitat que no havia estat contemplada anteriorment. L'accident de Fukushima també ha obligat a replantejar les condicions de seguretat de les centrals actualment en funcionament davant de grans catàstrofes naturals. En aquest accident, tot i la intensitat del terratrèmol, el moviment sísmic no va provocar danys en cap de les centrals nuclears de la zona, sinó que va ser el tsunami posterior el que va provocar el desastre, perquè va destruir unes instal·lacions auxiliars, fet que s'hagués pogut evitar sense cap dificultat tècnica si s'hagués previst el fenomen.

Com a conseqüència d'aquest accident, la UE va demanar als països membres la realització de proves d'estrès als 143 reactors existents. En el cas de les centrals catalanes, així com les altres de l'estat espanyol, els resultats preliminars publicats el novembre del 2011 donen una valoració positiva, però "millorable", recomanant "augmentar la fortalesa de les centrals" atès que s'han detectat alguns elements en que és possible un marge de millora per afrontar possibles inundacions, terratrèmols, talls d'electricitat o incendis. Els resultats definitius està previst que siguin donats a l'abril del 2012.

Aquest accident ha fet replantejar la planificació energètica en alguns països: Alemanya ha renunciat a l'ús d'aquesta tecnologia i ha optat pel progressiu tancament i posterior desmantellament de les seves centrals.

### **La situació sísmica a Catalunya**

La US NRC ha definit les característiques geològiques que han de tenir les falles perquè siguin considerades capaces de produir terratrèmols de magnitud suficient per afectar la seguretat de les instal·lacions nuclears. A part de la sismicitat actual i històrica, cal considerar la història sísmica de les falles dels últims 500.000 anys. Falles sense sismicitat actual ni enregistrada en temps històrics poden ser capaces de produir grans terratrèmols. Les falles dels voltants de les centrals nuclears catalanes, que per les seves dimensions podrien provocar grans terratrèmols, s'agrupen en:

- Falles capaces, anomenades així les falles que compleixen els criteris de la US NRC.
- Falles que, si bé no s'han demostrat capaces en el sentit de la US NRC, presenten característiques sísmiques i geològiques que fa que s'hi hagin de considerar hipotèticament.
- Falles que no mostren cap indicati d'activitat.

A la figura 14 es mostra el mapa de les falles a la zona costera de la península Ibèrica.

### **Principals falles properes a les centrals nuclears de Catalunya**

La **CN Vandellòs** es troba sobre la falla del Camp. És una falla sense sismicitat (ni històrica ni instrumental) associada. Això no obstant, s'ha demostrat que és una falla que ha produït terratrèmols d'una magnitud de 6,7+0,5 i que és capaç de produir-ne en el futur. Si trenqués tota la falla (40 km), el terratrèmol produït s'acostaria a una magnitud de 7. És una falla capaç en el sentit de la US NRC. (Proyecto DATACIÓN, UB-CSNENRESA). Aquestes i altres dades són conegudes per l'empresa explotadora i pel CSN, que és qui va promoure'n l'estudi.

No hi ha cap estudi del comportament sísmològic anterior al registre històric d'altres falles; només s'ha publicat una aproximació als paràmetres sísmics per bona part les falles hipotèticament capaces. De tota manera, el risc màxim per a la CN de Vandellòs pràcticament segur que vindria de la falla del Camp.

La CN d'Ascó podria veure's afectada també per l'activitat de la falla del Baix Ebre que, per les seves dimensions, podria produir terratrèmols de magnituds semblants a les de la falla del Camp.

### Tsunamis

Les modelitzacions de tsunamis publicades mostren que no hi ha risc per a la CN de Vandellòs. Cal tenir present, però, que només s'han tingut en compte les falles de la costa del nord d'Àfrica i del sud est de la península Ibèrica com a fonts dels tsunamis.

Caldria modelitzar els tsunamis que podrien produir les falles capaces o hipotèticament capaces de produir grans terratrèmols situades al mar, just davant de la costa catalana i valenciana. Amb les dades que hi ha es poden fer estimacions raonables de les magnituds possibles i dels desplaçaments del fons marí, i a partir d'aquí modelitzar els hipotètics tsunamis.

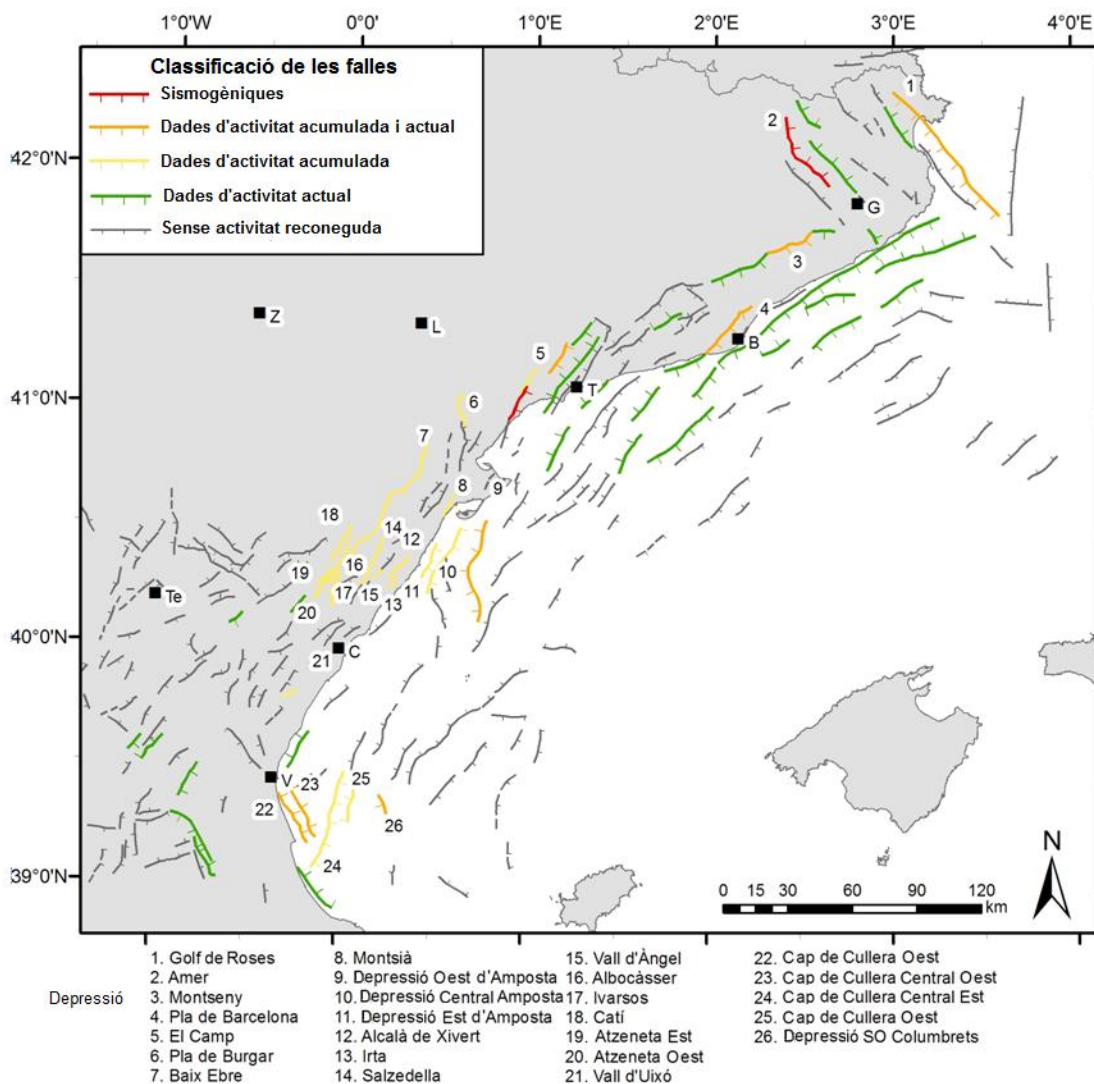


Fig. 14. Mapa de les falles a la zona costera de la península Ibèrica

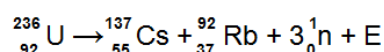
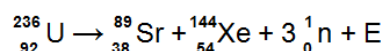
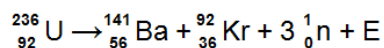
## 6. Els residus radioactius

El combustible nuclear està constituït pel que s'anomena material fèrtil, que és el capaç de produir fissions nuclears. Com a material fèrtil s'utilitza l'urani o l'òxid d'urani, o també una mescla de diferents òxids (MOX) composta per òxid d'urani natural o reprocessat i òxid de plutoni procedent del reprocessat del combustible cremat.

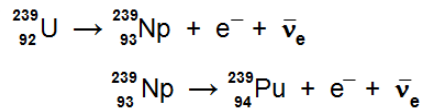
En tot cas, els residus nuclears són el resultat de les fissions de l'urani natural que està compost bàsicament per tres isòtops (el mateix component químic, però amb diferent nombre de neutrons al seu nucli). L'urani natural està compost per un 93% d'urani 238, un 0,7% d'urani 235, que és el fissible, i un 0,006% d'urani 234. Per captació de neutrons, l'urani 238, el més abundant, pot donar lloc a plutoni 239 i aquest, per successives captacions de neutrons, es reduirà fins a un 40% i produirà fins a un 32% de plutoni 240, un 18% de plutoni 241 i un 8% de plutoni 242. El plutoni 239 format es consumeix com a combustible, perquè es comporta com l'urani 235. Per això, tot i ser urani el combustible utilitzat, els reactors nuclears operen per fissió de l'urani i el plutoni, i en el combustible ja utilitzat quedarà al voltant d'un 1% de plutoni i, d'aquest, la major part és plutoni 239, el temps de semidesintegració del qual és de 24.110 anys. Els diferents residus generats són isòtops radioactius de diferents nivells d'activitat:

- Es consideren residus de baixa activitat (RBA) els que tenen un temps de semidesintegració inferior a 30 anys i uns nivells inferiors a  $4 \cdot 10^9$  Bq/t d'activitat específica alfa (radioactivitat alfa per cada tona de residu) i menys de  $12 \cdot 10^9$  Bq/t d'activitat específica de radioactivitat beta i gamma.
- Es consideren residus de mitjana activitat (RMA) els que tenen un temps de semidesintegració inferior a 30 anys, que pràcticament desapareixen en 300 anys i que tenen uns nivells d'activitat superiors.
- Es consideren residus d'alta activitat (RAA) els que tenen un temps de semidesintegració superior a 30 anys i, per tant, duren més de 300 anys, generen calor, i la seva activitat específica és elevada. La major part dels residus de les centrals nuclears són d'aquest tipus.

Amb el cremat per fissió del combustible en les centrals nuclears, els nuclis pesants de l'urani 235, en incorporar un neutró es converteixen transitòriament en urani 236 que, en dividir-se, dona lloc a dos nuclis més lleugers, i es produeixen combinacions de la forma:



amb unes proporcions que s'expressen en les gràfiques de la figura 15. El bari 141 format és un isòtop radioactiu de vida molt curta, el seu temps de semidesintegració és de 18 minuts. L'estronci 89 té un temps de semidesintegració de 50 dies i el del cesi 137, de 30 anys. Per altra part, l'urani 238 pot absorbir un neutró, donant transitòriament urani 239, que és inestable i es pot convertir en neptú 239 que, al seu torn, es converteix en plutoni 239:



El plutoni 239 és un isòtop radioactiu de temps de semidesintegració de 24.110 anys. Dels isòtops del iode obtinguts com a subproducte de la fissió de l'urani i el plutoni, el iode 131, que té un temps de semidesintegració de 8 dies, és el més cancerigen i el responsable de gran part de la contaminació provocada pel desastre de Txernòbil.

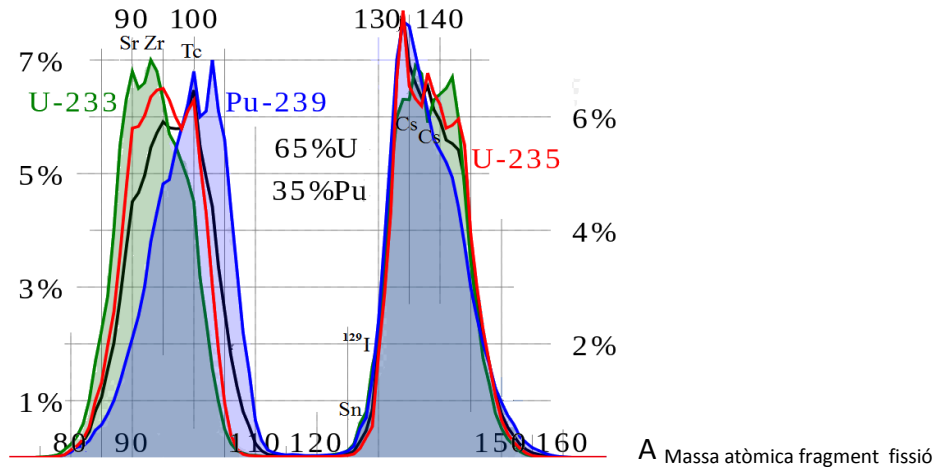


Fig. 15. Proporcions dels diferents isòtops radioactius resultants de la fissió nuclear

A Espanya la gestió dels residus radioactius és realitzada per ENRESA, que prepara el Pla Nacional de Residus Radioactius i el trameta al Ministeri d'Indústria, que el presenta al Govern per a la seva aprovació. Anualment es produeixen 2.000 tones de residus radioactius, dels quals la major part són de baixa i mitjana activitat, procedents d'aplicacions industrials i radiomèdiques, i 160 tones procedeixen de combustible irradiat de les centrals.

El Pla Nacional vigent preveu gestionar 12.800 m<sup>3</sup> de residus de combustible irradiat i 176.300 m<sup>3</sup> de residus de baixa i mitjana activitat fins l'any 2070, amb un cost de 13.000 milions d'euros. Aquesta quantitat és abonada per la indústria productora dels residus. Els residus de baixa i mitjana activitat són emmagatzemats en una planta destinada exclusivament a aquesta finalitat a El Cabril (Còrdova).

Des de 2002, existeix a l'emplaçament de la central nuclear de Trillo (Guadalajara) un Magatzem Temporal Individualitzat (MTI), basat en contenidors metàl·lics de doble ús (transport i emmagatzematge), amb exclusivitat per al combustible gastat d'aquesta central.

El combustible irradiat serà dipositat temporalment (60 anys) al Magatzem Temporal Centralitzat (MTC) que està previst construir properament.

### Tècniques de separació i transmutació de residus radioactius

L'objectiu d'aquestes tècniques és poder minimitzar l'inventari radio tòxic dels residus d'alta activitat i, per tant, el seu risc radiològic a llarg termini. Per complir l'objectiu que es pretén

amb aquestes tècniques és necessari separar alguns radionúclids de llarg període de semidesintegració i alta radio toxicitat, com són principalment el plutoni ja recuperat en el reprocés actual i els anomenats actínids minoritaris (neptuni, americi i curi). També s'ha proposat separar alguns productes de fissió de vida llarga com el tecneci, el iode, el cesi i el zirconi.

L'objectiu de la transmutació és la transformació de certs radionúclids de vida llarga en altres de vida més curta o isòtops estables, és a dir, no radioactius. Les operacions de transmutació es poden realitzar per reaccions nuclears, especialment utilitzant neutrons d'alta energia i amb un flux neutrònic elevat. Per aquest motiu, els estudis s'estan orientant als reactors ràpids i als sistemes accionats per acceleradors de partícules.

Finalment, sempre quedarà una part de residus que caldrà portar al Magatzem Geològic Profund.

### **El Magatzem Temporal Centralitzat (MTC)**

A Espanya hi ha 8 centrals nuclears en operació i dos en procés de desmantellament. El combustible irradiat d'aquestes 10 instal·lacions és emmagatzemat a la pròpia central o bé s'ha transportat a França o al Regne Unit, com és el cas de la CN de Vandellòs I o de la CN de Garoña.

A Catalunya, les tres centrals en operació (Ascó I, Ascó II, i Vandellòs II), tenen el combustible irradiat a les piscines de combustible de la pròpia central nuclear, amb un sistema actiu de refrigeració. A més, a Catalunya hi ha la central desmantellada de Vandellòs I, i el seu combustible irradiat és a França, esperant tenir disponible l'opció per a l'emmagatzematge. El cost actual de dipositar a França els residus de la CN de Vandellòs I, pel fet de no disposar d'un magatzem adient, és de 60.000 €/dia.

Davant d'aquesta situació, el 2004 es plantejà ordenar aquesta realitat i construir un Magatzem Temporal Centralitzat (MTC) per a tot el combustible irradiat de les centrals nuclears espanyoles. El Congrés dels Diputats aprovà aquesta mesura per unanimitat, en considerar més segur tenir una única instal·lació dissenyada específicament per a emmagatzemar el combustible irradiat, que els deu magatzems individualitzats utilitzats actualment. Posteriorment, es va obrir un procés d'informació pública sobre aquesta instal·lació per a tots els municipis interessats a acollir-la. Es van organitzar conferències i visites al MTC actualment operatiu a Holanda i es va obrir la convocatòria perquè es presentessin municipis com a candidats per hostatjar aquesta instal·lació. El MTC porta associat un centre tecnològic per fer recerca al voltant del combustible nuclear i un parc empresarial. Es van presentar nou candidatures, entre elles, la d'Ascó, que van ser acceptades pel ministeri. La candidatura d'Ascó va ser de les més ben valorades tècnicament, ja que presentava molts avantatges, com la proximitat a les centrals nuclears i la proximitat a les xarxes de comunicació, tant per autopista com per ferrocarril, però el Parlament s'hi havia pronunciat en contra. La decisió no ha estat presa fins després del canvi de govern al Congrés dels Diputats, on, finalment, el 30 de desembre va ser elegit el municipi de Villar de Cañas (Conca), tot i que tècnicament no era l'opció més valorada.

La instal·lació proposada disposa d'un sistema passiu de refrigeració per aire, de seguretat intrínseca, que permet extreure la calor que genera el combustible irradiat. Els mètodes actius de refrigeració són els emprats a les piscines de combustible irradiat de les centrals nuclears.

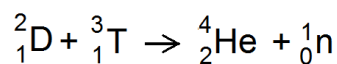
La construcció del MTC implicarà però, que s'hi transporti el combustible irradiat de la resta de les centrals nuclears. Malgrat això, aquesta opció es considera més segura que el fet de tenir deu magatzems temporals i, per altra part, el transport realitzat mitjançant contenidors blindats a la radioactivitat, tant per carretera com per tren, no ha patit mai cap incident en tota l'experiència internacional.

Aquest magatzem es diu temporal perquè té previst emmagatzemar el combustible irradiat per un període de 60 anys. Un cop passat aquest temps, el combustible pot seguir diferents camins: ésser reutilitzat a les centrals de quarta generació; continuar un procés de separació o transmutació; ser reprocessat i posteriorment utilitzat a les centrals nuclears existents, o procedir emmagatzemar-lo definitivament. Bàsicament, les opcions que es plantegen al terme d'aquest període estan orientades a treure més energia d'aquest combustible i fer-ne un aprofitament més intensiu. Actualment el combustible és una barreja d'urani 238 (96%) i urani 235 (4%) del qual solament s'aprofita l'urani 235, que representa el 4%.

## 7. L'energia nuclear de fusió

La fusió nuclear és el procés de reacció nuclear d'integració del nucli de dos àtoms lleugers, per formar-ne un de més pesat. En els àtoms lleugers l'energia d'empaquetament de dos àtoms és superior a la de l'àtom resultant, per la qual cosa amb aquest procés es perd una petita part de la massa, que es transforma en una gran quantitat d'energia. Aquesta reacció nuclear és la que es produeix espontàniament al sol, a causa de la gran força gravitatòria de compressió dels nuclis d'hidrogen i l'elevada temperatura generada, cosa que produeix per fusió heli.

La reacció nuclear que es produeix és:



en què el deuteri (D) és l'isòtop de l'hidrogen de dos neutrons i el triti (T) és l'isòtop de tres neutrons. El deuteri és un dels isòtops naturals de l'hidrogen, que es troba en una proporció de 0,0312% (en massa) provinent del Big-Bang fa 13,7 milions d'anys, per la qual cosa es pot extreure de l'aigua del mar. El triti es forma de manera natural per efecte dels raigs còsmics sobre els àtoms de nitrogen de l'atmosfera, i produeix carboni 12 i triti 3, però com que és de període de semidesintegració curt (12,3 anys), no s'acumula a l'atmosfera i es pot obtenir per bombardeig de neutrons.

Els reactors nuclears de fusió tenen per objectiu reproduir aquesta reacció, la reacció D-T, que té l'avantatge respecte a la fissió nuclear que no produeix residus radioactius directes i, per tant, seria una font d'energia neta i sostenible, i la disponibilitat d'hidrogen és inesgotable. Per altra part, seria una tecnologia segura, ja que la producció d'energia solament es perllonga 10 segons després que s'atura la reacció.

Els inconvenients d'aquesta tecnologia són, per una part, la complexitat tecnològica que suposa aconseguir les altes temperatures necessàries per produir la fusió dels àtoms, cosa que requereix utilitzar un 20% de l'energia produïda i, per altra part, la radioactivitat induïda pels neutrons obtinguts per la reacció, que poden convertir en isòtops radioactius els materials circumdants del reactor. Per evitar aquest inconvenient, cal preveure l'ús de materials que produeixen isòtops estables davant l'emissió de neutrons.

Hi ha dues tecnologies de reactors de fusió, la de confinament magnètic i la de confinament inercial. Els primers reactors es basen en la utilització de camps magnètics per confinar els plasmes; els segons es basen en l'ús de diversos raigs làser o feixos de partícules sobre una microesfera on es troba el combustible, de manera que s'aconsegueix un confinament inercial mitjançant les ones de xoc electromagnètiques.

Els reactors de fusió per confinament magnètic es divideixen en dos tipus: els *Tokamak* i els *Stellarators*.

La tecnologia Tokamak va ser desenvolupada a Rússia a la dècada dels anys cinquanta i es basa en la creació d'un camp magnètic toroidal que confina el plasma en rotació al seu interior. La tecnologia Stellarator també aconseguix el confinament dins d'un camp magnètic



toroïdal, però es diferencia de l'anterior en la forma de crear el camp magnètic, que es fa a base d'utilitzar bobines helicoïdals. Sembla que avui el reactor més avançat és el Tokamak. L'ITER és un reactor experimental, l'objectiu estratègic del qual consisteix a resoldre de forma integrada tots els problemes de viabilitat necessaris per a dissenyar el reactor i establir-ne el correcte funcionament. Una etapa posterior consistiria a disposar d'una central elèctrica de fusió en connexió, de demostració (DEMO).

El projecte ITER —com s'acaba d'esmentar, reactor experimental de confinament magnètic de tipus Tokamak—, és desenvolupat per un consorci en què participen Europa, els Estats Units, la Xina, Rússia, l'Índia, el Japó i Corea, països que representen més del 50% de la població mundial. El proppassat 24 de maig de 2006 es va signar el tractat per a la construcció de l'ITER a Cadarache (França), que porta associada la instal·lació de l'Agència Europea de l'ITER a Barcelona, en concret, al Campus del Besòs, anomenada *Fusion For Energy*, finançada per la Unió Europea i en la qual treballen unes 240 persones.

Està previst que el reactor ITER entri en funcionament el 2019. Tindrà una potència tèrmica de 500 MWt, tindrà un factor d'amplificació de 10, és a dir, consumirà uns 50 MW d'energia i produirà uns 500 MW d'energia tèrmica.

### **Estat de la recerca**

Aquesta tecnologia ha estat objecte de recerca en els últims cinquanta anys pels grans avantatges que suposaria disposar d'una font d'energia neta, segura, sense producció de gasos d'efecte hivernacle i amb una disponibilitat de combustible il·limitada. Fruit d'aquests treballs de recerca, recentment s'han construït al món diversos reactors experimentals de fusió, que, en general utilitzen bobines superconductores per crear els camps magnètics. La Xina, el 2006, va posar en funcionament un Tokamak superconductor anomenat EAST. El 2008, Corea del Sud va posar en funcionament un Tokamak superconductor anomenat KSTART. Alemanya està finalitzant la construcció d'un Stellarator superconductor anomenat W7-X. I a Espanya hi ha un reactor de fusió nuclear experimental del tipus Stellarator, situat a Madrid, on treballen unes 120 persones.

Actualment, el rècord de potència de fusió produïda, el té el reactor europeu JET, amb 16 MW de potència de fusió. Després ve el resultat del reactor dels Estats Units, el TFTR, amb 10 MW de potència de fusió.

## 8. Comparativa entre les fonts d'energia

### Aspectes econòmics, estratègics i mediambientals

Les diferents fonts d'energia utilitzades actualment presenten característiques molt diferents quant a compatibilitat mediambiental i costos. De fet, ambdós paràmetres (cost i respecte pel medi ambient) queden estretament lligats si en la valoració del cost s'inclou la repercussió d'aspectes mediambientals tals com l'ocupació de territori útil per a altres activitats, el consum de recursos no renovables o l'emissió de contaminants o de gasos que contribueixen a l'efecte hivernacle i, en conseqüència, a l'escalfament global.

La recerca científica ha relacionat de manera molt directa el clima, els aspectes mediambientals i l'energia. S'ha comprovat, per exemple, que la temperatura i la concentració de CO<sub>2</sub> han exhibit una correlació gairebé absoluta en els darrers 400.000 anys. En conseqüència, hi ha una preocupació creixent envers els efectes de la producció i el consum d'energia sobre l'estabilitat climàtica del planeta. Els darrers informes de la comunitat científica i en particular de l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), entre d'altres organismes, proposen accions específiques per tal de mitigar aquests efectes. L'informe Stern sobre els efectes climàtics en l'economia de l'escalfament global, elaborat a instàncies del govern del Regne Unit, s'està tenint en compte en les estratègies i plans d'R+D d'alguns països desenvolupats i en les negociacions de preparació de l'escenari post-Kyoto 2012. Diversos estudis indiquen que l'economia mundial ha excedit el límit de la sostenibilitat a nivell planetari, i és urgent actuar amb millores tecnològiques, entre d'altres mesures, per limitar i reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle.

Per assolir els objectius del protocol de Kyoto, la Unió Europea s'ha formulat l'objectiu 20-20, que consisteix a obtenir un 20% de producció energètica mitjançant fonts renovables cap a l'any 2020. El G8 ha proposat perllongar aquest objectiu a un 50-50, consistent en un 50% d'energia basada en fonts renovables cap a l'any 2050, a tot el món. Malauradament, alguns governs (especialment el dels Estats Units) s'han oposat a aquesta fita perquè la consideren inviable.

Segons les estadístiques de la *International Energy Agency* (IRA), l'any 2008 (el darrer per al qual aquesta organització ofereix dades globals), la distribució de la producció d'energia en el planeta es distribuïa de la següent manera:

- Els combustibles fòssils (incloent-hi el petroli, el gas i el carbó) aportaven el 80,3%
- Els combustibles renovables (l'lenya, residus i altres), el 10%
- L'energia nuclear representava el 5,8%
- La hidroelèctrica, el 2,2%
- Altres fonts (principalment renovables diferents a la hidroelèctrica) proporcionaven el 0,7%.

En el conjunt dels països de l'OCDE, amb estadístiques de l'any 2009, els combustibles fòssils (incloent-hi el petroli, el gas i el carbó) aportaven el 81,1%; els combustibles renovables (l'lenya i residus), el 4,4%; l'energia nuclear, l'11,3%; la hidroelèctrica, el 2,1%, i altres fonts, un 1,1%.

Encara que darrerament el percentatge de combustibles fòssils ha minvat en termes relatius, l'ús d'energies renovables és encara extremadament reduït en relació amb el total. En els

darrers tres decennis, la reducció relativa de la producció d'energia a través de combustibles fòssils ha estat principalment possible gràcies a l'augment experimentat per l'energia nuclear. En termes absoluts, la producció d'energia mitjançant combustibles fòssils no ha parat de créixer.

L'any 2008 el consum de combustibles fòssils va alliberar a l'atmosfera un total de 29.381 milions de tones de CO<sub>2</sub>. La major contribució a l'alliberament de CO<sub>2</sub> la va produir el consum de carbó (42,9%). El petroli i el gas també hi van contribuir de manera molt significativa (en un 36,8% i 20%, respectivament). L'any 1973 aquesta mateixa quantitat havia estat de 15.643 milions de tones, de manera que l'augment experimentat entre aquests anys és proper a un 100%.

Els apartats següents ofereixen una breu anàlisi de les diferents formes d'energia actualment en explotació i s'hi presta certa atenció als aspectes mediambientals, tècnics i econòmics. Cal notar que una comparativa directa entre els preus de les diferents fonts d'energia és difícil: d'una banda, perquè les diverses fonts consultades, corresponents a diferents organismes internacionals, ofereixen estimacions estadístiques sensiblement discordants; d'altra banda, avui es produeixen canvis molt substancials a causa del continuat encariment d'algunes fonts (molt particularment, el petroli), mentre que l'avenç tecnològic està permetent un abaratiment substancial d'algunes energies renovables (especialment de les energies eòlica i fotovoltaica).

### **Energia basada en combustibles fòssils**

La major part de l'energia emprada actualment en el món s'obté de combustibles fòssils. Aquesta energia s'empra per a tot tipus d'usos, però en destaca l'aplicació massiva per al transport, per a la producció d'electricitat i per a la climatització dels edificis. Els principals combustibles fòssils són el petroli, el carbó i el gas natural. Tots ells són recursos no renovables. L'any 2008 l'*International Energy Agency* (IEA) va quantificar la contribució del petroli a la producció energètica total en un 36%, la del carbó en un 27,4% i la del gas natural en un 23%, de manera que l'energia basada en combustibles fòssils representava un 80,43% del total.

La *US Energy Information Administration* preveu que el consum de petroli descendirà només lleugerament, en termes relatius, cap a l'any 2035, quan arribarà a representar un 29% del total de les fonts energètiques. Per contra, l'existència de reserves de carbó, molt importants en potències econòmiques emergents com la Xina i l'Índia, fa preveure un creixement molt significatiu de l'energia basada en el carbó.

La crema de combustibles fòssils produeix al voltant de 30.000 milions de tones de diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>) anuals. S'estima que els processos naturals només poden absorbir al voltant d'un terç d'aquesta quantitat, de manera que cada any es produeix un gran augment de massa de CO<sub>2</sub> atmosfèric. El CO<sub>2</sub> és un dels principals gasos que contribueixen a l'efecte hivernacle i, per tant, a l'escalfament del planeta. La combustió d'aquestes substàncies també genera àcids sulfúrics, carbònics i nítrics, que alhora produeixen pluja àcida. La pluja àcida causa un dany considerable tant en els espais naturals, on malmet la vegetació, com en espais urbans, on genera problemes de conservació dels edificis i del patrimoni cultural.

L'augment percentual del consum de petroli s'ha vist amortit pel continu augment del preu al llarg dels darrers anys. El preu del petroli va augmentar l'any 2010 com a resultat de l'augment de la demanda, motivada per signes de recuperació econòmica, i d'un abastiment insuficient.

Els preus encara van augmentar més a finals de 2010 i al llarg de 2011 a causa dels problemes econòmics i socials experimentats per alguns països productors africans i de l'Orient Mitjà. La situació actual és incerta a causa de l'embat de la crisi econòmica. S'espera, tanmateix, que el preu continuï augmentant de manera molt important.

L'ús de combustibles fòssils, i molt especialment del petroli, presenta alhora un gran cost social i ambiental en el cicle inicial d'extracció i transport. En general, aquests costos no queden reflectits en el preu final del producte, ja que normalment no són les companyies responsables de l'extracció les que fan front a l'impacte produït. Si aquests costos s'incloguessin en el preu final de l'energia, els preus augmentarien fins a valors molt superiors.

Una de les fonts de cost addicional rau en la destrucció ecològica en zones productores. Els abocaments produïts durant les guerres d'Iran-Irak (1980-1988) i la Primera i Segona guerres del Golf (1991, 2003) han estat desastres ecològics de primera magnitud. Altres grans desastres ecològics s'han esdevingut als països productors d'Àsia, Àfrica, Amèrica del Sud i Amèrica del Nord. Entre els desastres ecològics més recents cal esmentar l'abocament produït per l'enfonsament del vaixell Erika a Bretanya (1999, 35.000 tones), el vaixell Prestige davant de les costes gallegues (2002, 77.000 tones) i per l'accident d'una columna d'extracció *off-shore* de *British Petroleum* al Golf de Mèxic (2010, més de 700.000 tones). Els efectes ecològics d'aquests desastres són de llarga durada. D'altra banda, cal tenir present que els abocaments accidentals que generen marees negres representen menys del 10% de l'abocament total de petroli al mar, i són molt importants els que es produeixen durant les operacions quotidianes de manteniment i transport per escorrentiu superficial.

Una segona font de cost, ja esmentada, rau en les emissions de gasos d'efecte hivernacle (principalment diòxid de carboni, metà i òxids de nitrogen). Aquest problema constitueix probablement el límit ecològic més gran per a l'ús de combustibles fòssils. Els successius informes del Grup Intergovernamental d'experts sobre Canvi Climàtic han estat molt importants en aquest sentit. Les projeccions de futur, realitzades a partir de sofisticats models matemàtics del clima, preveuen un augment de la temperatura mitjana de l'aire entre 2<sup>o</sup> i 4<sup>o</sup> a la darrera dècada del segle XXI, amb una reducció del 10 al 30% dels recursos hídrics a les regions seques de latitud mitjana (on se situa Catalunya), cosa que potencialment tindrà una forta afectació sobre el turisme hivernal i estival, sobre el potencial hidroelèctric i la productivitat agrícola. Es preveuen també problemes sanitaris associats a les onades de calor i un increment dels incendis forestals. Actualment, l'emissió de gasos d'efecte hivernacle es troba regulada pel protocol de Kyoto de 1997, avui signat i ratificat per 197 països (però no pels Estats Units), el qual ha de ser entès com una primera fase cap a un control més cabdal de les emissions. L'exigència establerta pel protocol de Kyoto estableix una reducció del 5,2% de les emissions dels països signants cap al 2012 respecte dels nivells de 1990. Aquesta reducció, però, es pot considerar molt insuficient en relació amb la gravetat del problema, a causa, entre altres motius, de la incorporació de potències econòmiques emergents i, molt especialment, de la Xina, com a països altament contaminants. Diversos encontres mundials, especialment la Cimera de Copenhaguen sobre el Canvi Climàtic de 2009, s'han presentat com a possibles oportunitats per a la renovació i l'extensió del protocol de Kyoto. Malauradament, no hi ha hagut un progrés veritable en aquest sentit. Més encara, i pel fet que qualsevol canvi exigeix la ratificació per part dels organismes legislatius de molts països abans de l'acabament del termini del protocol, es preveu que es produeixi un cert període mancat de regulació fins a la possible adopció d'un nou compromís o protocol.

Una manera d'atenuar els efectes derivats de l'emissió de gasos d'efecte hivernacle rau en la reconversió dels processos de combustió cap a tecnologies més netes. Actualment, cert esforç d'investigació es dirigeix cap al disseny de mètodes o processos menys contaminants i

eficients. En el cas de les centrals termoelèctriques de combustibles fòssils això s'ha aconseguit mitjançant l'ús de cicles combinats. Es treballa també en la recerca sobre tecnologies per a la separació del diòxid de carboni i l'emmagatzematge en cavitats geològiques o a l'oceà profund. Les centrals de cicle combinat, desenvolupades de manera intensiva durant els darrers anys, són instal·lacions capaces de generar energia elèctrica mitjançant la combustió de gas natural (i excepcionalment, de gasoil) mitjançant processos de rendiment energètic molt elevat. El rendiment alt és possible gràcies a la recuperació i l'aprofitament de l'energia tèrmica residual continguda en els gasos d'escapament de les turbines de gas a través de turbines complementàries de vapor. L'energia obtinguda d'aquestes centrals de cicle combinat és la que actualment resulta més econòmica, juntament amb l'eòlica.

Malgrat l'augment percentual de la producció energètica a partir de fonts alternatives, la humanitat romandrà dependent de combustibles fòssils encara durant les properes dècades. És, per tant, d'interès la recerca en processos de captura i emmagatzematge del CO<sub>2</sub> residual per tal de prevenir-ne l'emissió a l'atmosfera. Es proposa, per exemple, emmagatzemar el CO<sub>2</sub> capturat en dipòsits naturals de gran capacitat, com aqüífers salins profunds situats a més d'un quilòmetre de fondària. Amb el temps, aquest CO<sub>2</sub> reaccionaria amb els minerals de les formacions rocoses i precipitaria en estat sòlid en forma de minerals carbonatats. Tanmateix, aquestes possibilitats troben una forta limitació en l'escala formidable del problema, ateses les quantitats massives de CO<sub>2</sub> alliberades anualment a l'atmosfera.

Una segona possibilitat de millora rau en la producció de processos de combustió nets i eficients. Cal encara una gran inversió en recerca i desenvolupament per a assolir una tecnologia veritablement neta (encara que mai renovable) del carbó. Tanmateix, la Xina i els Estats Units, entre molts altres països, són posseïdors d'unes reserves molt importants i aposten fortament per aquesta opció. Es preveu que en el futur es desenvolupin sistemes de caire net i flexible que operaran a pressions considerablement més altes que les que actualment es produeixen a les centrals. La producció de centrals veritablement netes i eficients exigeix una comprensió suficient de la química i la física del comportament dels combustibles en règim de pressions molt altes. Alhora, aquesta comprensió exigeix nous desenvolupaments experimentals, teòrics i numèrics.

### **Energia nuclear de fissió**

L'energia nuclear (a la qual es dedica aquest informe) és l'energia produïda en reaccions en cadena de fissió nuclear controlada d'urani natural o enriquit. A les centrals nuclears, l'energia alliberada per l'esmentada reacció s'aprofita per a produir energia elèctrica. L'energia nuclear presenta el gran avantatge que no produeix gasos d'efecte hivernacle i, per tant, no contribueix a l'escalfament del planeta i al canvi climàtic. Tanmateix, no és una energia renovable i el seu esgotament pot produir-se en menys d'un segle al ritme de la producció actual. Els seus alts costos de construcció en dificulten la inversió. L'adopció de l'energia nuclear per part de diferents països demana estabilitat política per garantir la inversió i respectar els terminis d'operació que la fan viable econòmicament, i ha requerit sovint una forta voluntat política.

Les successives generacions de reactors nuclears exhibeixen progressos molt satisfactoris en els aspectes de la seguretat i la reducció dels temps de construcció i les inversions necessàries. Tanmateix, la gestió (emmagatzematge i transformació) dels residus nuclears d'alta activitat i llarga vida mitjana és encara un aspecte subjecte a una forta controvèrsia. La reducció de la vida i de l'activitat dels residus requereix encara d'una inversió econòmica i d'un esforç

científicotècnic important. Les tècniques de transmutació i de cremat *in situ* ofereixen possibilitats interessants en aquest sentit.

Les conseqüències del terratrèmol i del tsunami que van devastar el nord oest del Japó l'11 de març de 2011 i van incidir sobre els reactors de la central de Fukushima han introduït una gran incertesa i podrien tenir implicacions profundes per al futur de l'energia nuclear al món. Mig any després de la catàstrofe de Fukushima, encara s'ha d'esbrinar quin és l'abast del problema i quant de temps es trigaran a resoldre totes les incerteses.

### **Biomassa convencional i residus**

La combustió de llenya es presenta sovint com una energia renovable. Cal tenir en compte, però, que aquesta forma d'energia provoca una quantitat sensible de gasos amb efecte hivernacle. En el seu moment, aquests gasos van ser absorbits per la massa forestal, per la qual cosa l'emissió resultant pot ser considerada nul·la en un termini relativament curt. El caire renovable d'aquest tipus d'energia queda molt compromès si es considera, a escala global, l'alt impacte de la desforestació de grans zones. La desforestació es produeix actualment, de manera dramàtica, en països com el Brasil, Indonèsia o la regió del Sahel africà, entre d'altres. L'aprofitament de la massa residual de l'agricultura o la silvicultura, que no contribueix a la desforestació, ofereix potencials molt limitats a costos sensibles.

A Catalunya, la biomassa llenyosa representa un consum de 93,7 ktep (milers de tones equivalents de petroli). El Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015 preveu que cap a l'any 2015 l'energia derivada de la biomassa forestal i agrícola assoleixi uns 306,6 ktep (equivalent a un 11,3% del total de les renovables).

Actualment es disposa de tecnologia per a la conversió de residus de distint origen (i molt especialment, dels residus urbans) en energia calòrica i finalment en elèctrica. La conversió d'aquests residus en energia, malgrat que és factible, exigeix processos molt complexos a causa de la varietat de materials orgànics i de tot tipus continguts, la qual cosa n'encareix el cost. Encara que aquest tipus d'energia pugui ser considerada renovable, no és una energia plenament neta a causa de l'emissió de components químics que poden alterar les condicions naturals de l'atmosfera. Hi ha dos processos principals:

- La conversió termoquímica, que utilitza vegetals i residus orgànics per a produir calor per combustió, i
- La conversió biològica, que aprofita la calor produïda en la digestió de bacteris anaeròbics.

### **Biocombustibles**

Els biocombustibles són combustibles d'origen biològic obtinguts de manera renovable a partir de diferents tipus de cultius. La major part dels biocombustibles s'obtenen del sucre, del blat, del blat de moro o de llavors oleaginoses.

Els biocombustibles mereixen una atenció creixent a causa de l'augment del cost dels combustibles fòssils i la preocupació per l'emissió de gasos d'efecte hivernacle. Entre els principals tipus de biocombustibles hi ha el bioetanol i el biodièsel. En general, aquests combustibles s'obtenen aplicant diversos processos (com la fermentació) a quantitats molt importants de cultiu, per la qual cosa la producció exigeix una ocupació intensiva de terreny

cultivable. L'any 2010 la producció de biocombustibles a escala mundial va assolir 105.000 milions de litres, i va proporcionar el 2,7% del combustible emprat pel transport per carretera. La Unió Europea, amb el 53% de la producció mundial, és el principal productor de biodièsel. D'acord amb l'Agència Energètica Internacional, els biocombustibles tenen el potencial de produir més d'un quart de la demanda de combustibles per al transport cap a l'any 2050.

La sostenibilitat dels biocombustibles és molt discutible, perquè les grans extensions de terreny necessàries per a produir-los poden posar en perill la seguretat alimentària dels països productors, com ja s'ha observat en els casos del Brasil i Mèxic. A més, l'especulació dels mercats amb les matèries primeres emprades en la producció d'aquests biocombustibles ha tingut una repercussió mundial important en la puja del preu d'alguns cereals, la qual cosa ha redundat en l'augment de la insuficiència nutricional i la fam en diversos països.

L'ús de biomassa primària per a la producció d'energia elèctrica és objecte de controvèrsia en la mesura que ocupa terres cultivables que es podrien emprar per a la producció d'aliments. Tanmateix, es preveu que tecnologies futures, com la gasificació de la biomassa i la generació en cicle combinat, podrien augmentar-ne els rendiments i abaratir-ne els costos.

Determinats desenvolupaments futurs podrien solucionar alguns dels problemes més importants associats a l'ús dels biocombustibles. El desenvolupament dels anomenats biocombustibles de segona generació, basats en vegetals ligno-cel·lulòsics, evita l'ús de matèries primeres del sector agroalimentari, a diferència dels biocombustibles de primera generació (basats en cereals i oleaginoses). Alhora, el biogàs és ja actualment una tecnologia amb potencial allà on hi ha presència de residus biodegradables (abocadors, granges, plantes de purins de porc, indústria agroalimentària, estacions depuradores d'aigües residuals, etc.).

A Catalunya, el consum de biocombustibles va representar un 25,3 ktep l'any 2007, equivalent al 3,1% del consum total d'energies renovables. D'acord amb el Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015, en la seva versió inicial, l'any 2015 els biocombustibles haurien hagut de passar a representar el 25,6% del consum d'energies renovables gràcies, sobretot, al pes del biodièsel que es preveia que substituís el 15% del consum de gasoil d'automoció. La revisió del Pla feta l'any 2009 ha comportat una reducció substancial d'aquesta previsió (de 785 ktep a 348 ktep) a causa de canvis de regulacions en l'àmbit espanyol i a la Unió Europea. Els biocombustibles haurien d'aportar uns 657 Ktep al balanç energètic l'any 2015, i representar un 23,9% del total de les energies renovables.

## **Energia hidràulica**

L'energia hidràulica és l'energia que prové de l'aprofitament de l'energia mecànica de la caiguda de l'aigua. És una energia renovable d'especial importància per als països que disposen d'importants recursos hídrics.

La gran energia hidràulica, però, requereix grans embassaments, la construcció dels quals pot causar en algunes ocasions un cost social i ecològic molt superior al benefici de la producció elèctrica neta. En particular, la construcció de la presa de les Tres Gorges a la Xina i dels embassaments de la vall del Narmada a l'Índia han suposat el desplaçament de centenars de milers de camperols pobres de les seves terres.

L'*International Energy Outlook 2011* de l'*Energy Information Administration* dels Estats Units preveu que la producció d'energia hidroelèctrica (juntament amb altres fonts d'energia elèctrica de tipus renovable) augmentarà un 2,7% anual cap a l'any 2035, la qual cosa suposa

un creixement superior a qualsevol altra font de generació d'energia elèctrica. Es preveu que siguin la Xina i l'Índia els països que liderin el desenvolupament de capacitat de producció hidroelèctrica.

Entre les energies renovables, es preveu que la capacitat de producció de l'energia hidroelèctrica augmenti més, en termes absoluts, que qualsevol altra font renovable d'energia durant els propers decennis. Tanmateix, en termes relatius es preveu que la producció d'energia elèctrica a través de l'energia solar experimenti la velocitat de creixement més important, estimada en un 8,3% anual, seguida del 5,7% pel vent, el 3,7% per l'energia geotèrmica, el 2% per la hidroelèctrica i l'1,4% per altres fonts renovables.

L'energia hidràulica és actualment la principal font renovable d'energia a Catalunya. A 31 de desembre de l'any 2007 la potència elèctrica bruta instal·lada en forma d'energia hidràulica era de 2.360,6 MW, cosa que representava una producció bruta d'energia elèctrica de 3.576,4 GWh, equivalent a un 41,4% respecte a la producció elèctrica del conjunt de les energies renovables. L'energia hidroelèctrica, que tradicionalment ha estat la més important de les energies renovables a Catalunya, presenta actualment unes possibilitats de creixement molt limitades. No obstant això, aquesta font energètica hauria de contribuir, d'acord amb el Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015, amb 504,3 ktps (equivalent al 18,6% de les renovables) al consum d'energia devers l'any 2015.

## **Energia eòlica**

L'energia eòlica es basa en l'aprofitament de l'energia cinètica del vent per convertir-la en energia elèctrica o mecànica. El desenvolupament tècnic dels aerogeneradors terrestres i marítics ha permès d'estendre enormement el potencial d'aquesta forma d'energia. Tanmateix, no va ser fins la segona meitat dels anys noranta que l'energia eòlica va assolir la majoria d'edat amb l'aparició d'aerogeneradors de potència significativa alhora que l'encariment general de l'energia va fer econòmicament viables projectes de gran envergadura. L'energia eòlica constitueix una de les principals alternatives al consum de combustibles fòssils gràcies a la seva abundància i àmplia distribució, un cost raonable, un caire renovable i l'absència d'emissions de gasos d'efecte hivernacle. La quantitat total d'energia eòlica que es pot obtenir de manera econòmicament viable, prescindint del seu impacte, podria ser superior al consum energètic que actualment es realitza a través de totes les fonts d'energia possibles.

Actualment l'energia eòlica ha esdevingut econòmicament competitiva gràcies a la maduresa tecnològica assolida. El cost de l'energia actualment produïda en camps eòlics terrestres resulta comparable al cost de funcionament de les instal·lacions de generació d'energia elèctrica basades en combustibles fòssils. L'energia eòlica competeix amb les noves plantes de carbó i és més econòmica que les centrals nuclears més modernes. Aproximadament, l'energia produïda en un parc eòlic pot costar entre 4 i 5 cèntims d'euro per kilowatt i hora, mentre que l'energia produïda a les centrals nuclears costa entre 5 i 9 cèntims d'euro sense comptar la repercussió de despeses lligades al desmantellament de les plantes i emmagatzematge dels residus. Cal notar, però, que el preu de l'energia eòlica *off-shore* (instal·lada en aigües profundes) és encara comparativament elevat.

Una possible limitació de l'energia eòlica rau en la poca capacitat de les xarxes elèctriques convencionals per evacuar la producció. Aquest problema exigeix reconfigurar les xarxes en el sentit d'un model menys radial (on l'energia és produïda en uns pocs centres) i evolucionar cap a un model de producció més distribuïda. Una segona limitació es troba en la necessitat de



combinar l'eòlica amb altres formes d'energia (com gas natural o plantes de cicle combinat) per mantenir el proveïment quan el vent bufa a una velocitat insuficient. Malgrat això, avui l'energia eòlica és, després de la hidràulica, l'energia renovable amb participació més gran en el total de la producció.

A finals de l'any 2010 la potència instal·lada a nivell global s'estimava en 197 GW. L'energia eòlica té actualment la capacitat de generar 430 TWh anualment, la qual cosa representa el 2,5% de tota l'energia consumida. S'espera que cap a l'any 2013 aquesta proporció arribi fins al 3,35%, i fins al 8% el 2018. Durant els darrers cinc anys el creixement anual mitjà de les instal·lacions ha estat del 27,6%. Països com Dinamarca, Portugal, Espanya, Irlanda i Alemanya són capdavanters en la implantació d'aquest tipus d'energia.

Un parc eòlic pot consistir en desenes o centenars d'aerogeneradors connectats a una xarxa de transmissió de corrent elèctric. Aquests parcs s'implanten a terra (energia eòlica terrestre) o a mar (energia eòlica marítima). L'energia eòlica terrestre ha tingut un desenvolupament substancial des de mitjans dels anys noranta del segle XX. Com amb totes les energies renovables, el cost de generació varia substancialment amb la disponibilitat del recurs. A mesura que els millors emplaçaments són gradualment ocupats, el cost específic de l'energia generada en nous parcs augmenta en empitjorar la qualitat del recurs eòlic. La construcció d'aquests parcs pot tenir un sensible efecte sobre l'ocupació del territori i el paisatge. Malgrat això, l'energia eòlica té en general un impacte ecològic o mediambiental inferior a qualsevol altre tipus d'energia, incloent-hi les renovables. El terreny on s'instal·len els aerogeneradors pot seguir essent emprat per a una varietat d'usos, incloses l'agricultura i la ramaderia. Futurs desenvolupaments tecnològics en el disseny de les pales han de permetre la instal·lació d'aerogeneradors de més gran potència unitària alhora que més lleugers i silenciosos.

L'eòlica marina es troba actualment solament ben desenvolupada al mar del Nord, al Bàltic i a les costes britàniques. Tanmateix, es considera que l'energia eòlica marina manté un gran potencial a causa dels seus importants avantatges. D'una banda, la captació d'energia resulta més continuada pel fet que al mar el vent hi bufa d'una manera constant. D'altra banda, presenta un nul o molt reduït impacte paisatgístic i una nul·la ocupació d'espai terrestre útil.

Per contra, l'energia eòlica marina planteja reptes tecnològics més importants. En aigües poc profundes (fins a 50 m), la tecnologia és similar a la terrestre pel que fa als elements generadors, amb els costos addicionals motivats per la fonamentació en fons de mar, el transport de l'energia a terra i una logística més complexa de muntatge i manteniment. A Catalunya, l'empresa amb seu a Barcelona ALSTOM Wind S.L. (antiga Ecotècnia), filial de l'empresa francesa Alstom, treballa actualment en el disseny de molins eòlics marins de grans dimensions d'aquest tipus.

En aigües profundes, la possibilitat de fonamentar en el fons del mar resulta excessivament costosa i s'opta per altres solucions de tipus flotant. A causa del caire estratègic que té per a Catalunya, el cas dels aerogeneradors *off-shore* es tracta a continuació amb atenció especial. Cal notar que el litoral català presenta una plataforma continental molt estreta i un talús continental molt pronunciat, motiu pel qual una introducció realment productiva d'aerogeneradors hauria de basar-se principalment en solucions de tipus flotant.

L'experiència fonamental en relació amb estructures flotants prové de la indústria petrolífera. Amb tot, l'aplicació d'aquestes plataformes en torres eòliques ha d'adaptar-se a les peculiars característiques d'aquests elements en relació amb les dimensions i a les condicions de treball resistent. Els dissenys fonamentals es poden agrupar en tres grans tipus en funció del principi que proporciona l'estabilitat:

- Estabilitat per llast. L'estabilitat s'aconsegueix abaixant el centre de gravetat de l'estructura flotant de suport. El rang de profunditats a les quals poden ser instal·lades és quasi il·limitat, però necessiten una fondària mínima de l'ordre de 50 m a causa de les dimensions de la part submergida. El posicionament es manté mitjançant ancoratges en el fons marí. Estructures d'aquest tipus, de fins a 100 m de fondària en aigües de 200 m de profunditat, han estat construïdes al mar del Nord, a Noruega.
- Estabilitat per equilibri de flotació. L'estabilitat de les plataformes d'aquest tipus, anomenades semisubmergibles, s'aconsegueix gràcies a la flotació d'una estructura formada per diverses columnes de flotació unides entre sí mitjançant pontons. Es poden situar tant en aigües poc profundes com de gran profunditat. Actualment hi ha un programa per a la instal·lació de torres eòliques flotants semisubmergides davant de les costes portugueses. Com en el cas anterior, el posicionament requereix el fondeig al fons del mar mitjançant uns cables.
- Estabilitat per cables tensats. L'estabilitat s'aconsegueix mitjançant uns elements flotants en combinació amb una sèrie de cables tensats entre l'estructura i ancorats al fons marí. Hi ha un prototipus instal·lat l'any 2008 a 21 km de les costes del sud d'Itàlia.

Malgrat l'existència d'alguns prototipus relatius a les tres tècniques esmentades, cal encara desenvolupar una recerca significativa orientada a optimitzar-ne les tecnologies i abaratir-les. Aquesta recerca, que ha de combinar coneixements relatius a les enginyeries marítima, estructural i energètica, constitueix alhora una oportunitat per a un país com Catalunya, que podria trobar en aquest camp un espai important per a la innovació i la creació d'una tecnologia avançada pròpia.

La producció bruta d'energia elèctrica d'origen eòlic a Catalunya durant l'any 2007 va ser de 42,8 ktep, equivalent a l'1,1% de la producció bruta total d'energia elèctrica i el 5,8% de la producció d'origen renovable. Amb la implantació de nous parcs eòlics i la creació de parcs marins cal esperar que, en el futur, l'energia de tipus eòlic creixi de manera molt important. Cal notar que la potència instal·lada a Catalunya representa actualment poc més de l'1% del total de la potència eòlica de l'Estat espanyol. Les comunitats autònomes més destacades són Galícia, Castella-La Manxa, Castella i Lleó, Aragó, i Navarra. El Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015 ha establert un sostre eòlic terrestre, tenint en compte el potencial existent i les zones incompatibles amb l'energia eòlica per qüestions ambientals i de protecció del patrimoni cultural. Així s'ha estimat que s'assolirà una potència instal·lada de 3.500 MW l'any 2015, que suposarà una producció 698,4 ktep (equivalent al 25,8% del total de l'energia renovable produïda). El desenvolupament de l'energia eòlica marítima permetria, en un futur, superar molt àmpliament aquestes quantitats.

### **Energia solar tèrmica i fotovoltaica**

L'energia solar tèrmica consisteix en l'aprofitament directe, en forma d'escalfament o energia calorífica, de la radiació solar incident. S'aprofita la radiació solar per a escalfar un líquid que mitjançant un sistema intercanviador de calor pot emprar-se tant per a escalfar com per a refredar. La tecnologia de la generació solar termoelèctrica es troba en un estat de maduresa inferior al de l'energia eòlica. Com l'eòlica, l'energia solar tèrmica exigeix una ocupació important del territori per obtenir una explotació significativa, amb l'agreujant que l'ocupació no és compatible amb altres usos.

L'energia solar fotovoltaica aprofita la conversió fotovoltaica a través de l'efecte fotoelèctric, mitjançant el qual és possible la transformació directa de la radiació solar en energia elèctrica. L'energia es converteix directament en electricitat mitjançant un material semiconductor encabit en una cèl·lula solar. L'energia solar fotovoltaica és encara una energia cara malgrat l'alt nivell de desenvolupament tècnic assolit. La implantació és encara molt reduïda i es manté basada en importants ajuts públics. Des del punt de vista tecnològic, i malgrat els avenços experimentats, encara hi ha molt a fer fins a trobar solucions adequadament econòmiques i (quan s'utilitzen com a part dels edificis) estèticament acceptables. S'ha comprovat que l'augment de l'eficiència de les instal·lacions (en termes de capacitat per a captar energia) solament és possible a canvi d'un augment molt important dels costos. Des del punt de vista estètic, es treballa en el disseny de plaques integrades en finestres solars (que de fet ja es comercialitzen) i teules solars, així com en solucions més flexibles i lleugeres consistents en cèl·lules fotovoltaïques fabricades amb polímers orgànics conductors (en substitució de les plaques de silici més convencionals). L'augment del rendiment de les plaques solars, l'aplicació de nous materials i l'emergència de noves tecnologies fan esperar una reducció sensible de costos fins a uns nivells del voltant d'un terç dels actuals devers l'any 2020.

El *Código Técnico de la Edificación* obliga als edificis de nova construcció a incorporar una instal·lació solar tèrmica per cobrir part de les seves necessitats, les quals són funció de la demanda d'aigua calenta sanitària i de la zona climàtica on es troben.

Aquests desenvolupaments, però, troben serioses dificultats a causa dels costos implicats i de determinades contradiccions relacionades amb la planificació del procés d'implementació pràctica. Alemanya, amb tres vegades menys irradiació solar que Espanya, ha desenvolupat una política de suport constant i gradual a l'energia fotovoltaica, sense canvis en la regulació, que ha evitat dificultats als inversors i ha permès convertir el país en líder mundial en aquest camp, amb 7.203 MW de potència instal·lada. Segons l'*International Energy Agency* (IEA), l'Estat espanyol, amb 4.000 MW, és un dels països amb més potència fotovoltaica instal·lada. La producció bruta d'energia elèctrica d'origen fotovoltaic a Catalunya durant l'any 2007 va ser de 29,7 GWh. En aquest mateix any, a 31 de desembre, la potència elèctrica bruta instal·lada era de 34,4 MW.

El Pla de l'Energia de Catalunya reserva uns objectius ambiciosos per a l'energia solar. Per a l'energia solar tèrmica i termoelèctrica, l'objectiu és arribar a 307 ktpes (11,3% de l'energia renovable). Pel que fa a la fotovoltaica, l'objectiu és de 500 MW de potència instal·lats l'any 2015, amb les quals s'haurien de produir uns 57,9 ktep (2,13% de l'energia renovable).

### **Altres fonts d'energia renovable**

L'energia geotèrmica es basa en la captació i la conducció a la superfície de l'energia tèrmica generada i emmagatzemada a l'interior de la Terra. L'energia tèrmica de l'interior de la Terra es va originar durant la formació del planeta i durant els processos radioactius dels certs minerals. Actualment, aquesta font d'energia s'aprofita en diversos països, i arriba a produir uns 10.715 MW de potència elèctrica a nivell global. Una quantitat encara més important de potència calorífica obtinguda d'aquesta forma s'empra per al condicionament tèrmic (calefacció o refrigeració) d'edificis i té també altres aplicacions, com processos industrials, centrals de dessalinització i aplicacions per a l'agricultura. L'explotació de l'energia geotèrmica allibera gasos d'efecte hivernacle atrapats en el subsòl. Tanmateix, aquestes emissions són molt menors que les que generen els combustibles fòssils. L'ús d'aquesta forma d'energia es

troba limitat pel cost de les perforacions profundes que resulten necessàries durant les fases d'exploració i d'explotació.

L'oceà pot produir dos tipus d'energia: energia tèrmica, resultant de l'escalfament de l'aigua per part de la radiació solar, i energia mecànica, produïda per les onades i les mareas. Aquestes fonts d'energia poden ser transformades per a produir electricitat o bé energia tèrmica aprofitable. S'han proposat una varietat de tecnologies, la majoria de les quals es troba encara en fase de desenvolupament o demostració, i és encara necessari un esforç important en recerca i innovació. La major part de les tecnologies donen lloc a sortides d'energia variables i subjectes a diferents nivells de predictibilitat.

Pel que fa a la recerca en fusió nuclear, fins avui encara no s'ha aconseguit dissenyar reaccions de fusió que puguin ser utilitzades per a generar energia de forma útil. S'espera que amb el reactor nuclear de fusió ITER, actualment en construcció a Cadarache (França), en el marc d'un projecte internacional, sigui possible realitzar un gran avenç en el sentit de la possible explotació de l'ITER.

## 9. Fonts documentals

Totes les fonts en línia indicades han estat consultades amb data de setembre de 2010

Centre for Energy Policy and Technology –UKERC (<http://www3.imperial.ac.uk/icept>)

Climate Change Expert Group (CCXG) of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

([http://www.oecd.org/document/44/0,3746,en\\_2649\\_34361\\_1904108\\_1\\_1\\_1\\_1,00.html](http://www.oecd.org/document/44/0,3746,en_2649_34361_1904108_1_1_1_1,00.html))

Comisión Nacional de Energía (<http://www.cat.cne.es/cne/Home>)

Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento, 2006

(<http://www.codigotecnico.org/web>)

Comisión Nacional de la Energía (<http://www.cat.cne.es>)

International Energy Outlook 2011 – DOE/0484(2011). U.S Energy Information Administration, 2011 (<http://www.eia.gov>)

Key World Energy Statistics 2010. International Energy Agency- IEA, 2010 (<http://www.iea.org>)

Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 1997

(<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>)

Pla de l'Energia de Catalunya. Revisió de 2009. Generalitat de Catalunya, Departament d'Economia i Finances, 2009 ([http://www20.gencat.cat/docs/empresaiocupacio/16%20-%20Energia%20i%20Mines/Arxius/doc\\_67117973\\_1.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/empresaiocupacio/16%20-%20Energia%20i%20Mines/Arxius/doc_67117973_1.pdf))

Projecte ITER, 2010 (<http://www.iter.org>)

Revista *Ingeniería y Territorio*, números 82, *Energía*; 89, *Energía II*; i 90, *Energía III* (<http://www.ciccp.es/revistait>)

*Special Report on Renewable Energy Source and Climate Change Mitigation*. International Governmental Panel on Climate Change IPCC, Working Group III- Mitigation of Climate Change, 2011 (<http://www.ipcc.ch>)

*Stern Review on the Economics of Climate Change*, 2006

([http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.hm-treasury.gov.uk/independent\\_reviews/stern\\_review\\_economics\\_climate\\_change/sternreview\\_index.cfm](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm))

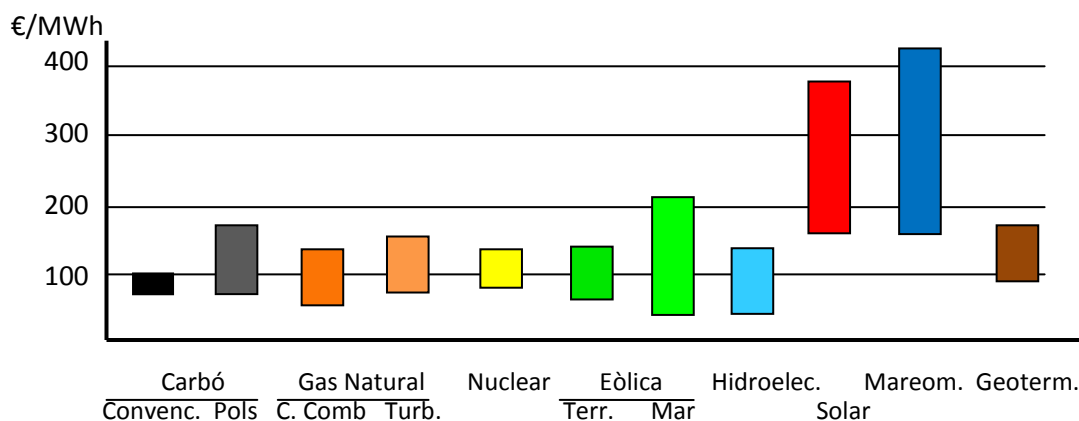
Normes regulatòries de la NCR (<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/>)

Costos indirectes de producció: (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/en35-external-costs-of-electricity-production-1>)

## 10. Principals qüestions plantejades sobre l'energia

### 1. Quins són els costos de producció de l'energia per cada tecnologia?

En la quantificació dels costos de producció dels diferents tipus d'energia, cal distingir entre els costos directes i els costos indirectes. Els costos directes són el resultat de repercutir en els KW produïts l'amortització dels costos de construcció i manteniment de la central i el cost del combustible utilitzat. Els costos indirectes tenen en compte molts altres factors, però alguns són difícilment quantificables, com poden ser el cost d'ocupació de les valls per les aigües de la presa per a la producció hidroelèctrica, el cost de l'emissió del CO<sub>2</sub> en el cas de les centrals tèrmiques o, en el cas de les centrals nuclears, el cost de l'emmagatzematge a llarg termini i el dels riscos. Les diferències de criteri en l'avaluació d'aquests costos i les diferències entre instal·lacions i països fa que es presentin aquestes discrepàncies entre les diferents fonts d'informació. La figura 16 mostra el marge de variació estimat del cost de producció de les diferents fonts d'energia.



Fonts:

- EIA report: Annual Energy Outlook 2011
- German Renewable Energy Sources Act-EEG (2010).
- Estudi del cost de les centrals angleses avaluada per DECC (juny de 2010).
- Anual report de l'Energy Information Administration, DOE/EIA-0383 (2010).

Fig. 16. Comparativa de costos de producció de les diferents fonts d'energia

### 2. Dependència de les fonts d'energia a Catalunya

De l'anàlisi d'aquestes dades —de l'any 2007, les últimes publicades per l'ICAEN, per bé que les de 2011 es preveu que seran molt similars— es desprèn que el 19,7 % de l'energia consumida és produïda a les centrals nuclears, però aquesta proporció puja fins al 46,8 % de l'energia elèctrica produïda a Catalunya. Això es deu al fet que les centrals nuclears tenen un nivell d'utilització més alt respecte dels altres tipus de centrals, a causa, per una part, que el cost de producció de l'energia nuclear és més baix que el de les centrals tèrmiques; per altra part, que la disponibilitat de l'energia hidràulica, que té encara un cost de producció inferior, depèn de la variació de les reserves hídriques durant l'any, mentre que el funcionament de les

centrals nuclears, per la seva tecnologia, no és de producció variable sinó de funcionament estable a ple rendiment.

Per reduir aquest elevat percentatge de participació de l'energia nuclear en l'energia produïda, sense incrementar el consum d'energies no renovables, caldria incrementar la producció d'energia eòlica i d'altres energies renovables i, a la vegada, intensificar-ne la racionalització del consum.

### **3. Es pot garantir la seguretat d'una central nuclear?**

La seguretat de les centrals nuclears es basa en el sistema de múltiples barreres i en estratègies de control redundants que permeten operar amb alta fiabilitat. Els sistemes tecnològics permeten assegurar una alta seguretat nuclear, però no garantir-la, ja que poden estar subjectes a falles humanes, tant des del punt de vista del seu funcionament —com succeí a Txernòbil o a Three Mile Island—, com des del punt de vista de la seva concepció —com a Txernòbil, que no disposava dels sistemes de seguretat de què actualment disposen totes les centrals, o Fukushima, que tot i estar en una zona d'alta activitat sísmica, no estava preparada per resistir tsunamis d'una magnitud tan alta.

### **4. Són segures les centrals nuclears catalanes?**

La tecnologia de les centrals nuclears de Vandellòs i Ascó és de segona generació, tot i que han sofert diferents processos de readaptació a normes de seguretat més estrictes, supervisades per la CSN. De fet, al llarg de la història de l'energia nuclear a Catalunya, tan sols la central de Vandellòs I va tenir una incidència de nivell 3 (l'incendi d'un generador, el 1989). Aquest accident va provocar que es tanqués la central, però no perquè representés cap perill nuclear, sinó per l'elevat cost que suposava reparar-la i adaptar-la a mesures de seguretat més estrictes.

Per altra part, la situació sísmica d'aquestes centrals no presenta amenaces previsible i es pot concloure que les seves condicions de seguretat són les equivalents a les més segures d'altres països. Recentment s'han sotmès a les anomenades proves d'estrès (*stress test*), segons els acords europeus de seguretat nuclear i els resultats obtinguts fins ara mostren uns valors positius per a les centrals nuclears catalanes (vegeu l'informe del Consell de Seguretat Nuclear).

Com a conseqüència d'aquestes proves s'incrementarà la seguretat de les centrals nuclears, les quals disposaran d'unes unitats mòbils d'actuació (aportació d'electricitat i refrigeració) que es podran traslladar a l'emplaçament de manera immediata, en cas de grans emergències, fins i tot si les infraestructures de transport estan deteriorades (carreteres i trens).

L'emplaçament de Vandellòs II està a 24 metres d'alçada sobre el nivell del mar, situació que per a la costa mediterrània es considera un marge suficientment segur davant de terratrèmols marins.

Per tot el que s'acaba d'exposar, es pot dir que la seguretat de les centrals nuclears catalanes és bona i està millorant contínuament.

## 5. Podem prescindir de l'energia nuclear?

Actualment, la potència instal·lada a Catalunya, que correspon a la suma de les potències de totes les centrals de producció d'energia elèctrica, té una capacitat global de 12.764 MW<sup>3</sup>; en el cas que aquestes centrals estiguessin productives al 100 %, és a dir, ininterrompudament durant tot l'any, teòricament produirien una energia de 111.812 GWh<sup>4</sup>. Sense les centrals nuclears, aquesta energia límit seria de 84.244 GWh.

Atès que el 2007 els consums eren de 44.557,8 GWh i el 2010 eren de 43.935 GWh —xifra que és inferior a aquest límit teòric inassolible de 84.244 GWh—, podria pensar-se que, des del punt de vista del balanç energètic de producció d'energia elèctrica a Catalunya, es podria prescindir de l'energia nuclear, ja que la resta de centrals podrien produir la demanda d'electricitat a Catalunya, funcionant durant un 52% del seu temps o de la seva capacitat —la seva disponibilitat—, tot i que això, tècnicament, és qüestionable.

Per poder prescindir de l'energia nuclear, sense disposar encara d'una major capacitat de producció basada en les energies renovables, caldria assignar una major disponibilitat a les centrals tèrmiques (de l'ordre del 60%), el que suposaria un augment del cost de producció i un augment del consum de les energies basades en el petroli i emissions de CO<sub>2</sub>, així com utilitzar totes les possibilitats de l'energia hidràulica.

## 6. Per quines estratègies han optat altres països?

Hi ha països que s'han plantejat de renunciar a l'expansió de l'energia nuclear, si bé actualment, només Alemanya hi ha renunciat explícitament. Altres països han apostat per seguir-la utilitzant i han renovat les llicències d'operació fins a 60 anys o, fins i tot, han optat per potenciar-la, com ara França, la Xina o l'Índia, els governs dels quals creuen que els beneficis econòmics que comporta, així com la nul·la emissió de CO<sub>2</sub> del seu ús, compensa els inconvenients que suposa utilitzar-la.

---

<sup>3</sup> La mesura en MW correspon a la potència. La potència és la quantitat amb què es genera o s'utilitza l'energia, independentment del temps que estigui en funcionament.

<sup>4</sup> La mesura en GWh correspon a l'energia (treball). L'energia generada o consumida es mesurarà en kilowatts per hora (KWh) o en gigawatts per hora (GWh), i depèn del temps que ha estat operativa.



## Annex I: Distribució geogràfica dels elements del sistema elèctric a Catalunya

En aquest annex es recullen dades significatives i mapes de distribució dels principals elements del sistema energètic al món i al nostre país.

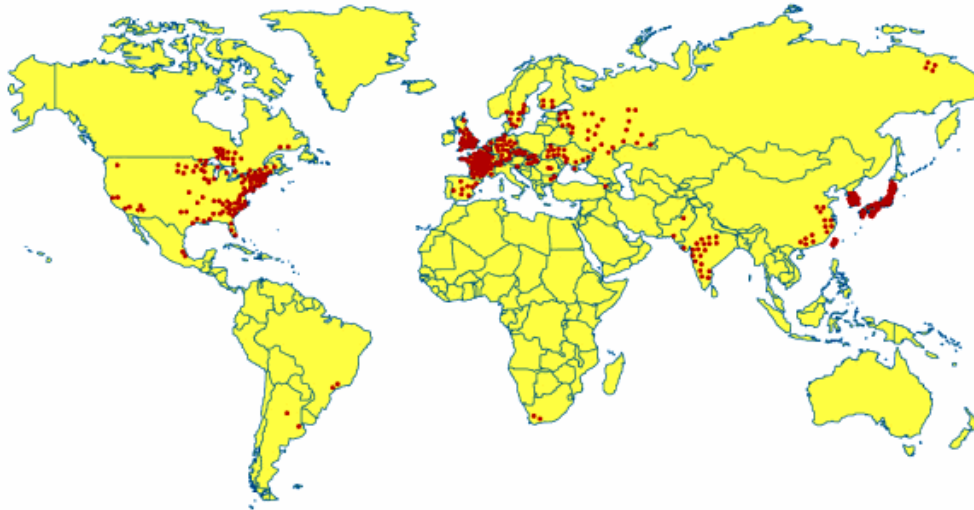


Fig. 17. Distribució de les centrals nuclears al món



Fig. 18. Situació de les centrals nuclears catalanes



Fig. 19. Distribució geogràfica dels elements del sistema elèctric a Catalunya

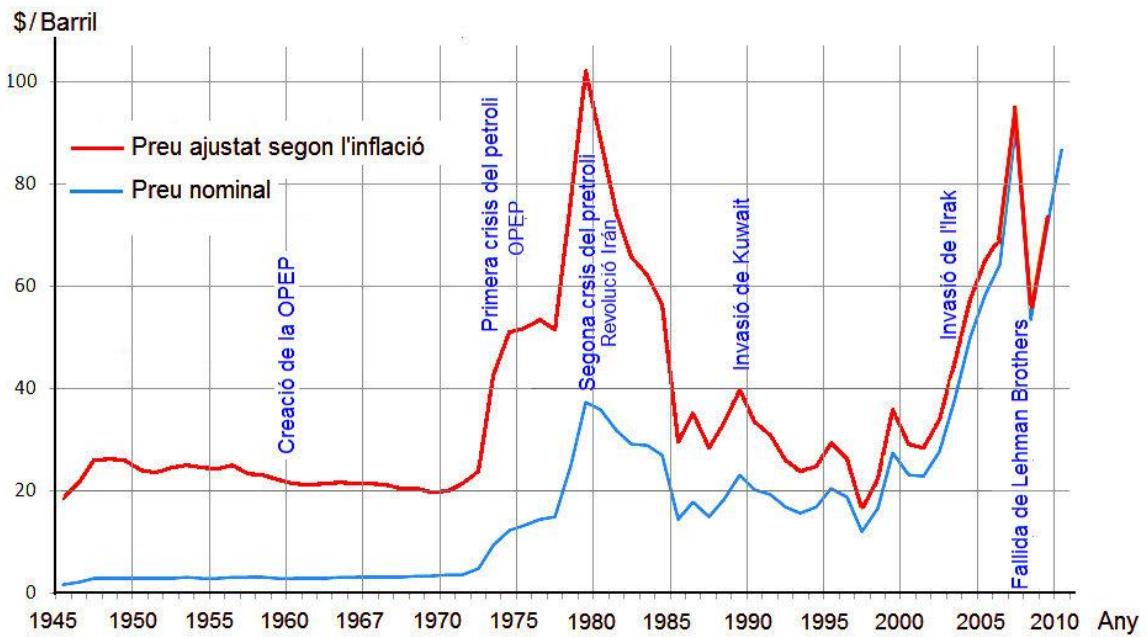


Fig. 20. Evolució del preu del petroli del *Barril de Brent*.  
Ajustament de la inflació segons Inflationdata.com

## L'energia hidràulica a Catalunya

L'aprofitament dels recursos hidràulics per a produir energia elèctrica es va iniciar als Pirineus, el 1914, amb la construcció de les preses de Seròs i Cabdella, de la mà de la companyia *Barcelona Traction*. En la dècada del 1950 es va iniciar una nova etapa de creixement de l'explotació dels recursos hidràulics amb la creació d'Enher, que construí les principals preses del sistema. Actualment, a Catalunya hi ha 38 centrals hidroelèctriques de més de 10 MW, que representen una potència total instal·lada de 2.047,1 MW. Pel que fa a la minihidràulica, actualment hi ha 345 centrals de fins a 10 MW de potència: d'aquestes, 302 estan en servei i tenen una potència instal·lada de 2.355 MW, mentre que les altres 43 es troben aturades. El 2007, la producció anual total d'aquestes centrals va ser de 3.576 GWh, valor inferior al d'altres anys, com el 2003, que va ser de 6.039 GWh. Aquesta variabilitat és en funció dels recursos disponibles. La figura 21 representa la distribució de la pluviometria anual mitjana per les diferents conques hidràuliques.

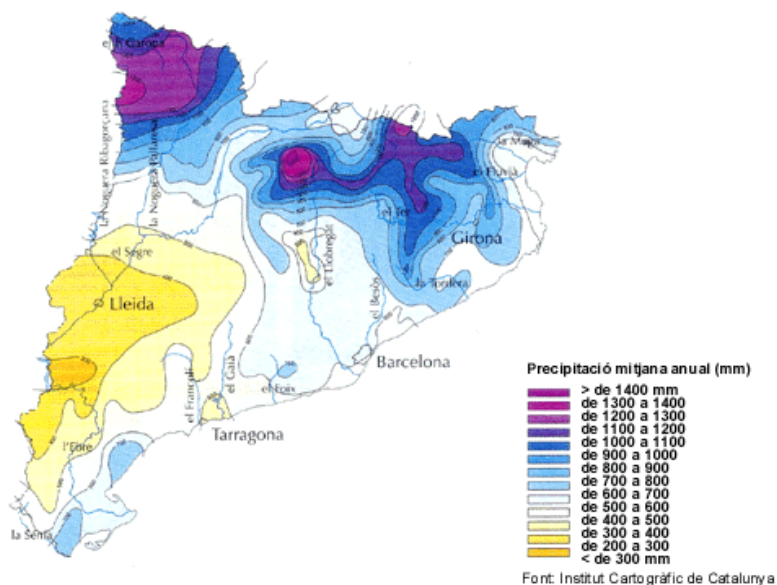


Fig. 21. Distribució de la mitjana de precipitacions a Catalunya

Les infraestructures hidràuliques a Catalunya no han variat substancialment en els darrers anys (vegeu la figura 22), des que el 2001 es va posar en funcionament la central de Xerta, amb 17,8 MW. L'anterior que s'havia posat en servei va ser la central de bombeig d'Estany Gento/Sallente, el 1985.

La gestió dels recursos hidràulics de les conques interiors de Catalunya correspon a l'Agència Catalana de l'Aigua, creada el 1998, i la de la conca de l'Ebre correspon a la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre. Les infraestructures hidràuliques més importants de Catalunya són Estany Gento/Sallente, amb 451 MW de potència instal·lada; Riba-roja, amb 262 MW; Tavascan, amb 120 MW, i Canelles, amb 108 MW. A continuació es detalla el conjunt d'aquestes infraestructures.

Conques del nord-oest:

- Pantà dels Llacs Val d'Aran: conca del Garona
- Pantà d'Oliana: conca del Segre
- Pantà de Rialb: conca del Segre
- Pantà de Sant Llorenç de Montgai: conca del Segre

- Pantà d'Utxesa: conca del Segre
- Pantà de Borén: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà de la Torrassa: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà de Sant Antoni: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà dels Terradets: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà de Camarasa: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà de Graus: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà de Tavascan: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà del Llac Negre: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà de Sant Maurici: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà dels Llacs d'Espot: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà dels Llacs de Cabdella: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà de Sallente: conca de la Noguera Pallaresa
- Pantà d'Escales: conca de la Noguera Ribagorçana
- Pantà de Canelles: conca de la Noguera Ribagorçana
- Pantà de Santa Anna: conca de la Noguera Ribagorçana
- Pantà de Cavallers: conca de la Noguera Ribagorçana
- Pantà de Llesp: conca de la Noguera Ribagorçana
- Pantà de Baserca: conca de la Noguera Ribagorçana

#### Conques gironines:

- Pantà de Sau: conca del Ter
- Pantà de Susqueda: conca del Ter
- Pantà del Pasteral: conca del Ter
- Resclosa de Colomers: conca del Ter (no entrat mai en funcionament)
- Embassament de Núria: conca del Ter
- Pantà de Seva: conca del Ter
- Pantà de Boadella: conca de la Muga
- Pantà de Portbou: conca de la riera de Portbou

#### Conques del Maresme:

- Pantà de Santa Fe: conca de la Tordera
- Pantà de Vallfornès: conca del Besòs

#### Conques del centre:

- Pantà de la Baells: conca del Llobregat
- Pantà de Sant Ponç: conca del Llobregat
- Pantà de la Llosa del Cavall: conca del Llobregat
- Pantà de Sant Martí de Tous: conca del Llobregat
- Pantà de Foix: conca del Foix

#### Conques del sud:

- Pantà del Catllar: conca del Gaià
- Pantà de Riudecanyes: conca de Riudecanyes

#### Conca de l'Ebre:

- Pantà de Riba-roja: conca de l'Ebre
- Pantà de Flix: conca de l'Ebre
- Pantà de Siurana: conca de l'Ebre



- Pantà de Margalef: conca de l'Ebre
- Pantà dels Guiamets: conca de l'Ebre
- Pantà de la Vilella Baixa: conca del Montsant



Fig. 22. Principals instal·lacions hidroelèctriques a Catalunya (ACA)

## L'energia tèrmica a Catalunya

Les centrals tèrmiques clàssiques tenen un baix rendiment energètic, del 25 al 40 %, a causa de l'elevat percentatge de calor evacuat després de la combustió. Després de la primera crisi energètica, i a fi de millorar el rendiment d'aquestes centrals, es varen anar substituint progressivament per les centrals de cogeneració o les de cicle combinat (vegeu la figura 23).

Les centrals de cogeneració es caracteritzen per la producció combinada de calor i electricitat, és a dir, s'hi s'obté simultàniament energia elèctrica i energia tèrmica útil (vapor, aigua calenta o aire calent).

En les centrals de cicle combinat, el combustible es crema a l'interior d'una turbina de gas, similar a les dels avions de reacció, i el moviment de la turbina es transmet a un primer grup generador. Amb els gasos calents, producte de la combustió, es produeix vapor com en una central tèrmica convencional que genera electricitat a un segon alternador. La combinació dels dos sistemes de producció permet a aquestes centrals arribar a rendiments del 58%, molt més alts que en el cas de les antigues centrals tèrmiques.

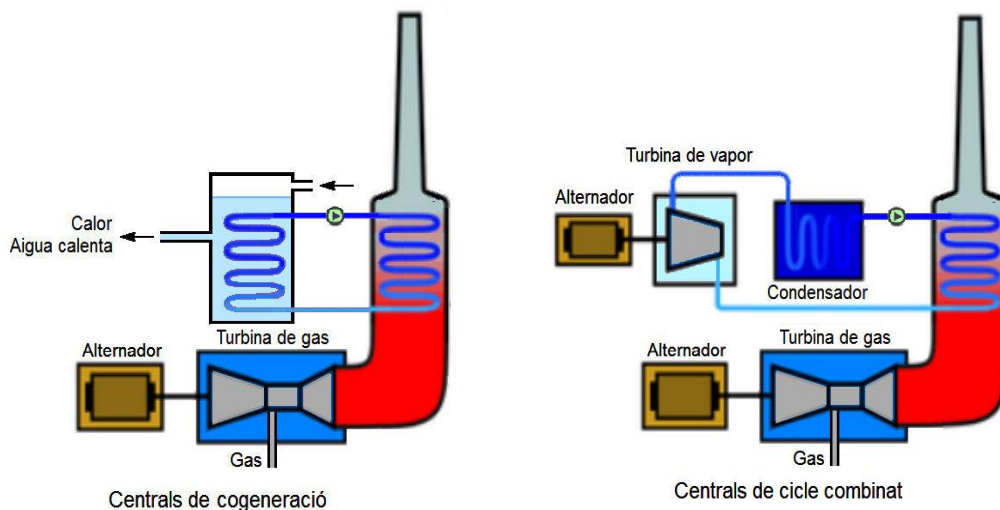


Fig. 23. Esquema bàsic de les centrals tèrmiques de cogeneració i de cicle combinat

A Catalunya, la producció d'energia elèctrica mitjançant centrals tèrmiques es fa a les instal·lacions següents:

- Tèrmica del Besòs, a Sant Adrià del Besòs
- Tèrmica de Foix, a Cubelles
- Tèrmica de Tarragona
- Tèrmica de Tarragona Power
- Tèrmica de Vandellòs
- Tèrmica de Cercs

La **central tèrmica de Sant Adrià** està formada per un conjunt d'unitats situades als marges dret i esquerre del Besòs. Les unitats Sant Adrià 1 i 3, del marge esquerre (1970 – 2007), eren de tipus convencional, construïdes per Fecsa, i tenien una potència instal·lada de 3x350 MW. Després del desmantellament de les centrals s'ha optat per conservar les tres xemeneies de 200 m d'alçada que caracteritzen el paisatge de Sant Adrià.

Al marge dret del Besòs també es clausuraren el 2005 les unitats convencionals Besòs 1 i 2 de 450 MW de potència, posades en funcionament el 1972. Per substituir aquestes centrals el 2004, Endesa va posar en funcionament els grups Besòs 3 i 4, de cicle combinat, de 419 MW i 400 MW. Darrerament, el març de 2011, va inaugurar la unitat Besòs 5 de cicle combinat de 859 MW.

La **central tèrmica Foix** situada al terme municipal de Cubelles, a la comarca del Garraf, és de tipus convencional, de 520 MW, construïda entre els anys 1975 i 1978, va ser posada en funcionament el novembre de 1979. El seu combustible és fuel i està pràcticament fora de servei des de l'agost de 2010, a l'espera de ser convertida a cicle combinat.

La **central tèrmica de Tarragona Power**, situada al terme municipal de la Canonja, és una central de cicle combinat de 417 MW que utilitza el gas com a combustible. Actualment és propietat d'Iberdola.

La **central tèrmica de Tarragona**, també situada al terme municipal de la Canonja, és una central de cicle combinat de 400 MW, posada en servei per Endesa el 2003, i des de 2008 és propietat d'E.ON.

La **central tèrmica de la Plana del Vent**, a Vandellòs, és de cicle combinat de 800 MW, i va entrar en funcionament el 2007. És propietat de Gas Natural, i pot operar amb fuel o gas.

La **Central tèrmica de Cercs**, a la comarca del Bergadà, va ser construïda el 1971 per aprofitar el carbó de les mines properes. Té una potència instal·lada de 160 MW, i E.ON, la seva actual propietària, la va clausurar el juliol de 2011.

## L'energia eòlica a Catalunya

El gener de 2011 Catalunya disposa d'una potència instal·lada de 850 MW, distribuïda en 31 parcs, i hi ha 41 instal·lacions més que ja tenen concedida l'autorització administrativa. Aquesta potència és molt reduïda respecte a d'altres comunitats i solament representa el 4% de l'energia eòlica instal·lada a tot l'estat (<http://www.eoliccat.net>). El Pla de l'Energia 2006-2015 preveu incrementar la producció d'aquesta font d'energia renovable fins a assolir els 3.500 MW instal·lats, l'any 2015, objectiu per al qual s'ha definit un mapa que delimita les zones d'implantació de generadors eòlics tenint en compte la disponibilitat de recursos (vegeu la figura 24) i les zones d'especial protecció paisatgística.

Per impulsar el creixement de la producció d'energia eòlica a Catalunya, el 22 de setembre de 2009 el Govern va aprovar un decret que regula la tramitació administrativa dels parcs eòlics i fotovoltaics sobre el terreny, amb l'objectiu de simplificar-ne el tràmit d'autorització i racionalitzar-ne la instal·lació sobre el territori. Aquest decret preveu la creació de Zones de Desenvolupament Prioritari (ZDP) (vegeu la figura 25), que són els espais on es donen les millors condicions per a ubicar-hi els parcs eòlics, tant pel que fa al recurs eòlic necessari, com a la capacitat per a evacuar a la xarxa elèctrica l'energia produïda, com a la viabilitat ambiental, paisatgística i urbanística.

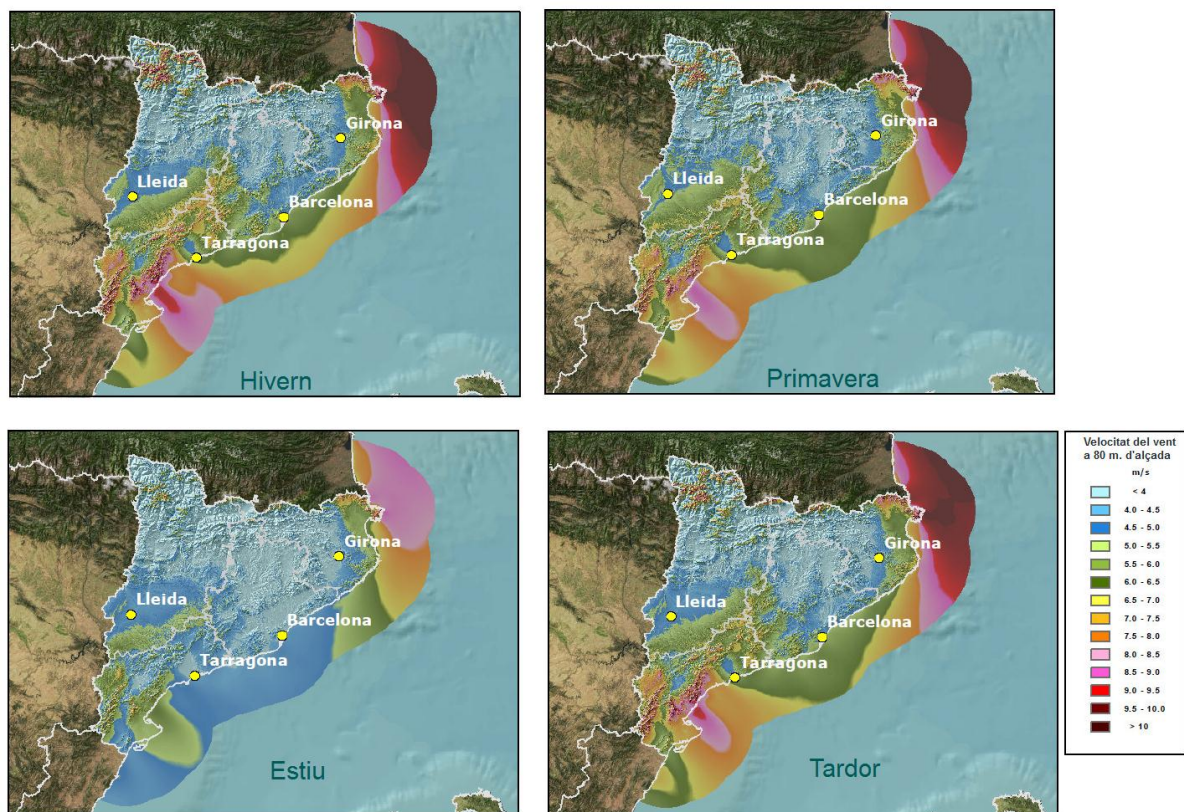


Fig. 24. Distribució dels recursos eòlics a Catalunya. Font Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya

D'una banda, l'oposició que aixeca la implantació de generadors eòlics en molts indrets de Catalunya i, d'altra banda, els favorables recursos de què gaudeixen alguns indrets han fet plantejar també els parcs eòlics marins. L'Institut de Recerca en Energia de Catalunya (IREC) ha elaborat un projecte experimental que preveu instal·lar, en una primera fase, 4 generadors



amb una potència de 20 MW a 3,5 km de la costa, davant l'Ametlla de Mar (Baix Ebre), en aigües d'una profunditat de 40 m. En una segona fase, preveu instal·lar 8 generadors flotants a 20 Km de la costa, situats en aigües d'una profunditat de 100 m i amb una potència de 50 MW. Començat a tramitar el març de 2010, es tracta del primer parc marí projectat a l'Estat espanyol i també ha provocat un fort rebuig en aquesta població i entre els pescadors de la zona. L'evacuació de l'energia elèctrica generada a la xarxa principal de distribució es realitzaria a través de l'estació transformadora de Vandellòs, situada a poca distància del parc.

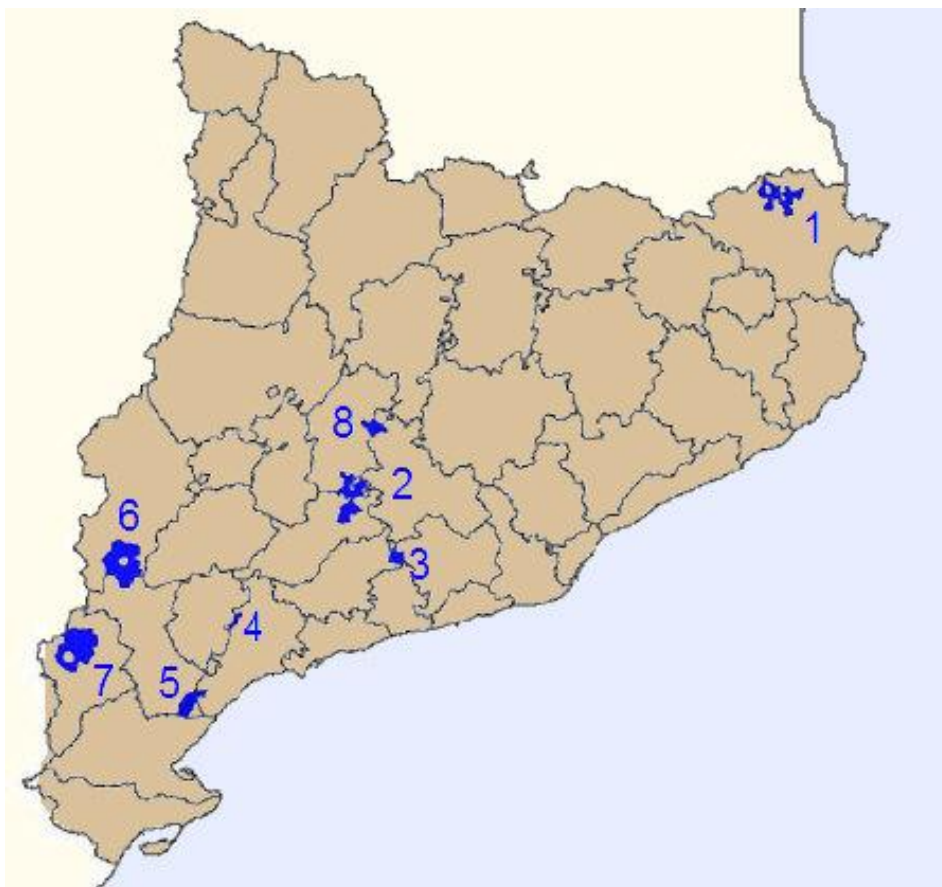


Fig. 25. Mapa amb les zones de desenvolupament prioritari de l'energia eòlica definit el 2009

La potència ja instal·lada en aquests parcs és (dades de gener 2011):

**ZDP 1: Alt Empordà (200 MW)**

*Municipis:* Agullana, Cantallops, Capmany, Espolla, La Jonquera, Masarac i Sant Climent Sescebes.

**ZDP 2: Segarra i Conca de Barberà (186 MW)**

*Municipis:* Conesa, Les Piles, Llorac, Montoliu de Segarra, Santa Coloma de Queralt, Sarra, Savallà del Comtat, Ribera d'Ondara, Talavera i Rocafort de Queralt.

**ZDP 3: Alt Penedès (33 MW)**

*Municipis:* Pontons i Aiguamúrcia.

**ZDP 4: Baix Camp i Priorat (45 MW)**

*Municipis:* Arbolí, Alforja, Cornudella de Montsant i Porrera.

**ZDP 5: Ribera d'Ebre i Baix Camp (120 MW)**

*Municipis:* Tivissa, Vandellòs i Hospitalet de l'Infant.

**ZDP 6: Segrià i Ribera d'Ebre (60 MW)**

*Municipis:* Almatret, Maials, Llardecans, Seròs i Riba-roja.

**ZDP 7: Terra Alta (90 MW)**

*Municipis:* Batea, Gandesa, La Pobla de Massaluca i Vilalba dels Arcs.

**ZDP 8: Anoia i Segarra (100 MW).**

*Municipis:* Calonge de Segarra, Castellfollit de Riubregós, Estaràs, Ivorra, Pujalt i Sant Ramon.

## L'energia geotèrmica

L'energia geotèrmica és la que es pot obtenir aprofitant la calor de l'interior de la terra, produïda bé pel gradient tèrmic (variació de la temperatura del subsòl amb la profunditat), bé per la calor magmàtica en les zones actives de l'escorça terrestre.

El valor mitjà de l'augment de la temperatura amb la profunditat és d'un grau cada 30 metres o, el que és el mateix,  $30^{\circ}$  per quilòmetre. En zones d'activitat volcànica o en zones d'una configuració geològica especial, que donen potencialitat geotèrmica, es presenten anomalies respecte al valor del gradient tèrmic mitjà, on aquest gradient pot assolir valors superiors o molt superiors. A Breiðafjörður (Islàndia), per exemple, el gradient arriba als  $124^{\circ}\text{C}/\text{km}$  i a Tenerife o a les Muntanyes de Foc, a l'Illa de Lanzarote, als  $100^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .

Aquest gradient tèrmic prové de la calor natural del nucli de la terra (constituït bàsicament per níquel i ferro a uns  $4.000^{\circ}\text{C}$ ), la qual va decreixent fins arribar al mantell superior, on trobem unes temperatures d'entre  $15$  i  $20^{\circ}\text{C}$ . El flux en què ascendeix aquesta calor és, de mitjana, de  $57 \text{ mW}/\text{m}^2$  en els continents. Catalunya està situada a la vora d'una de les subplaques que conformen el mosaic mediterrani, amb una configuració geològica especial que li dona una potencialitat geotèrmica de  $110 \text{ mW}/\text{m}^2$ , superior a la mitjana estatal ( $82 \text{ mW}/\text{m}^2$ ) i a la mitjana europea ( $64,5 \text{ mW}/\text{m}^2$ ). Les estructures favorables són sempre les conques de distensió neògenes (el Camp de Tarragona, el Vallès-Penedès, la Selva, l'Empordà, Olot) amb temperatures properes als  $100\text{-}120^{\circ}\text{C}$  a  $1.000\text{-}1.500 \text{ m}$  de profunditat (vegeu la figura 26).

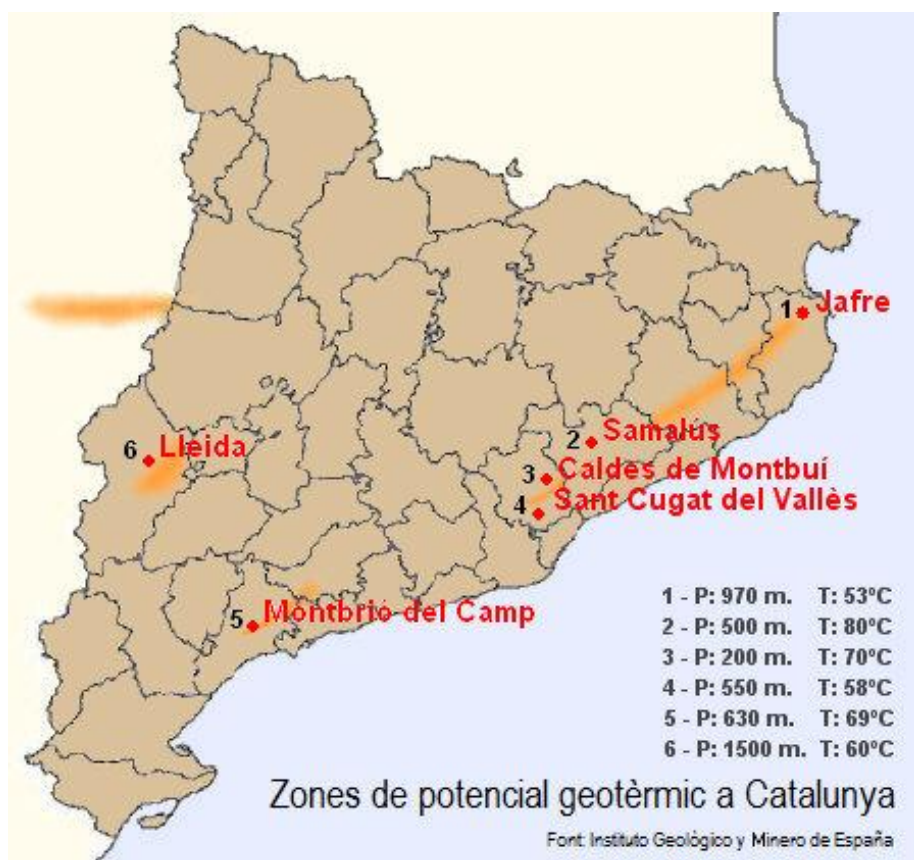


Fig. 26. Zones de potencial geotèrmic a Catalunya

El seu potencial, estudiat amb detall per l'IGME (Instituto Geológico y Minero de España) entre el 1976 i el 1986, i avaluat fins a principi dels anys noranta pel ja desaparegut INI, la Generalitat i la UE, es va posar de manifest mitjançant l'execució d'una sèrie de sondatges profunds (1.000-1.500 m) que van demostrar l'existència del recurs. Malauradament, mai no va ser aprofitat a causa d'una legislació minera obsoleta que encara avui continua vigent (i que fa que es discuteixi de qui és competència).

L'aprofitament de l'energia geotèrmica varia molt, en funció de la temperatura a què es pugui accedir:

- L'energia geotèrmica d'alta temperatura és la que supera els 150°C, situació en què es pot obtenir vapor per produir energia elèctrica mitjançant turbines. Aquestes condicions no es donen a Catalunya.
- L'energia geotèrmica de temperatura mitjana és la que disposa d'aquífers d'entre 70 i 150°C. Cal obtenir l'energia elèctrica a partir de vapor, utilitzant líquids més volàtils que l'aigua i amb un rendiment menor, de manera que solament les petites centrals elèctriques poden explotar aquest recurs que, d'altra banda, és explotable com a font de calor per a calefacció urbana i per fer-ne aprofitament industrial.
- L'energia geotèrmica de baixa temperatura, amb magnituds d'entre 70 i 50°C, és també utilitzable en un context domèstic o agrícola.

En subsòls no afectats d'anomalies geotèrmiques, també pot ser utilitzada l'elevada estabilitat tèrmica del subsòl —d'entre 10 i 16°C a pocs metres de la superfície—, ja que augmenta el rendiment de les bombes de calor. La bomba de calor és el procediment de transferir la calor d'una part del circuit per alliberar-la a l'altra. En una bomba de calor, s'augmenta la pressió d'un fluid, mitjançant un compressor, a fi d'augmentar la temperatura d'aquest fluid; i absorbeix calor quan es redueix la pressió del gas mitjançant una vàlvula d'expansió. Aquest circuit calent-fred és utilitzat per l'aire condicionat, tant com a calefacció com per a refrigeració (vegeu la figura 27).

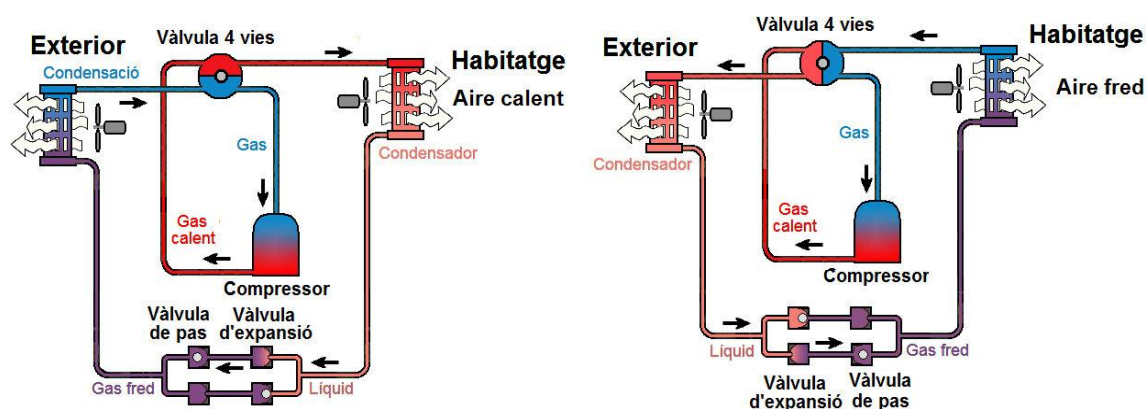
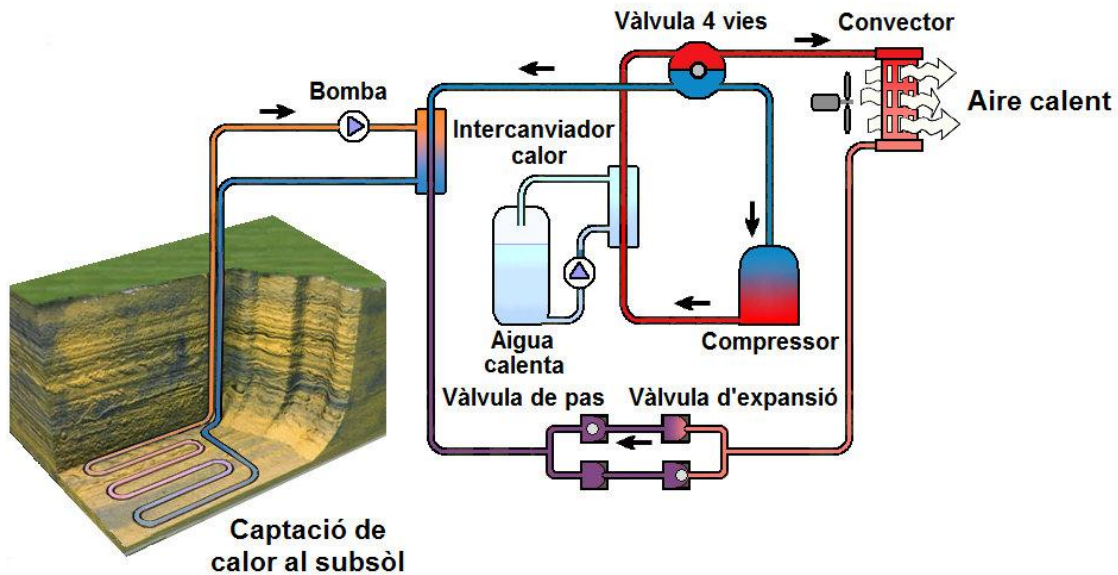
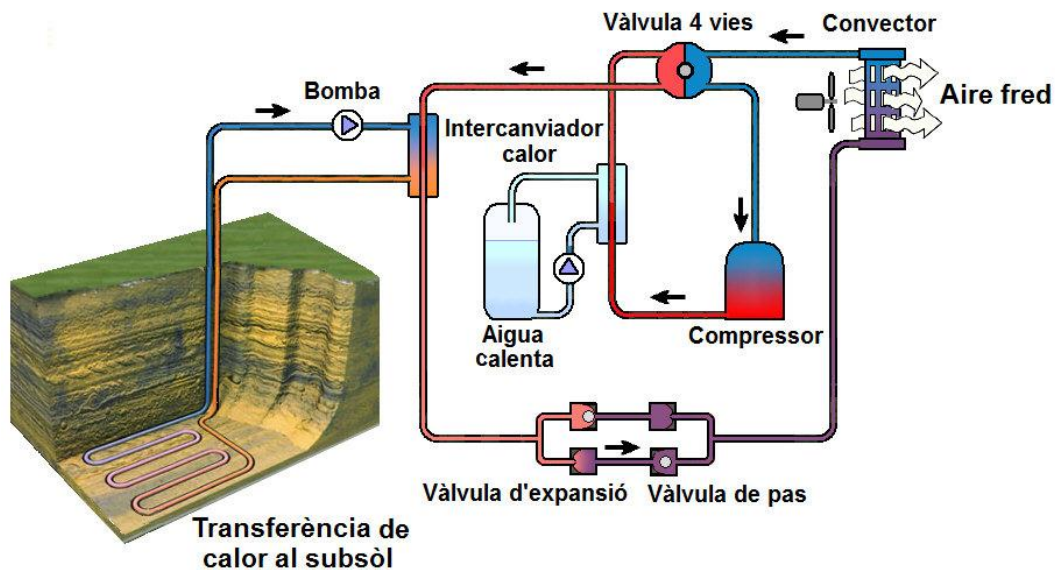


Fig. 27. Bomba de calor com a calefacció i com a refrigeració

El rendiment de la bomba de calor depèn de la diferència de temperatures entre els focus fred i calent (interior i exterior). És per això que si s'utilitza un intercanviador geotèrmic (vegeu la figura 28) per aprofitar la calor (a l'estiu) o el fred (a l'hivern) del subsòl (o també dels fons marins), augmenta considerablement aquest rendiment, amb el consegüent estalvi energètic.



a) Funcionament com a calefacció



b) Funcionament com a refrigeració

Fig. 28. Sistema geotèrmic d'aire condicionat domèstic

La manca de legislació també fa que cadascú apliqui aquest recurs sense cap normativa i que no es tinguin dades sobre el seu aprofitament en l'àmbit domèstic.

A l'IDAE (*Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*) del *Ministerio de Industria, Turismo y Comercio*, amb coneixement de la Direcció General d'Energia, Mines i Seguretat Industrial i de l'ICAEN, tenen damunt la taula el projecte d'R+D+I per a foradar, el 2012, un pou de 2.000 metres de profunditat a Montbrió del Camp, on hi ha un gradient geotèrmic molt elevat (el més elevat de Catalunya), que dóna 140-150°C a aquesta profunditat, i aprofitar aquesta energia.

L'èxit de la geotèrmia passa per un decidit recolzament per part de l'Administració i una reglamentació àgil, eficaç i eficient que esperoni la inversió privada. Des del maig de 2009 (data de creació del GEOPLAT – Plataforma Tecnològica Española de Geotermia) sembla que s'albira un nou intent d'avanç a nivell institucional, que només el temps podrà confirmar.

## **L'energia mareomotriu**

L'energia mareomotriu és la que s'obté utilitzant les variacions del nivell del mar amb les mareas. Per poder utilitzar aquesta energia amb diferències de nivell que no arriben als 3 m es necessiten turbines de gran cabal, que requereixen preses de gran capacitat d'emmagatzematge.

Atès que a les costes mediterrànies les variacions del nivell del mar produïdes per les mareas és poc rellevant, no és possible utilitzar aquesta font d'energia.

Per explorar les possibilitats d'extreure energia del mar a través de l'onatge, a principi del 2011 l'empresa catalana *Sea Electric Waves*, amb el suport d'ACC1Ó, ha instal·lat als blocs exteriors de l'escullera del port de Sant Feliu de Guíxols un prototipus experimental de generador undimotriu, basat en una columna d'aigua de nivell oscil·lant (a causa de l'onatge) que va comprimint l'aire a la part superior, el qual s'utilitza per impulsar una turbina.



## Annex II: Els reactors nuclears

La producció d'energia elèctrica mitjançant l'energia nuclear es realitza per fissió, que consisteix en el trencament de certs nuclis pesants (urani o plutoni) quan hi incideixen neutrons d'una determinada energia, la qual cosa fa que es divideixin en dos àtoms més lleugers alliberant una gran quantitat d'energia (calor). La calor produïda es converteix en el vapor que mou les turbines que estan connectades als generadors elèctrics.

Per tal que la reacció nuclear en cadena es produeixi, és necessari que els dos o tres neutrons que s'alliberen en cada fissió produeixin en promig una nova fissió. Per augmentar la probabilitat que es produeixi una fissió cal utilitzar un moderador, ja que els neutrons més ràpids tenen menys probabilitat de produir una fissió. Com a moderador els reactors PWR i BWR, els més utilitzats, utilitzen aigua lleugera ( $H_2O$ ), que modera la velocitat dels neutrons i a la vegada té una baixa absorció. Per poder controlar que es mantingui la reacció, s'utilitzen unes barres de control que absorbeixen els neutrons, normalment grafit, quan són introduïdes en el nucli del reactor, en major o menor proporció (vegeu la figura 26).

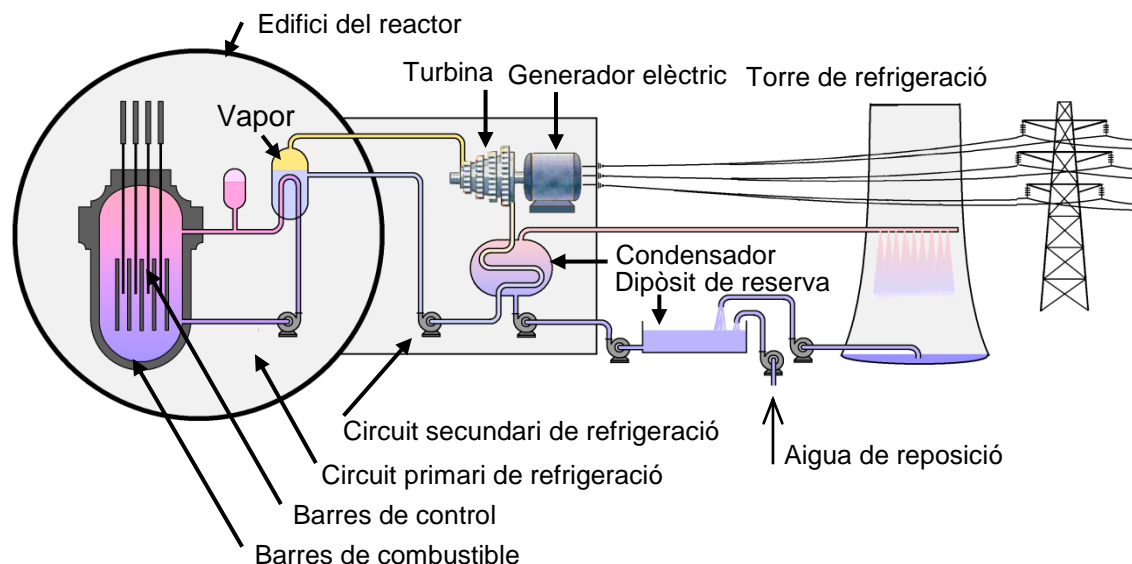


Fig. 26. Elements bàsics d'un reactor nuclear

Els primers reactors nuclears van començar a ser construïts per a aplicacions militars. El primer va ser construït a la universitat de Chicago, el Chicago Pile-1 (CP-1), dins del Projecte Manhattan. Aquest reactor va iniciar el funcionament el 2 de desembre del 1942, i els treballs realitzats van donar lloc al llançament de la primera bomba atòmica a Hiroshima, el 6 d'agost del 1945. Posteriorment, el 1953, el departament de defensa nord-americà va encarregar el desenvolupament d'un reactor nuclear de generació d'energia elèctrica per a la propulsió de submarins a General Electric i Westinghouse, companyies que desenvoluparen, respectivament, la tecnologia d'urani enriquit moderat per aigua en ebullició (BWR) i amb d'aigua a pressió (PWR), que són les tecnologies més utilitzades en l'actualitat. El *Nautilus* va ser botat el 1955 i va estar dotat d'un reactor PWR.

França, ja el 1945, crea el Comissionat per a l'Energia Atòmica (CEA) i el 1950 inicia el seu programa civil d'energia nuclear, però no obre la seva primera planta nuclear fins el 1963. Anys abans, el 1956, Anglaterra ja havia connectat el seu primer reactor, el Cander Hall, a la xarxa.



Al Canadà, a partir del 1950, també es va potenciar la tecnologia nuclear i hi van desenvolupar un nou tipus de reactor que utilitza aigua pesada (on l'hidrogen és substituït pel deuteri, un isòtop de l'hidrogen) com a moderador i urani natural com a combustible. Aquesta tecnologia ha estat utilitzada en altres reactors produïts al Canadà.

Tot i que el principi de funcionament de les centrals nuclears no ha variat al llarg dels anys, sí que tecnològicament han anat evolucionant, de manera que es poden distingir ja quatre generacions de reactors. Els de primera generació són els que es van construir entre 1950 i 1965. Els reactors de segona generació es van construir entre 1965 i 1995 i són d'aquesta època la majoria dels reactors en operació avui. Anomenem reactors de tercera generació els que es van començar a construir el 1995, i és previst que en continuï la instal·lació fins el 2030. Aquests reactors introdueixen conceptes de seguretat passiva, amb la qual s'aconsegueixen cotes de seguretat més elevades, són de disseny més senzill, més econòmics i també tenen uns terminis de construcció més curts. Finalment, els reactors de quarta generació seran els que es construiran a partir de l'any 2030. Actualment estan en fase d'investigació i desenvolupament, són reactors dedicats a produir electricitat i hidrogen, i faran un ús més eficient del combustible.

Fins ara, els reactors nuclears utilitzen l'urani 235 com a combustible, isòtop que es troba a la natura, en l'urani natural, amb una abundància del 0,7% i les reserves del qual equivalen a 10 vegades la del carbó i 100 vegades la del petroli, en termes de l'energia que se'n pot obtenir. Una de les alternatives dels reactors de quarta generació és transformar l'isòtop U 238 en material físsil en reactors reproductors, via per la qual s'obtindrà molta més energia, tal com indica la figura 3.2.; també es pot fer un procés semblant amb el cicle del Th 232. Això permetrà allargar durant molts anys l'ús de l'energia nuclear.

Una altra manera de classificar els reactors nuclears, és segons el moderador que utilitzen, així apareixen tres famílies de reactors nuclears:

- Reactors grafit-gas: el grafit actua com a moderador i el gas com a refrigerant.
- reactors d'aigua lleugera: l'aigua lleugera (H<sub>2</sub>O) actua tant de moderador com de refrigerant. Aquest reactors es divideixen en dos tipus: els reactors d'aigua a pressió (PWR) i els reactors d'aigua en ebullició (BWR). Fan servir com a combustible urani enriquit entre un 3 i un 5% d'isòtop urani 235. Actualment a Catalunya els tres reactors que hi ha són del tipus PWR.  
Aquesta és la tecnologia de reactors més estesa al món. Dels 440 reactors en operació al món, uns 252 són reactors d'aigua a pressió (PWR) i uns 94 són d'aigua en ebullició (BWR).
- reactors d'aigua pesada: l'aigua pesada (D<sub>2</sub>O) és el moderador que utilitzen. És una tecnologia que s'ha desenvolupat al Canadà, i aquest país l'ha exportat als seus clients.

Podríem dir que els reactors clàssics són principalment els reactors de segona generació. Un tema de màxima actualitat en aquest grup de reactors és l'anomenat procés de renovació de la llicència d'operació més enllà dels 40 anys d'operació. Als Estats Units hi ha cent quatre reactors en operació, a setanta-un dels quals els ha estat renovada la llicència d'operació fins a seixanta anys, i tretze més ho tenen sol·licitat. També s'està considerant la possibilitat de renovar llicències fins als vuitanta anys d'operació.

## **Reactors d'última generació**

Com a reactors d'última generació, que estan en fase de construcció, destaquen els AP-1000 de l'empresa americana Westinghouse, que construeix quatre unitats a Haiyanj i Sanmen (Xina); el reactor EPR, de l'empresa francesa Areva, que construeix també quatre unitats: dues a Taishan (Xina), una a Olkiluoto (Finlàndia) i una altra a Flamanville (França). L'empresa coreana KEPCO està construint dues unitats del reactor APR-1400 a Shin-Kori (Corea del Sud). Aquests reactors de tercera generació plus introdueixen millores significatives de fabricació i seguretat respecte als reactors anteriors, ja que permeten l'extracció de la calor residual per sistemes de conducció i convecció naturals, i tenen un millor aprofitament del combustible, cosa que permet una disminució de la quantitat dels residus radioactius generats.

### ANNEX III El Combustible dels reactors nuclears

Els materials utilitzats com a combustible nuclear han de presentar una absorció baixa de neutrons, una resistència alta a la corrosió química, bones propietats de transferència de calor, alta resistència mecànica i ductilitat en condicions d'irradiació i alta estabilitat tèrmica. Els materials emprats són l'acer inoxidable, aliatges de base níquel-crom d'alta resistència mecànica a altes temperatures i aliatges de zirconi que presenten baixa absorció de neutrons, comparades amb l'acer i els aliatges de níquel-crom.

Un tub (beina) d'uns 3,5 metres de llargada per un centímetre de diàmetre s'omple de pastilles, formant l'anomenada barra de combustible. La beina és de zirconi (vegeu la figura 27). Cada barra de combustible disposa de l'espai suficient per a acomodar tant els productes de fissió gasosos com l'expansió tèrmica de les pastilles. La barra es pressuritza internament amb heli. Una molla helicoidal d'acer inoxidable s'instal·la entre la part superior de la columna de combustible i el tap superior per evitar el desplaçament del combustible durant la seva manipulació i transport.

Les barres combustibles es disposen en uns elements portants formant un conjunt prismàtic i lligades a intervals d'aproximadament 50 cm mitjançant reixes que mantenen de forma precisa la distància entre les barres, permetent un joc entre elles d'aproximadament 3 mm. Les reixes estan fabricades d'un aliatge de zirconi per minimitzar l'absorció de neutrons o d'aliatge austenític de níquel i crom, si es vol obtenir una millor subjecció de la barra. Algunes reixes contenen aletes mescladores que incrementen la turbulència del refrigerant i augmenten l'eficiència tèrmica.

En els extrems superior i inferior dels elements combustibles es disposen unes peces d'acer inoxidable anomenades capçals, que posicionen el combustible dins del nucli. El capçal superior disposa de superfícies adequades, que permetin ser agafades per la grua robòtica del reactor. Els forats del capçal inferior per al pas de fluid es dissenyen de manera que actuïn com a filtre, i evitin l'entrada en el nucli de partícules que poguessin produir danys a les barres de combustible.

En el combustible PWR, el capçal superior disposa de dispositius de subjecció que impedeixen que l'element combustible s'aixequi per l'acció de les forces hidràuliques. En el cas del combustible BWR, el pes de l'element combustible és suficient per compensar les forces hidràuliques. En els elements combustibles PWR, les reixes i els capçals estan subjectes a uns tubs anomenats tubs guia, que a més d'actuar com a component estructural, proporcionen canals per allotjar les barres de control. La part inferior dels tubs guia, denominada amortidor, és de menor diàmetre que la resta, cosa que té per finalitat frenar la caiguda de les barres de control al final de seu recorregut. En alguns dissenys, un tub situat en la posició central (tub d'instrumentació) proporciona un canal per a la inserció de la instrumentació intranuclear; en altres dissenys la instrumentació s'introdueix en el nucli per un dels tubs guia.

En els elements combustibles BWR els capçals van units mitjançant unes barres de combustible especials anomenades barres de subjecció amb taps que van roscats als seus extrems per a unir-se als capçals. Les reixes van subjectes a dos tubs centrals anomenats barres d'aigua, ja que pel seu interior circula aigua que fa de moderador a la part central de l'element.

Els elements de combustible BWR operen introduïts en un canal prismàtic d'aliatge de zirconi i les barres de control de forma cruciforme s'introdueixen en el nucli fora de l'element de combustible.

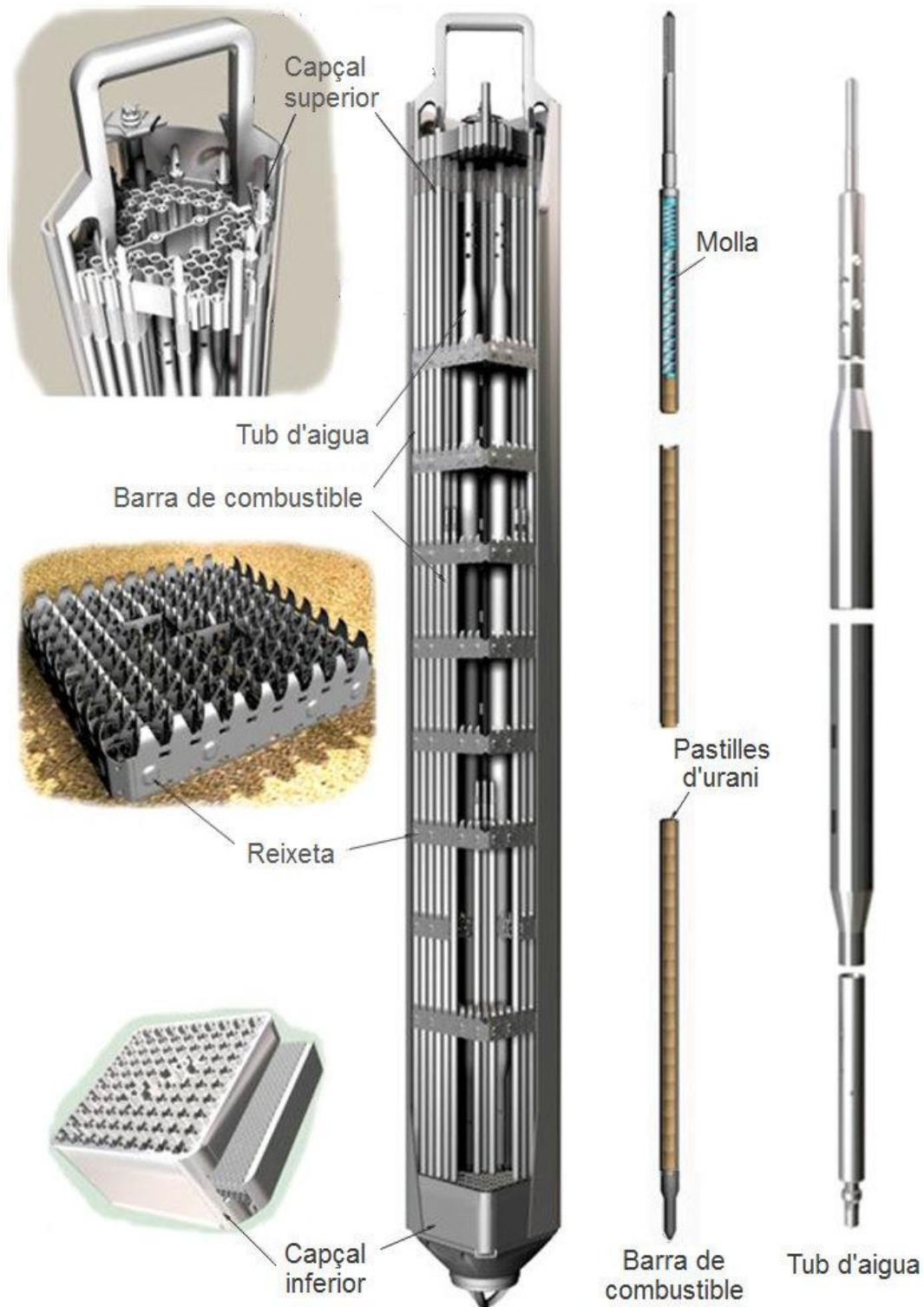


Fig. 27. Element combustible d'un reactor PWR

Aquestes barres de combustible tenen un temps de vida útil d'entre un i dos anys, però es varia la seva distribució dins del nucli del reactor, per redistribuir-les en funció del seu grau d'utilització (cremat).

## Annex IV Principals accidents nuclears

Tot i les estrictes mesures de seguretat de què disposen les centrals nuclears, ja s'han produït en diferents indrets del món diversos accidents. A continuació es descriuen les causes i els efectes provocats pels més greus.

**Chalk River Nuclear Laboratories (CRNL), Canadà, 1952:** Va ser el primer accident nuclear que es va produir. Aquell accident es va originar per una sobtada pujada de tensió, seguida d'una sèrie de problemes mecànics i errors humans, com a resultat dels quals no es van poder baixar les barres de control. Això va originar diverses explosions d'hidrogen que van produir danys a l'edifici de contenció, si bé es va evitar la contaminació del riu Ottawa. En aquesta mateixa planta, el 1958, es va produir un segon accident quan es va retirar una barra de combustible del reactor, mitjançant els braços robòtics, per evitar un sobreescalfament. Un cop retirada la barra, la beina es va malmetre i incendiar, cosa que va provocar una fuga dins del recinte de contenció. Aquest incendi va obligar a activar les vàlvules de ventilació i això va produir una alliberació de certa radiació a l'exterior, tot i que no va provocar danys constatables.

**Mayak, Rússia, 1957:** Va ser el primer accident nuclear important i es produí el 1957 a la planta de Mayak (Ozersk), una planta que va ser construïda molt a corre-cuita i en total secret, entre el 1945 i el 1948. La planta estava formada per cinc reactors productors de plutoni enriquit per a aplicacions militars, dins del programa d'armes nuclears de la Unió Soviètica. Aquesta planta va sofrir diferents incidents i accidents. El primer accident important es produí el 29 de setembre de 1957, quan per una fallada del sistema de refredament d'un tanc d'emmagatzematge, que contenia desenes de milers de tones de residus nuclears, es va produir una explosió no nuclear. Aquesta explosió, però, afectà els murs de contenció i va provocar un vessament de materials radioactius al riu Techna, que estengué la contaminació entorn d'uns 20.000 km<sup>2</sup>. Aquest accident, considerat de grau 6 (accident seriós) —l'escala internacional d'accidents nuclears va del 0 al 7—, va provocar l'evacuació d'unes 10.000 persones. Tot i això, un gran nombre de persones van ser exposades a la radiació, cosa que va provocar més de 200 morts i milers d'afectats i va continuar causant la mort de moltes més persones fins molts anys més tard. Aquest accident va ser mantingut com un secret a la Unió Soviètica fins el 1992; la CIA, que se n'assabentà, també el mantingué en secret per evitar l'alarma als Estats Units.

**Windscale, Anglaterra, 1957:** L'accident es va produir en una instal·lació nuclear amb finalitats militars, en què s'obtenia plutoni enriquit per a la fabricació d'armes atòmiques. El 7 d'octubre en aquest reactor, moderat per grafit i refrigerat per aire —tècnica ja abandonada—, es va iniciar una operació de control i manteniment que no va poder ser correctament monitoritzada per manca de suficients sensors de temperatura en el reactor. L'escalfament (que no s'havia percebut) d'unes barres de combustible va ser la causa que el dia 10 el reactor quedés fora de control. Per controlar aquest sobreescalfament es va haver de refrigerar el reactor amb aigua, operació perillosa per la possibilitat que es produís una explosió d'hidrogen —cosa que afortunadament no va passar—, i que va alliberar a l'atmosfera gasos amb iode i cesi radioactius, uns radioisòtops de curta vida que afectaren, però, una àrea d'uns 500 km<sup>2</sup> i provocaren uns 240 càncers de tiroides.

**Mayak, Rússia, 1967:** El segon incident important a la planta de Mayak es va produir el 1967, quan el llac Karachay —on s'abocaven tots els residus nuclears i que va provocar repetits alliberaments de materials radioactius a les aigües circumdants en èpoques de fortes pluges—

s'assecà a causa d'un any de sequera. La dessecació del llac va provocar que els sediments radioactius fossin escampats pel vent i afectessin un extens territori i més de 400.000 persones.

**Three Mile Island, EUA, 1979:** el 28 de març, en el circuit secundari d'un dels reactors de la planta de Three Mile Island, a les proximitats de Harrisburg, es va produir una fallada: el circuit extern del nucli del reactor, que produeix el vapor que impulsa les turbines, va fallar; les turbines es van aturar i van deixar de refrigerar. Això va provocar la parada automàtica del reactor, fet que es produeix mitjançant la introducció de les barres de control. La parada del reactor no va evitar que seguis augmentant la temperatura, que hauria d'haver estat controlada pels sistemes normals de refrigeració o, en el seu defecte, pels d'emergència. L'accident es va desencadenar pel bloqueig momentani d'una vàlvula, que va provocar el sobreescalfament del nucli del reactor. Davant d'aquesta alarma, l'enginyer responsable del control de la planta va desconnectar el circuit automàtic d'emergència i va activar el manual. Però el sistema manual no va funcionar, perquè per un error humà, en unes maniobres rutinàries prèvies, s'havien deixat tancades les vàlvules de pas. Aquesta incidència no es va veure fins 8 minuts més tard a causa d'una confusió en l'apreciació dels instruments de mesura i dels indicadors del panell de control. Aquest error —que va impedir el restabliment de la refrigeració a temps— va fer que el nucli del reactor augmentés la pressió i se sobreescalfés i, en conseqüència, que la vàlvula de despressurització automàtica alliberés gasos radioactius (xenó i criptó) a l'atmosfera. Així mateix, l'augment de temperatura va fer que l'aigua del circuits de refrigeració entrés en ebullició, amb la qual cosa les bombes ja no bombejaven aigua sinó vapor, de manera que van entrar en cavitació i es van aturar. Per totes aquestes incidències en cadena no es va poder evitar que, nou hores més tard de l'inici de l'accident, l'aigua del reactor baixés per sota de les barres de combustible i es produís la fusió, alliberant material radioactiu al fons del reactor.

Un cop activada la vàlvula de despressurització del reactor, també per error o avaria, va seguir oberta i també va fallar la corresponent indicació, cosa que va provocar l'alliberament de molt gas radioactiu a l'atmosfera. Tot i aquesta fallada, es va poder evitar l'explosió del reactor, com va succeir posteriorment a Txernòbil i a Fukushima.

Aquest accident va comportar, a més de l'emissió de gasos radioactius, l'abocament d'una considerable quantitat d'aigua (120 m<sup>3</sup>) de baix nivell de radioactivitat al riu Susquehanna, fet que va provocar, més que danys, una gran alarma social. Com a conseqüència d'això, als Estats Units, fins el 2010, no es va construir cap més central nuclear i vint instal·lacions van ser clausurades, per bé que cent-quatre segueixen operatives. Actualment, hi ha una central en construcció i set de planificades.

**Txernòbil, Ucraïna, 1986:** Es considera l'accident més greu dels ocorreguts en una central nuclear. Es va produir el 26 d'abril de 1986 durant la realització d'unes proves de comportament en cas de fallada d'energia elèctrica, operacions que eren controlades manualment. Mentre es feien les proves, el reactor va reduir excessivament l'energia produïda i, per evitar que s'aturés, es va provocar una reactivació, que no es va poder controlar. Això va passar, per una part, perquè era un reactor de disseny de primera generació amb reduïdes mesures de seguretat —la central no disposava d'edifici de contenció—, fet que era possible a la URSS, però que no hagués estat admès en cap altre país occidental; i, per altra part, perquè el cap d'operacions no disposava de tota la informació tècnica sobre el reactor. Aquella maniobra va provocar la fusió del nucli, l'accident més greu que pot succeir en una central nuclear. L'explosió originada va ser molt violenta, l'incendi provocat va durar deu dies, va destruir part del reactor i va provocar l'expulsió a l'exterior de 8 tones de combustible amb isòtops d'alta radioactivitat i llarg temps de desintegració.

Almenys trenta dels heroics operaris que van participar en el control del reactor, llançant productes químics per absorbir la radiació i cobrint les restes del reactor amb sorra mitjançant helicòpters, van morir per radiació letal. Successives evacuacions van afectar més de 350.000 persones, i es va haver de deixar definitivament abandonada la població de Prypiat, que tenia 50.000 habitants, i tot un radi de 30 km. El balanç de víctimes produïdes en els deu anys posteriors va ser d'uns 20.000 morts i uns 300.000 afectats de diferents tipus de càncer.

Per confinar la radiació emesa per les restes del reactor destruït es va haver de construir un sarcòfag de ciment, que va ser reforçat anys més tard amb un recobriment addicional d'acer. Per dur a terme aquesta feina i recollir residus radioactius alliberats, es va haver de mobilitzar més de 600.000 persones entre militars, bombers i voluntaris, les quals van haver d'executar diverses tasques en unes condicions de treball d'alt risc per la seva salut.

**Fukushima, Japó, 2011:** El recent accident succeït a la planta nuclear de Fukushima I es va desencadenar amb el tsunami que va seguir al terratrèmol del dia 11 de març. Aquest terratrèmol, que va assolir els 8,9 graus en l'escala de Richter, ha estat el més fort de la història del Japó i el cinquè més fort de tot el planeta des que se'n tenen registres. El terratrèmol va produir la parada automàtica de totes les centrals nuclears de la zona més propera (Fukushima I, Fukushima II, Onagawa i Toka). Al llarg dels anys, les centrals nuclears del Japó han resistit terratrèmols importants amb danys relativament poc importants. No obstant això, el terratrèmol de 2007 a Chuetsu-oki —de 6,8 graus Richter i molt destructiu— va provocar a la central de Kashiwazaki-Kariwa la caiguda d'alguns contenidors amb deixalles radioactives, alguns dels quals es van obrir, fet, però, que no comportà contaminació radiològica a l'exterior. El sisme també va provocar algunes fugites d'aigua lleugerament contaminada a l'exterior, cosa que tampoc causà danys, però sí un incendi als transformadors i una fugida d'oli que contaminà l'entorn. Aquesta central nuclear, que ja havia portat controvèrsia per haver estat construïda sobre una falla activa, va ser obligada a fer una sèrie d'obres per millorar la seva seguretat.

En el cas de Fukushima I, constituïda per sis reactors dels quals tres estaven aturats per manteniment, el fort terratrèmol va provocar danys en les instal·lacions de distribució d'energia elèctrica, mentre que el control de les centrals es va mantenir amb els generadors d'emergència de què disposen. El problema es va originar quan el tsunami que afectà la planta va arrossegar els grups generadors i els dipòsits de fuel, excepte un que estava soterrat. Això va obligar a dosificar l'escassa energia disponible a fi de controlar la refrigeració dels tres reactors que estaven en funcionament, els tres que estaven aturats i els tancs d'emmagatzematge de combustible gastat, cosa que ja va produir els primers episodis de sobreescalfament. Aquesta situació de control de refrigeració sota mínims solament es va poder mantenir unes hores, perquè les bateries d'emergència es van esgotar. En no poder restablir cap sistema d'alimentació alternatiu, es va declarar l'estat d'emergència i es va procedir a l'evacuació de la població en un radi de 20 km, cosa que afectà unes 51.000 persones.

Amb els esforços fets per refrigerar els reactors es van abocar al mar grans quantitats d'aigua contaminada i, per tal d'evitar les sobrepressions produïdes per l'ebullició de l'aigua del reactor, es van haver d'alliberar a l'atmosfera gasos amb elevats nivells de radioactivitat, per bé que els vents dominants en direcció a l'oceà van poder mitigar-ne els efectes. Tot i els esforços esmerçats, després de successives explosions, es va produir la fusió del nucli de tres reactors i un quart reactor va patir grans danys.

Gràcies a les tasques de control dels reactors, dutes a terme per personal voluntari —els heroics de Fukushima—, s'aconseguí que, tot i la gravetat de la situació i que van ser quatre els

reactors afectats, els danys a les persones fossin molt menors que a Txernòbil. En aquest cas, la contaminació radioactiva es va reduir amb la gran dilució de les aigües abocades a l'oceà; d'altra banda, l'emissió de gasos durant les despressuritzacions i les explosions també van quedar molt diluïdes gràcies als vents dominants que endinsaven els núvols tòxics sobre l'oceà. Els danys econòmics i materials provocats han estat molt quantiosos i caldrà afrontar també, a part de la pèrdua dels sis reactors, les tasques de desmantellament, que es poden prolongar durant més de deu anys.

Gener 2012