

Termodinàmica i energia

Energies renovables

Laura Jarauta Rovira
Marta Morata Cariñena

PID_00166267



Universitat Oberta
de Catalunya

www.uoc.edu

Índex

Introducció	7
Objectius	10
1. Energia, calor i temperatura	13
1.1. Energia	13
1.2. Calor	14
1.3. Temperatura	16
1.4. Mesura de la calor	18
1.4.1. Calor específica	19
1.4.2. Calor latent	21
1.4.3. Transmissió de la calor	24
1.5. Diferència entre calor i temperatura	30
1.6. Què hem après?	30
2. Lleis de la termodinàmica	32
2.1. Conceptes bàsics de termodinàmica	33
2.1.1. Energia interna i entropia	34
2.1.2. Sistemes termodinàmics	34
2.1.3. Classificació dels sistemes termodinàmics	36
2.1.4. Concepte de pressió i de volum	37
2.2. Estat d'un sistema termodinàmic	38
2.3. Tipus de processos termodinàmics i diagrames T - S	39
2.3.1. Diagrames T - S	40
2.3.2. Procés isoterm	41
2.3.3. Procés isocor	41
2.3.4. Procés isòbar	42
2.3.5. Procés adiabàtic	42
2.4. Llei zero de la termodinàmica	42
2.5. Primer principi de la termodinàmica	45
2.6. Segon principi de la termodinàmica. Entropia	46
2.7. Què hem après?	48
3. Accés a l'energia	49
3.1. Dades de l'energia	49
3.1.1. Evolució i estat actual del consum energètic	50
3.1.2. Tipus d'energia i concepte d'energia primària	53
3.1.3. Consum d'energia primària a Espanya	54
3.1.4. Consum d'energia a la llar	56
3.1.5. L'energia elèctrica	58
3.2. Els agents del mercat elèctric	68
3.2.1. Productors: el <i>mix</i> de generació	69

3.2.2. Transformació i distribució	72
3.2.3. Comercialitzadores	72
3.2.4. Consumidors	73
3.2.5. L'operador del mercat ibèric d'energia	74
3.3. Què hem après?	77
4. Energia tèrmica i energia nuclear	78
4.1. Les transformacions d'energia	79
4.2. Central tèrmica	81
4.2.1. Combustibles	82
4.2.2. Cicle termodinàmic	83
4.2.3. Central tèrmica convencional	85
4.2.4. Central tèrmica de cicle combinat: turbina de gas amb turbina de vapor	87
4.3. Central nuclear	89
4.3.1. Combustible: de l'urani als elements combustibles	89
4.3.2. Cicle termodinàmic	91
4.3.3. Impacte ambiental associat	91
4.4. Què hem après?	93
5. Energies eòlica i fotovoltaica	94
5.1. Què és una font d'energia renovable?	94
5.2. Estudi dels recursos renovables	95
5.2.1. Vent	95
5.2.2. Radiació solar	99
5.2.3. El problema de la regulació de les energies renovables	100
5.3. Energia eòlica	101
5.3.1. Criteris per a la implantació de l'energia eòlica	102
5.3.2. Aerogeneradors	103
5.3.3. Elements auxiliars	108
5.3.4. Impacte ambiental	109
5.4. Energia fotovoltaica	111
5.4.1. Introducció: tipus de plantes solars	112
5.4.2. Tipus de plantes solars fotovoltaiques	114
5.4.3. Connexió a la xarxa: marc legal	117
5.5. Què hem après?	118
6. Sistema fotovoltaic autònom	120
6.1. Elements que formen una instal·lació fotovoltaica	121
6.1.1. Sistema de captació	122
6.1.2. Acumulació: bateries	128
6.1.3. Regulació	130
6.1.4. Inversor continu-altern	131
6.2. Dimensionament de la instal·lació	133
6.2.1. Demanda energètica	134
6.2.2. Càlcul de l'energia necessària	138

6.2.3. Radiació solar disponible	138
6.2.4. Nombre de mòduls fotovoltaics necessaris	141
6.2.5. Capacitat del sistema d'acumulació: nombre de bateries	142
6.2.6. Selecció dels altres elements de la instal·lació	144
6.3. Sistemes híbrids fotovoltaics-eòlics	146
6.4. Què hem après?	147
7. Sistemes generadors aïllats	148
7.1. Sistemes generadors aïllats	148
7.2. Què hem après?	149
8. Problemes resoltos	150
8.1. Enunciats	150
8.2. Solucions	152
Resum	159
Exercicis d'autoavaluació	163
Solucionari	165
Glossari	165
Bibliografia	169

Introducció


La societat actual es caracteritza per fer un ús continuat de l'energia, en les seves diferents formes, per tal de satisfer les seves necessitats. Des que ens llevem, sigui amb la dutxa d'aigua calenta, el microones per escalfar el cafè o amb la ràdio, i posteriorment al llarg de tota la jornada, estem tan acostumats a consumir energia que ni tan sols ens adonem de quan ho fem.

L'ús i l'aplicació de l'energia ha millorat l'habitabilitat a les ciutats i ha augmentat el nivell de confort amb la calefacció o la il·luminació. L'energia també ha possibilitat diferents transformacions fisicoquímiques que han originat uns efectes no desitjats i desconeguts que estan afectant seriosament la sostenibilitat de la manera d'usar l'energia.


La manera com utilitzem l'energia afecta les possibilitats de mantenir el desenvolupament de la nostra societat. Si no en consumim gaire, haurem de consumir massa esforços per a cobrir les necessitats bàsiques i no podrem dedicar esforços a desenvolupar-nos. Però si consumim massa energia, el cost monetari, ambiental o de recursos d'aquest excés de consum obligarà a dedicar un esforç addicional que no podem orientar vers el desenvolupament que perseguim. Les formes d'energia que s'han utilitzat per a activitats bàsiques han anat evolucionant amb el temps. Des de la llenya, el carbó, el petroli, el gas o l'electricitat, fins a l'energia solar o fotovoltaica. Es pot observar com històricament no hi ha cap determinisme tecnològic respecte a les fonts d'energia i les tècniques a utilitzar. Les situacions actuals són producte de les decisions preses al llarg de la història quant al tipus i la qualitat de les prestacions, els costos econòmics, la salubritat, la contaminació i l'assignació dels recursos energètics.

L'energia es pot definir com la capacitat de produir un treball. Com hi ha diferents formes de treball, s'invertirà en diferents manifestacions d'energia. Per exemple, hi ha el treball elèctric i l'energia elèctrica, o el treball mecànic i l'energia mecànica. I dins de la física hi ha una branca, la termodinàmica, que s'ocupa precisament de l'estudi de l'energia i les seves transformacions en els diferents sistemes des d'un punt de vista macroscòpic.

La termodinàmica és una ciència fenomenològica de caràcter universal que estableix uns criteris bàsics sobre la interacció i l'evolució de l'energia i la matèria de molts sistemes, uns criteris que són vàlids en problemes comuns d'enginyeria, química i física. I per què diem que la termodinàmica és fenomenològica? Perquè està basada en lleis o principis que s'han formulat a partir de l'experiència. Això ha estat possible, en part, perquè el seu estudi es pot abordar des del punt de vista macroscòpic, a partir de les propietats del sistema: pressió (P), volum (V) i temperatura (T) relacionades per lleis empíriques.



El concepte d'*energia* s'estudia en el mòdul "Mecànica" d'aquesta assignatura.



El concepte de *treball* s'estudia en el mòdul "Mecànica" d'aquesta assignatura.

Nivell macroscòpic

El nivell macroscòpic, des del punt de vista de la física, és el nivell de descripció d'un estat físic concret de partícules que integren un cos i es pot definir a partir de magnituds extensives com el volum, la longitud o la massa, i magnituds intensives mitjanes com la pressió o la temperatura.

En qualsevol cas, en aquest mòdul estudiarem la termodinàmica només en un nivell descriptiu i conceptual per a entendre els processos que estan implicats en la generació de l'energia.

Cal destacar que, dels diferents tipus d'energia que podem tenir (cinètica, tèrmica, potencial, etc.), la que més intervé en el nostre dia a dia, com a societat industrialitzada i tecnològica, és l'energia elèctrica. Hem arribat a un punt en què no ens sorprèn la facilitat amb què encenem una làmpada o endollem un aparell. Tot i això, el sistema elèctric té un funcionament molt complex. Per exemple, un aspecte que molts cops es desconeix del sistema elèctric és que aquest està coordinat fins a tal punt que l'electricitat que consumim en cada moment es genera en aquell precís instant a la central elèctrica. Així doncs, no hi ha electricitat acumulada per si de cas ens posem a fer servir un aparell, sinó que en cada instant, el consum d'electricitat és el mateix que la producció.

A més a més, el sistema elèctric i energètic actual, de la nostra societat, és completament dependent dels combustibles fòssils (carbó, petroli i gas natural). Aquests recursos es troben en quantitats finites a la Terra, per la qual cosa es van esgotant i, a més, provoquen impactes ambientals com el canvi climàtic. Altres tipus de fonts energètiques, com l'energia nuclear, presenten aspectes que no estan del tot resolts, com ara la gestió dels residus que generen.

És en aquest context que les energies renovables estan començant a tenir cada cop més importància. Es tracta de fonts energètiques inesgotables que tenim disponibles i que ens permeten generar electricitat amb recursos locals i sense hipotecar, amb el nostre consum, la disponibilitat dels recursos de les generacions futures. L'energia eòlica i la fotovoltaica en són dos exemples. Cal però tenir en compte que aquests sistemes poden tenir altres tipus d'impactes ambientals o socials, els quals caldrà considerar des d'un bon començament a l'hora de construir aquest tipus d'instal·lacions.

Conèixer el funcionament del sistema elèctric i les seves característiques ens servirà sens dubte per a entendre millor els reptes i les oportunitats que tenim com a societat. Més encara si tenim en compte que la nostra generació serà segurament una de les darreres que podrà disposar de l'energia fòssil (gas, petroli i carbó) a baix cost i amb una producció quasi il·limitada.

Com a conclusió, indicar que en aquest mòdul tractarem, precisament, de la termodinàmica en particular i de l'energia en general. El mòdul està estructurat en dues grans parts:

- 1) La primera part correspon als dos primers apartats. En aquests estudiarem la termodinàmica com a branca de la ciència. Començarem definint els conceptes bàsics d'aquesta disciplina i, a continuació, n'enunciarem les lleis bàsiques.

2) La segona part correspon als apartats del 3 al 7. En aquests analitzarem el funcionament del sistema energètic actual, centrant-nos en les diferents tecnologies de generació elèctrica: les de fonts convencionals o fòssils i les d'energies renovables. Començarem fent un repàs al model energètic actual i tot seguit, en l'apartat 4 analitzarem les energies tèrmica i nuclear, que són les fonts més importants d'energia al nostre país. A continuació, en els apartats 5 i 6 ens centrarem en dues de les energies renovables més importants: l'eòlica i la solar. Finalment, en l'apartat 7 parlarem dels sistemes productors d'energia autònoms.

Objectius

En aquesta part del mòdul es persegueixen els objectius següents:

- 1.** Saber què són, des del punt de vista de la física: l'energia, la calor, la temperatura, la pressió, el volum i l'entropia.
- 2.** Conèixer les tres lleis de la termodinàmica.
- 3.** Conèixer com és el consum energètic mundial actual i quina ha estat la seva evolució.
- 4.** Detallar de quines fonts energètiques s'obtenen els recursos.
- 5.** Definir termes clau per a la valoració de l'energia: energia lliure, energia primària, energia secundària, energia final i energia útil.
- 6.** Analitzar el consum energètic a Espanya, que en tractar-se d'una illa energètica, dóna una visió global de com és un sistema energètic.
- 7.** Descriure els principals impactes ambientals i socials associats al consum d'energia.
- 8.** Detallar els agents que intervenen en el mercat elèctric: productors, distribuïdors, comercialitzadores, consumidors i l'operador del mercat.
- 9.** Descriure com funcionen, a nivell termodinàmic i tecnològic, les principals centrals de generació elèctrica actuals: centrals tèrmiques, centrals de cicle combinat i centrals nuclears.
- 10.** Donar a conèixer què són les fonts d'energia renovable i quines són les seves peculiaritats en comparació de les fonts d'energia fòssil.
- 11.** Aprendre a avaluar els recursos renovables, concretament, el recurs eòlic i la radiació solar.
- 12.** Detallar els elements que formen un parc eòlic.
- 13.** Descriure com funciona un aerogenerador i avaluar-ne el potencial de generació d'energia.
- 14.** Enumerar els diferents tipus de plantes solars existents: tèrmiques, termo-elèctriques i fotovoltaïques.

- 15.** Descriure com funciona una cèl·lula fotovoltaica i els diferents tipus que hi ha.
- 16.** Detallar els elements que formen una planta fotovoltaica.
- 17.** Aprendre a dimensionar una instal·lació solar fotovoltaica autònoma perquè pugui satisfer una demanda elèctrica concreta.
- 18.** Descriure els sistemes de generació aïllats: com són i en quins casos són necessaris.

1. Energia, calor i temperatura

Començarem l'estudi de la termodinàmica a partir de dos conceptes tan comuns com la *temperatura* i la *calor*. Per què parlem de calor i de temperatura?

La calor és una forma d'energia i la temperatura és una mesura d'energia, i l'energia és, precisament, un dels conceptes clau d'aquest mòdul, com heu vist en la introducció. Així, parlarem de calor i de temperatura, però abans definirem el concepte d'*energia*, encara que de ben segur tots n'heu sentit a parlar (només cal que mireu les notícies o el mòdul de mecànica).

En aquest apartat definirem aquests tres conceptes (*energia, calor i temperatura*), però a més veureu com mesurar la calor i un conjunt de magnituds que hi estan relacionades.

Què aprendrem?

En aquest apartat veureu què són conceptes tan quotidians com la calor, l'energia i la temperatura, com es mesuren i en què es diferencien. També veureu una cosa fonamental per a la termodinàmica com és la transmissió de calor.

Què suposarem?

Per a l'estudi d'aquest apartat suposarem que teniu assimilats els conceptes de *treball* i *energia* del mòdul de mecànica.

1.1. Energia

Quan observem al nostre voltant, el món i, en concret, la nostra vida diària, podem afirmar que tant un com l'altra estan basats en l'energia. L'energia elèctrica, per exemple, ens envolta en gairebé tot allò que fem o usem. L'energia elèctrica es converteix en diferents tipus d'energia que utilitzem a diari, com l'energia lluminosa per a la nostra il·luminació, l'energia mecànica per als nostres electrodomèstics o l'energia tèrmica per escalfar-nos. Però vegem què diu la física del concepte d'*energia*.

L'**energia** és la capacitat que té un cos de realitzar treball o bé de transformar o escalfar.

El treball és una de les formes de transmissió d'energia entre els cossos. Quan es parla de treball en un vocabulari comú, associem aquest concepte a l'esforç.

Des del punt de vista de la física, el concepte de *treball* no és més que la força resultant aplicada sobre un objecte (entesa com la força total efectiva) i, a més, aquest objecte ha de realitzar un determinat desplaçament. Per exemple, quan es disposa d'un objecte que s'està desplaçant a una velocitat i aquest objecte xoca amb una paret on està recolzat un clau, quan es produeix el xoc, l'objecte inverteix el treball que ha realitzat en el desplaçament en l'energia necessària per a poder clavar el clau a la paret.

D'altra banda, l'energia forma part d'un grup de magnituds que es diuen **magnituds extensives**. Aquestes magnituds es caracteritzen per ser additives. Si considerem un sistema format per dues parts, el valor total d'una magnitud extensiva és la suma dels valors en cada una de les dues parts. Per exemple, la massa o el volum d'un cos, o l'energia d'un sistema termodinàmic són magnituds extensives.

Així, des d'una visió de la termodinàmica, l'energia s'entén com una propietat extensiva que es pot presentar de múltiples formes: mecànica, tèrmica, elèctrica, química, nuclear, etc. La unitat d'energia és exactament la mateixa que la del treball físic. En el Sistema Internacional es mesura en joules ($1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}$).

L'energia, com hem dit, és una magnitud extensiva perquè si unim dos cossos amb una determinada energia, l'energia total serà la suma d'ambdues. Això es deu també al fet que és una magnitud que depèn de la quantitat de substància que té el cos o sistema.

D'altra banda, concebem l'energia com una magnitud física perquè es pot mesurar i atribuir un valor numèric quantitatiu. És a dir, aquest electrodomèstic consumeix tanta energia.

Es pot dir que la termodinàmica s'ocupa de les transformacions i es pot dir que l'enginyeria s'encarrega de processar i gestionar bé aquesta energia i les seves transformacions per a donar a la societat els productes i serveis que necessita.

1.2. Calor

Si pensem com està configurat l'Univers, direm que l'Univers és matèria i és energia. La matèria està composta d'àtoms i molècules (entenen les molècules com a conjunt d'àtoms) i l'energia farà que aquests àtoms i molècules estiguin sempre en moviment. El moviment que realitzen aquests àtoms i molècules pot ser de rotació al voltant de si mateixes, de vibració o xocs d'unes contra les altres. El resultat del moviment d'aquests àtoms o molècules és una forma d'energia que s'anomena **calor**, la qual és en tot tipus de matèria.

Recordeu

Recordeu, del que heu vist en el mòdul de mecànica, que el treball s'expressa matemàticament com el producte escalar de la força pel desplaçament:

$$W = \int F dx$$

Recordeu

N és el símbol del newton, la unitat de força, i m és el símbol del metre, la unitat de longitud en el Sistema Internacional d'unitats.

Matèria

Tota la matèria es compon d'àtoms i molècules.

Però, aquesta és la mateixa calor de la qual parlem habitualment i que sentim nosaltres?

A l'organisme, l'estimulació del sistema nerviós pot ocasionar un augment del metabolisme cel·lular, la qual cosa augmenta la calor produïda.

La calor es pot definir en termes trivials com el contingut "energètic" d'un sistema. Per tant, suma totes les energies que provenen dels moviments dels àtoms que el componen. Aquesta calor només es posa de manifest quan es transfereix del sistema als voltants o viceversa. La calor no és una nova forma d'energia, sinó una transferència d'energia en què intervenen un gran nombre de partícules.

L'energia es pot presentar de formes molt diferents i es pot transformar d'un tipus d'energia a un altre. De fet, "l'energia no es crea ni es destrueix, només es transforma". Veurem més endavant, en l'apartat 2.5, que aquesta llei és fonamental i té el rang de principi. Per tant, molts tipus d'energia es poden transformar en calor. L'energia electromagnètica, l'electrostàtica o elèctrica, la mecànica, la química o la nuclear, poden escalfar una substància i fer que s'incrementi la velocitat de les seves molècules. Si posem energia en un sistema, aquest s'escalfa; si traiem energia, es refreda. És el que succeeix, per exemple, quan tenim fred i saltem per a entrar en calor; o si tenim fred a les mans i ens freguem una contra l'altra per escalfar-les.

Per exemple, l'energia mecànica es transforma en energia tèrmica sempre que fem botar una pilota. Cada vegada que la pilota reboti sobre el terra, part de l'energia que porta la pilota (energia cinètica deguda a la velocitat) es converteix en calor, i fa que la pilota reboti i que assoleixi cada vegada menys altura. És a dir, que hi ha una pèrdua d'energia a causa de la transferència d'energia en forma de calor que es produeix en cada rebot.

Un altre exemple és el cas de l'energia tèrmica que es transfereix d'uns objectes als altres i fa que s'escalfin. Quan escalfem aigua en una cassola, la calor del foc fa que les molècules de la cassola comencin a vibrar més de pressa. La conseqüència d'aquesta vibració és que la cassola s'escalfa. Al seu torn, la calor que adquireix la cassola provoca que les molècules d'aigua es moguin més de pressa i s'escalfin. Per tant, quan escalfem alguna cosa, el que estem fent és incrementar la velocitat de les seves molècules.

Veiem per tant que hi ha moltes formes d'energia i que aquesta energia es pot transformar en una altra forma d'energia o calor.

L'energia elèctrica es transforma en energia tèrmica quan usem estufes elèctriques, escalfadors o bombetes. També els nostres cossos converteixen l'energia química dels aliments que mengem en calor. La llum del Sol es transforma en calor i fa que la superfície terrestre s'escalfi.

Activitat 1.1.

Se us ocorren més exemples de transformació d'un tipus d'energia en calor a la nostra vida quotidiana?

En resum, la calor és l'energia que té un objecte a causa del moviment dels seus àtoms o molècules. Aquests àtoms o molècules estan en moviment continu, vibren o xoquen. En augmentar l'energia d'un objecte, els seus àtoms i molècules es mouen més de pressa, la qual cosa incrementa la seva energia de moviment o calor.

Però, si l'energia es transforma en calor, per què a les notícies ens donen sempre la temperatura? I per què quan ens donen la temperatura ja ens fem una idea de si farà molta calor o no? Què és la temperatura?

1.3. Temperatura

A la nostra vida diària experimentem la temperatura tots els dies: quan fa calor, sentim calor; quan està nevant, sentim fred; quan estem bullint aigua, fem que la temperatura augmenti i quan fem gelat, esperem que la temperatura baixi.

Com hem introduït al principi de l'apartat, la matèria està formada per àtoms i molècules.

El concepte de *temperatura* es pot introduir com la mesura de la calor o de l'energia tèrmica de les partícules d'una substància.

Però els àtoms i les molècules d'una determinada substància no sempre es mouen a la mateixa velocitat. Això significa que hi ha un rang d'energia de moviment dins de les molècules. Per exemple, en un gas, les molècules es mouen aleatòriament i a diferents velocitats (unes es mouen més ràpid i altres es mouen més lentament).

Com que allò que mesurem és el seu moviment mitjà, la temperatura no depèn del nombre de partícules en un objecte i per tant, no depèn de la seva mida. Per exemple, la temperatura d'un cassó d'aigua bullint és la mateixa que la temperatura d'una olla d'aigua bullint, malgrat que l'olla sigui molt més gran i tingui més quantitat de molècules d'aigua que el cassó.

La **temperatura** és el que es coneix com una magnitud intensiva.

Una magnitud és intensiva quan, per a un sistema en equilibri dividit en parts, la temperatura global no és la suma de les temperatures de cadascuna de les parts que confinen el sistema.

Això és el contrari que succeeix per exemple amb l'energia (vegeu el subapartat 1.1. Energia), la massa, la quantitat de moviment i moltes altres magnituds que s'anomenen *magnituds extensives*. La idea que s'intenta transmetre de la temperatura és que es tracta d'una mesura de la mitjana de l'energia tèrmica d'un cos.

Així, direm que un cos és calent si té una temperatura elevada. Això vol dir que les seves partícules, globalment, tenen una velocitat elevada. D'altra banda, aquest cos tindrà molta energia tèrmica si, a més de tenir una temperatura alta, té una gran quantitat de matèria.

Les unitats de mesura de la temperatura són les següents:

1) **Kelvin (K)**. És la unitat fonamental per a la mesura de la temperatura absoluta i se simbolitza amb K.

Sempre s'intentarà utilitzar el kelvin com a unitat de mesura. És la mesura absoluta de la temperatura i és la que accepta el Sistema Internacional d'unitats.

Graus i kèlvins

Cal anar amb compte amb la unitat de mesura de la temperatura. El seu nom és *kelvin*, no pas *grau Kelvin*, i el seu símbol és K, no °K.

S'anomena *temperatura absoluta* perquè el seu zero coincideix amb la temperatura més baixa possible, és a dir, el zero absolut, que és aquella temperatura a la qual totes les partícules d'un material es trobarien en repòs. Fixeu-vos que el zero de temperatura en l'escala Kelvin són $-273,15\text{ °C}$ (mireu l'equació 1).

2) **Grau Celsius (°C)**. Amb freqüència, la mesura de la temperatura es dona en una escala més familiar com és el **grau Celsius (°C)**. Matemàticament, el canvi de °C a K s'expressa:

$$T\text{ (K)} = T\text{ (°C)} + 273,15 \quad (1)$$

Celsius i Kelvin

És important notar que la unitat de temperatura en el Sistema Internacional és el kelvin.

Per exemple, suposem una substància que s'escalfa i assoleix una temperatura de 37 °C . Quant marcarà un termòmetre en kèlvins (K)?

Hem vist com la mesura de la temperatura es pot expressar en diferents unitats. Hem parlat de la mesura de la temperatura en graus centígrads (°C) i kèlvins (K), i hem establert la relació entre ambdues unitats a partir de l'equació (1):

$$T\text{ (K)} = T\text{ (°C)} + 273,15 \quad (2)$$

Tenint en compte que la substància està a 37 °C , i aplicant la fórmula anterior, obtindrem el valor de la temperatura de la substància expressat en kèlvins (K).

$$T\text{ (K)} = T\text{ (°C)} + 273,15 = 37 + 273,15 = 310,15\text{ K} \quad (3)$$

Per tant, la temperatura de 37 °C es correspon a 310 K , que és la mateixa temperatura expressada en unitats diferents.

L'aparell típic amb què es mesura la temperatura es diu **termòmetre**: noteu que un termòmetre en kèlvins i en graus Celsius té la mateixa separació entre graus. Això vol dir que un augment de temperatura d'un kelvin representa un augment de temperatura d'un grau Celsius. L'únic que varia en un cas i un altre és on se situa el zero de la temperatura.

En consultar la bibliografia americana o anglesa, podeu trobar altres escales de mesura de la temperatura, com l'escala **Fahrenheit** (°F) o la temperatura **Ran-kine** (°R). Matemàticament, la relació entre les diferents escales s'expressa segons les fórmules següents:

$$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{T (^{\circ}\text{F}) - 32}{1,8} \quad (4)$$

$$T (^{\circ}\text{R}) = T (^{\circ}\text{C}) + 459,67 \quad (5)$$

En aquests casos, un termòmetre en graus Celsius i un en graus Fahrenheit, per exemple, tindran una separació de graus diferent.

Ara ja sabem què és la temperatura i a què correspon, però queda veure què és exactament la calor i com es mesura.

1.4. Mesura de la calor

La **calor**, o **energia tèrmica**, se simbolitza normalment amb la lletra Q i és una de les diverses formes d'energia, com hem vist al principi del subapartat 1.2. Es tracta d'una forma d'energia "privilegiada", ja que és present en qualsevol transformació energètica. Tota l'energia tendeix a convertir-se en energia tèrmica.

La calor, per la seva part, es pot convertir en altres formes d'energia, però la transformació mai no és completa, com ja veureu més endavant en l'apartat següent quan estúdieu el primer principi de la termodinàmica (en l'apartat 2.5).

L'energia tèrmica es manifesta pel moviment de les partícules d'un cos o material. Com més moviment tinguin les partícules, més calor assolirà el cos.

Com una forma d'energia que és, la calor Q té unitats d'energia. En el Sistema Internacional d'unitats s'utilitza el joule (J), però amb freqüència també s'utilitza la calor (cal).

La **caloria** es defineix com la quantitat de calor necessària per a elevar un grau la temperatura d'un gram d'aigua líquida. L'equivalència entre joules i calories és $1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$.

Fixeu-vos en la definició de calor. El que està dient és que l'experiència demostra que el treball realitzat sobre un sistema i la calor que allibera guarda sempre una relació constant i igual, amb un valor aproximat de 4,18. Per tant, per cada 4,18 joules de treball realitzat, es comunica una quantitat de calor igual a una calor.

D'altra banda, haureu notat que si poseu una olla de ferro al foc s'escalfa abans que per exemple una de ceràmica; o que és més fàcil descongelar un tros de carn que un pot ple d'aigua. És a dir, hi ha materials que s'escalfen o es refreden molt de pressa i altres que triguen més. Això es deu a dos conceptes fonamentals que són la calor específica i la calor latent, que veurem en els següents subapartats. Veurem també com es produeixen aquests processos de transmissió de calor.

1.4.1. Calor específica

Quan diversos cossos amb diferent temperatura es posen en contacte en un recinte, es produeix transferència de calor entre ells i assoleixen una temperatura final d'equilibri al cap de cert temps. Quan s'ha assolit aquest equilibri, s'ha de complir que la suma de les quantitats de calor intercanviades sigui zero, és a dir, en l'equilibri no hi ha intercanvi de calor.

La relació entre la calor que guanya una unitat de massa (1 kg en el Sistema Internacional d'unitats) d'una determinada substància i l'augment de temperatura que experimenta es defineix com calor específica i és una propietat molt important dels materials que relaciona ambdues magnituds:

$$c_e = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (6)$$

En l'equació anterior, c_e és la calor específica, Q és la quantitat de calor intercanviada i ΔT és l'increment de temperatura.

L'increment de la temperatura, ΔT , depèn de la temperatura de cada substància i de la temperatura final d'equilibri. De manera que, si la temperatura de la substància és inferior a la temperatura final d'equilibri, direm que el cos absorbeix calor ($Q < 0$). En canvi, si la temperatura de la substància és més alta que la temperatura final d'equilibri, direm que la substància cedeix calor ($Q > 0$).

Aquesta propietat, la calor específica, és constant per a intervals de pocs graus de temperatura. La taula 1 mostra els valors de la calor específica per a diferents substàncies a 20 °C de temperatura. I fixeu-vos en aquest detall: cal dir a quina temperatura estem proporcionant el valor, perquè la calor específica depèn de la temperatura.

Taula 1. Valors de la calor específica de diferents substàncies a 20 °C

Substància	c_e (J/kg · K)	c_e (cal/kg·°C)
Alumini pur	896	214,3
Coure pur	383	91,58
Ferro pur	452	108,1
Aigua	4.184	1.000
Freó 12	965,9	230,9
Aire sec	1.012	242,0

La caloría, cal, és una unitat de mesura de l'energia que no pertany al Sistema Internacional:
1 cal = 4,18 J

Com s'ha comentat, la calor específica és una propietat dels materials. Quan es parla d'escalfar o refredar un cos concret es parla de capacitat calorífica del cos, que és la quantitat de calor que ha d'absorbir el cos per incrementar en un grau la seva temperatura.

Si un cos ha absorbit una quantitat Q de calor i ha augmentat la seva temperatura un ΔT (increment de temperatura), la seva capacitat calorífica mitjana es pot calcular com:

$$\text{Capacitat calorífica} = \frac{Q}{\Delta T} \quad (7)$$

Segons la fórmula (7), la capacitat calorífica, en determinades condicions, depèn de la calor absorbida (Q) per una substància i de l'increment de temperatura resultant (ΔT).

La capacitat calorífica d'un sistema físic depèn de la quantitat de substància o massa d'aquest sistema. Per a un sistema format per una substància homogènia de massa m , es defineix la **calor específica o capacitat calorífica específica** c_e :

$$\text{Capacitat calorífica} = mc_e \quad (8)$$

Substància homogènia

Diem que una substància és homogènia quan, en absència de forces exteriors, les seves variables termodinàmiques són constants.

De les relacions anteriors, (7) i (8), es pot deduir que en augmentar la massa d'una substància, augmenta la seva capacitat calorífica i, amb això, la dificultat de la substància per a variar la seva temperatura (és el que s'anomena la **inèrcia tèrmica**). Un exemple són les ciutats costaneres on el mar actua com un gran termòstat i regula les variacions de temperatura.

Capacitat calorífica del ferro

Imagineu una massa de 12 kg de ferro. Quanta calor cal subministrar per a elevar la temperatura de la massa de ferro des de 80 °C fins a 120 °C?

Per calcular la quantitat de calor necessària per a elevar la temperatura de 80 °C a 120 °C, hem de calcular la capacitat calorífica d'aquesta substància. És a dir, la capacitat calorífica dependrà de la quantitat de massa i de la calor específica de la substància concreta segons l'equació (8):

$$\text{Capacitat calorífica} = mc_e \quad (9)$$

Fixeu-vos que en aquest exemple utilitzem J/kg °C i no pas J/kg K. En realitat, en aquest cas podem utilitzar ambdues unitats indistintament, ja que són joules per quilogram i per kelvin, però un increment de kèlvins sempre té el mateix valor que un increment de graus Celsius. En altres paraules, la diferència de temperatura té el mateix valor en kèlvins i en graus Celsius.

La quantitat de substància la sabem: són 12 kg. Per conèixer la calor específica del ferro, acudim a la taula 1, on el valor c_e del ferro és de 452 J/kg °C. Tenint en compte aquestes dades, i substituint-les en l'equació (8), obtenim:

$$\text{Capacitat calorífica} = mc_e = 12 \text{ kg} \cdot 452 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} = 5.424 \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}} \quad (10)$$

Una vegada calculada la capacitat calorífica de la massa de ferro, com el ferro augmenta la seva temperatura de 80 °C a 120 °C, la calor absorbida pel ferro s'expressa amb l'equació (7):

$$\text{Capacitat calorífica} = \frac{Q}{\Delta T} \quad (11)$$

En aïllar d'aquesta equació la calor absorbida Q per la massa de ferro, com ja s'ha calculat la capacitat calorífica i es coneix l'increment de temperatura ΔT , s'obté:

$$Q = \text{Capacitat calorífica} \cdot \Delta T = 5.424 \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}} (120 - 80) ^\circ\text{C} = 5.424 \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}} (40) ^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$Q = 216.960 \text{ J} \quad (13)$$

Fixeu-vos que la quantitat de calor absorbida és positiva ($Q > 0$), ja que la temperatura del cos és inferior a la temperatura final d'equilibri (el cos absorbeix calor).

1.4.2. Calor latent

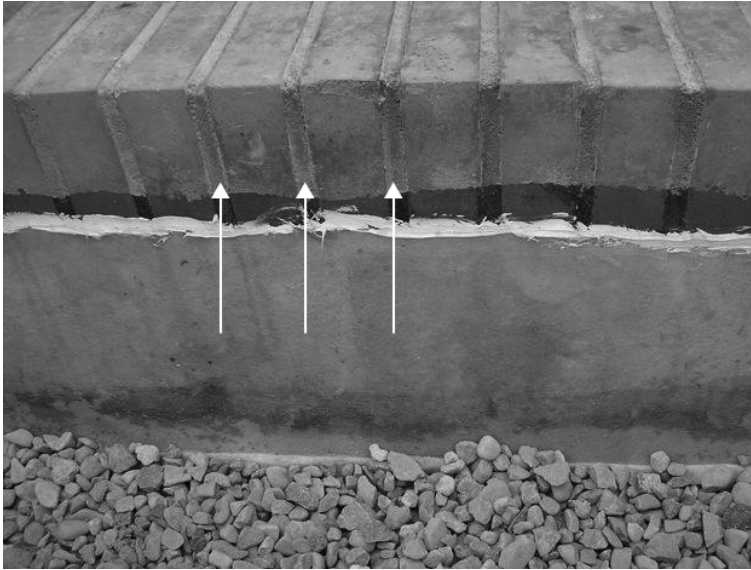
Amb aquestes explicacions es podria arribar a pensar que un cos podria incrementar la seva temperatura indefinidament. El cert és, tanmateix, que quan el cos arriba a certes condicions de pressió i de temperatura, es produeixen canvis. Tots els dies ocorren canvis en la matèria que ens envolta. Algunes d'aquestes transformacions fan canviar l'aspecte, la forma o l'estat. A aquests canvis els anomenem **canvis físics de la matèria**.

Per exemple, per què als carrers hi ha una franja més fosca al paviment? Per què els rails de la línia de tren tenen una petita separació? En el cas del paviment, les franges o juntes de dilatació absorbeixen els moviments de dilatació i contracció del material causats per les variacions tèrmiques i, d'aquesta manera, eviten esquerdes i desperfectes (fixeu-vos en la fotografia de la figura 1: les franges fosques que hi apareixen són les juntes de dilatació). Una cosa similar succeeix amb els rails de les vies del tren.

Per tant, podem concloure que els canvis de volum que pateix la matèria estan relacionats amb la temperatura i l'espai que ocupen.

Però els cossos també pateixen canvis de fase, és a dir, passen de sòlid a líquid i viceversa. Aquests canvis de fase entre els tres estats de la matèria també comporten un intercanvi d'energia.

Figura 1. Fotografia de les franges o juntes de dilatació



Les fletxes indiquen la posició de les juntes de dilatació

Entre els canvis físics més importants tenim els canvis d'estat, que són els canvis que es produeixen per transmissió de calor.

Els canvis de fase també produeixen un intercanvi d'energia entre els tres estats de la matèria: sòlid, líquid o gas. De manera que el cos passarà de sòlid a líquid o a gas i de líquid a gas, i absorbirà energia en cada pas:

- calor de fusió en el pas de sòlid a líquid;
- calor de sublimació en el pas de sòlid a gas; i
- calor de vaporització en el pas de líquid a gas.

Aquestes calors són característiques de cada material i depenen de les condicions de pressió i de temperatura.

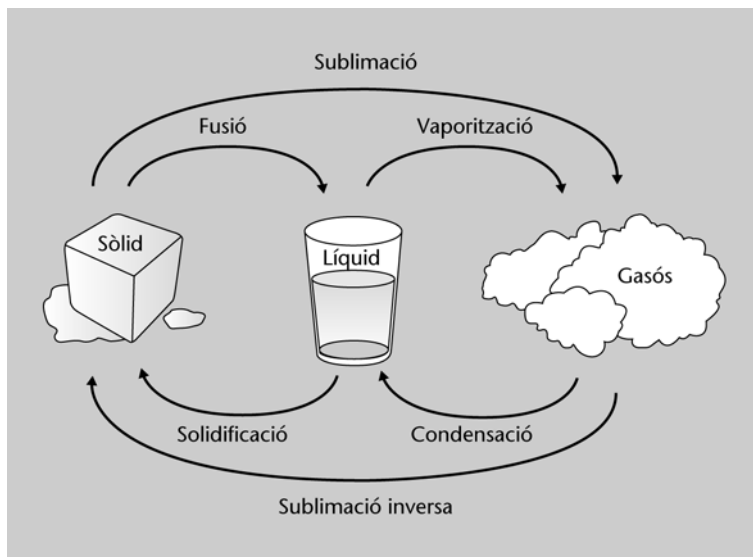
El pas contrari, és a dir, de gas a líquid o sòlid, i de líquid a sòlid es realitza cedint energia:

- calor de solidificació en el pas de líquid a sòlid;
- calor de sublimació inversa en el pas de gas a sòlid; i
- calor de condensació en el pas de gas a líquid.

En la figura 2 teniu un esquema dels diferents canvis de fase que poden ocórrer en la matèria.

Hem vist que, quan es produeix una transmissió de calor d'un cos a l'altre, aquesta calor depèn de la calor específica de la substància o cos i de la variació de temperatura.

Figura 2. Esquema dels canvis de fase entre els diferents estats de la matèria

**Figura 2**

Es mostra que la calor de fusió serveix per a passar de l'estat sòlid al líquid (a la inversa, la calor de solidificació); la de vaporització per a passar de l'estat líquid al gasós (a la inversa, la calor de condensació); i la de l'estat sòlid al gasós és la calor de sublimació (a la inversa, la de sublimació inversa).

Quan es produeix una transferència de calor que fa canviar l'aspecte de la matèria, aquesta calor depèn de la quantitat de massa de la substància i del que es coneix com a *calor latent* causat pel canvi d'estat físic que es produeix en la substància.

Matemàticament:

$$Q = mc_l \quad (14)$$

on m és la massa de la substància i c_l és la calor latent del canvi de fase o estat.

És important que tingueu en compte que el procés de canvi d'estat es realitza a temperatura constant. Per exemple: un tros de gel, en fondre's a la temperatura de fusió, manté la temperatura de $0\text{ }^\circ\text{C}$ (en forma de gel i després en forma de líquid). En aquest canvi d'estat ha de rebre una quantitat important de calor, només per a fondre'l, no per a canviar la temperatura: aquí la substància obeeix a una característica coneguda com a **calor latent de fusió** (C_f), i la del gel és de 334 J/g .

La mateixa aigua, si es continua escalfant, podrà evaporar-se. En assolir la temperatura de vaporització ($100\text{ }^\circ\text{C}$ a nivell del mar) passarà a vapor, després que se li hagin lliurat 2.260 joules de calor per cada gram. Aquest valor correspon a la **calor latent de vaporització** (C_v). És a dir, el sistema necessita un aportament d'energia per a invertir-lo en el canvi d'estat, i només en això. Quan canvia d'estat no canvia la temperatura. Una vegada l'estat ha canviat, la temperatura pot continuar variant.

Si el procés anés a l'inrevés de com s'ha plantejat, és a dir, de líquid a sòlid, la propietat de la matèria que s'ha d'utilitzar en aquest nou canvi d'estat continua

essent la calor latent de fusió i, en el cas del pas de gas a líquid, continua essent la calor latent de vaporització.

La calor latent d'un glaçó

Suposem un glaçó de 50 g. El glaçó està a 0 °C i volem obtenir-ne aigua. En aquest cas, necessitem aportar-hi la quantitat de calor necessària perquè el gel passi de l'estat sòlid a l'estat líquid (aigua). El gel pateix un canvi d'estat i per calcular la calor necessària aplicarem l'equació (14):

$$Q = mc_l \quad (15)$$

És a dir, quan es produeix una transferència de calor que fa canviar l'aspecte de la matèria, aquesta calor depèn de la quantitat de massa de la substància i del que es coneix com calor latent, c_l , causat pel canvi d'estat físic que es produeix a la substància. La calor latent de fusió del gel són 334 J/g i, com que la massa de gel és de 50 g, en aplicar l'equació (14) s'obté:

$$Q = mc_l = 50 \text{ g} \cdot 334 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 16.700 \text{ J} \quad (16)$$

En conclusió, per a fondre una massa de 50 g de gel és necessari aportar 16.700 joules.

1.4.3. Transmissió de la calor

Fins ara, hem introduït el concepte de *calor* com una transferència d'energia. Per tant, el flux de calor es produeix entre dos cossos perquè tenen diferent temperatura.

Però, com es realitzen aquests processos de transmissió de l'energia en forma de calor? El procés de transmissió de calor es pot dur a terme per mitjà de diferents mecanismes com són la conducció, la convecció i la radiació.

Encara que aquests tres processos poden tenir lloc simultàniament, pot succeir que un dels tres mecanismes predomini sobre els altres dos. Per exemple, la calor que es transmet a través de la paret d'una casa ho fa fonamentalment per conducció; l'aigua d'un cassó situat sobre un cremador de gas s'escalfa preferentment per convecció i la Terra rep la calor del Sol gairebé exclusivament per radiació.

Veurem a continuació cadascun d'aquests processos separatament.

Conducció

En els sòlids, l'única transferència de calor es realitza per conducció. Per exemple, si tenim una vareta metàl·lica i s'escalfa per un dels seus extrems, comença a augmentar la temperatura i la calor es transmet cap a l'extrem més fred per conducció. La transferència de calor per conducció es produeix pel moviment dels electrons que transporten energia quan hi ha una diferència de temperatura. Per aquest motiu, usem culleres de fusta a la cuina i no de metall.

La conducció de la calor és un mecanisme de transferència d'energia tèrmica entre dos sistemes basat en el contacte de les seves partícules sense flux de matèria i que tendeix a igualar la temperatura entre dos punts.

La conducció s'explica microscòpicament perquè les partícules d'un cos que tenen més temperatura i, per tant, amb més energia cinètica, transfereixen el seu moviment a la resta de les partícules que tenen menys temperatura. La llei que descriu la transmissió de la calor per conducció és una llei experimental.

Hi ha un paràmetre que depèn del tipus de material i que regularà la capacitat de transmissió de la calor per conducció: és la conductivitat tèrmica k . En el Sistema Internacional, les unitats de la conductivitat són els watts per metre i per kelvin ($W/(m\ K)$) o els joules per segon, per metre i per kelvin ($J/(s\ m\ K)$).

Si s'és rigorós, la conductivitat tèrmica és una propietat inherent al tipus de material i que dependrà de la temperatura. A una temperatura més alta es produeix un major moviment de les molècules que conformen el material (recordeu l'apartat 1.2. Calor, en què es va donar l'explicació de la calor), i es podrà transmetre més fàcilment l'energia cinètica. Per tant, en funció de com sigui la seva conductivitat tèrmica, es poden classificar els tipus de materials en:

1) **Conductors**: si tenen una conductivitat alta, els materials seran bons conductors. Normalment, els metalls tenen una conductivitat alta i són bons conductors de la calor.

2) **Aïllants**: els materials que tenen una conductivitat baixa s'anomenen aïllants i es consideren mals conductors de la calor (per exemple, el suro o el polièster són aïllants).

Per a veure-ho en un cas pràctic, quan posem a escalfar una olla metàl·lica, s'escalfa molt ràpid. Si col·loquem un drap sobre l'olla, la temperatura que assolirà el drap no té res a veure amb la que assoleix l'olla.

La taula 2 mostra la capacitat de certs materials per transmetre la calor, és a dir, el coeficient de conductivitat tèrmica k .

Taula 2. Valors de conductivitat k per a diferents materials (expressada en $W/(m\ K)$)

Material	k ($W/m\ K$)
Coure pur	401
Alumini	237
Vidre	0,81
Plàstic	0,25
Formigó	1,2

Microscòpicament

Microscòpicament es refereix als nivells de les xarxes cristallines, molècules i àtoms, i per a la seva completa descripció es requereix l'ús de la mecànica quàntica.

Recordeu que l'energia cinètica s'estudia en el mòdul "Mecànica" d'aquesta assignatura i es deu al moviment dels cossos.

Watts

Els watts es defineixen com joules per segon:
 $1\ W = 1\ J/s$

Conductivitat tèrmica

En aquest apartat es fa referència a la conductivitat tèrmica i no a la conductivitat elèctrica del mòdul d'electromagnetisme.

Material	k (W/m K)
Suro	0,043
Polietilè rígid	0,023
Aigua	0,6
Aire	0,026

És important ressaltar que a la taula 2 no solament apareixen materials sòlids, sinó que també hi apareix la conductivitat de certs fluids, com l'aigua o l'aire, encara que, en la majoria dels casos, la transmissió de la calor en els fluids es realitza per convecció (com veurem en l'apartat següent).

A la pràctica es poden considerar com materials aïllants aquells que presenten una conductivitat tèrmica inferior a 0,175 W/(m K).

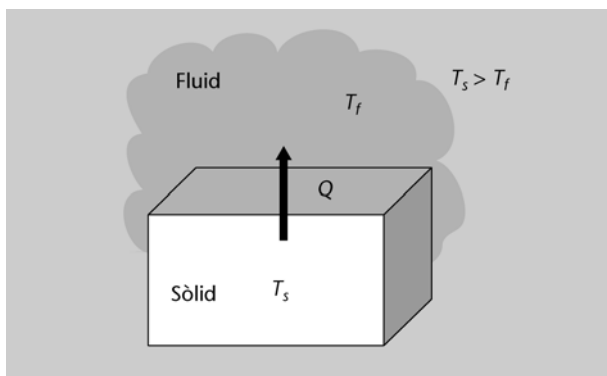
Convecció

La segona possibilitat per transmetre calor és la convecció, que és característica de les situacions en què hi ha present un fluid (gasos o líquids).

La convecció de la calor és un sistema de transmissió d'energia característica dels fluids (gasos i líquids). Es produeix quan aquests absorbeixen calor en una porció i després aquesta porció es desplaça i es barreja amb una altra més freda i li cedeix calor. Aquest moviment s'anomena **corrent de convecció**.

La conducció de la calor dins del fluid resulta molt complexa d'entendre i d'estudiar. El moviment de les partícules dins del fluid a diferents temperatures porta la calor a diferents punts del domini del fluid. Això vol dir que, a les equacions de conducció de la calor que descriuen el problema, cal afegir-hi les equacions de continuïtat i de conservació de l'energia del fluid. Aquestes situacions són molt complicades de resoldre analíticament i només és possible resoldre-les en casos molt concrets de convecció i per a això és necessari utilitzar mètodes numèrics i ordinadors.

Figura 3. Esquema de la transmissió de calor per convecció entre un fluid i un sòlid



En la figura 3 podeu veure un esquema de transmissió de calor per convecció entre un fluid i un sòlid. Quan un fluid està en contacte amb una paret sòlida de més temperatura, encara que el fluid presenti un moviment turbulent, al costat de la paret es forma una pel·lícula de fluid. Aquesta pel·lícula o capa s'anomena *capa límit*. El fluid que està en moviment turbulent s'emporta la calor. Com més turbulent és el moviment, més prima és la pel·lícula.

El fenomen de transmissió de calor de la paret al fluid es realitza per conducció a través de la pel·lícula i alhora per convecció del fluid. En conjunt, el fenomen és complex perquè la quantitat de calor transmesa dependrà de diversos factors concurrents, com ara:

- la naturalesa del fluid;
- l'estat del fluid (densitat, calor específica i conductibilitat tèrmica);
- la velocitat del fluid (si és lenta, el moviment serà laminar, i si és ràpida serà turbulent);
- l'intercanvi de calor (pot provocar evaporació, condensació o formació de la pel·lícula);
- la forma del sòlid (paret plana o corba, vertical o horitzontal);
- la naturalesa de la superfície (rugosa o llisa); i
- la conductivitat del sòlid (que sigui un conductor bo o dolent).

Moviment turbulent

Un moviment turbulent és un moviment desordenat de les partícules dins del fluid.

Moviment laminar

Un moviment laminar és aquell en què les partícules estan ordenades i es desplacen com si fossin superfícies.

L'estudi tèrmic de la convecció se simplifica a partir del **coeficient mitjà de transmissió de calor per convecció**, α , descrit a partir de l'expressió següent:

$$\frac{Q}{t} = \alpha \cdot S \cdot (T_s - T_f) \quad (17)$$

on Q/t és la calor que es transfereix en el procés de convecció, α és el coeficient de convecció, S és la secció a través de la qual es produeix la convecció, T_s és la temperatura del sòlid i T_f és la temperatura del fluid.

Recordeu

La lletra α és la lletra grega alfa minúscula.

Les unitats d'aquest coeficient, en el Sistema Internacional d'unitats, són $W/(m^2K)$.

El coeficient α es determina experimentalment. A la taula 3 teniu diferents valors i ordres de magnitud del valor del coeficient de transmissió per convecció en condicions usuals.

Taula 3. Valors del coeficient de transmissió de calor per convecció en les situacions més usuals

Classe de convecció	α ($W/(m^2K)$)
Convecció natural, aire	Entre 5 i 50
Convecció natural, aigua	Entre 10 i 100
Convecció forçada, aire	Entre 10 i 200
Convecció forçada, aigua	Entre 50 i 10.000

A la taula apareixen dues classes de transmissió per convecció: la convecció natural i la convecció forçada.

1) La **convecció natural** es produeix quan el fluid està en repòs i adquireix moviment a causa de les diferències de densitat causades per l'escalfament d'algunes de les seves molècules. Aquest escalfament és degut a la transmissió de calor. El moviment del fluid a gran escala es manifesta en fenòmens com el vent i els corrents marins i, a petita escala, la convecció natural es crea en el moviment d'un líquid mentre s'escalfa en un recipient, de manera que la calor es reparteix per tot el líquid. Aquest tipus de convecció el provoquen les diferències de densitat causades per les diferències de temperatura.

2) La **convecció forçada** es produeix quan el moviment del fluid que intercanvia calor es crea per mitjans mecànics: un ventilador, una bomba, etc. Podeu veure a la taula 3 com els valors dels coeficients de la convecció forçada produeixen efectes quantitativament més importants i, sovint, aquesta convecció es produeix en situacions en què es vol incrementar el flux de la calor. Per exemple, quan un cotxe està durant un temps aturat amb el motor en marxa, es posa en funcionament el ventilador del radiador i així es força la convecció amb l'aire de l'exterior i s'afavoreix que el líquid que evacua la calor del motor cedeixi aquesta calor a l'aire. Quan el cotxe està en moviment i passa aire a certa velocitat cap al radiador, no és necessari forçar la circulació de l'aire amb el ventilador, però igualment es tracta d'un cas de convecció forçada.

Quan tenim un sòlid i un fluid en contacte també es produeix transmissió de calor per convecció i, en aquest cas, hi ha una resistència tèrmica. La resistència tèrmica deguda a la convecció entre un sòlid i un fluid es determina a partir de l'expressió següent:

$$R_{T,convecció} = \frac{1}{\alpha \cdot S} \quad (18)$$

on R_T és la resistència tèrmica per convecció i es mesura en ohms (Ω); α és el coeficient de convecció i es mesura en $W/(m^2 K)$ i S és la secció (la superfície) a través de la qual es produeix la convecció.

Per a disminuir la resistència tèrmica de convecció i afavorir l'intercanvi de calor entre un sòlid i un líquid, amb el supòsit que no es poden modificar les condicions de flux i, per tant, no es pot modificar (augmentar) el valor d' α , l'única solució és incrementar la superfície S d'intercanvi. Una altra solució possible consisteix a augmentar la superfície exterior mitjançant extensions, que és el que es coneix com **aletes**.

La convecció també ocorre en l'aire calent que s'eleva. Alguns exemples són:

- en escalfar-se, l'aire que descansa sobre un radiador s'expandeix, disminueix la seva densitat i s'eleva;

- els corrents oceànics freds són un exemple de convecció natural a gran escala;
- el vent és un altre exemple de convecció i el clima, en general, és el resultat de corrents d'aire; i
- quan s'escalfa una olla amb aigua es produeixen corrents de convecció. A mesura que l'aigua calenta del fons puja, a causa de la seva densitat més baixa, se substitueix per l'aigua més freda de la part superior. Aquest principi s'utilitza en molts sistemes de calefacció, normalment els sistemes que utilitzen radiadors d'aigua calenta.

Però també podem sentir la convecció: penseu en la sensació de fred que tenim quan hi ha un vent fort (que segons els meteoròlegs es pot assimilar a dos graus menys de temperatura) a diferència de la sensació que tenim quan no hi ha vent.

Radiació

Tots els cossos, sigui quina sigui la seva temperatura, emeten energia de manera contínua des de la seva superfície. Aquesta energia, anomenada *energia radiant*, la transporten ones electromagnètiques. Per aquest motiu, l'energia radiant es pot transmetre també en el buit.

L'emissió contínua d'energia radiant per un cos s'anomena **radiació**.

Com a conseqüència d'aquest fenomen, dos cossos col·locats en el buit i que tenen diferent temperatura assolixen l'equilibri tèrmic perquè el que té menys temperatura rep energia radiant de l'altre cos, amb una temperatura més alta. Quan un cos absorbeix energia radiant, aquesta es transforma en calor. Tanmateix, els cossos també poden reflectir (difondre) o refractar (propagar).

Malgrat que tots els cossos radien (emeten energia radiant), tractarem únicament l'energia radiant emesa pels sòlids i els líquids, ja que l'emesa pels gasos obeeix a lleis molt diferents i queda més enllà dels objectius d'aquest mòdul.

Hem dit que l'energia radiant es transmet per ones electromagnètiques. Per tant, la seva velocitat de propagació en el buit serà la de la llum (299.792,458 m/s en el buit). Ja heu vist en el mòdul d'ones que les ones electromagnètiques comprenen les radioones, les ones infraroges, la llum visible, les ones ultravioletades i els rajos X i γ ; totes aquestes difereixen només en la seva longitud d'ona.

Els cossos sòlids i líquids emeten energia radiant que conté ones de totes les freqüències, les amplituds de les quals depenen principalment de la temperatura del cos emissor i no del tipus de molècules que el formen. En canvi, els gasos emeten energia radiant en un nombre relativament baix de freqüències, les quals són característiques de les molècules del gas.

Recordeu

γ és la lletra grega gamma minúscula i es llegeix "gamma".

Tota la matèria del cos emet energia radiant però, en general, en el seu interior, l'energia emesa per cada punt és novament absorbida pel propi cos i per això l'energia que s'allibera correspon només a una capa fina de la superfície del cos. És important notar que l'energia emesa no solament depèn de la temperatura de la superfície, sinó també de la seva naturalesa.

Com a curiositat, els humans notem més la radiació que la temperatura ambient. És a dir, si som en una sala amb l'aire a 20 °C, però el sostre o una paret estan a 50 °C per la radiació solar, mai no tindrem sensació de confort. El mateix passa si la paret és freda, com en el cas dels edificis envidrats.

1.5. Diferència entre calor i temperatura

Una vegada que hem introduït els conceptes de *calor* i de *temperatura*, es podria arribar a pensar que calor i temperatura signifiquen el mateix i, per tant, ens preguntem: com podem diferenciar entre el concepte de *calor* i el de *temperatura*?

La calor i la temperatura són conceptes que estan relacionats entre si, però són molt diferents:

- La calor és l'energia total del moviment de les molècules que formen una substància, mentre que la temperatura és una mesura de la mitjana d'aquesta energia molecular.
- La calor depèn de la velocitat de les partícules, del seu nombre, de la seva mida i del seu tipus. La temperatura, tanmateix, no depèn de la mida. Per exemple, la temperatura d'un got petit d'aigua pot ser la mateixa que la temperatura d'una galleda d'aigua, però la galleda té més calor perquè té més quantitat d'aigua i, per tant, més energia tèrmica total.

En resum, afirmarem que la temperatura no és energia, sinó una mesura d'aquesta. Tanmateix, la calor sí que és energia.

1.6. Què hem après?

En aquest apartat hem après:

- els conceptes de calor i temperatura i com diferenciar-los;
- el concepte d'energia;
- com es mesura la temperatura;
- com es mesura la calor; i
- que hi ha diferents mecanismes de transferència de la calor.

Una vegada definits els conceptes d'energia i calor continuarem introduint conceptes bàsics de termodinàmica com la definició de sistema termodinàmic, frontera, entorn, etc. Tot això ens permetrà acabar amb unes lleis fonamentals de la física, les lleis de la termodinàmica, que ens permetran entendre els processos energètics, naturals i artificials, que tenen lloc al nostre voltant.

2. Lleis de la termodinàmica

Hem vist i introduït la termodinàmica com una part de la física que s'ocupa d'estudiar l'energia i les seves transformacions. Hem vist que aquesta energia es pot convertir en treball (apartat 1.1. Energia) i hem vist que, en les transformacions d'energia, una part d'aquesta es transforma en calor (subapartats 1.2 i 1.4).

Aquesta és, de fet, l'orientació històrica, ja que la termodinàmica data del segle XIX i neix per la necessitat de millorar el rendiment de les primeres màquines tèrmiques fabricades durant la Revolució Industrial.

El punt de partida de la major part de consideracions termodinàmiques són, tanmateix, les denominades lleis o principis de la termodinàmica. Per dir-ho planerament, aquestes lleis defineixen com tenen lloc les transformacions d'energia. I, amb el temps, aquestes lleis han esdevingut unes de les més importants de la ciència.

En aquest apartat estudiarem els principis de la termodinàmica. Abans, tanmateix, és necessari introduir o recordar algunes nocions i coneixements preliminars: el concepte de sistema termodinàmic, què són les variables extensives i intensives, què és l'equilibri termodinàmic i a què ens referim quan parlem d'estat d'un sistema termodinàmic. En aquest apartat introduïrem concisament aquests elements, però en els posteriors els desenvoluparem amb més detall.

Què aprendrem?

En aquest apartat veureu alguns conceptes propis de la termodinàmica que ens portaran a definir les tres lleis de la termodinàmica. En particular:

- veureu conceptes nous com l'energia interna i l'entropia;
- veureu conceptes quotidians, però us els mostrarem des d'un punt de vista físic, com la pressió i el volum;
- també establirem les bases d'un sistema termodinàmic i com aquests es defineixen i representen;
- finalment, us mostrarem les tres lleis de la termodinàmica.

Què suposarem?

Per a l'estudi d'aquest apartat suposarem que heu assimilat els conceptes de treball i energia del mòdul de cinemàtica i dinàmica i que sabeu interpretar gràfiques.

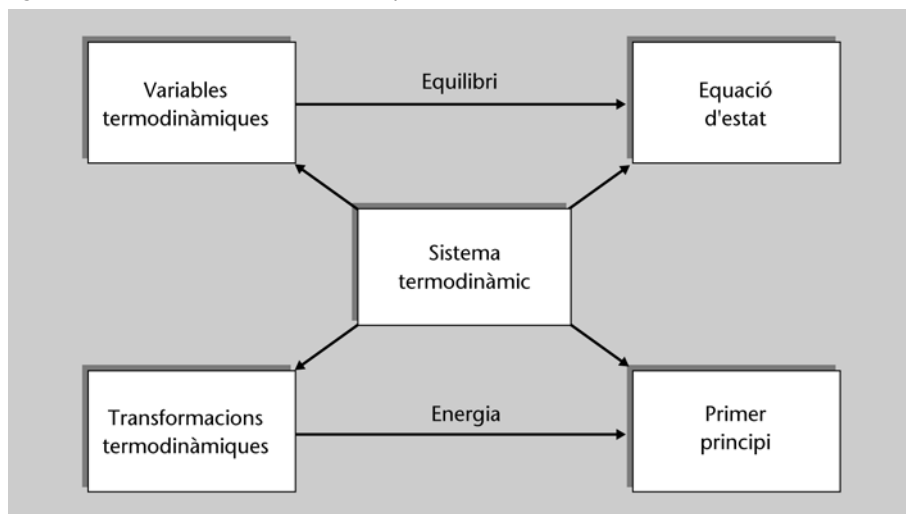
2.1. Conceptes bàsics de termodinàmica

En aquest apartat estudiarem els conceptes de sistema termodinàmic, variables extensives i intensives, equilibri termodinàmic i estat d'un sistema termodinàmic. Com que tots aquests conceptes estan relacionats, hi tornarem constantment. Començarem per tant amb una definició concisa i veurem com estan relacionats. Això ens permetrà començar a treballar amb ells i després, més endavant, ja us mostrarem en detall la seva definició.

Dit això, comencem mostrant-vos la relació entre ells. Per a això podeu mirar la figura 4:

- Un **sistema termodinàmic** és aquell sistema objecte d'estudi. L'estat d'un sistema termodinàmic queda definit per unes variables que són la pressió (P), el volum (V) i la temperatura (T), i que s'anomenen **variables d'estat**. Si aquestes variables no varien es diu que el sistema termodinàmic està en equilibri.
- Una **funció d'estat** és una propietat d'un sistema termodinàmic que depèn només de l'estat del sistema i no de la manera com el sistema va arribar a l'estat esmentat.

Figura 4. Quadre resum de tots els conceptes introduïts i com es relacionen



L'esquema de la figura 4 mostra que un sistema termodinàmic està definit per les seves variables termodinàmiques i que, si aquestes no varien, el sistema està en equilibri. Un sistema termodinàmic en equilibri està definit per les seves equacions d'estat. Però un sistema termodinàmic pot patir transformacions termodinàmiques amb l'aportament o cessió de part de la seva energia. Aquestes transformacions d'energia estan relacionades amb el primer principi de la termodinàmica. Això és precisament el que veurem en aquest apartat, i ara ja heu vist perquè havíem d'introduir abans aquests conceptes.

Tanmateix, hi ha encara altres elements que necessitem i que són clau per enunciar els principis de la termodinàmica: els conceptes d'energia interna i d'entropia.

2.1.1. Energia interna i entropia

A continuació definirem dos conceptes que són fonamentals per enunciar els principis de la termodinàmica: l'energia interna i l'entropia.

Energia interna

L'energia interna (U) d'un sistema és l'energia comptabilitzada per la suma de l'energia cinètica de les molècules i els àtoms que constitueixen el sistema, l'energia de rotació i l'energia de vibració, a més de l'energia potencial entre les molècules (recordeu els tipus d'energia que heu vist en el mòdul de mecànica).

L'energia interna és una funció d'estat perquè no es pot conèixer el seu valor absolut, només es poden conèixer els seus estats inicial i final.

Entropia

El concepte d'entropia s'entén com una definició del desordre. El desordre d'un sistema aïllat mai no pot decreïxer. Per tant, quan un sistema aïllat assoleix una configuració de màxima entropia, ja no pot experimentar canvis, ja que ha assolit l'equilibri. La naturalesa sembla que prefereix el desordre i el caos.

L'entropia S és una funció d'estat del sistema. Té un valor únic per a cada estat d'equilibri, independentment de com es va arribar a l'esmentat estat. Segons la seva definició, l'entropia està relacionada amb magnituds que són mesurables i que s'estudiaran en el segon principi de la termodinàmica.

2.1.2. Sistemes termodinàmics

Fixeu-vos que fins ara hem parlat del concepte d'energia com una forma de treball i com aquest treball es transforma en diferents formes d'energia. Principalment, hem parlat de l'energia com la transferència de calor o energia tèrmica en un determinat sistema. Els sistemes que són objecte de l'estudi de la termodinàmica s'anomenen sistemes termodinàmics.

Per a entendre'ls, definirem què és un sistema termodinàmic i les seves parts.

Es defineix un **sistema termodinàmic** com una regió de l'espai que és objecte d'estudi. Les parts d'un sistema termodinàmic són l'univers, la frontera i l'entorn.

Els límits del sistema s'anomenen **frontera** i estan definits per una superfície arbitrària. La frontera pot ser real o imaginària, pot estar en repòs o en moviment i pot canviar la seva forma o mesura.

L'**entorn** és la regió de l'espai que hi ha fora de la frontera i és la regió de l'espai que, sense ser part del sistema, interactua d'alguna manera amb aquest.

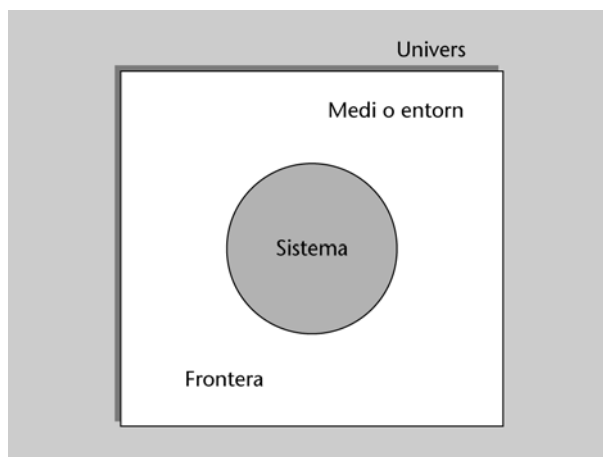
L'**univers** és el conjunt del sistema i l'entorn.

En començar qualsevol anàlisi de termodinàmica cal definir el sistema, la frontera i l'entorn.

Per exemple, considerem un dispositiu format per un èmbol i un cilindre. Suposem que dins del cilindre tenim un gas tancat i volem saber què és el que el succeeix al gas tancat quan s'escalfa. En aquest cas, el gas és el nostre sistema termodinàmic, ja que centrem la nostra atenció en conèixer què és el que li passarà al gas quan augmenti la seva temperatura. Les superfícies del cilindre i èmbol formaran la frontera. Tot el que queda fora del gas, constitueix el seu entorn.

En la figura 5 podeu veure un esquema de les parts d'un sistema termodinàmic com un conjunt d'elements (sistema, frontera, entorn i univers), de manera que el sistema serà qualsevol objecte, quantitat de matèria o regió de l'espai en estudi i estarà aïllat de totes les altres coses. Així doncs, tot el que envolta el sistema és l'entorn on hi ha el sistema. I el conjunt de sistema i entorn es defineix com a univers.

Figura 5. Representació esquemàtica d'un sistema termodinàmic, medi, frontera i univers



L'embolcall real o imaginari que tanca un sistema i el separa, l'aïlla dels seus voltants (entorn), s'anomena frontera del sistema. D'altra banda, és important definir la frontera com una superfície i no com un altre sistema; heu de tenir molt clar que l'espessor d'una superfície és matemàticament zero, raó per la qual la frontera no pot contenir ni matèria, ni ocupar cap lloc a l'espai.

Per exemple, si voleu estudiar un refrigerador, la frontera del sistema termodinàmic seria tota la superfície externa del refrigerador i tot el que hi ha

a l'interior d'aquest refrigerador seria el nostre sistema. D'altra banda, si no més voleu estudiar el funcionament del compressor, el compressor mateix seria el sistema termodinàmic.

Una vegada definit el concepte de sistema termodinàmic i de quines parts consta, passarem a descriure com es classifiquen els sistemes termodinàmics.

2.1.3. Classificació dels sistemes termodinàmics

En termodinàmica ens centrarem en l'estudi del sistema termodinàmic i, en concret, de l'interior del sistema. Per a definir l'interior del sistema utilitzarem una sèrie de magnituds com la pressió (P), el volum (V) i la temperatura (T). Aquestes magnituds descriuen l'estat, però per a estudiar-lo necessitem definir i classificar els sistemes termodinàmics.

Els sistemes termodinàmics es poden classificar en aïllats, tancats i oberts.

1) **Sistema aïllat:** és aquell sistema en el qual no hi ha intercanvi ni de massa ni d'energia amb els voltants.

Però llavors apareix la pregunta: si no tenim intercanvi o transferència de matèria o energia, com podem interactuar amb el sistema? És a dir, com ens podem trobar amb un sistema aïllat si no podem interactuar amb ell?

El cert és que això és una aproximació: en realitat hi ha molts sistemes que, a efectes termodinàmics, es poden considerar com aïllats. Per exemple, quan tenim un termos ple de menjar calent, es pot considerar com una bona aproximació de sistema aïllat des del punt de vista termodinàmic. Fixeu-vos que l'envàs no permet canvi de matèria i intenta impedir que l'energia, en forma de calor, surti del sistema.

2) **Sistema tancat o massa de control:** és aquell sistema que no té flux de matèria a través de la seva frontera, encara que hi pot haver flux d'energia amb el medi circumdant.

Per exemple, un rellotge de corda es podria considerar un sistema tancat perquè no hi introduïm ni en traiem matèria, però necessita un aportament d'energia per a poder mesurar el temps.

3) **Sistema obert o volum de control:** és aquell sistema en què hi pot haver flux de matèria i energia a través de la seva frontera, que llavors s'anomena superfície de control.

Per exemple, un cotxe es pot considerar un sistema obert. Li posem combustible i desprèn diferents gasos i calor.

En la figura 6 teniu un exemple esquemàtic de la classificació dels sistemes termodinàmics. Fixeu-vos que ens trobem en un entorn i s'hi poden observar els esquemes dels diferents tipus de sistemes: un sistema obert pot intercanviar matèria i energia amb l'exterior; un sistema tancat no pot intercanviar matèria amb l'exterior però sí que pot intercanviar-hi energia; i, finalment, un sistema aïllat no intercanvia ni matèria ni energia amb l'exterior.

Figura 6. Dibuix esquemàtic d'un sistema tancat, un d'obert i un d'aïllat

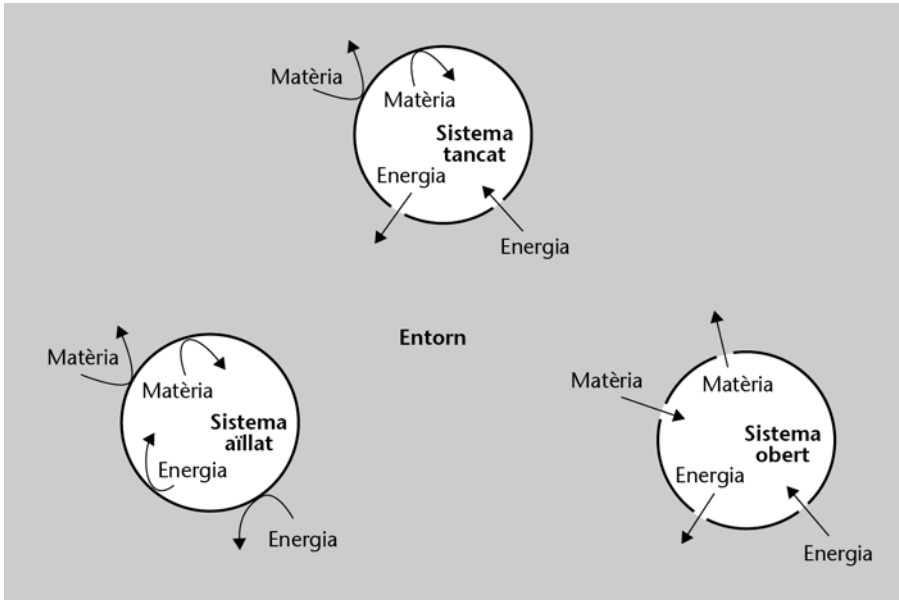


Figura 6

Es poden observar els esquemes dels diferents tipus de sistemes. Un sistema obert pot intercanviar matèria i energia amb l'exterior; un sistema tancat no pot intercanviar matèria amb l'exterior però sí energia; un sistema aïllat no intercanvia ni matèria ni energia amb l'exterior. El sentit de les fletxes ens indica precisament si es dona aquesta transferència de matèria o energia per a cada un dels tipus de sistemes termodinàmics.

En la figura 6 és interessant que us fixeu en el sentit de les fletxes, les quals ens indiquen precisament si es dona aquesta transferència de matèria o energia per a cada un dels tipus de sistemes termodinàmics.

2.1.4. Concepte de pressió i de volum

En un sistema termodinàmic, les variables que defineixen el sistema i el seu estat són la massa (m), la pressió (P), el volum (V) i la temperatura (T). Ja coneixeu els conceptes de massa i temperatura que s'han definit anteriorment: la massa en el mòdul de mecànica i la temperatura en l'apartat 1.3. Temperatura. Tanmateix, encara no hem definit dos conceptes imprescindibles per a la termodinàmica com són la pressió i el volum. Malgrat que tenim una referència col·loquial d'aquests conceptes, no en tenim cap definició física.

Pressió

Des del punt de vista de la física, la **pressió** (P) és una magnitud intensiva que es defineix com la força per unitat d'àrea o superfície:

$$P = \frac{F}{S} \quad (19)$$

El concepte de *massa* es defineix en el mòdul "Mecànica" d'aquesta assignatura.

La unitat de mesura de la pressió en el Sistema Internacional és el pascal, que es defineix com un newton per metre quadrat: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$.

Val la pena comentar que normalment s'utilitzen altres unitats de pressió:

- l'atmosfera (símbol atm):

$$1 \text{ atm} = 1,033 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (20)$$

- el bar (símbol bar):

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \quad (21)$$

- mil·límetres de mercuri (símbol mmHg):

$$1 \text{ mmHg} = 1,33 \cdot 10^2 \text{ Pa} \quad (22)$$

Atmosfera

La pressió d'1 atm correspon a la pressió que fa l'atmosfera terrestre sobre el nivell del mar.

Mercuri

El símbol Hg correspon a l'element mercuri.

Recordeu

Una magnitud és intensiva quan, per a un sistema en equilibri dividit en parts, la magnitud global no és la suma de les magnituds de cadascuna de les parts que confinen el sistema (com la temperatura).

Una magnitud és extensiva quan, per a un sistema en equilibri dividit en parts, la magnitud global és la suma de les magnituds de cadascuna de les parts (com el volum).

Volum

El **volum** (V), des del punt de vista de la física, és una magnitud extensiva definida com la propietat que tenen els cossos d'ocupar un determinat espai. La unitat de mesura del volum en el Sistema Internacional es el metre cúbic (m^3).

En el cas del volum també s'utilitzen altres unitats, com el litre (símbol l), que és igual a un decímetre cúbic (dm^3 , $1 \text{ m}^3 = 1.000 \text{ l} = 1.000 \text{ dm}^3$).

I ara ja tenim totes les eines necessàries per a definir un estat termodinàmic.

2.2. Estat d'un sistema termodinàmic

Fins ara hem parlat diverses vegades de sistema termodinàmic, però per què ens hem entretingut explicant altres conceptes abans? La resposta és que un sistema termodinàmic queda definit en funció d'unes variables o magnituds termodinàmiques, com la pressió (P), el volum (V) i la temperatura (T), que prenen uns valors fixos. Mentre el valor de les variables no canviï, l'estat del sistema termodinàmic no canvia.

Si es produeix un canvi en el sistema a causa d'un procés termodinàmic, aquest canvi queda definit quan s'indica l'estat inicial i final i com es realitza el procés. És a dir, quina és la trajectòria o el camí per a passar d'un estat inicial a un altre final.

És fonamental que tingueu en compte que les variables termodinàmiques només estan definides quan el sistema termodinàmic està en equilibri termodinàmic. El concepte d'equilibri termodinàmic ha sortit diverses vegades, però: què significa que un sistema termodinàmic estigui en equilibri termodinàmic?

Un sistema termodinàmic està en equilibri termodinàmic si es produeixen simultàniament les tres situacions següents:

- primer, que hi hagi equilibri tèrmic, és a dir, que la temperatura no canviï, sinó que es mantingui constant;
- segon, que hi hagi equilibri químic, és a dir, que la composició del sistema tampoc no canviï;
- i tercer, i últim, que hi hagi un equilibri mecànic, és a dir, que no es produeixin moviments en el sistema.

En resum, podríem dir que l'estat d'un sistema és la condició determinada pels valors de les seves propietats. I aquestes propietats només estan definides quan el sistema està en equilibri.

Una vegada hem vist què és un sistema termodinàmic, veurem quins tipus de processos termodinàmics hi ha.

2.3. Tipus de processos termodinàmics i diagrames T - S

Quan parlem d'un sistema termodinàmic (recordeu que el sistema termodinàmic és la regió de l'espai en estudi), el sistema es troba en un determinat estat on les variables pressió (P), volum (V) i temperatura (T) estan perfectament definides. Aquestes variables poden evolucionar d'un estat a un altre mitjançant un procés termodinàmic. Des del punt de vista de la termodinàmica, aquestes transformacions han de transcórrer des d'un estat d'equilibri inicial a un altre d'equilibri final. És a dir, que les magnituds que pateixen una variació en passar d'un estat a l'altre han d'estar perfectament definides en l'estat inicial i final.

Per a la descripció de les transformacions que es poden produir entre els sistemes termodinàmics i el seu entorn, es defineix el contorn termodinàmic.

El **contorn termodinàmic** és un conjunt de parets tancades que, a més de delimitar i confinar el sistema, informa sobre els estats d'equilibri del sistema amb la resta de l'univers.

L'evolució dels sistemes només es pot realitzar entre estats d'equilibri. Aquesta evolució rep el nom de **quasiestàtica** i permet conèixer, en qualsevol instant, les propietats intrínseques del sistema.

Les parets termodinàmiques que posen en contacte diversos sistemes termodinàmics es poden classificar en **parets restrictives** o lligadures, i **parets permissives** o contactes.

1) Les parets restrictives o lligadures poden ser:

- a) **Adiabàtiques**: si no permeten l'intercanvi d'energia tèrmica (o calor).
- b) **Rígid**s: si no es poden desplaçar, és a dir, quan el volum del sistema no pot variar.
- c) **Impermeables**: si no permeten el pas de matèria.

2) Les parets permissives o contactes poden ser:

- a) **Diatèrmanes (o diatèrmiques)**: si permeten el pas d'energia tèrmica.
- b) **Mòbils**: si es poden desplaçar.
- c) **Permeables**: si permeten el pas de matèria.

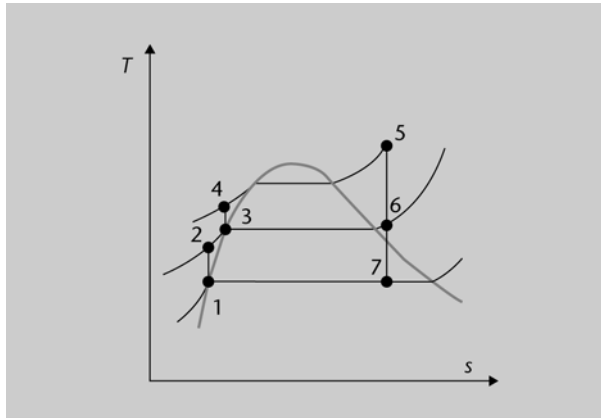
El tipus de paret afectarà el tipus de procés que hi tingui lloc. Aquests processos es descriuen amb diversos tipus de diagrames, d'entre els quals els més importants són:

- en termodinàmica s'usen els diagrames P - V (pressió-volum);
- en enginyeria en general, i en particular en l'estudi de diferents tecnologies energètiques, se solen utilitzar els diagrames T - S (temperatura-entropia), que són els que ens interessin en aquest mòdul i, per tant, els que descriurem a continuació.

2.3.1. Diagrames T - S

La definició de la variable d'estat entropia (vegeu l'apartat 2.1.1. Energia interna i entropia) permet introduir una nova representació gràfica dels processos termodinàmics: el diagrama de temperatura (en K) i entropia (en J/K kg). Aquest diagrama és el més indicat per a l'estudi de les màquines tèrmiques. En la figura 7 teniu un diagrama T - S . Fixeu-vos que a mesura que augmenta l'entropia, augmenta la temperatura, fins a un màxim, a partir del qual comença a disminuir. Les línies primes en el diagrama representen altres processos (a temperatura constant, a entropia constant, etc.).

Figura 7. Diagrama T-S d'un cicle de Rankine



Una de les propietats més importants d'aquest diagrama és que les àrees del diagrama corresponen a energies.

Una vegada hem vist com es representen els processos, ara veurem els processos en si. En concret, veurem els processos isoterms, isocors, isòbars i adiabàtics.

En el subapartat 4.2.2 d'aquest mòdul, es veu que el diagrama de la figura 9 correspon a un tipus de procés que es coneix com a cicle de Rankine.

2.3.2. Procés isoterm

L'evolució d'un sistema termodinàmic a temperatura constant es coneix com a procés isoterm. Per exemple, l'expansió o la compressió d'un gas es poden produir sense variació de la temperatura.

Correspondria als processos que segueixen línies horitzontals en la figura 7 (processos de l'1 al 7, per exemple).

L'expansió isoterma d'un gas ideal es pot dur a terme col·locant el gas en contacte tèrmic amb un altre sistema de capacitat calorífica molt gran (vegeu el subapartat 1.4.1) i a la mateixa temperatura que el gas. Aquest sistema es coneix com a focus calent. D'aquesta manera, la calor es transfereix molt lentament, la qual cosa permet que el gas s'expandeixi i realitzi un treball, a temperatura constant.

2.3.3. Procés isocor

Un procés isocor és un procés que es realitza a volum constant. En conseqüència, com no hi ha variació de volum, l'increment de volum ΔV és zero ($\Delta V = 0$). Recordeu del mòdul de cinemàtica i dinàmica que perquè es realitzi un treball, és necessari que s'efectuï un desplaçament i, si no varia el volum, no hi ha desplaçament net i, en conseqüència, no hi ha treball. Per tant, en un procés isocor, el treball que realitza el gas és zero ($W = 0$).

Seria el cas, per exemple, d'un recipient de parets gruixudes que conté un gas determinat, al qual se li subministra calor: la temperatura i la pressió internes

augmenten, però el volum es manté igual. En un procés que s'efectua a volum constant sense que hi hagi cap desplaçament, el treball fet pel sistema és zero. És a dir, en un procés isocor no hi ha treball realitzat pel sistema.

2.3.4. Procés isòbar

Si la pressió no canvia durant un procés, es diu que aquest és isòbar. Un exemple de procés isòbar és l'ebullició de l'aigua en un recipient obert. Com el contenidor està obert, el procés s'efectua a pressió atmosfèrica constant. En el punt d'ebullició, la temperatura de l'aigua no augmenta amb l'addició de calor i, en lloc d'això, hi ha un canvi de fase d'aigua a vapor (vegeu el subapartat 1.4.2). En la figura 7, correspondria a les línies verticals (1 al 2, 3 al 4, 5 al 6, 6 al 7).

2.3.5. Procés adiabàtic

Un procés adiabàtic o isentròpic és aquell en el qual el sistema, generalment un fluid que realitza treball, no intercanvia calor amb el seu entorn.

El terme adiabàtic fa referència a elements que impedeixen la transferència de calor amb l'entorn. En climatització, per exemple, els processos d'aportament de vapor d'aigua (humectació) són adiabàtics, ja que no hi ha transferència de calor malgrat que s'aconsegueixi variar la temperatura de l'aire a partir de la seva humitat relativa.

I arribats a aquest punt, ja estem en condicions d'enunciar les lleis de la termodinàmica.

2.4. Llei zero de la termodinàmica

Fixeu-vos com la termodinàmica centra l'atenció en l'estudi de l'interior dels sistemes físics i en els intercanvis d'energia en forma de calor que es produeixen entre un sistema i un altre.

El concepte essencial és, per tant, l'estudi dels sistemes termodinàmics com un conjunt de matèria que es pot aïllar, que coexisteix en un entorn i que pot intercanviar energia o no. Recordeu que l'estat del sistema es pot definir per unes variables mesurables, com són la pressió (P), el volum (V) i la temperatura (T), i que s'anomenen variables d'estat (vegeu el subapartat 2.1). Hem vist que aquestes propietats només es poden definir quan el sistema està en equilibri termodinàmic (vegeu el subapartat 2.2).

Es diu que dos sistemes estan en equilibri tèrmic si cadascun està individualment en equilibri i, si estan aïllats de l'exterior, quan es posen en contacte a través d'una frontera i no experimenten cap canvi en els seus estats.

L'experiència ens ensenya que dos sistemes estan en equilibri tèrmic a través d'un únic valor, que és la seva temperatura T . Així, per tant, dos sistemes estaran en equilibri tèrmic quan tinguin la mateixa temperatura.

La llei zero de la termodinàmica ens diu que si tenim dos cossos anomenats A i B, amb diferent temperatura i els posem en contacte, en un temps determinat t assoliran la mateixa temperatura, és a dir, tindran tots dos la mateixa temperatura. Si després un tercer cos, que anomenarem C, es posa en contacte amb A i B, també assolirà la mateixa temperatura i, per tant, A, B i C tindran la mateixa temperatura mentre estiguin en contacte. I, per tant, estaran en equilibri.

L'anomenada llei zero de la termodinàmica rep aquest nom perquè va ser enunciada quan ja existien la primera i la segona lleis de la termodinàmica. Fixeu-vos que la llei zero sorgeix del sentit comú i no es pot definir a partir d'altres definicions o lleis. El que diu és que, si dos sistemes estan en equilibri tèrmic amb un tercer sistema, llavors també estan en equilibri tèrmic entre si.

Per a entendre el concepte d'equilibri tèrmic podem considerar dos blocs de coure de la mateixa geometria i pes, aïllats dels voltants, però en contacte entre si. Un dels blocs és més calent que l'altre i, per tant, la seva temperatura, la seva resistència elèctrica i el seu volum són més grans. En entrar en contacte els dos blocs (que estan aïllats dels seus voltants) es produeix un intercanvi d'energia en forma de calor, que es pot observar pel decrement de temperatura, volum i resistència elèctrica del bloc més calent. Alhora es duu a terme un augment de les mateixes propietats al bloc fred. Quan tots els canvis observables cessen, aquesta interacció tèrmica o de calor ha acabat: es diu que ambdós blocs han assolit l'equilibri tèrmic.

En altres paraules, si es tenen dos sistemes amb diferent temperatura i en equilibri tèrmic, quan aquests dos sistemes es barregen, el sistema que tenia una temperatura més alta cedirà calor a aquell que tenia una temperatura més baixa. D'altra banda, el que tenia una temperatura més baixa absorbirà la calor necessària fins a arribar a una temperatura final d'equilibri tèrmic. Aquesta temperatura final estarà sempre entre les temperatures dels sistemes que es barregen.

Per exemple, quan s'afegeix llet freda al cafè, el cafè amb llet resultant no és tan calent com el cafè, ni tan fred com la llet. S'obté com a resultat una situació d'equilibri tèrmic en què el cafè, que tenia una temperatura més alta, cedirà calor i la llet, a temperatura més baixa, absorbirà la calor que cedeix el cafè fins que arribin a una temperatura final d'equilibri.

Exemple 2.1

Es barregen 150 kg d'una substància A de calor específica 5.000 J/kg °C a 60 °C amb 100 kg d'una altra substància B de calor específica 0,88 cal/g °C a 60 °F. Calculeu la temperatura final de la mostra una vegada que s'hagi arribat a l'equilibri. Podeu suposar que la mescla és totalment homogènia i que no hi ha intercanvis d'energia amb l'exterior ni calor generada com a conseqüència del procés, ni calor perduda cap a l'exterior.

Solució

Per resoldre aquest problema, per començar ens hem de fixar que barregem dues substàncies: la substància A amb la substància B. Cadascuna d'aquestes té una temperatura diferent. Com resoldrem el problema? En primer lloc, observeu que les substàncies no solament estan a diferents temperatures, sinó que aquestes estan en escales diferents. Per tant, haurem de passar totes dues temperatures a la temperatura de mesura en el sistema internacional, és a dir, a kèlvins (K).

La substància A està a 60 °C i la substància B a 60 °F. L'escala de mesura de la temperatura és diferent per a cada una de les temperatures. Per tant, passarem ambdues temperatures a l'escala absoluta, és a dir, a l'escala Kelvin (K).

Per a passar la temperatura expressada en l'escala Celsius (°C) a K, aplicarem la fórmula (1).

Matemàticament:

$$T \text{ (K)} = T \text{ (°C)} + 273,15 \quad (23)$$

$$T_A = 60 + 273,15 = 333,15 \text{ K} \quad (24)$$

Anàlogament, la temperatura B, expressada en °F, l'expressarem en °C aplicant-hi l'equació (4) i, seguidament, aplicant-hi de nou l'equació (1) la passarem a l'escala absoluta (K):

$$T \text{ (°C)} = \frac{T \text{ (°F)} - 32}{1,8} \quad (25)$$

$$T_B \text{ (°C)} = \frac{60 - 32}{1,8} = \frac{28}{1,8} = 15,55 \text{ °C} \quad (26)$$

$$T \text{ (K)} = T \text{ (°C)} + 273,15 \quad (27)$$

$$T_B = 15,55 + 273,15 = 288,70 \text{ K} \quad (28)$$

Si observem les unitats de mesura per a la calor específica de les substàncies A i B, es pot veure que una calor específica c_e està expressada en les unitats del sistema internacional de mesura, mentre que l'altra està expressada en calories. Per tant, haurem de passar aquesta última al Sistema Internacional de mesura, J/kg · K, tenint en compte la relació entre joules i calories: 1 cal = 4,184 J.

$$C_{e,B} = 0,88 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}} = \frac{0,88 \text{ cal} \cdot 4,184 \frac{\text{J}}{\text{cal}} \cdot 1.000 \frac{\text{g}}{\text{Kg}}}{1 \text{ g} \cdot \text{K}} = 3.681,92 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \quad (29)$$

Ara que ja ho tenim tot en les mateixes unitats, podem continuar. Si tenim dues substàncies a diferents temperatures, l'equilibri tèrmic s'aconseguirà quan la calor que desprèn la que té una temperatura més alta s'iguali a la calor que absorbeix la substància que té una temperatura més baixa. És a dir, quan la calor cedida sigui igual a la calor absorbida.

Per a arribar a l'equilibri termodinàmic, és a dir, a una temperatura final d'equilibri, la calor que cedeix la substància que té una temperatura més alta (substància A), Q_A , ha de ser igual a la calor absorbida per la substància que té una temperatura més baixa (substància B), Q_B .

$$Q_A = Q_B \quad (30)$$

Aquesta calor absorbida o cedida està determinada per l'expressió (6):

$$C_e = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (31)$$

Que, en aïllar la calor, es converteix en:

$$Q = mc_e \Delta T \quad (32)$$

Si apliquem que la calor cedida per A és igual a l'absorbida per B, on T_f és la temperatura final d'equilibri que assolirà la mescla, i que serà més gran que T_B i més petit que T_A , tindrem:

$$Q_A = Q_B \quad (33)$$

$$m_A \cdot c_{e,A} \cdot (T_A - T_f) = m_B \cdot c_{e,B} \cdot (T_f - T_B) \quad (34)$$

On m_A és la massa d'A, $c_{e,A}$ és la calor específica d'A i T_A és la temperatura inicial d'A. Els elements amb subíndex B indicaran el mateix per a la massa B. T_f és la temperatura final que assolirà el sistema. Substituint els valors de les masses, les calors específiques i les temperatures s'obté una equació, l'única incògnita de la qual és, precisament, la temperatura final d'equilibri (T_f) de la mescla de la substància A i la substància B:

$$150 \cdot 5.000 \cdot (333,15 - T_f) = 100 \cdot 3681,92 \cdot (T_f - 288,56) \quad (35)$$

Calculem la temperatura final:

$$T_f = 318,59 \text{ K} \quad (36)$$

La temperatura final d'equilibri de la mescla és, per tant, de 45,44 °C (318,59 K). Fixeu-vos com aquesta temperatura és dins de l'interval comprès entre la temperatura més alta i la més baixa de les substàncies que constitueixen la mescla.

2.5. Primer principi de la termodinàmica

El primer principi de la termodinàmica és una llei de conservació de l'energia i, al seu torn, una definició precisa del concepte de calor.

El **primer principi de la termodinàmica**, o llei de conservació de l'energia, afirma que, com l'energia no es crea ni es destrueix, la quantitat d'energia que es transfereix a un sistema en forma de calor (Q) més la quantitat d'energia transferida al sistema en forma de treball (W) ha de ser igual a l'augment d'energia interna (U) del sistema.

Matemàticament, el primer principi de la termodinàmica es pot enunciar de la manera següent:

$$\Delta Q + \Delta W = \Delta U \quad (37)$$

És a dir, en tot sistema aïllat, l'energia interna es conserva.

El primer principi de la termodinàmica és la formalització del principi de conservació de l'energia, segons el qual l'energia no es crea ni es destrueix, només es transforma.

Aquesta definició és compatible amb el que ja hem vist: que la calor i el treball són mecanismes d'intercanvi d'energia entre els sistemes (vegeu per exemple el subapartat 1.4.3). El primer principi de la termodinàmica identifica la calor (Q) com una forma d'energia, que es pot convertir en treball mecànic i emmagatzemar-se. Per tant, des del primer principi de la termodinàmica, la calor, igual que el treball, és una energia en trànsit, és a dir, un procés d'intercanvi d'energia i pot causar els mateixos canvis en un cos que el treball.

Per a la definició d'energia interna, vegeu el subapartat 2.1.1 d'aquest mòdul didàctic.

L'energia mecànica es pot convertir en calor mitjançant la fricció. A més, el treball mecànic necessari per produir una calor es coneix com l'equivalent mecànic de la calor. Segons el primer principi, o principi de conservació de l'energia, tot el treball mecànic realitzat per produir calor per fricció apareix en forma d'energia als objectes sobre els quals es realitza el treball. Per exemple, quan s'escalfa aigua en un recipient tancat fent girar unes rodes de paletes, l'augment de nivell energètic de l'aigua és proporcional al treball realitzat per moure les rodes de paletes.

A qualsevol màquina li cal certa quantitat d'energia per produir treball. És impossible que una màquina realitzi un treball sense cap aportament d'energia. Quan la calor es converteix en energia mecànica, com en un motor de combustió interna, la llei de conservació de l'energia també és vàlida. Tanmateix, sempre es perd o dissipa energia en forma de calor perquè cap motor no té una eficiència perfecta.

Pèrdua d'energia

Quan diem que es perd energia, no és que es perdi, sinó que es transforma en algun tipus d'energia que no podem aprofitar.

2.6. Segon principi de la termodinàmica. Entropia

Hem vist que la primera llei de la termodinàmica és una expressió de la llei de la conservació de l'energia. L'aplicació de la primera llei a diversos sistemes ens permet realitzar prediccions que després es poden comprovar experimentalment. Tanmateix, en cap moment no es va deduir la primera llei de la termodinàmica, sinó que es va presentar com una conseqüència de les observacions experimentals.

Un dels aspectes rellevants de la termodinàmica és que es basa en principis axiomàtics, és a dir, que no es poden demostrar, però la seva validesa està àmpliament sustentada per l'experiència.

El primer principi de la termodinàmica (apartat 2.5., Primer principi de la termodinàmica) és la formalització del principi de conservació de l'energia, segons el qual l'energia no es crea ni es destrueix, només es transforma. Segons això, en qualsevol procés que es dona a la naturalesa, el balanç d'energia és nul. Aquesta descripció de la naturalesa és certa, però incompleta.

En efecte, el primer principi no ens diu res del sentit en què poden ocórrer els processos a la naturalesa de manera espontània. Un exemple d'això és quan posem en contacte dos cossos amb diferent temperatura: s'estableix un flux de calor des del cos amb temperatura més alta fins al de temperatura més baixa. Segons el primer principi, la calor cedida pel cos calent ha de ser igual a l'absorbida pel cos fred, però no explica perquè el flux de calor no es dirigeix del cos fred al calent, que és un cas que no aniria en contra del principi de conservació de l'energia.

En la caiguda d'un cos des de certa altura fins al terra es produeix la transformació de l'energia potencial en energia tèrmica com a conseqüència de l'im-

pacte. El primer principi de la termodinàmica no nega la possibilitat de transformació de l'energia tèrmica en potencial i que el cos s'elevi fins a la seva altura inicial. Tanmateix, tots sabem que aquesta transformació no es donarà espontàniament, és a dir, sense cap acció exterior.

Un altre exemple seria la reacció exotèrmica que es produeix en combinar un combustible i un comburent, la qual desprèn energia i productes de la combustió. Aquesta reacció es dona igualment en un sol sentit. Mai no s'ha vist que productes de la combustió reaccionin en aportar-los energia i retornin el combustible i el comburent originals.

L'observació de la naturalesa ens indica l'existència d'una limitació dels processos que hi tenen lloc espontàniament. Aquesta limitació del sentit en què es donen els processos a la naturalesa, que descriu el primer principi, imposa la necessitat d'establir una llei general que determini l'espontaneïtat dels processos, és a dir, que tingui en compte quin és el sentit en què es produeixen espontàniament els processos. Aquesta llei és el segon principi de la termodinàmica.

El segon principi de la termodinàmica afirma que l'entropia S , és a dir, el desordre d'un sistema aïllat, mai no pot decreïxer. Per tant, quan un sistema aïllat assoleix una configuració de màxima entropia, ja no pot experimentar canvis, atès que ha assolit l'equilibri.

Matemàticament:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (38)$$

És a dir, la variació d'entropia és igual a la variació de calor entre la temperatura a què es troba el sistema. L'entropia S és una funció d'estat del sistema. Té un valor únic per a cada estat d'equilibri, independentment de com es va arribar a l'esmentat estat. Segons l'equació (38), l'entropia està relacionada amb magnituds que són mesurables, com la variació de calor Q i la temperatura T .

Sembla que la naturalesa prefereix el desordre i el caos. Amb el segon principi es pot demostrar que, si no es realitza treball, és impossible transferir calor des d'una regió de temperatura més baixa a una altra de temperatura més alta.

Feynmann deia que l'entropia sempre creix perquè hi ha més maneres de tenir les coses desordenades que de tenir-les ordenades, per la qual cosa és més probable un estat amb més entropia.

Un element molt important que imposa el segon principi de la termodinàmica a l'espontaneïtat de certs processos és la transformació de calor en treball. La

Combustible i comburent

En una reacció de combustió típica el combustible és la substància que es crema i allibera energia, gràcies al seu gran poder calorífic, mentre que el comburent és una substància que afavoreix la combustió oxidant el combustible. Per exemple, en una reacció amb petroli, el combustible seria el petroli i l'oxigen (per exemple de l'atmosfera) seria el comburent.


Vegeu el concepte d'entropia en el subapartat 2.1.1. d'aquest mòdul didàctic.

Richard Phillips Feynman

Físic nord-americà (Nova York, 1918 - Los Angeles 1988), considerat com un dels més importants del segle xx. Va obtenir el Premi Nobel de Física l'any 1965 pel seu treball en electrodinàmica quàntica, compartit amb el físic nord-americà Julian Schwinger i el físic japonès Sin-Itiro Tomonaga. Al llarg de la seva vida, va rebre nombrosos premis i se'l considera una de les figures pioneres de la nanotecnologia i una de les primeres persones a proposar la realització futura dels ordinadors quàntics. També se'l coneix pel seu treball com a docent i els seus llibres divulgatius.

transformació de calor en treball es realitza de manera natural, per exemple en la fricció. Tanmateix, la inversa és més difícil d'obtenir. De fet, els motors tèrmics són un invent recent, del segle XVIII. Aquest i altres exemples ens indiquen que hi ha una diferència essencial entre la calor i les altres formes d'energia (treball, química, nuclear, etc.), ja que totes aquestes es poden transformar íntegrament en calor, mentre que la transformació inversa no es realitza completament.

La segona llei de la termodinàmica proporciona també una definició precisa d'una propietat anomenada entropia: aquesta es pot considerar com una mesura de quant pròxim està un sistema de l'equilibri. També es pot considerar com una mesura del desordre del sistema, com ja heu vist.



Vegeu el concepte d'entropia en el subapartat 2.1.1. d'aquest mòdul didàctic.

2.7. Què hem après?

En aquest apartat hem après:

- la definició de sistema termodinàmic, la seva classificació i les parts que el formen;
- els diferents processos que pot experimentar un sistema termodinàmic, com ara els processos a pressió, volum o temperatura constant o els processos adiabàtics (sense transferència de calor);
- com es poden representar, en un diagrama T - S , els processos experimentats per un sistema termodinàmic; i
- les lleis bàsiques de la termodinàmica.

Un cop vistos teòricament els diferents conceptes termodinàmics relacionats amb l'energia, passarem ara a l'aplicació d'aquests conceptes en el sistema energètic actual. Començarem amb una visió global del funcionament del sistema energètic.

3. Accés a l'energia

Per a començar a endinsar-vos en el món de l'energia, primer de tot cal que feu una ullada a l'estat de la qüestió en la nostra societat.

L'objectiu d'aquest apartat és doble. En una primera part us volem donar a conèixer algunes dades i valors del consum energètic actual, a escala mundial i també individual. En una segona part concretarem el funcionament del mercat elèctric espanyol i els diferents agents que el formen. Estudiarem el sistema elèctric espanyol perquè és una illa energètica, la qual cosa ajudarà a entendre millor els diversos processos implicats.

Què aprendrem?

- Veurem com és d'important l'ús de l'energia en la societat actual i els usos a què la destinem;
- aprendrem el concepte d'energia primària i valorarem aquest terme en el cas d'Espanya.
- analitzarem com és el nostre consum d'energia a la llar;
- veurem la importància actual de l'energia elèctrica;
- descriurem els diferents impactes ambientals, socials i econòmics que van lligats al consum d'energia;
- coneixerem com funciona i quins agents interactuen en el mercat elèctric.

Què suposarem?

Suposarem que coneixeu les equivalències entre les principals unitats d'energia i potència, com kWh, MW, etc., i que compreneu les magnituds del sistema energètic global i el consum d'energia en la nostra societat. També suposarem que teniu ben clara la diferència entre potència i energia.

3.1. Dades de l'energia

Cada mes, cada dos mesos o cada trimestre ens arriben a casa les factures dels subministraments. Normalment, l'únic que fem és mirar si la xifra que ens toca pagar s'assembla a la que teníem a la factura anterior i, si més o menys s'assemblen, l'arxivem i ens n'oblidem.

Tot i així, és important que ens adonem de què hi ha realment darrere de cada unitat d'energia que consumim, i que puguem valorar si ens trobem en un terme mitjà de consum, per sobre o per sota.

L'objectiu d'aquest apartat és, doncs, fer una pinzellada a alguns aspectes clau associats al consum energètic actual, començant a escala mundial i arribant a l'anàlisi del nostre habitatge.

3.1.1. Evolució i estat actual del consum energètic

La humanitat ha evolucionat molt des dels seus inicis i cada dia sembla que la velocitat de canvi va a més. Només cal que ens comparem amb els nostres avis. Quan ells tenien la nostra edat no tenien ni mòbil, ni reproductor portàtil de música, ni ordinador... Tots aquests ginys, que ara ens són imprescindibles per dur a terme el nostre dia a dia, consumeixen energia i això, és clar, es nota a escala mundial.

Així doncs, com es pot veure en el gràfic il·lustratiu de la figura 8, el consum energètic ha evolucionat exponencialment amb els anys, des de l'home primitiu del tipus caçador-recol·lector fins a l'actual "home tecnològic". Fixeu-vos com consumim l'energia actualment i l'evolució de cadascuna de les parts del gràfic.

1) **L'alimentació.** És l'aspecte bàsic i imprescindible per a la nostra supervivència, i podem veure que creix, però no gaire, ja que les calories ingerides a la nostra dieta, el que necessitem per a poder créixer i subsistir, continua essent el mateix. Sí que és cert, però, que mengem més carn que els nostres avantpassats i que tenim molts més excedents d'aliments que es fan malbé o simplement no es consumeixen, cosa que en termes energètics representa un increment d'energia. Però no és pas en aquest aspecte que hem fet un salt quantitatiu; el creixement ha estat molt més notable en els altres tres aspectes.

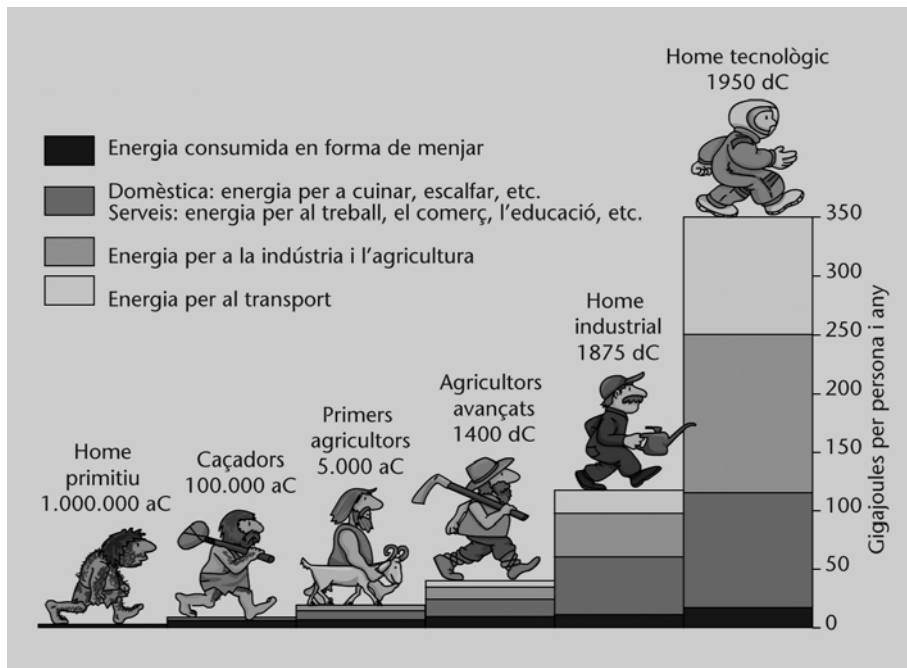
2) **El consum domèstic i en serveis.** A les nostres llars i llocs de feina, la tecnologia que ens envolta comporta un consum d'energia, que si bé individualment no sembla gaire, en el seu conjunt és notable. Cal també tenir en compte, sobretot, la climatització dels edificis (la calefacció i l'aire condicionat), que representa, tal com veurem més endavant en l'apartat 3.1.3, el consum majoritari dels nostres edificis.

3) **El consum industrial i agrícola.** La tecnificació del camp, amb vehicles, maquinària de collita, sistemes de regadiu, etc., implica que actualment els cultius tinguin associat un consum energètic molt més alt. Les indústries, cada cop més automatitzades i amb menys treball manual o humà, també han experimentat un increment del consum: automatització de processos, magatzems completament robotitzats, etc.

4) **El transport.** Sens dubte, és un dels aspectes clau del nostre consum actual, i caldria actualitzar el gràfic amb valors encara més recents. Un exemple

el tenim en les companyies de vol de baix cost, que han fet possible que anem a passar un cap de setmana, per exemple, a Londres. A més, per a les vacances d'estiu escollim destinacions que eren completament exòtiques fa cinquanta anys. I, finalment, els desplaçaments diaris per anar de casa a la feina i de la feina a casa, que en molts casos representen una gran inversió de temps i un consum de combustible notable al cap de l'any.

Figura 8. Evolució del consum energètic per persona i per tipus d'ús



Font: Adaptat d'El Correu de la UNESCO

Amb aquesta revisió de l'evolució del consum energètic podem veure que vivim en una era en què l'ús intensiu de l'energia en el nostre dia a dia és un aspecte clau, i això és molt bo per una banda i dolent per l'altra. Té avantatges significatius, sobretot de millora de la qualitat de vida, però hi ha també grans inconvenients, com ara la dependència que tenim de l'energia i els costos que aquesta té.

La nostra dependència energètica és doble:

- 1) Per un costat tenim que ja no podem realitzar la nostra feina ni el nostre dia a dia habitual si falla, per exemple, el subministrament elèctric. Només cal recordar l'episodi del juliol de 2007, quan algunes zones de Barcelona es van quedar sense subministrament elèctric durant tres dies i hi havia gent que no podia ni tan sols cuinar.
- 2) Per l'altre, tenim una dependència exterior de l'energia, sobretot de petroli, gas i combustible nuclear, que no són recursos nacionals, sinó que provenen d'altres països per al nostre consum. I en aquest sentit trobem nombrosos casos de conflictes bèl·lics i de lluites pel domini geoestratègic dels recursos al

llarg de la història. Aquest aspecte s'analitzarà més a fons en el següent apartat dedicat al consum d'energia primària.

A tall de conclusió sobre l'evolució del consum energètic, cal fer un apunt relatiu al repartiment d'aquest consum a escala mundial. Els països del sud, en fase de desenvolupament i amb models socials més primitius (no són a la darrera columna del gràfic de la figura 1), consumeixen molta menys energia en el seu dia a dia, i sempre utilitzen fonts més locals. Alguns casos extrems els trobem per exemple als Andes, a l'Amèrica del Sud, on hi ha zones on l'únic recurs energètic són els excrements secs del bestiar que utilitzen a mode de llenya per a cuinar, il·luminar-se i escalfar-se. A escala mundial hi ha, doncs, desigualtats molt notables.

Globalment, es diu que un 80% de la població mundial consumeix el 20% dels recursos, mentre que l'altre 20% de la població consumeix el 80% dels recursos.

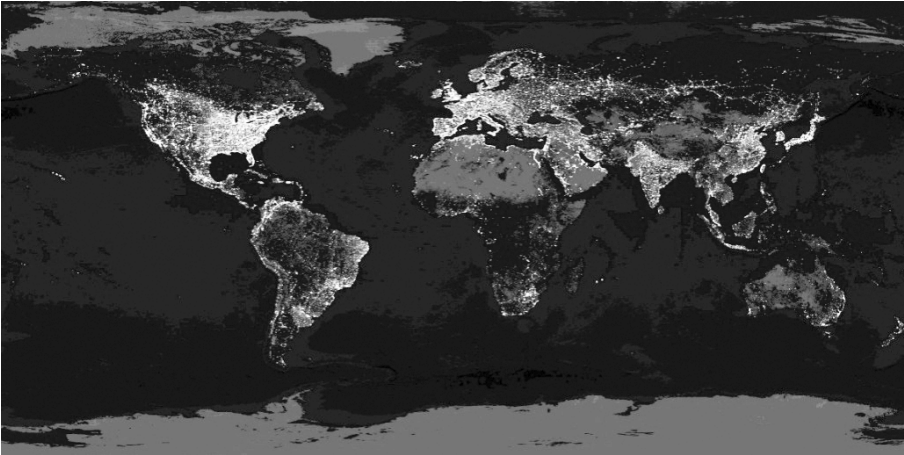
Gràficament, això es mostra en la figura 9.

Figura 9. Representació gràfica del repartiment del consum al món



Una imatge que sens dubte fa reflexionar i ens transmet aquesta disparitat social a escala mundial és el muntatge de la fotografia del món de nit que la NASA va publicar a la seva web i que us mostrem en la figura 10. La intensitat lluminosa de cada zona del globus terraquí, encara que no correspongui directament al consum energètic, ens dóna una idea força encertada de l'estat de desenvolupament de les diferents regions del món, malgrat que a l'explicació de la fotografia es lligui més a la densitat de població. Les zones amb més intensitat lluminosa són els Estats Units, Europa i el Japó, i les que menys són l'Àfrica, la Xina i l'Amazònia.

Figura 10. El món de nit



Font: Astronomy picture of the day (<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/>)

3.1.2. Tipus d'energia i concepte d'energia primària

Per tal d'analitzar més a fons com consumim l'energia, començarem per definir el concepte d'energia primària.

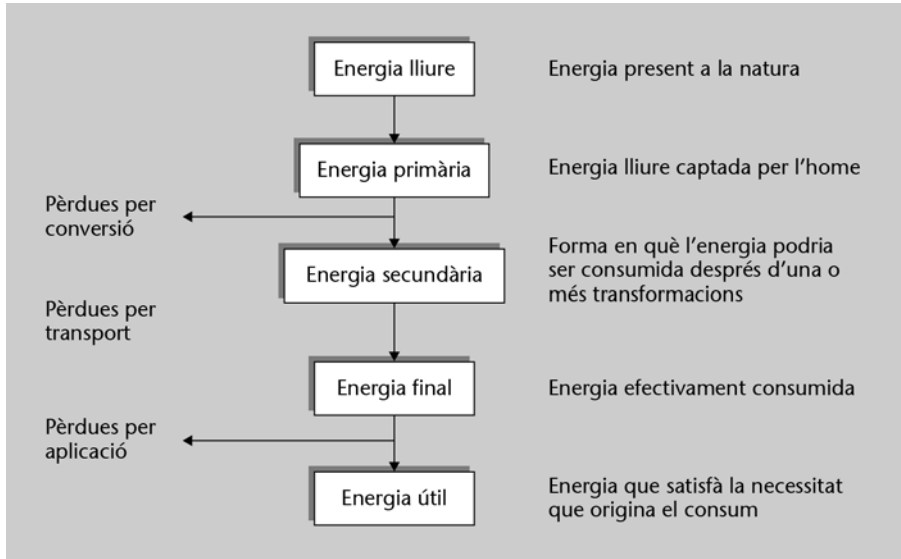
Des de l'energia present a la natura en diferents formes (temperatura, moviment, etc.) a l'energia que necessitem realment per fer certes tasques, hi ha diferents tipus d'energia, tal com es mostra en la figura 11. Aquestes són:

- l'energia lliure: és l'energia present a la natura, en forma de temperatura, energia potencial, moviment, etc.;
- l'energia primària: és l'energia lliure que pot ser captada i aprofitada per l'home. Els principals tipus d'energia primària, i que analitzarem amb més profunditat en els apartats 4, 5 i 6, són:
 - a) els combustibles fòssils (carbó, petroli i gas natural),
 - b) l'energia nuclear, i
 - c) les energies renovables (solar, eòlica, biomassa, etc.).
- l'energia secundària: un cop tenim l'energia primària, la podem transformar, una o més vegades, en altres formes d'energia, com per exemple en una central tèrmica, que transforma l'energia del combustible en energia elèctrica, com veurem més endavant en l'apartat 4.2;
- l'energia final: és l'energia que realment consumim, és a dir, la que paguem amb les nostres factures de gas i electricitat; i
- l'energia útil: és aquella que realment necessitem, la que s'utilitza per satisfer la necessitat que origina el consum, la que aprofitem. La diferència entre l'energia final i l'energia útil serà el rendiment de l'aparell que utilitzem.

! L'energia potencial s'explica en el mòdul "Mecànica" i la temperatura s'explica en el subapartat 1.3 d'aquest mòdul.

Per a fer-ho més entenedor, en la figura 11 teniu el procés que segueix l'energia des de l'origen, a la natura (en forma d'energia lliure), fins al destí, el consum final (l'energia útil). S'hi pot apreciar que el concepte d'energia primària és el més global, i el que inclou totes les pèrdues originades en el sistema energètic (pèrdues per conversió, per transport i per aplicació).

Figura 11. Procés de l'energia, de la natura al consum



Així doncs, el concepte d'energia primària és molt útil per fer les estadístiques energètiques, ja que inclou **tot** el consum energètic associat al país (si mirem només el mercat elèctric ens faltaran els combustibles dels vehicles; si mirem els combustibles ens faltará l'energia necessària per refinar-los, etc.). L'energia primària és, doncs, un terme global que ens ajuda a valorar l'energia que realment necessitem per a seguir amb el nostre model social.

3.1.3. Consum d'energia primària a Espanya

Per tal d'analitzar més a fons com consumim l'energia, hem cregut convenient desenvolupar a fons el cas del consum energètic a Espanya. La geografia de la península Ibèrica fa que, energèticament, sobretot pel que fa a l'electricitat, sigui quasi una illa, que funciona de manera autònoma i independent, ja que les connexions que tenim amb l'exterior (Europa, Portugal i Marroc) són molt poc significatives respecte al consum energètic total. Els països centroeuropeus, en canvi, tenen un teixit elèctric que els permet comportar-se com una xarxa en què les fronteres polítiques són quasi invisibles. Així doncs, a Europa hi haurà un consum energètic molt més uniforme entre països que no pas a Espanya, que en aquest sentit és més individual.

Bé, i com és el consum d'energia primària a Espanya? Per tal d'analitzar-lo hem accedit a l'informe que elabora el Ministeri de Medi Ambient, Medi Rural i Marí anomenat *Perfil ambiental de España 2008* (el més recent en el moment

Transformació de l'energia

Les transformacions, des de l'energia lliure fins a l'energia útil, es produeixen segons el primer principi de la termodinàmica, però part de l'energia es perd a cada transformació, principalment en forma de calor.

Consum d'energia

L'any 2008, els intercanvis d'electricitat d'Espanya amb Europa van ser de 6.214 GWh, un 2,35% del total de 263.530 GWh d'energia consumida.
(Font: *El sistema eléctrico español 2008*, Red Eléctrica de España)

de l'edició i del qual podeu consultar el contingut complet a la web del ministeri). Aquest informe disposa de diferents capítols i n'hi ha un d'exclusiu dedicat a l'energia, en què podem trobar el gràfic de l'evolució del consum d'energia primària que es mostra en la figura 12.

En aquest gràfic veiem, en primer lloc, la tendència creixent de consum d'energia primària, que de l'any 1990 al 2007 s'ha incrementat aproximadament un 55%. En segon lloc, hi apreciem els percentatges dels diferents tipus de fonts: les que minven són el petroli, el carbó i la nuclear; les energies renovables es mantenen aproximadament i l'única font que mostra una tendència creixent és el gas natural.

D'aquestes fonts, només les renovables i part del carbó són locals, per la qual cosa **més del 80% de l'energia primària consumida prové de fora del territori estatal**. A aquest aspecte ens referirem quan parlàvem de la dependència del sistema energètic en l'apartat 3.1.1, i aquesta dependència ens fa molt vulnerables, com a societat, enfront els països que ens subministren els recursos energètics.

Web d'interès

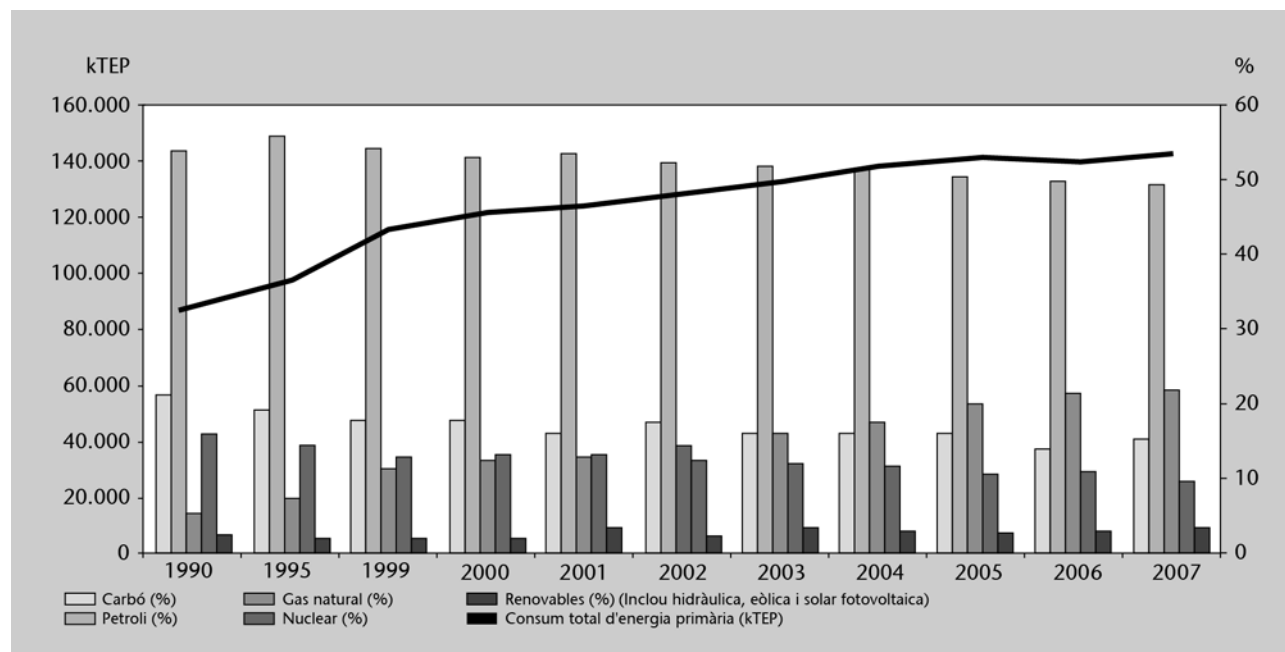
Consulteu l'informe *Perfil ambiental de España 2008* a la pàgina web del Ministeri de Medi Ambient:

http://www.mma.es/portal/secciones/calidad_contaminacion/indicadores_ambientales/perfil_ambiental_2008/index.htm

Recursos energètics

El petroli prové principalment dels Emirats Àrabs, el gas prové d'Algèria (en el cas d'Espanya) i el combustible nuclear prové del Congo i altres països africans.

Figura 12. Evolució del consum d'energia primària



Font: Dades extretes de MIT i C

Per a acabar amb els indicadors del sistema energètic espanyol, és important parlar de la **intensitat de l'energia primària**, un concepte del que potser ja heu sentit a parlar. Aquest indicador neix de la necessitat de valorar l'increment en el consum de l'energia primària d'un país, associat al seu producte interior brut (PIB) anual. D'aquesta manera, si un país està en vies de desenvolupament o en un moment de creixement econòmic, el més probable és que incrementi el seu consum d'energia primària, però si aquest valor el dividim pel PIB obtindrem un valor que ens indica, a més a més, l'eficiència del país per produir una unitat de PIB. El gràfic de la figura 13 mostra l'evolució

Unitat kTEP

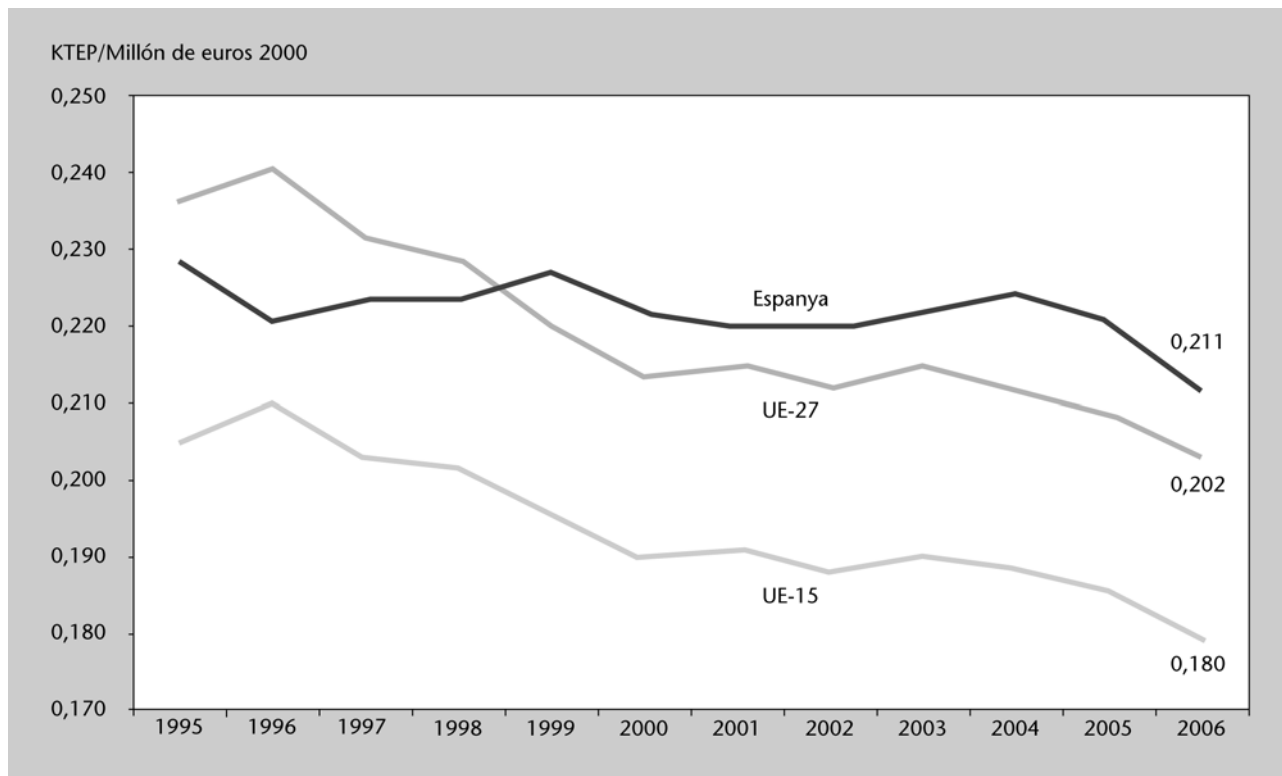
La unitat kTEP és l'abreviatura de kilotona equivalent de petroli i és una unitat d'energia (1 kTEP equival a 1.000 TEP o tones equivalents de petroli), amb les equivalències següents:

1 TEP = 41.868.000.000 J
(joules) = 11.630 kWh
(kilowatts hora)

En anglès, TEP correspon a TOE (*tonne of oil equivalent*).

d'aquest indicador. Hi podem veure que Espanya es troba per sobre de la mitjana europea (és a dir, que som més "ineficients") i que, a més, la tendència global, tret dels darrers anys, és més o menys estable.

Figura 13. Evolució de la intensitat d'energia primària



Font: Dades extretes d'Eurostat.

3.1.4. Consum d'energia a la llar

Fins ara hem vist l'evolució del consum energètic al llarg de la història i el consum d'energia primària a Espanya. Ara exposarem un exemple molt més palpable i que sentireu més proper, com és el consum energètic a la llar.

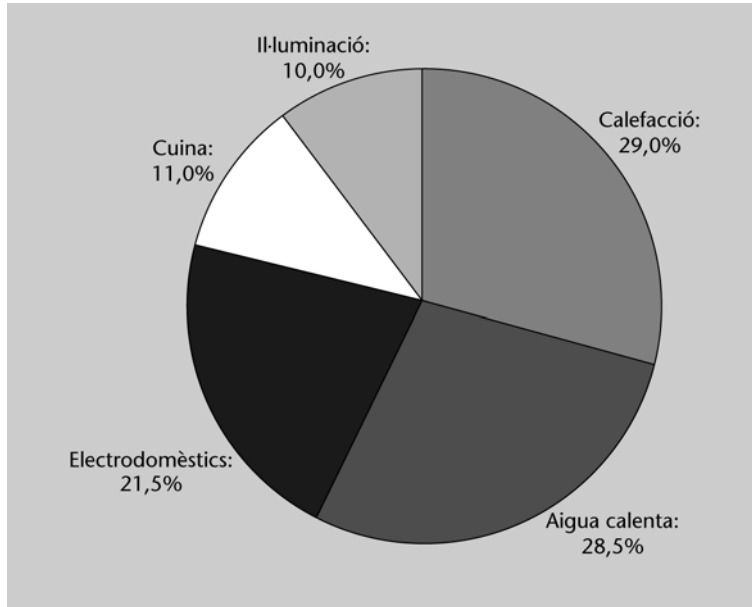
Per començar, és interessant saber com gastem l'energia consumida a la llar, quins usos li donem. Com a exemple de ciutat mediterrània, en la figura 14 es mostren els percentatges d'ús d'energia segons la *Guia per a l'estalvi energètic* publicada per l'Ajuntament de Barcelona. Aquests percentatges poden variar molt, sobretot en funció del clima (per exemple, en climes més freds tindrem un consum més alt de calefacció).

Els usos que fem de l'energia a la llar els repartim entre les tres fonts energètiques habituals: electricitat (il·luminació i electrodomèstics); gas natural (cuina i calefacció); i energia solar tèrmica (per a l'aigua calenta).

D'aquestes fonts energètiques, és interessant fixar-se en la repercussió que té la il·luminació en el total. Actualment, en un habitatge que sigui completa-

ment elèctric, és un consum minoritari si és compara amb el dels aparells elèctrics i electrònics que utilitzem, però es curiós el fet que, per herència històrica, quan hi ha un tall de subministrament encara diem que “se n’ha anat el llum”.

Figura 14. Distribució del consum energètic per usos en una llar ubicada a Barcelona



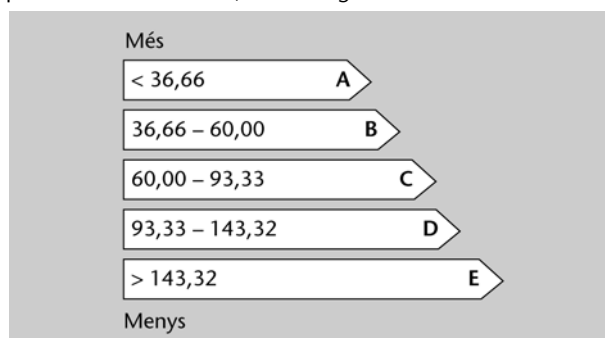
Font: Adaptat de *Guia per a l'estalvi energètic*. Ajuntament de Barcelona.

A continuació, i per tal de veure quin impacte anual té a les nostres cases el consum d'energia, us proposem realitzar una petita auditoria energètica.

Activitat 3.1. Auditoria energètica a casa nostra

1. Determineu quina font energètica us satisfà, a casa vostra, cadascuna de les necessitats de la figura 14 (energia elèctrica, gas natural o energies renovables).
2. Agafeu les factures del subministrament energètic (gas i electricitat) del darrer any i calculeu el vostre consum anual en kWh.
3. Calculeu, a partir de la superfície de la vostra llar, el consum energètic per metre quadrat (kWh/m² per any), dividint el consum anual de l'habitatge per la superfície del pis.
4. Amb aquest valor, classifiqueu el vostre habitatge segons la següent escala per al consum energètic de la llar:

Classificació energètica de l'habitatge segons l'actual sistema de certificació energètica d'edificis de nova construcció, establert pel Real Decret 47/2007, de 19 de gener.



Escala de classificació

L'escala de classificació s'ha obtingut seguint el procediment establert al document *Escala de Calificació Energètica para Edificios de Nueva Construcción* editat pel Ministeri de l'Habitatge i pel Ministeri d'Indústria, Turisme i Comerç, per Barcelona (zona climàtica C2) i per a edificis d'habitatges. Si canvia la ubicació de l'habitatge o el tipus d'edifici, l'escala ja no és aplicable.

5. Valoreu, seguint els barems següents, quin tipus d'habitatge teniu:

a) Si obteniu una classificació A o B, el vostre habitatge és molt eficient i hi feu una bona gestió de l'energia. Segur que seguiu recomanacions d'estalvi i eficiència energètica.

b) Si obteniu una classificació C, teniu un habitatge de tipus mitjà, i segur que teniu opció de fer-hi alguna millora que us ajudi a reduir el consum energètic.

c) Si la classificació que obteniu és D o E, es pot dir que, en termes actuals, l'habitatge no és eficient en estalvi i segurament podeu adoptar-hi mesures que us ajudin a millorar-ne el comportament.

3.1.5. L'energia elèctrica

Fins ara hem vist el consum energètic que fem com a societat, i concretament a casa nostra, i també l'energia primària que consumeix Espanya. Un dels tipus d'energia que més consumim és l'energia elèctrica, que té un paper rellevant i cada dia més gran. Per això és important que coneguem algunes dades sobre aquest tipus d'energia.

Definició d'energia elèctrica

Comencem doncs amb una definició d'energia elèctrica.

S'anomena **energia elèctrica** a la forma d'energia que sorgeix de l'existència d'una diferència de potencial entre dos punts. Això permet establir un corrent elèctric entre ambdós, quan se'ls posa en contacte mitjançant un conductor elèctric, per obtenir-ne treball.

Per a més informació, vegeu el mòdul "Electrostàtica" d'aquesta assignatura.



Per què és important l'energia elèctrica?

La gran importància actual de l'energia elèctrica no es deu tant a la seva naturalesa, com al fet que aquesta es pot transformar fàcilment, amb les tecnologies actuals, en moltes altres formes d'energia i que, per tant, pot satisfer moltes de les necessitats o demandes que tenim avui en dia com a societat.

És precisament per aquesta major tecnificació de la nostra vida que l'energia elèctrica és un element clau en el nostre dia a dia. Per exemple, anys enrere, quan l'extensió de la xarxa elèctrica no era tan gran com ara, hi havia les neveres de gas. Aquestes no s'endollaven, sinó que funcionaven amb una bombona de gas. Avui en dia, en canvi, podríem afirmar que quasi totes les neveres existents són elèctriques.

A causa, doncs, de la importància actual d'aquest tipus d'energia, i el potencial de creixement tan gran que té (amb la possible implantació de cotxes elèctrics), és important que coneguem les seves principals característiques.

El diagrama de Sankey

Per veure quin paper té l'energia elèctrica respecte a l'energia primària (definida en el subapartat 3.1.2) que es consumeix a Espanya, ens valdrem del diagrama de Sankey per a l'energia a Espanya l'any 2008, que s'adjunta en la figura 15.

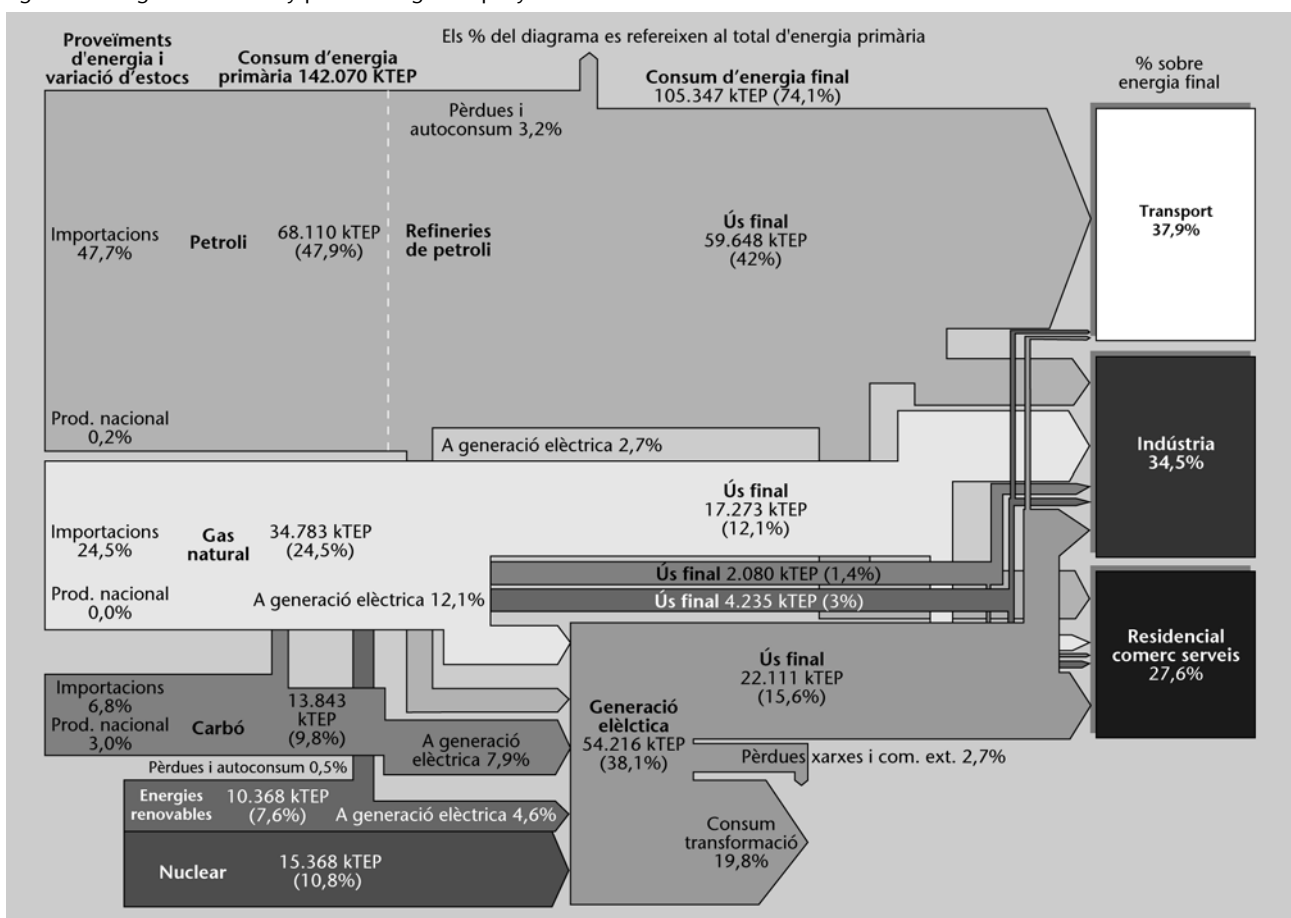
En aquest diagrama entrem per l'esquerra, on veiem els diferents tipus d'energia primària consumida a Espanya. A mesura que avancem cap a la dreta del diagrama, es produeixen pèrdues al sistema (per autoconsum, pel transport, per les transformacions, etc.), en forma de fletxes que no arriben al límit de la dreta. Aleshores arribem a un punt en què se'ns indica el consum d'energia final (la que paguem a les nostres factures i que passa pels comptadors). I a la dreta de tot tenim els percentatges d'energia que consumim per cada aplicació (transport, indústria i la corresponent a les residències, el comerç i els serveis).

Així doncs, en observar el diagrama de la figura 15, veiem que l'energia elèctrica constitueix el 21% del consum d'energia final, ja que l'energia elèctrica representa 22.111 kTEP del total de 105.347 kTEP de consum d'energia final.

Diagrama de Sankey

Representació gràfica del consum d'energia en un ecosistema natural o artificial, a partir de franges que representen, segons el seu gruix, la quantitat d'energia corresponent, i segons la seva direcció, el destí final d'aquesta energia.

Figura 15. Diagrama de Sankey per a l'energia a Espanya el 2008



Font: Adaptat de *La energía en España 2008*. Ministeri d'Indústria, Turisme i Comerç.

Podem apreciar també en aquest diagrama que l'energia elèctrica és un tipus d'energia secundària i d'energia final, segons s'ha descrit en la figura 11. És un tipus d'energia secundària perquè s'obté de la transformació d'algun altre recurs (petroli, gas, vent, nuclear, etc.), i és un tipus d'energia final perquè és també una forma que tenim actualment de consumir energia per satisfer la demanda real d'energia útil.

Aquests dos aspectes de l'energia elèctrica són molt importants i els haurem de tenir presents, ja que, en funció de la tecnologia de generació que fem servir (en la producció de l'electricitat a les centrals elèctriques) i de l'aparell que utilitzem (en el nostre consum d'energia final), podem arribar a tenir uns rendiments globals, des de l'energia primària a l'energia útil, molt baixos.

Vegem ara, en els següents apartats, dos valors del sistema de generació elèctrica que extraïem del diagrama de la figura 3.8: el rendiment global del sistema de generació elèctrica i el valor de les pèrdues en el transport d'electricitat.

Rendiment del sistema de generació elèctrica

Hi ha un concepte clau per a saber com d'eficient és un sistema: és el *rendiment*.

El **rendiment** es calcula com el quocient entre l'energia total obtinguda, en el sentit que l'aprofitem, i l'energia total subministrada:

$$\text{Rendiment} = \frac{\text{Energia obtinguda (aprofitable)}}{\text{Energia total subministrada}} \times 100 \quad (39)$$

L'expressió es multiplica per 100 perquè el resultat s'acostuma a donar en tant per cent.

Per a saber quin és el rendiment de la generació elèctrica, és a dir, el rendiment de la transformació de l'energia primària a energia secundària, veiem, a partir del mateix diagrama de Sankey de la figura 15, que el rendiment de generació del conjunt de centrals i tecnologies de generació elèctrica del país és del 48%.

Per efectuar aquest càlcul hem considerat, segons la figura 15:

- el 15,6% de l'ús final d'energia elèctrica,
- el 2,7% de les pèrdues de transport, i
- el total de 38,1% de la generació elèctrica.

I fem l'operació següent:

$$\text{Rendiment generació elèctrica} = (15,6 + 2,7) / 38,1 = 0,48 = 48\%$$

Així doncs, per cada 100 unitats d'energia que entren en una central elèctrica, només 48 es transformen en energia elèctrica, i la resta, 52, es perden en forma d'altres tipus d'energia (principalment calorífica en fums de combustió, etc.) a la central mateixa.

Recordeu

Les transformacions de l'energia les hem tractades en els apartats 1 i 2.

Pèrdues en el transport d'electricitat

Les xarxes elèctriques que transporten l'energia tenen pèrdues i les podem calcular a partir del mateix diagrama de la figura 15.

L'energia produïda a les centrals és la suma de l'energia elèctrica final (15,6%) i les pèrdues per transport (2,7%). Així doncs, el total produït a les centrals elèctriques és del 18,3%. Per tant, les pèrdues per transport corresponen, en percentatges absoluts, al 14,75% de l'energia generada per les centrals (el 2,7% representa un 14,75% del 18,3%, segons la figura 15).

Així doncs, el rendiment global del sistema de generació elèctrica, considerant l'energia que ens arriba als punts de consum (tenint en compte les pèrdues de transformació i les de transport) és del 40,9%.

O, dit d'una altra manera, per cada kWh d'energia elèctrica que arriba a casa nostra s'hauran perdut 1,44 kWh.

Activitat 3.2. Rendiments globals de conversió

El rendiment global de les conversions energètiques associades a l'energia elèctrica, que es fa evident en consultar les dades oficials del sector energètic disponibles, no sempre es coneix. Un exemple molt clar, i que no és aïllat, el podem trobar en una pàgina web d'un sistema de calefacció elèctrica, en la que s'assegura el següent (és un cas real, no inventat):

"El rendiment dels radiadors X és sempre del 100%. En canvi les calderes [s'entén que de gas o gasoil] estan subjectes a un coeficient de rendiment que pot arribar al 90% quan treballen a plena potència (escalfament d'aigua sanitària), però que es redueix sensiblement quan treballen únicament per a calefacció i es redueix encara més, per sota del 50%, si tenim pocs radiadors en servei."

Creieu que és certa aquesta afirmació?

Solució

En realitat, aquesta afirmació no és falsa, és a dir, un radiador elèctric té un rendiment pròxim al 100% (el 100% absolut no existeix), però no s'està tenint en compte que l'energia elèctrica és un tipus d'energia secundària i que, per tant, hauríem de tenir en compte el rendiment del sistema elèctric que ens abasteix, en aquest cas l'espanyol, i també de la xarxa de distribució. Per tant, el rendiment global serà en realitat el producte dels dos rendiments (el de transformació i transport de l'energia elèctrica, que és del 40,9%, segons hem vist) i el de l'aparell (pròxim al 100%). Així doncs, el rendiment global de l'aplicació serà del 40,9%.

Per a una caldera de gas o gasoil, el rendiment sí que és directament el que obtenim de l'aparell, ja que es transforma directament un combustible (gas o gasoil) en calor, i no hem de tenir en compte cap més rendiment.

Com a conclusió de l'exemple, veiem que fins i tot en el moment de treball de menys rendiment de la caldera de gas o gasoil, que tindria un rendiment del 50%, el rendiment global de la transformació és més alt que el del radiador elèctric, que en conjunt és del 40,9%.

Aquest exercici està molt lligat amb la definició de sistema termodinàmic, els límits i l'entorn que hem explicat al principi del mòdul. Fixeu-vos que si definim el sistema amb límits a l'aparell de calefacció, l'afirmació és certa; però si el sistema contempla des de l'energia primària a l'energia útil, el rendiment global canvia.

Així doncs, hem de tenir en compte que l'energia elèctrica és un tipus d'energia de gran qualitat, perquè la podem transformar fàcilment en altres formes d'energia. Alhora, però, hem vist que porta implícit un rendiment de generació que caldrà tenir present, sobretot si volem comparar l'eficiència energètica entre diferents alternatives tecnològiques per satisfer les nostres demandes. En general, per a aquelles aplicacions que no tenen substitut possible (com p. ex. l'electrònica) serà una bona opció, però per a la demanda d'energia calorífica no serà, ni molt menys, una opció de bon rendiment energètic.

Recordeu

En el subapartat 1.4 s'ha comentat que l'energia calorífica és un dels tipus d'energia de menys qualitat. Tant és així que les pèrdues de la majoria de transformacions energètiques es transformen en calor.

Impactes ambientals (socials i econòmics) associats a l'energia elèctrica

Tal com hem explicat, l'energia elèctrica no és una energia primària, sinó que l'obtenim d'un procés de transformació a partir d'altres tipus d'energia. Entre les diferents opcions de generació, i que s'expliquen posteriorment en el subapartat 3.2.1, tenim les següents:

- a) central tèrmica de gas natural, carbó o fuel,
- b) central de cycle combinat,
- c) central nuclear,
- d) energies renovables (eòlica, solar fotovoltaica i biomassa).

En funció de la tecnologia que utilitzem per a crear l'energia elèctrica tindrem uns impactes o uns altres. Vegem quins impactes ambientals estan associats a cada tipus de generació elèctrica.

Impactes del procés de combustió

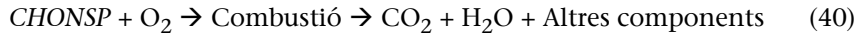
Actualment, una gran part de l'energia elèctrica s'obté a partir d'un procés de combustió (com seria el cas de les centrals tèrmiques o les de cycle combinat que veurem en el subapartat 4.2). És important conèixer bé com funciona el procés de combustió i els impactes que se'n deriven. En aquest apartat descriurem doncs aquest procés, i també els combustibles fòssils i els impactes associats, entre els quals, un dels més importants és el canvi climàtic.

Descripció del procés de combustió

El procés de combustió es duu a terme a partir d'un combustible (que pot ser petroli, carbó, fusta, etc.) mesclat amb oxigen.

El combustible està format principalment per carboni, hidrogen i oxigen i, en menor mesura, per altres elements com nitrogen, sofre, fòsfor, etc. (CHONSP). Els combustibles, mesclats amb l'oxigen de l'aire (O_2) i amb una guspira que

faci detonar la combustió, es converteixen en diòxid de carboni (CO_2) i vapor d'aigua (H_2O), i en menor mesura en altres productes de combustió (òxids de nitrogen, cendres, etc.). Així doncs, en cremar aquests combustibles, el que fem es dur a terme la conversió següent:



El procés de combustió es duu a terme de la mateixa manera, tant si cremem fusta com petroli. L'únic que canviarà és la composició del combustible i, per tant, part dels productes de combustió. Aquests productes estan tots continguts en els fums de combustió. Vegem quin és l'impacte ambiental associat a aquests productes de combustió.

Contaminants del procés de combustió

Els fums de combustió tenen dos tipus de contaminants associats:

- **Contaminants primaris:** monòxid de carboni, òxids de nitrogen (que provoquen pluja àcida) i partícules en suspensió (cendres i pols formades per partícules de mida molt petita i que poden penetrar a l'organisme per les vies respiratòries). Aquests contaminants afecten principalment les zones properes al punt d'emissió (xemeneia, tub d'escapament, etc.).
- **Contaminants secundaris:** gasos d'efecte hivernacle, principalment diòxid de carboni. Aquests contaminants es diferencien dels altres perquè tenen un efecte global, no solament en el punt d'emissió, sinó a tot el planeta.

D'aquests tipus de contaminants, els primaris són molt més localitzats, ja que els problemes i els impactes es produeixen al mateix lloc on es consumeix l'energia, on s'emeten els fums de combustió. També és important tenir en compte que aquest tipus de contaminants existirà tant si cremem combustibles fòssils com si cremem fusta.

Els secundaris, en canvi, tenen efectes globals, és a dir, sobre parts del planeta on no hi ha cap central tèrmica, i estan associats únicament als combustibles fòssils.

Els gasos d'efecte hivernacle són els responsables de l'anomenat canvi climàtic, del que sentim a parlar contínuament en els mitjans de comunicació. L'emissió de gasos d'efecte hivernacle està directament vinculada al consum energètic de la societat, ja que la majoria es genera en els processos de combustió dels combustibles fòssils que, com hem vist en el diagrama de Sankey de la figura 15, són la principal font energètica actual. Però, per què els combustibles fòssils són els responsables de l'efecte hivernacle? Per contestar aquesta pregunta caldrà que entenguem l'origen dels combustibles fòssils.

Origen i formació dels combustibles fòssils

Inicialment, al planeta Terra no hi havia l'atmosfera actual, ni tampoc els éssers vius actuals. Els bacteris i els vegetals captaven carboni de l'aire (que hi era present en forma de diòxid de carboni) i emetien oxigen, mitjançant la fotosíntesi, igual que fan les plantes actuals. És a dir, que amb la seva respiració van anar creant la composició actual de l'atmosfera, en reduir el diòxid de carboni i augmentar l'oxigen.

Una de les teories de la formació del petroli és que es va produir una acumulació d'enormes quantitats de restes d'animals marins i de vegetals terrestres en els fons marins. Durant milions d'anys, mesclats amb sediments i sota la intensa acció de la compressió i el calor generat, es transformaren en petroli i en gas. És a dir, el carboni que contenen els combustibles fòssils prové de les restes fòssils d'aquesta matèria orgànica, i d'aquí el nom de combustibles fòssils.

En el cas del carbó i del gas natural, l'origen és també el mateix: matèria orgànica fòssil que va quedar atrapada durant els moviments de plaques tectòniques i que es va transformar a causa de la pressió i les temperatures altes.

Els combustibles fòssils i el canvi climàtic

Tenint en compte el que acabem de descriure, el diòxid de carboni que hi havia a l'ambient va ser captat per les plantes i emmagatzemat a l'interior de la Terra en forma de combustibles fòssils. Gràcies a aquesta captació de diòxid de carboni de fa milions d'anys, la composició de l'atmosfera i el clima actuals són els que són.

D'altra banda, a partir de la descripció del procés de combustió veiem que amb la crema de combustibles fòssils estem emetent aquest diòxid de carboni que va ser captat per les plantes, el plàncton i els bacteris de fa milions d'anys, i que fins ara estava emmagatzemat i retingut en els combustibles fòssils a l'interior de la Terra.

Així doncs, la combustió intensiva de combustibles fòssils està alterant la composició de l'atmosfera per l'emissió d'aquest diòxid de carboni captat ara fa milions d'anys pels organismes, i això és el que es coneix com a **canvi climàtic**.

Ens podríem preguntar: si cremem fusta, no estem emetent també diòxid de carboni i per tant contribuint a l'efecte del canvi climàtic? La resposta és que no, ja que en aquest cas la fusta prové d'un arbre que va captar aquest diòxid de carboni fa, per exemple, cinquanta anys, quan la composició de l'atmosfera ja era l'actual. Així, la seva combustió tanca un cicle del carboni de cinquanta

anys, que està equilibrat amb els nous cultius d'arbres, i per tant no altera globalment el contingut de diòxid de carboni a l'atmosfera.

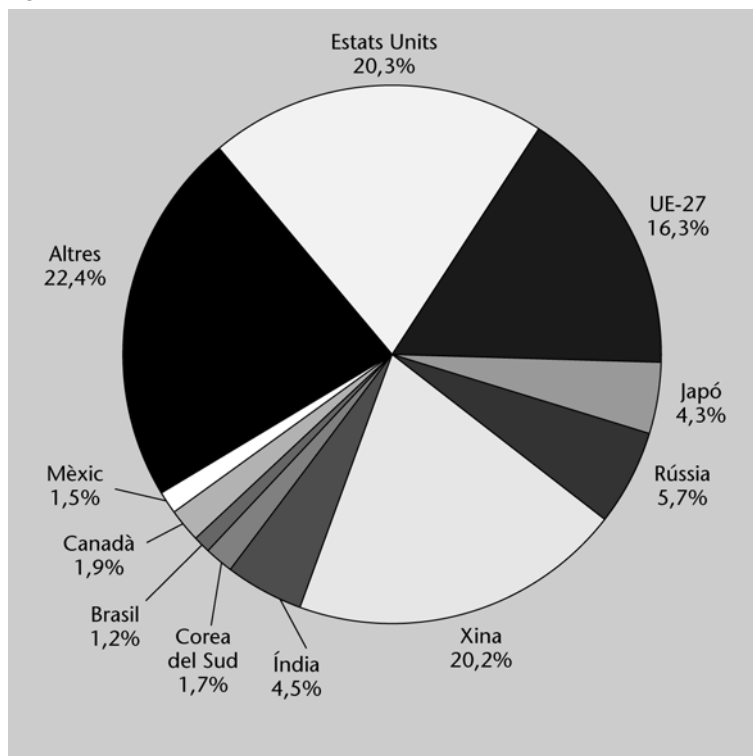
La combustió de combustibles fòssils, en canvi, està tancant un cicle del carboni de 3,5 milions d'anys, i que NO està equilibrat amb la captació de diòxid de carboni de les plantes i el plàncton actuals, i per tant està alterant la concentració d'aquest gas a l'atmosfera.

L'emissió de gasos d'efecte hivernacle al món

Hi ha diferents teories sobre els efectes que aquest canvi en la composició de l'atmosfera pot tenir en el clima del planeta, però si una cosa està clara és que és un problema que ens afecta a tots. Però, tots en som igual de responsables? Té sentit que duem a terme polítiques de reducció de gasos d'efecte hivernacle si altres països no hi col·laboren?

Si mirem les dades de la figura 16 podem pensar que no, ja que els Estats Units i la Xina són responsables del 40,5% de les emissions mundials.

Figura 16. Estructura de les emissions de CO₂ el 2006



Font: Dades extretes de la Comissió Europea i l'OCDE.

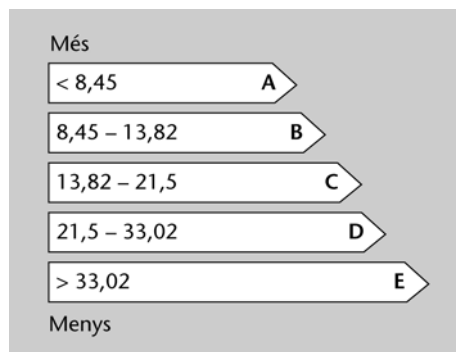
El canvi climàtic és sens dubte un dels grans reptes a què s'enfronta conjuntament la població mundial, i per al qual cal adoptar mesures comunes. Alhora, treballar per canviar el sistema energètic i fer-lo menys dependent de les energies fòssils farà que, a la llarga, la fiabilitat del subministrament sigui major. Si això no es porta a terme actualment es deu al factor econòmic: ara per ara surt més barat (en termes econòmics) consumir els combustibles fòssils que no pas fomentar les energies renovables i adaptar el sistema actual a les seves limitacions.

Activitat 3.3. Continuació de l'auditoria energètica a casa nostra

Continuem amb l'auditoria energètica de casa nostra, però ara calculem la classificació de la nostra llar en funció de les emissions. Feu-ho de la manera següent:

1. Agafeu les factures de subministrament energètic (gas i electricitat) del darrer any i calculeu el vostre consum anual en kWh.
2. Calculeu ara les emissions associades a cada tipus d'energia, utilitzant els factors de conversió següents:
 - a) 1 kWh elèctric = 0,45315 kg CO₂
 - b) 1 kWh gas = 0,20098 kg CO₂
3. Calculeu, a partir de la superfície de la vostra llar, les emissions generades per metre quadrat: kg CO₂/m² per any (dividiu les emissions anuals per la superfície del pis).
4. Amb aquests valors, classifiqueu el vostre habitatge segons l'escala següent:

Classificació energètica de l'habitatge



Segons l'actual sistema de certificació energètica d'edificis de nova construcció establert pel Reial Decret 47/2007, de 19 de gener.

Observació

L'escala de classificació s'ha obtingut seguint el procediment establert al document *Escala de Calificació Energètica para Edificios de Nueva Construcción* editat pel Ministeri de l'Habitatge i pel Ministeri d'Indústria, Turisme i Comerç, per Barcelona (zona climàtica C2) i per a edificis d'habitatges. Si canvia la ubicació de l'habitatge o el tipus d'edifici, l'escala ja no és aplicable.

5. Valoreu, seguint els barems següents, quin tipus d'habitatge teniu pel que fa a les emissions:
 - a) Si obteniu una classificació A o B, el vostre habitatge és molt eficient i hi feu una bona gestió de l'energia. Segur que seguiu recomanacions d'estalvi i eficiència energètica.
 - b) Si obteniu una classificació C, teniu un habitatge de tipus mitjà, i segur que teniu opció de fer-hi alguna millora que us ajudi a reduir el consum energètic.
 - c) Si la classificació que obteniu és D o E, es pot dir que, en termes actuals, l'habitatge no és eficient en estalvi i segurament podeu adoptar-hi mesures que us ajudin a millorar-ne el comportament.

Els residus nuclears

Un dels impactes de l'energia nuclear (la qual es descriu en l'apartat 4.3) són els residus que genera. El combustible que s'utilitza, un cop esgotat, es manté radioactiu durant **milions** d'anys. Aquests residus, si bé es generen en poca quantitat en relació amb l'energia obtinguda, s'han de gestionar correctament per a evitar que puguin afectar el medi ambient amb la seva radiació i produir impactes irreversibles sobre l'ecosistema.

Actualment, la major part del combustible nuclear esgotat a l'Estat espanyol està emmagatzemat a les centrals nuclears mateixes, però en un futur s'haurà de gestionar fora d'aquestes. Entre les diferents opcions de gestió hi ha les següents:

- Disposició geològica profunda: és la més segura. Consisteix a buscar una zona de terreny que compleixi certes característiques geològiques que

confinen la radioactivitat d'aquests materials, i enterrar-los allí, amb la vigilància deguda, pel període (milions d'anys) que dura la radioactivitat dels materials.

- Enterrar-los en fosses oceàniques o als fons marins, però aquesta opció no aporta la seguretat suficient quant a control social, per la qual cosa es podrien donar situacions de risc en cas de mala manipulació. És doncs una opció amb poques possibilitats de dur-se a terme, ja que podria comportar un risc de seguretat per a la població mundial.
- Enviar-los a l'espai. En aquest cas tampoc no hi ha una seguretat absoluta en el control de les càpsules de residus enviades a l'espai que, fins i tot, podrien tornar a xocar amb la superfície de la Terra. Les poques garanties de seguretat fan que aquesta opció també es descarti.

Residus nuclears

Els residus nuclears poden tenir efectes molt greus en la població i el planeta, a causa de l'emissió de radioactivitat. Si els magatzems de residus nuclears no tenen les mesures de seguretat suficients, els residus es podrien robar i utilitzar en accions terroristes. A aquest aspecte ens referim quan parlem del control social dels residus nuclears.

Sigui com sigui, l'ús de l'energia nuclear genera uns residus radioactius durant milions d'anys que cal tenir en compte. Sí que és cert que no s'emeten gasos d'efecte hivernacle, ja que no hi ha procés de combustió, però no és cert que sigui una energia neta, atès que genera uns residus molt perillosos que cal tenir en compte a l'hora de planificar la generació energètica.

Impacte social

Com hem anat veient, el sistema energètic actual depèn molt dels recursos fòssils ubicats fora del territori on es consumeix l'energia, la qual cosa fa que hi hagi conflictes geoestratègics a escala mundial pel control d'aquests recursos. Això succeeix per als combustibles fòssils i també per a l'urani de les centrals nuclears.

Aquest aspecte però, sovint no es té en compte, o es passa per alt. Tanmateix, el seu cost global en l'àmbit social, econòmic (costos d'armament) i ambiental no és menyspreable.

Les energies renovables: energia sense impacte?

Les energies renovables representen, dins el ventall de possibilitats d'obtenció d'energia final, les energies amb menys impacte global.

1) En primer lloc, la font que utilitzen (radiació solar, vent, aigua, etc.) és un recurs local i renovable:

- Local, perquè està ubicat al lloc on es genera i necessita l'energia i, per tant, no implica dependència exterior ni tots els impactes associats (conflictes pel control de recursos, etc.).
- Renovable, ja que l'ús del recurs no implica un esgotament, sinó que la seva existència és independent de que l'usem o no. El vent no deixarà d'existir per més molins que posem al territori, ni la radiació del sol disminuirà per més captadors que instal·lem.

Recursos renovables locals

Els recursos renovables són locals, és a dir, provenen del mateix territori. Per contra l'energia elèctrica no es genera allà on hi ha la demanda (que seria, per exemple, a les ciutats), sinó que es produeix en zones allunyades com ara les zones rurals, que generen més energia elèctrica de la que necessiten. Aquest problema el presenten les energies convencionals i també algunes energies renovables.

2) En segon lloc, no produeixen emissions ni contaminants en la generació energètica, únicament en les fases de construcció i de desmantellament de les instal·lacions, igual que la resta de tecnologies.

Les energies renovables són, doncs, ara per ara, l'única alternativa real a la generació d'electricitat i la satisfacció de la demanda energètica sense l'ús de recursos fòssils i finits.

Així i tot, sovint trobem exemples de municipis que volen dur a terme un projecte d'instal·lació de molins eòlics i sembla que tothom s'hi bolca en contra per l'impacte paisatgístic o visual que aquestes instal·lacions tenen al territori. Podríem dir que l'impacte visual, d'alteració del paisatge rural, és l'únic impacte que tenen aquestes energies, ja que són instal·lacions de tipus extensiu, és a dir, ocupen molta superfície de territori per a obtenir una bona quantitat d'energia.

En qualsevol cas, el millor és racionalitzar el consum d'energia i fer-ne un bon ús (no regular els aires condicionats amb les finestres obertes, posar la calefacció a temperatures adequades, etc.), ja que com es diu sovint, la millor energia és la que no es consumeix.

3.2. Els agents del mercat elèctric

Fins ara hem fet una pinzellada a les demandes energètiques de la societat, al mercat elèctric i a l'impacte d'aquest sistema. L'energia elèctrica és, com ja hem comentat, un tipus d'energia secundària, que prové de la transformació d'altres tipus d'energia.

Ara, però, passarem a descriure a grans trets com funciona el mercat elèctric i quins són els agents que el formen.

La complexitat d'aquest sistema es deu al fet que l'energia elèctrica, com ja hem comentat, es genera instantàniament en el moment en què es consumeix. Així, quan encenem un llum, el kilowatt hora (kWh) no està emmagatzemat a l'endoll, esperant a que el consumim, sinó que l'energia necessària per a encendre la bombeta es genera, en algun lloc del territori, en el precís instant en què connectem el llum.

Així doncs, a diferència del gas o el petroli, que els podem tenir emmagatzemats en dipòsits i subministrar-los en funció de la demanda, el sistema elèctric precisa d'una infraestructura molt més complicada per a poder satisfer en cada moment la demanda generada.

En aquest apartat descriurem els diferents agents que interactuen en el sistema elèctric per fer que aquest funcioni, la major part del temps, sense problemes. Aquests agents són:

- 1) els productors,
- 2) el sistema de transformació i transport,
- 3) les comercialitzadores,
- 4) els consumidors, i
- 5) l'operador del mercat ibèric d'energia.

3.2.1. Productors: el *mix* de generació

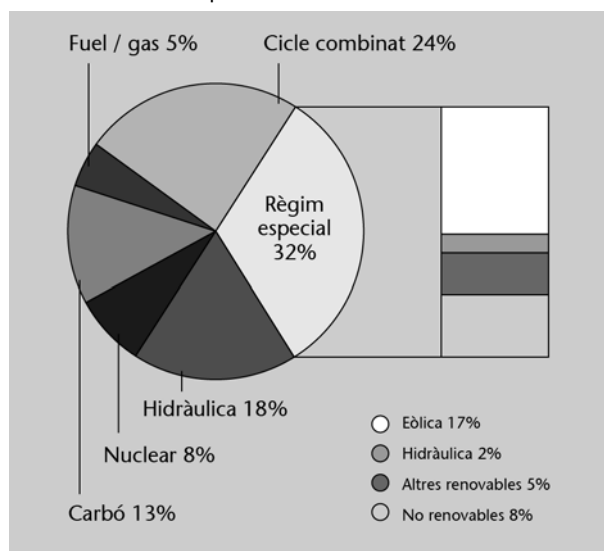
El primer que cal perquè pugui existir el sistema elèctric són els productors.

Els productors són les instal·lacions que transformen algun tipus d'energia primària en energia elèctrica.

Hi ha dues dades que haurem de tenir en compte per a valorar correctament els productors elèctrics: la potència instal·lada i la cobertura de la demanda anual d'energia.

1) La potència instal·lada ens mostra quin és el parc de centrals elèctriques, existents i en funcionament, que poden generar energia elèctrica, si escau. En la figura 17 es mostra els tipus de centrals elèctriques que formaven la potència instal·lada peninsular (90.878 MW) el 31 de desembre de 2008. Fixeu-vos només en l'estructura general dels productors; els diferents tipus els explicarem més endavant en aquest apartat.

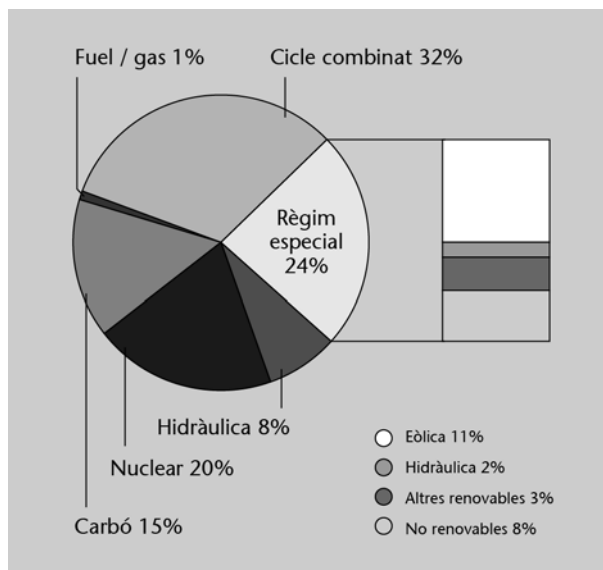
Figura 17. Potència instal·lada el 31 de desembre de 2008 en el sistema elèctric peninsular



Font: Adaptat de *El sistema elèctric español 2008*. Red Elèctrica de España.

D'aquest parc de centrals elèctriques, no totes funcionen el mateix nombre d'hores i, per tant, generen una quantitat d'energia elèctrica que no està directament relacionada amb la seva potència. Si volem saber quin tipus de central elèctrica ha produït efectivament l'energia elèctrica consumida, haurem de mirar la **cobertura de la demanda anual d'energia**, que per al 2008 és la que es mostra en la figura 18 (com abans, fixeu-vos només en l'estructura general dels productors, i ja explicarem els diferents tipus més endavant en aquest apartat). Aquesta figura és el que s'anomena *mix* de generació.

Figura 18. Cobertura de la demanda anual d'energia elèctrica peninsular per al 2008



Font: Adaptat de *El sistema elèctric español 2008*. Red Eléctrica de España.

Per exemple, observem com les nuclears, que representen només un 8% de la potència instal·lada, acaben donant cobertura al 20% de la demanda. Això es deu al fet que les centrals nuclears no s'aturen mai (únicament per aturades de manteniment), cosa que permet que la seva generació sigui contínua. Això, però, s'explicarà més en detall en el subapartat 4.3.

Les centrals de producció d'energia elèctrica es divideixen en dos grans grups: el règim ordinari i el règim especial. Aquesta classificació respon a la necessitat que té actualment el govern d'incentivar econòmicament certes tecnologies energètiques. Així, tenim:

1) Règim especial: són aquelles tecnologies energètiques més netes i eficients, però que econòmicament no són viables per si soles, i el govern les incentiva de manera diferent.

2) Règim ordinari: són la resta de centrals, les convencionals. Entre aquestes:

- les centrals tèrmiques de fuel, gas i carbó (subapartat 4.2),
- les centrals de cicle combinat (subapartat 4.2.4),

- les centrals nuclears (subapartat 4.3), i
- les centrals hidràuliques (les grans preses, que no tractarem en aquest mòdul).

Passem a veure quins tipus de centrals corresponen al règim especial. Actualment, la definició de les tecnologies de règim especial apareix en l'article 27 de la Llei del sector elèctric, en què es detalla que l'activitat de producció d'energia elèctrica tindrà la consideració de producció en règim especial en els casos següents (sempre que la potència de les instal·lacions no superi els 50 MW):

- quan es tracti d'autoproductors que utilitzin la cogeneració (generació de calor i electricitat de manera simultània) o altres formes de producció d'electricitat associades a activitats no elèctriques, sempre que comportin un rendiment energètic alt;
- quan s'utilitzi com a energia primària alguna de les energies renovables no consumibles (eòlica o solar), biomassa o qualsevol tipus de biocarburant; i
- quan s'utilitzin residus no renovables com a energia primària. Els residus poden ser municipals, agrícoles o ramaders.

És a dir, es poden inscriure en la producció elèctrica en règim especial aquells productors que tenen instal·lacions d'energies renovables o d'alta eficiència i que, a més a més, són de poca potència. Vol dir això que les energies renovables mai no són econòmicament viables i que, per tant, cal que hi hagi darrere uns incentius econòmics del govern?

En realitat no. El que hi ha, com en totes les instal·lacions, és una economia d'escala. Els grans parcs eòlics que hi ha a Navarra o a la Muela (província de Saragossa) generen tanta energia que surt a compte promoure'n la instal·lació sense cap ajuda. El que no és viable econòmicament es instal·lar tres molins o quatre seguidors fotovoltaics i, per això, en aquests casos cal un incentiu econòmic.

Els incentius a la producció solar fotovoltaica

Cal esmentar una curiositat d'aquest sistema d'incentius. En un moment, concretament durant el període 2007-2008, es va incentivar de tal manera la producció solar fotovoltaica que aquest tipus de plantes de producció d'energia elèctrica a partir del Sol va proliferar espectacularment per tot el territori. Cal dir també que hi va haver qui va fer certes "trampes legals" amb aquestes instal·lacions, ja que les inscrivien com a dues instal·lacions en lloc d'una, per tal de no sobrepassar el límit de potència establert. Sigui com sigui, aquest escenari tan propici per a l'energia solar fotovoltaica va fer que, ja a mitjan 2007, s'assolissin per a aquesta tecnologia els objectius que hi havia previstos per al 2010! De seguida, però, el govern va rectificar el marc legal i ara no promociona tant aquesta energia.

En resum, hi ha dos tipus de productors: els de règim ordinari (totes les centrals tèrmiques i nuclears) i els de règim especial. Aquests últims són d'energies renovables o d'alta eficiència energètica (com la cogeneració) i tenen una potència total més baixa que la de les centrals convencionals.



3.2.2. Transformació i distribució

Un cop l'energia elèctrica ha estat produïda, cal que aquesta “viatgi” fins al punt de consum o de demanda. Per a fer-ho, hi ha les línies elèctriques de distribució.

L'energia elèctrica es desplaça en forma de corrent altern a través de les línies elèctriques.

Aquestes línies són de diferents tipus en funció de la tensió o el voltatge amb què transporten l'energia.

1) A tot el territori hi ha una xarxa d'alta tensió que interconnecta tots els punts. Aquesta és de gran voltatge per dos motius:

- a) disminuir les pèrdues que es generen en el transport de l'energia elèctrica, i
- b) disminuir també la secció de cable necessària per a fer el transport.

Alhora, aquestes línies tenen una gran amplada, ja que els conductors elèctrics han d'estar a una distància mínima per a evitar que es creïn arcs elèctrics entre les línies. Totes les línies d'alta tensió del territori espanyol són propietat de l'empresa Red Eléctrica de España, S. A., que en té el monopoli.

2) D'aquestes grans línies es passa a les línies de mitjana tensió, que són línies de menys amplada que recorren àrees d'abast regional.

3) Posteriorment hi ha les línies de baixa tensió, que són les que discorren per l'interior de les zones habitades, molts cops ja amb un únic cablejat.

Per a passar d'una línia a una altra calen centres de transformació intermedis, que redueixen o augmenten el voltatge del corrent d'entrada.

Aquestes instal·lacions són necessàries per a garantir, en tot moment, el subministrament fiable i de qualitat a qualsevol punt del territori.

3.2.3. Comercialitzadores

Un cop generada i distribuïda, l'energia es ven a través d'un contracte amb el consumidor final. Els consumidors signem aquest contracte amb una empresa comercialitzadora.

Cogeneració

La cogeneració és el procés pel qual es genera electricitat i calor. Les empreses amb un procés que necessita molta energia tèrmica instal·len centrals de cogeneració, i així aprofiten la crema de combustible, que igualment es duria a terme per obtenir calor, per a generar també electricitat. Com que els equips de cogeneració són més cars que els que només produeixen calor, es tracta d'una tecnologia eficient que està subvencionada.

Comercialitzadores

Una llista de comercialitzadores es pot consultar a la web de l'Institut para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE):

- www.idae.es

Aquest aspecte és relativament nou al territori espanyol. Anteriorment, el cost de l'energia elèctrica per al consumidor domèstic estava protegit legalment pel govern. Així, era molt més barat tenir el contracte de subministrament d'energia elèctrica amb la distribuïdora d'energia elèctrica local, és a dir, la propietària de les línies elèctriques que arriben a casa nostra, que no pas amb una comercialitzadora que estigués comprant l'energia al mercat lliure. És el que es coneixia com tarifa regulada.

Arran de la liberalització del mercat elèctric es va veure que una de les parts del sistema que no es podia liberalitzar eren les línies de distribució, ja que no tindria sentit que s'omplís el territori i els carrers d'infraestructures de transport d'energia elèctrica. Les distribuïdores, doncs, mantenen el seu monopoli exclusiu, però no són les que tenen el contracte amb els consumidors. Ara són les comercialitzadores les que tenen aquests contractes.

3.2.4. Consumidors

Els consumidors som els qui tenim una demanda d'energia. Els consumidors es classifiquen per la potència contractada i la tensió o el voltatge de subministrament que tenim.

A les nostres llars, el més normal és tenir una potència contractada d'entre 4,4 i 6,6 kW. Si tots els elements de la llar són elèctrics (cuina d'inducció, calefacció elèctrica, etc.), segurament la potència contractada serà superior.

Així, podem dividir els consumidors d'energia elèctrica en tres grups, en funció de la potència contractada i de la tensió de connexió:

- 1) persones consumidores en baixa tensió (BT), les famílies i PIMES, amb una potència contractada inferior o igual a 10 kW (10 kW);
- 2) persones consumidores en baixa tensió (BT) amb una potència contractada superior a 10 kW (> 10 kW); i
- 3) persones consumidores en mitjana (MT) o alta tensió (AT).

D'aquests tres grups, els dos últims han d'estar obligatòriament en un mercat lliure.

Així doncs, com a consumidors de baixa tensió tindrem un contracte amb una comercialitzadora, que serà l'empresa encarregada del nostre subministrament. Abans, en funció del punt de consum, el contracte l'havíem de fer obli-

gatòriament amb la distribuïdora local d'energia, sense cap alternativa. Ara podem demanar ofertes a diferents comercialitzadores i contractar la que ens ofereixi un preu millor. També podem contractar energia de comercialitzadores que només subministrin energies renovables.

En alguns casos hi ha grans consumidors que van directament al mercat elèctric, sense tenir com a intermediaris les comercialitzadores. Això només surt a compte per a les indústries que consumeixen una gran quantitat d'energia.

3.2.5. L'operador del mercat ibèric d'energia

Fins ara hem vist els diferents agents que formen el mercat elèctric ibèric, però si, com hem dit al començament, el productor genera en cada instant l'energia elèctrica que consumim, com es coordinen els consumidors i els productors? L'operador del mercat ibèric d'energia (OMEL) n'és el responsable.

Per a entendre-ho millor, a continuació us detallem la seqüència que es duu a terme a diari per coordinar la producció i el consum d'energia. Per fer-ho ens ajudarem de la figura 19, en què es mostren els resultats del mercat elèctric per a cada hora del mercat elèctric diari:

- 1) Les comercialitzadores fan una previsió del que consumiran els seus clients i, per a cada hora, s'obtenen unes previsions de demanda.
- 2) Posteriorment, les productores ofereixen, per a cada hora, l'energia que podran produir i a quin preu ho faran.
- 3) L'OMEL creua les dues dades i per a cada hora s'obté un preu de cassació (on es creuen la corba de demanda i la d'oferta), al qual es vendrà i es comprarà l'energia en aquella hora. El preu a què cobraran l'energia els productors serà el preu de cassació, és a dir, poden haver ofert l'energia a 3 c€/kWh, però la cobraran a 5 c€/kWh produït si són les 10 del dia 26 de novembre de 2009 (segons la figura 19).
- 4) L'OMEL consulta l'operador de la xarxa de distribució d'alta tensió, que és REE (com hem explicat en l'apartat 3.2.2), si és tècnicament viable per al sistema elèctric el perfil de producció que s'obté cada hora. Si cal, en funció de la viabilitat tècnica, es retoca.

Els resultats finals obtinguts del funcionament del mercat elèctric es poden consultar, a més de moltes altres dades del sistema elèctric, a la web d'OMEL (www.omel.es).

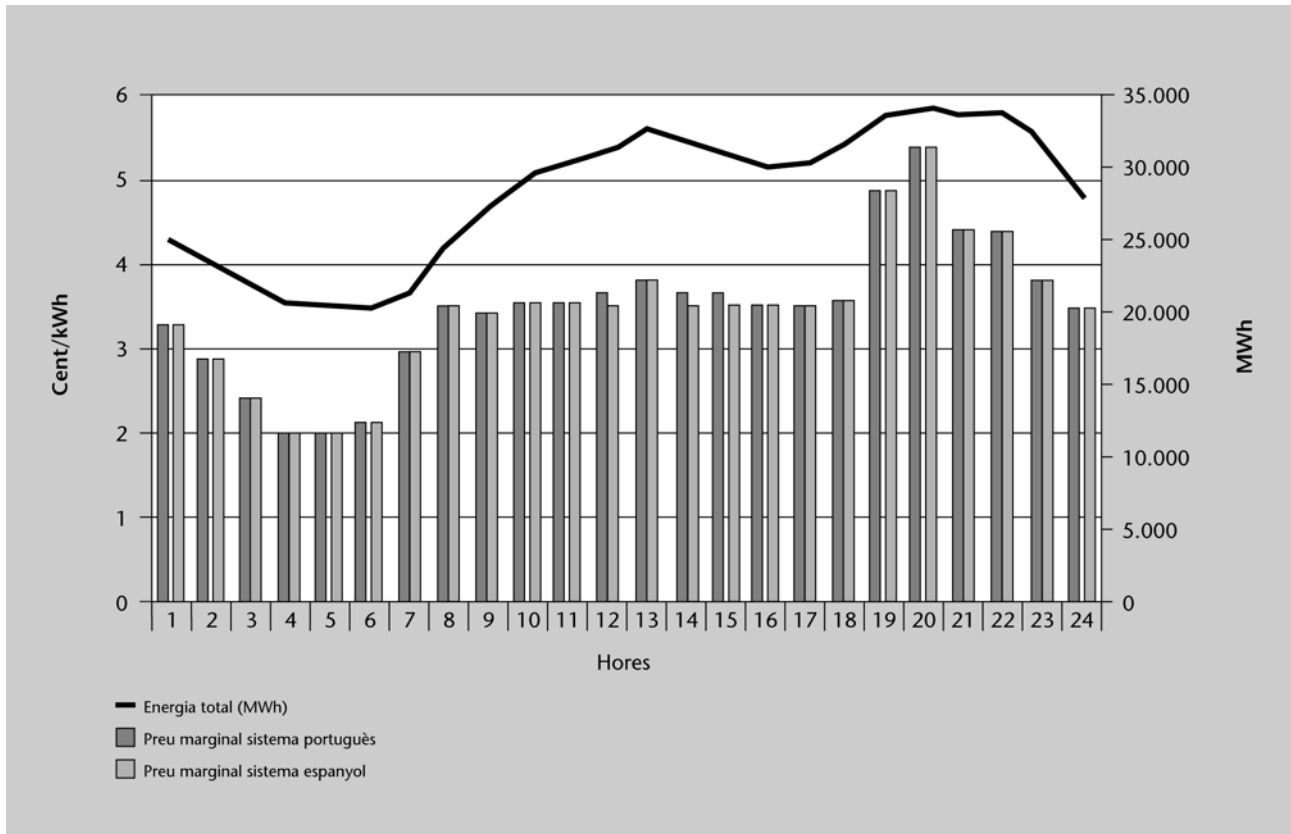
c€

c€ significa cèntims d'euro, és a dir, que en dividir aquest valor per 100 obtenim el valor en euros.

REE

REE són les sigles de Red Eléctrica de España.

Figura 19. Preu del mercat diari d'electricitat per al dia 26 de novembre de 2009



Font: Adaptat de l'operador del mercat ibèric d'energia (www.omel.es).

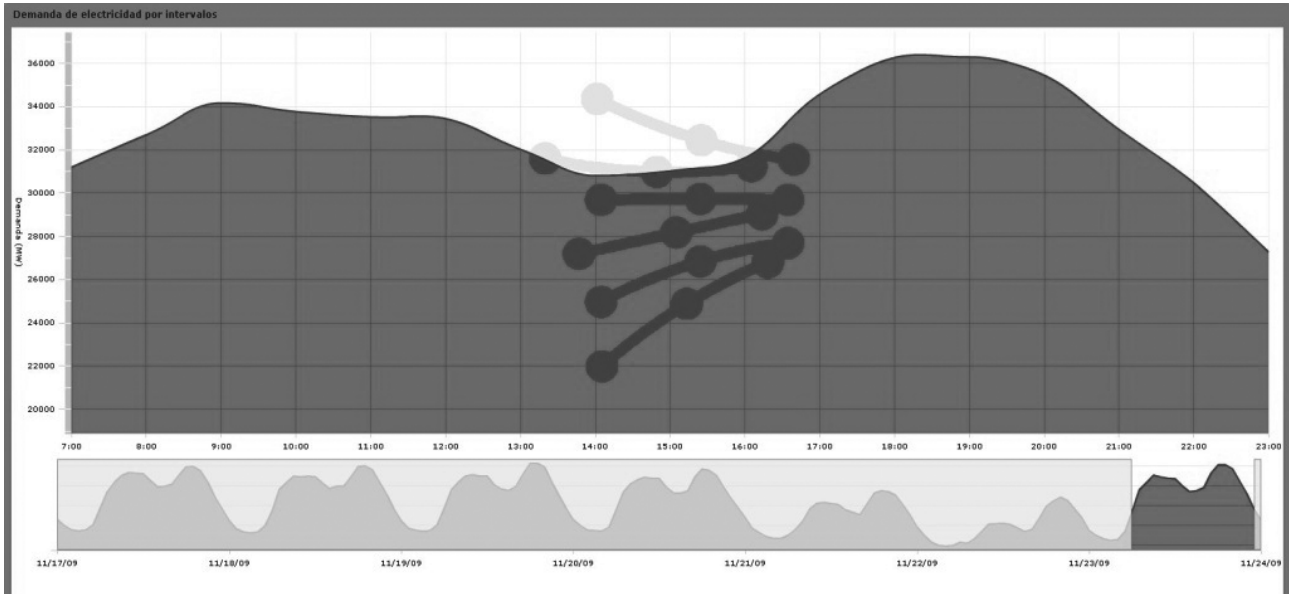
I amb això ja n'hi ha prou? Què passa quan no fa vent i un productor que té un parc eòlic no genera la quantitat d'energia que havia dit que produiria? Per a això hi ha dos mecanismes de regulació addicionals:

1) El mercat intradiari: per a cada hora hi ha un mercat paral·lel en què s'acaben d'ajustar les necessitats dels consumidors i dels productors, a un preu diferent del de cassació.

2) La garantia de potència: cada dia, i en tot moment, hi ha algunes centrals elèctriques tèrmiques o de cycle combinat que estan "preparades" per a produir electricitat en qualsevol moment que els ho demanin. Així, si hi ha alguna incidència i no es cobreix la demanda en algun moment, se'ls comunica que produeixin energia i comencen a produir-ne immediatament.

Als consumidors ens pot estranyar que es pugui preveure el nostre consum individual, ja que un dia arribem a casa abans i encenem tots els llums i fem tres rentadores, mentre que un altre dia serem fora i no consumirem res. I en cap moment no truquem a la comercialitzadora elèctrica per a explicar-li-ho. Per tant, com ho poden saber? Curiosament, tot i que el nostre comportament individual no sigui igual cada dia, com a societat sí que tenim un comportament homogeni. Es tracta d'una corba de consum que varia sobretot estacionalment, però que en general és molt estable. Podeu veure'n un exemple en la figura 20, concretament una corba típicament hivernal.

Figura 20. Corba de demanda d'electricitat del 17 al 24 de novembre de 2009

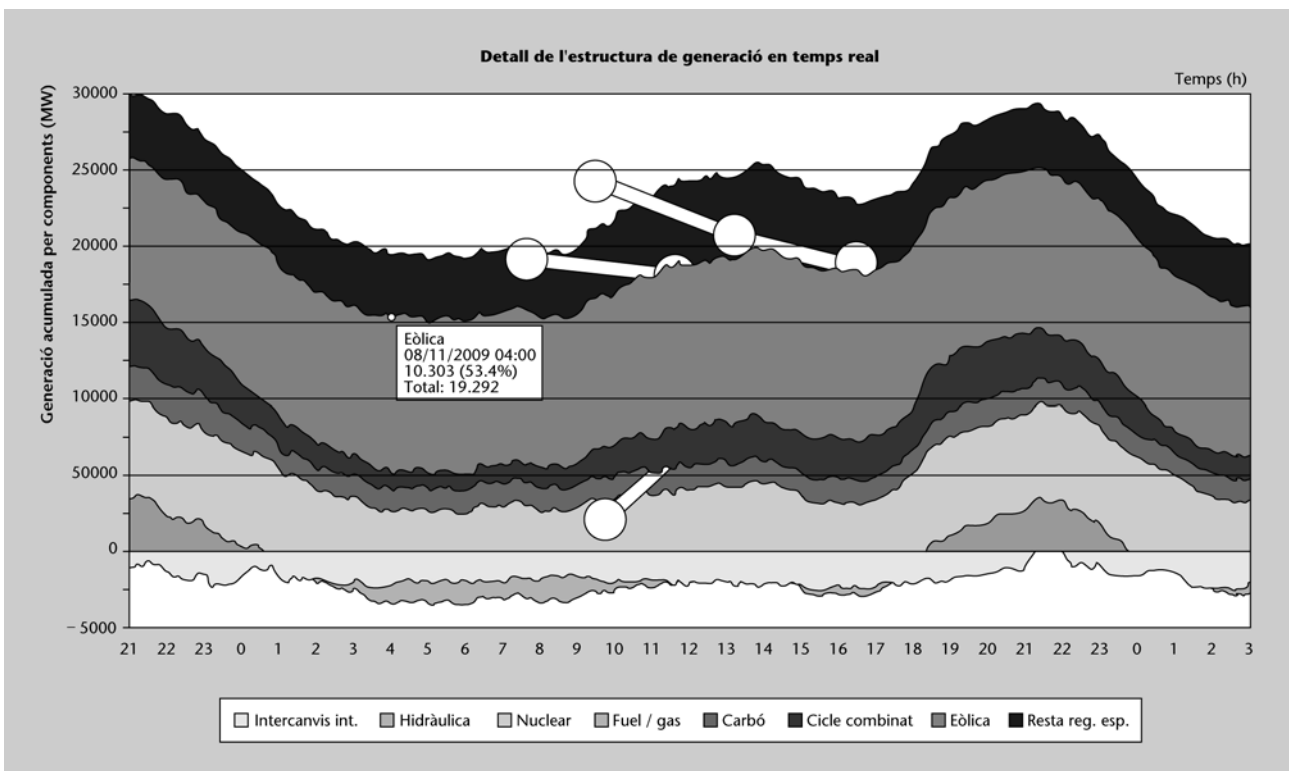


Font: Red Eléctrica de España (www.ree.es).

Aquestes corbes evolucionen amb el temps i, de fet, algun any el pic de consum anual, és a dir, el dia amb més demanda elèctrica, s'ha donat a l'estiu, pels aires condicionats, quan tradicionalment el pic de consum coincideix amb el dia més fred de l'hivern.

Per a acabar aquesta descripció de l'energia i del mercat elèctric, us volem adjuntar la corba de generació elèctrica d'un dels dies en què es va donar un màxim de producció eòlica (la franja amb el requadre de la figura 21).

Figura 21. Corba de detall de l'estructura de generació elèctrica en temps real del dia 8 de novembre de 2009



Font: Adaptat de Red Eléctrica de España (www.ree.es).

Aquell dia, aquest tipus d'energia va representar el 53,4% de l'energia generada. A poc a poc, en superar les limitacions que tenen actualment les energies renovables, caldrà arribar a perfils de generació com els de la figura 21, en què les emissions de CO₂ siguin una curiositat de la minoria de centrals elèctriques.

3.3. Què hem après?

Hem vist que l'energia és un factor clau en la nostra societat i que el sistema que ens permet produir, transportar i consumir energia elèctrica és molt complex. També hem detallat els diferents impactes ambientals, entre els quals destaca el canvi climàtic, i hem après que el sistema energètic actual depèn majorment dels combustibles fòssils, que provenen d'altres països.

Hem enumerat els diferents tipus de centrals elèctriques, però no en coneixem bé el funcionament. Així doncs, en el següent apartat passarem a descriure en profunditat el funcionament de les centrals tèrmiques, les quals representen actualment més de la meitat de la generació elèctrica.

4. Energia tèrmica i energia nuclear

Fins ara hem fet un repàs al sistema energètic, mundial, però sobretot espanyol i, més concretament, hem analitzat el sistema elèctric. Tenim doncs, fins aquest punt, una visió general de les principals característiques del sistema energètic, de les seves propietats, de les seves mancances i del seu funcionament.

A partir d'aquest punt, el que farem serà entrar a conèixer més concretament les característiques d'algunes de les centrals elèctriques que formen part del conjunt de potència instal·lada actualment a l'Estat espanyol. Concretament, en aquest apartat tractarem els tipus de central següents (s'indica per a cadascun la potència instal·lada a Espanya a final del 2008 i el percentatge de cobertura de demanda que va representar en tot l'any 2008, amb dades extretes de les figures del subapartat 3.2.1):

Taula 4

Tipus de central	Potència instal·lada	Cobertura anual de la demanda l'any 2008
Central tèrmica	18%	16%
Central de cicle combinat	24%	32%
Central nuclear	8%	20%

En total, les tecnologies descrites en aquest apartat 4 representen el 50% de la potència instal·lada a l'Estat i cobreixen el 68% de la demanda anual. Són, per tant, les tecnologies majoritàries quant a cobertura de la demanda elèctrica actual.

A més de les centrals tèrmiques també hi ha les centrals hidràuliques, que són les grans preses hidroelèctriques. Aquesta tecnologia queda fora de l'abast d'aquesta assignatura i per tant no s'explicarà. Únicament indicarem que l'energia hidràulica representa un 18% de la potència instal·lada i un 8% de l'energia generada l'any 2008, com podeu comprovar amb les dades adjuntades en el subapartat 3.2.1.

En apartats posteriors parlarem de les tecnologies renovables, que estan incloses dins les tecnologies de règim especial descrites en el subapartat 3.2.1. Les centrals de règim especial representen un 32% de la potència instal·lada i un 24% de l'energia generada.

Què aprendrem?

- Veurem el rendiment de les diferents conversions energètiques amb la tecnologia actual;
- enumerarem els combustibles habituals de les centrals tèrmiques;

- analitzarem els cicles termodinàmics que es duen a terme a les centrals tèrmiques;
- coneixerem les diferents parts i elements que formen les centrals tèrmiques actuals;
- descriurem el funcionament d'una central nuclear;
- detallarem els impactes associats a la tecnologia nuclear.

Què suposarem?

Suposarem que teniu clars els conceptes i les magnituds propis de la termodinàmica, com ara la pressió, la temperatura i l'entropia, i que també coneixeu les representacions gràfiques dels cicles termodinàmics.

4.1. Les transformacions d'energia

Abans de començar, és bo que fem una recapitulació dels principis bàsics de la termodinàmica, que ja hem desenvolupat al principi del mòdul, però que cal tenir presents per a entendre les conversions d'energia que es donen en una central tèrmica.

Com s'ha mencionat en explicar el primer principi de la termodinàmica en el subapartat 2.5, en qualsevol procés, l'energia ni es crea ni es destrueix, sinó que es conserva. I com s'ha detallat en el segon principi, no totes les formes d'energia es poden transformar en treball útil amb la mateixa facilitat. És a dir, la qualitat de la conversió dependrà del tipus d'energia inicial, de la qualitat d'aquesta. I, a més a més, hem d'afegir un altre factor en totes aquestes consideracions. Un factor més tècnic i menys científic: la tecnologia disponible.

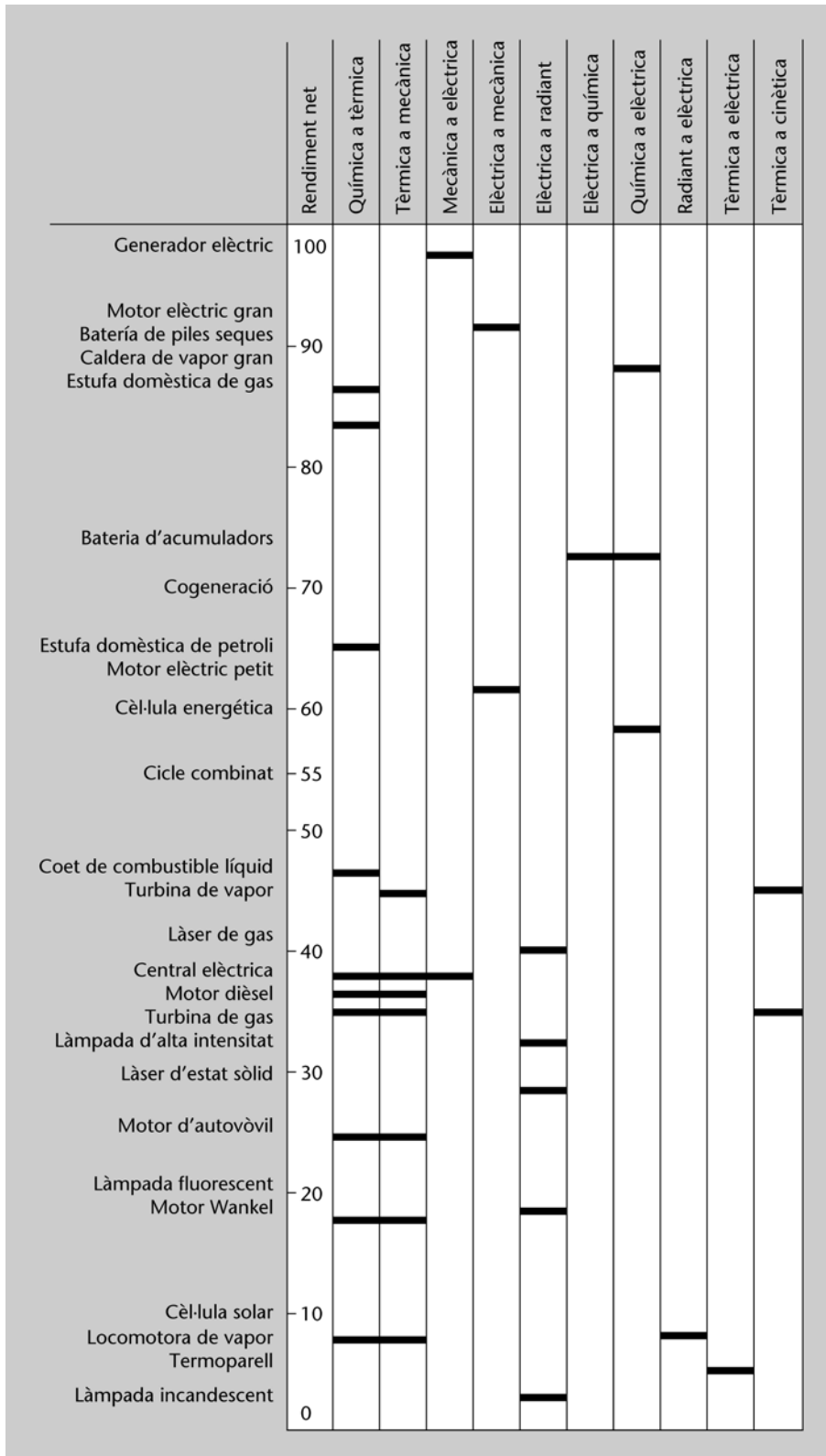
Fins ara no s'han inventat totes les tecnologies per permetre certes transformacions entre diferents formes d'energia. I, de les tecnologies disponibles, no totes tenen el mateix rendiment. En aquest sentit, i per a acabar amb aquest breu recordatori, en la figura 22 teniu una taula resum amb el rendiment dels diferents convertidors d'energia.

Sens dubte és un quadre que demana una estona de revisió. En primer lloc, quina tecnologia té un rendiment més baix? La làmpada incandescent, amb un rendiment del 5%. Si recuperem el que dèiem a l'exemple de l'escalfador elèctric (en l'apartat 3.1.5.), i al rendiment de la tecnologia li apliquem el rendiment del sistema energètic (40,9%), tenim un rendiment total d'il·luminació de la làmpada incandescent del 2%! Realment baix!

Recordeu

Recordeu que en l'apartat 1 hem parlat de diferents transformacions d'energia en situacions quotidianes.

Figura 22. Rendiments dels convertidors d'energia



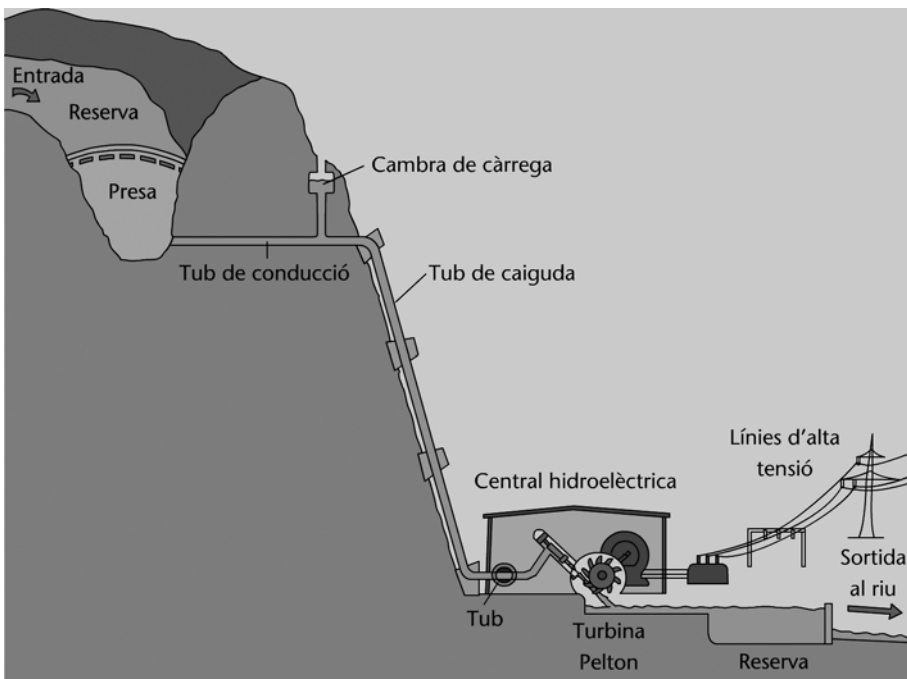
Font: Adaptat de *Tecnologia energètica* (UPC).

I què passa amb el 95% de l'energia elèctrica que consumeixen les làmpades incandescent i no es converteix en llum? Doncs que es converteix en calor! Qui no s'ha cremat mai en tocar una làmpada metàl·lica amb una bombeta incandescent que portava una estona funcionant? Val a dir, però, que des del setembre de 2009, la Unió Europea ha prohibit la fabricació i la importació

d'aquest tipus de llums i, per tant, aviat (quan s'hagin exhaurit els estocs) ja no serà possible comprar-los.

En la banda del rendiment més alt, tenim les conversions d'energia mecànica a elèctrica (99%) i també la inversa, d'elèctrica a mecànica (94%). Aquests rendiments tan alts fan que les centrals de bombeig siguin una opció molt eficient per a regular els sistemes elèctrics. Aquestes centrals tenen dos embassaments d'aigua connectats amb canonades. En els moments en què sobra energia elèctrica a la xarxa, es posen a bombejar aigua cap a l'embassament superior, amb un rendiment del 94%. En els moments en què falta energia, l'aigua baixa de l'embassament superior a l'inferior, i obtenim energia amb un rendiment del 99%. En total, haurem tingut un rendiment global del 93%, que sens dubte és més alt que, per exemple, el rendiment d'acumular l'energia en bateries (les quals tenen un rendiment del 74%). Un esquema d'aquest tipus de centrals es pot veure en la figura 23, que mostra la central al final d'un tub de caiguda d'aigua. L'aigua fa girar la turbina i genera electricitat.

Figura 23. Esquema d'una central de bombeig



Recordeu

La llei de Faraday que heu vist en el mòdul de magnetostàtica: la turbina fa servir aquesta llei. La turbina fa girar un alternador, que ve a ser una bobina que gira dins d'un camp magnètic constant.

Un cop vistos aquests aspectes de la transformació d'energia, passem a veure com es transformen els diferents tipus d'energia a electricitat, en els diferents tipus de centrals elèctriques.

4.2. Central tèrmica

Les centrals tèrmiques o termoelèctriques són les que generen electricitat a partir de combustibles fòssils.

El que farem en aquest apartat és descriure les principals característiques de funcionament d'aquestes centrals, des dels combustibles que les poden abastar fins al cicle termodinàmic que té lloc en la conversió d'energia elèctrica.

Posteriorment descriurem les dues tecnologies principals que s'usen a les centrals: la turbina de vapor i la turbina de gas. Com podreu veure, no és amb la combustió mateixa que té lloc la producció d'energia elèctrica, sinó que els fums calents de la combustió o el vapor d'aigua es fan passar per una turbina que gira amb el pas d'aquests fluids i genera electricitat.

4.2.1. Combustibles

Les centrals tèrmiques funcionen, principalment, amb tres combustibles:

- 1) Carbó: es tracta d'un combustible fòssil en estat sòlid.
- 2) Derivats del petroli (fueloil o gasoil): són combustibles fòssils, obtinguts del refinament del petroli.
- 3) Gas natural: és un combustible fòssil en estat gasós, format per diferents proporcions de gasos com el metà, el propà, el butà, etc.

Hi ha altres centrals que funcionen amb una combinació d'aquests combustibles i altres d'origen més renovable, com poden ser:

- 4) Residus sòlids urbans: els residus que es cremen en incineradores s'aprofiten per a generar energia elèctrica al mateix temps.
- 5) Biomassa: restes de poda o de neteja de boscos i jardins.
- 6) Biogàs: gas obtingut de la fermentació anaeròbia de la matèria orgànica dels residus orgànics o els purins.

Fermentació anaeròbia

La fermentació o digestió anaeròbia de la matèria orgànica és un procés pel qual certs bacteris degraden la matèria orgànica en absència d'oxigen. Com a resultat d'aquesta descomposició s'obté una mescla gasosa formada per metà (CH_4) i diòxid de carboni (CO_2) que té propietats combustibles i s'anomena biogàs.

En funció del tipus de combustible que tinguem, el procés de combustió es durà a terme amb una tecnologia o una altra. En alguns casos serà necessari preparar el combustible, com per exemple en algunes centrals tèrmiques de carbó que fan l'anomenat procés de gasificació o liquació del carbó, convertint-lo a l'estat gasós o líquid. En tot cas, aquestes tecnologies queden fora de l'abast del present mòdul.

Recordeu

En l'apartat 1.4.2 hem estudiat, juntament amb el concepte de calor latent, els diferents tipus de calor de transformació de la matèria.

Com a idea principal, és important saber que les centrals tèrmiques poden funcionar amb diferents combustibles, sols o combinats, i que en alguns casos es durà a terme una preparació prèvia de la mescla per a optimitzar el rendiment del procés de combustió de la central.

Un altre aspecte important, i del qual potser heu sentit a parlar, és l'impacte ambiental que comporta la crema d'aquests combustibles. En alguns casos podeu haver sentit, sobretot per part dels promotors de les centrals alimentades amb gas natural, que aquest és un combustible net. Per què ho diuen?

La crema de combustibles fòssils emet contaminants a l'entorn, amb els fums que surten de les xemeneies (partícules en suspensió, sofre i òxids de sofre, òxids de nitrogen, diòxid de carboni, etc.). Però dels diferents tipus de combustibles fòssils que hi ha, no tots emeten la mateixa quantitat de contaminants en la seva combustió. El carbó és el combustible més contaminant i, per això, a poc a poc, s'intenta fer-lo servir menys (per contra, és un dels pocs recursos fòssils locals que tenim). En el cas del gas natural, en canvi, no s'emeten partícules en suspensió i els òxids de sofre s'emeten amb una concentració més baixa. Malgrat tot, encara hi poden haver òxids de nitrogen i, sens dubte, en tractar-se d'un combustible fòssil, comportarà l'emissió de gasos d'efecte hivernacle.

4.2.2. Cicle termodinàmic

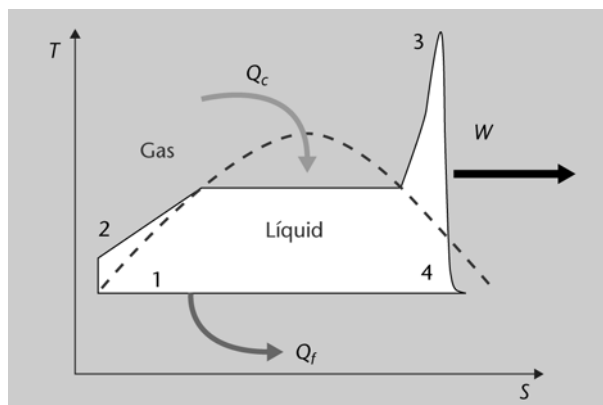
Hi ha dos processos o cicles termodinàmics associats a les centrals tèrmiques: el cicle de Rankine i el cicle de Brayton.

1) El cicle de Rankine està associat al vapor. Representat en un diagrama de temperatura-entropia en la figura 24, consta de quatre etapes diferenciades:

- Etapa 1 (de 2 a 3). A la caldera, a partir de la calor de combustió (Q_c), es genera vapor a alta pressió.
- Etapa 2 (de 3 a 4). El vapor generat s'expandeix a la turbina (o turbines, n'hi pot haver més d'una) i produeix amb aquesta expansió un treball mecànic (W) que un alternador, acoblat a la turbina, converteix en energia elèctrica.
- Etapa 3 (de 4 a 1). El vapor, un cop ha efectuat el treball i s'ha expandit, és condensat i així cedeix calor (Q_f) a un focus fred mitjançant un intercanviador (que és un element que permet el traspàs de calor d'un fluid a un altre sense mesclar-los). El focus fred pot ser aigua, un llac o l'aire.
- Etapa 4 (d'1 a 2). L'aigua condensada es bombeja de nou cap a la caldera.

El diagrama de temperatura-entropia s'anàlitz a en el subapartat 2.3.1 d'aquest mòdul didàctic.

Figura 24. Diagrama de temperatura-entropia (T - S) del cicle de Rankine ideal



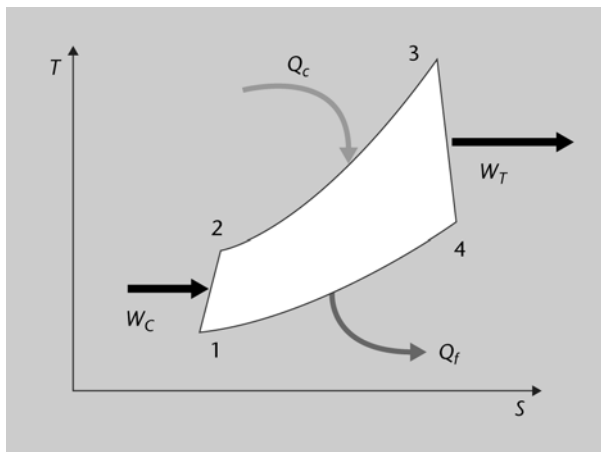
La línia discontinua representa el canvi d'estat de l'aigua

2) El cicle de Brayton, associat al gas, es duu a terme de manera similar, també en quatre etapes, i el podem veure representat en el diagrama de la figura 25:

Els diagrames T-S es veuen en el subapartat 2.3.1. d'aquest mòdul didàctic.

- Etapa 1 (d'1 a 2). El gas que es farà servir per a la combustió es comprimeix amb un compressor, que aporta treball al sistema. En aquest procés de compressió, l'aire augmenta la seva temperatura.
- Etapa 2 (de 2 a 3). L'aire comprimit s'escalfa amb la calor de la combustió.
- Etapa 3 (de 3 a 4). L'aire s'expandeix en una turbina de gas i, en aquesta expansió, part de l'energia tèrmica es converteix en treball mecànic de gir de l'eix de la turbina. Aquesta turbina pot tenir en el mateix eix, acoblats, el generador (que serà el que convertirà el moviment en electricitat) i el compressor d'entrada de l'etapa 1.
- Etapa 4 (de 4 a 1). En aquest cas, la calor que queda a l'aire s'emet en els fums de combustió i s'agafa aire nou per a l'etapa d'entrada.

Figura 25. Diagrama de temperatura-entropia del cicle de Brayton



Com a resum, el que ha de quedar clar és que en els cicles termodinàmics que es duen a terme en les centrals termoelèctriques, la calor obtinguda en el procés de combustió es transforma en treball mecànic, el qual es transforma en energia elèctrica mitjançant un alternador.

Un altre aspecte que cal remarcar és l'alliberament de Q_f (la calor extreta del sistema) dels cicles termodinàmics. La calor que tenen el vapor o el gas, un cop turbinats, s'ha d'extreure del fluid per optimitzar el rendiment del cicle.

En el cas del cicle de Brayton, aquesta calor s'allibera amb els fums de combustió de la xemeneia. En el cas del cicle de vapor, com que és un cicle tancat (es fa circular la mateixa aigua una vegada i una altra), cal tenir un bescanviador extern que extregui la calor. És a dir, haurem de passar la calor que tenim a l'aigua a un altre fluid. Aquest podrà ser l'aigua d'un riu, d'un llac o del mar o, en un cas extrem, de l'aire. Això fa que aquest tipus de centrals sempre estiguin prop d'algun curs o massa d'aigua que els permet extreure aquesta calor del cicle.

4.2.3. Central tèrmica convencional

La central tèrmica o termoelèctrica convencional és la que duu a terme un cicle de Rankine (vapor) o bé un cicle de Brayton (gas), en funció del tipus de combustible que es tingui i de la tecnologia implantada en el procés.

Els diferents tipus de sistemes termodinàmics es defineixen en el subapartat 2.1.3. d'aquest mòdul didàctic.

En tots dos casos, el rendiment global d'aquest tipus de centrals tèrmiques, ja sigui amb cicle de gas o amb cicle de vapor, està entorn del 30%-35% global (des de la combustió a la generació elèctrica). Es tracta d'una tecnologia molt usada, però que globalment té un rendiment baix.

Central tèrmica amb cicle de vapor

Comencem per les centrals tèrmiques que tenen un circuit de Rankine o de vapor. Com hem comentat en l'apartat 4.2.2, aquestes centrals disposen d'un circuit tancat d'aigua. Aquesta aigua està degudament tractada (descalcificada, etc.) perquè sigui adequada per al procés i no provoqui avaries en els elements que formen el sistema.

Com a elements clau d'aquesta central, i sempre associats a una de les parts del cicle termodinàmic que hem vist en el subapartat 4.2.2, tenim els següents (vegeu la figura 26):

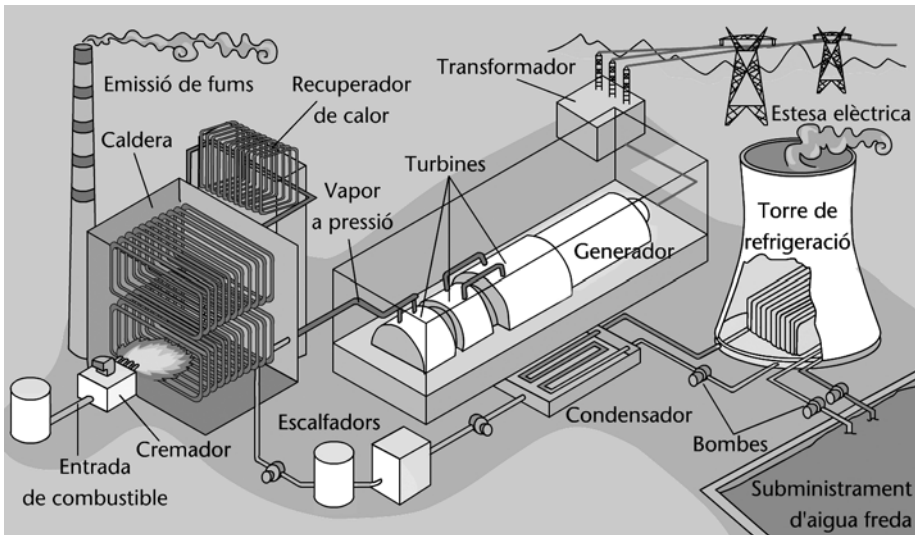
- a) La caldera és l'element on es produeix la combustió del combustible i alhora la transferència o intercanvi d'aquesta calor a l'aigua del circuit. Hi ha diferents tecnologies patentades, en funció del tipus de combustible que utilitzen i de l'intercanviador de calor.
- b) La turbina de vapor serà adequada a les pressions de treball i és la que transforma la temperatura i la pressió del vapor d'aigua en treball mecànic de gir de l'eix de la turbina.
- c) El generador elèctric transforma el moviment de gir de l'eix de la turbina en electricitat. Hi ha diferents tipus de generadors, en funció de la velocitat de gir, la potència, etc.
- d) El condensador s'encarrega de convertir el vapor d'aigua de nou en aigua líquida. La calor que extreu el condensador l'ha d'absorbir l'ambient pròxim a la central: l'aigua o l'aire. Si és aigua, es tindrà un circuit obert (entra i surt aigua del riu o llac) de bescanvi. En el cas de l'aire, hi poden haver torres de refrigeració o intercanviadors d'aire que impliquen l'ocupació de més superfície.
- e) Un sistema de tractament de fums i una xemeneia: els fums de la combustió s'hauran de tractar, en major o menor mesura, en funció del combustible que tinguem, per tal de complir amb els límits d'emissió de contaminants que imposen les normatives europees, estatals i locals. En alguns casos, els sistemes de tractament són aparells de grans dimensions, per tal de tenir uns rendiments bons.

Torres de refrigeració

Les torres de refrigeració són les torres més grans que veurem a les centrals tèrmiques o nuclears. Malgrat la seva magnitud, l'únic component que emeten és vapor d'aigua! Els fums sempre surten per unes xemeneies més primes i altes.

f) Un sistema de preparació i injecció de combustible: en alguns casos tindrem un sistema que prepararà el combustible que utilitzem, prèvia entrada a la caldera, com per exemple la gasificació del carbó. En altres casos, com a les centrals de gas, els tractaments de preparació són mínims.

Figura 26. Esquema d'una central tèrmica de vapor



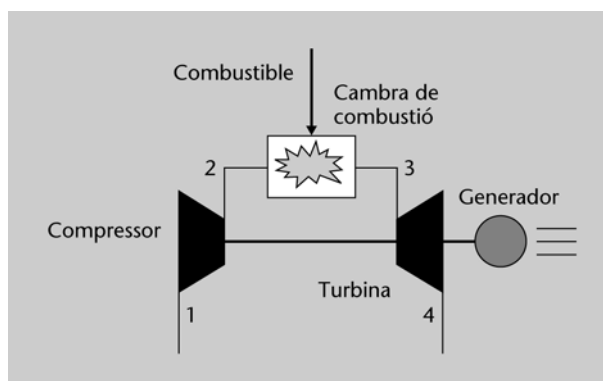
Central tèrmica amb cicle de gas

Altres centrals tèrmiques, alimentades amb gas o gasoil, poden dur a terme un cicle de Brayton o de gas. En aquest cas, com hem comentat en l'apartat 4.2.2, el gas que fa el cicle és l'aire que es mescla posteriorment amb el combustible, a l'entrada, i els fums de combustió que s'obtenen de la caldera, a la part final del cicle. Així, són els fums de combustió els que passen per la turbina de gas.

En el cas del cicle de Brayton, els components són els següents:

a) La turbina de gas: hi ha diferents tipus de turbines patentades. Un exemple de turbina és la del conjunt de compressor, cambra de combustió i turbina tot unit. És un conjunt com el que es mostra esquemàticament en la figura 27.

Figura 27. Esquema d'una turbina de gas



b) Un generador acoblat a l'eix de la turbina, com en el cas de les centrals amb cicle de Rankine.

c) Un sistema de preparació i injecció del combustible, com en el cas del cicle de Rankine.

En aquest cas, com que és un cicle obert, tal com hem descrit en el subapartat 2.1.3, no tindrem bescanviador de calor ni condensador. La calor s'evacua directament al medi mitjançant els fums. Sí que es disposa d'un sistema d'intercanviador aire-aire, en el qual l'aire de combustió, un cop turbinat però encara calent, preescalfa l'aire exterior abans de passar-lo pel procés de compressió.

4.2.4. Central tèrmica de cicle combinat: turbina de gas amb turbina de vapor

Dins del grup de les centrals termoelèctriques, és a dir, que converteixen calor en electricitat, hi ha les centrals de cicle combinat.

Una central de cicle combinat consisteix en una central termoelèctrica que combina els dos cicles termodinàmics que hem vist: el cicle de Rankine amb turbina de vapor i el cicle de Brayton amb turbina de gas.

Concretament, en una primera fase es realitza el cicle de Brayton: es crema el gas i es turbinen els fums de combustió. Aquests, un cop se'ls ha extret l'energia mitjançant la turbina de gas, encara tenen una temperatura molt alta, i s'aprofiten (en alguns casos amb un reescalfament intermedi) per produir el vapor d'un cicle de Rankine. D'aquesta manera, la calor es recupera i es turbinada de nou el vapor generat.

La propietat especial d'aquestes centrals termoelèctriques de cicle combinat és que, en combinar els dos cicles i aprofitar la calor residual del cicle de la turbina de gas per produir el vapor, es millora molt el rendiment. Així, per a aquestes centrals de cicle combinat, tindrem un rendiment total de generació al voltant del 52%. Si tenim en compte que una tèrmica convencional està al voltant del 30%, veiem que aquesta tecnologia quasi duplica el rendiment. Es tracta, doncs, d'una bona millora tecnològica que permet incrementar el rendiment mitjà del sistema elèctric: aprofita en major mesura els recursos disponibles que s'utilitzen en la combustió i arriba a una conversió del 50% de l'energia del combustible en energia elèctrica.

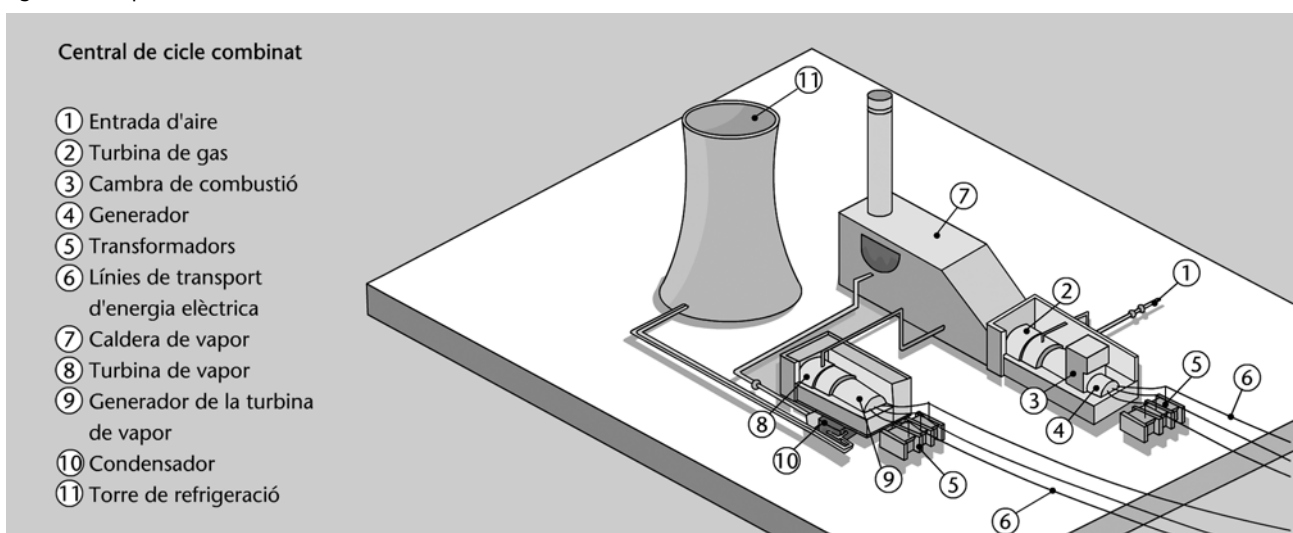
Els elements que formen una central de cicle combinat són el conjunt de sistemes que formaven les tèrmiques convencionals, descrites en el suba-

partat 4.2.3, que són els que es descriuen a continuació i que podeu veure en la figura 28:

- a) La turbina de gas, formada pel conjunt de compressor, turbina i cambra de combustió, tots acoblats en un mateix eix.
- b) La turbina de vapor, encarregada de la conversió del vapor generat en moviment de l'eix.
- c) La caldera recuperadora de calor: en aquest cas, en comptes de tenir una caldera de combustió que genera vapor a partir de la combustió, tenim una caldera que en primer lloc aprofita la calor dels fums de la turbina de gas i, en cas que sigui necessari, aporta calor addicional, amb combustió, per a la generació del vapor. Si es duu a terme aquesta combustió de suport per generar vapor es parla de postcombustió.
- d) Un o més alternadors que s'encarreguen de convertir el moviment de l'eix generat per les turbines en energia elèctrica.
- e) Un condensador, encarregat de refredar el vapor un cop s'ha turbinat, perquè torni a començar el cicle termodinàmic amb prou rendiment.
- f) Un sistema de preparació i injecció de combustible, connectat a la cambra de combustió de la turbina de gas i també a la caldera recuperadora de calor, que pot necessitar combustible per a la generació de vapor.

Hi ha moltes configuracions possibles per a les plantes d'aquest tipus, en funció del nombre d'eixos, alternadors, turbines de vapor, etc., que hi hagi. En la majoria dels casos, les centrals de cicle combinat es construeixen a partir de conjunts patentats. Es tracta de centrals compactes que tenen totes una aparença externa molt similar que permet reconèixer-les fàcilment. La figura 28, precisament, n'és un exemple.

Figura 28. Esquema d'una central de cicle combinat



4.3. Central nuclear

Les centrals nuclears, encara que pugui semblar que tenen una tecnologia molt diferent de la resta de centrals elèctriques, són en realitat centrals tèrmiques nuclears.

És a dir, una central nuclear és exactament igual que una central tèrmica amb cicle de Rankine o turbina de vapor, però en lloc de tenir una caldera que genera vapor a partir de la calor de combustió d'un combustible fòssil, obté la calor del procés de fissió de l'àtom d'urani.

Així doncs, una central nuclear no és una mena de central en què la fissió de l'urani genera directament electricitat, sinó que l'urani és la font de calor que ajuda a generar el vapor. Aquest vapor, igual que a les centrals termoelèctriques convencionals, passa per un cicle de turbina de vapor i genera electricitat a partir d'un alternador.

En aquest apartat descriurem genèricament aquesta tecnologia, per a tenir una idea bàsica de com funcionen aquestes centrals. En el darrer apartat farem una reflexió sobre l'impacte ambiental associat a aquestes centrals tèrmiques i si poden ser una alternativa real a la lluita contra el canvi climàtic.

4.3.1. Combustible: de l'urani als elements combustibles

Una central nuclear obté la calor necessària per a dur a terme el cicle de Rankine a partir de la reacció nuclear de l'urani.

L'urani és un element no gaire abundant a la natura. S'extreu en mineria, i el Congo és un dels països amb més reserves. Un cop extret, aquest urani no serveix directament com a combustible, sinó que cal processar-lo, mitjançant l'anomenat procés d'enriquiment de l'urani. El procés d'enriquiment de l'urani que es consumeix a les centrals europees es duu a terme a França.

El procés d'enriquiment és necessari per a obtenir bons rendiments de la generació de fissió. L'urani està present a la natura en les formes conegudes com a isòtops ^{238}U i ^{235}U (urani 238 i urani 235, respectivament). De forma natural, la presència d'aquest segon isòtop és d'un 0,7%, i en les barres de combustible, que són el producte de l'enriquiment de l'urani, és d'un 4%-5%.

Aquest isòtop es combina amb òxid d'urani (UO_2), un material de tipus ceràmic que s'utilitza en forma de pastilles, d'un diàmetre aproximat d'un centímetre. Aquestes pastilles s'introdueixen en unes beines fetes amb un aliatge de zirconi, amb un diàmetre de 4 cm i de 4 m de longitud. Un cop s'ha preparat

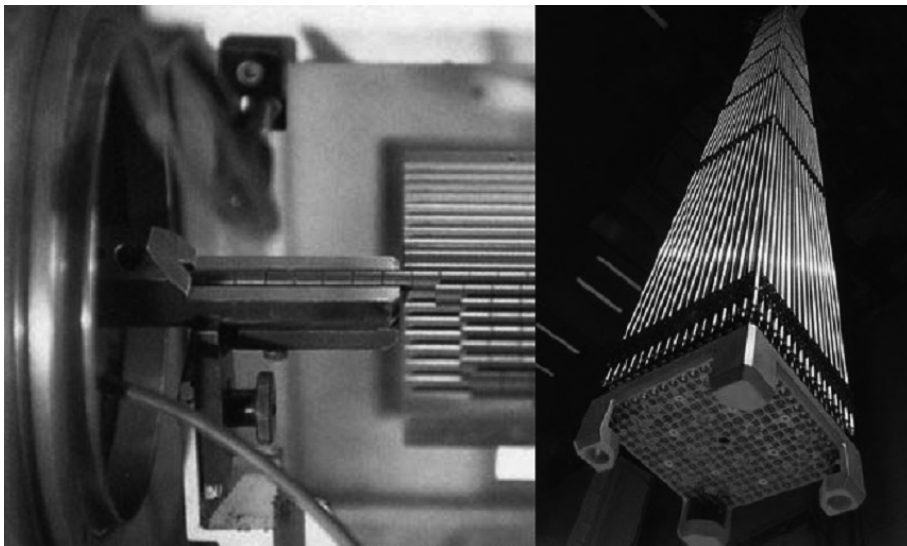
Isòtops

Els isòtops d'un element químic són àtoms que tenen el mateix nombre atòmic (és a dir, el mateix nombre de protons) i diferent nombre màssic (és a dir, diferent nombre de neutrons). Les propietats químiques dels isòtops d'un mateix element són les mateixes, però les propietats físiques poden ser completament diferents. Per exemple, els isòtops amb una relació entre protons i neutrons que no sigui adequada per a l'estabilitat, seran inestables, és a dir, radioactius.

aquesta barra, se n'agrupen unes quantes i es forma el que es coneix com un element combustible.

Aquest element combustible, del qual s'adjunta una imatge en la figura 29, és el que es fa servir en les centrals tèrmiques nuclears a per recollir la calor generada durant la fissió de l'urani.

Figura 29. Detall de les pastilles d' UO_2 i d'un element de combustible d'una central nuclear



Font: Departament de Física de la UPC. Mòduls ambientals.

Aquests elements combustibles són també els que es disposen en el reactor de la central nuclear. L'energia alliberada per la reacció de fissió és en forma d'energia cinètica dels fragments de la fissió de l'urani (nuclis d'altres elements, amb propietats radioactives). Aquesta energia cinètica es transfereix en forma d'energia calorífica a les pastilles ceràmiques dels elements combustibles, que, a la seva vegada, transmeten aquesta calor a la part exterior de les beines, a la zona del zirconi.

Per a extreure aquesta calor generada per la fissió de l'urani es fa circular aigua a pressió a través de les beines, que s'enduen la calor alliberada i augmenta així la seva temperatura. Un cop tenim aquesta aigua escalfada es duu a terme el cicle de Rankine de vapor, igual que a les centrals tèrmiques descrites en el subapartat 4.2.3.

Cal destacar que la calor generada per la reacció nuclear de l'urani és molt més gran que la calor generada en una combustió. Perquè us en feu una idea, 453 g d'urani produeixen la mateixa calor que 1.500 tones de carbó. Si ho passem a les mateixes unitats tenim que 453 g d'urani equivalen a 1.500.000.000 g de carbó! És a dir, el poder calorífic de l'urani és més de tres milions de vegades superior al del carbó en termes de massa!

Al cap d'un temps de dur a terme reaccions nuclears, els elements de combustible es renoven, la qual cosa implica substituir algunes de les barres de zirconi.

Energia de fissió

L'energia de fissió és una energia que s'allibera en dividir-se un nucli atòmic d'urani en altres productes, sempre radioactius.

Les barres o elements combustibles que ja no són aptes per a escalfar aigua es retiren. Actualment, aquests elements consumits es mantenen emmagatzemats a l'interior de les mateixes centrals nuclears.

4.3.2. Cicle termodinàmic

Com hem comentat ja des del començament d'aquest apartat, el cicle termodinàmic que es realitza en una central nuclear és el cicle de Rankine, de turbina de vapor, que hem descrit anteriorment en el subapartat 4.2.2. L'única diferència és que no hi ha una caldera de vapor que faci vapor a partir de la combustió, sinó que la calor s'obté fent passar aigua a pressió a través dels elements combustibles.

A causa del sistema d'extracció de l'energia calorífica dels elements combustibles, fent passar aigua a través d'aquests, les temperatures de treball de l'aigua no són tan altes com en el cas de les centrals tèrmiques de combustió. El fet de tenir temperatures de treball més baixes fa que obtinguem un rendiment més baix en el cicle de Rankine.

Tot i això, com que no hi ha pèrdues de calor pels fums de la xemeneia (que sí que es donen en les centrals de combustió), s'acaben obtenint uns rendiments globals de la central d'entre el 30% i el 40%, semblants als de les centrals tèrmiques de combustió, però lluny dels rendiments de les centrals de cicle combinat.

4.3.3. Impacte ambiental associat

L'impacte ambiental d'una central nuclear pot ser:

1) **Impacte tèrmic.** Igual que les centrals tèrmiques convencionals de cicle de Rankine, aquestes centrals necessiten masses d'aigua o d'altres elements per refrigerar l'aigua del circuit. Si, com hem dit, el rendiment és del 30%-40%, tenim que per cada unitat d'energia elèctrica generada n'haurem d'emetre a l'ambient, en forma de calor, dues. És per això que les centrals nuclears se situen pròximes als rius o al mar. A més a més, acostumen a tenir també torres de refrigeració de vapor d'aigua, ja descrites en el subapartat 4.2.3.

2) **Impacte radiològic.** Aquest és, sens dubte, el gran aspecte negatiu d'aquest tipus de centrals. Tot i que la quantitat de combustible utilitzat és molt inferior a la de les tèrmiques de combustió, un cop esgotat el combustible, es converteix en residu. Malgrat la poca quantitat generada, aquest residu té una activitat radioactiva que es pot mantenir durant milions d'anys! A part d'aquests residus, també es poden emetre elements radioactius a través de l'aigua o de les xemeneies de refrigeració, tot i que aquest és un aspecte que a les centrals europees es controla moltíssim, amb controls molt exhaustius a les

proximitats de les centrals, per tal de detectar la possible acumulació d'isòtops radioactius.

Heu de tenir present que la radioactivitat no és un efecte exclusiu de les centrals nuclears i de la reacció de fissió: la radioactivitat existeix també en certes zones de la natura. Aquesta radioactivitat s'anomena *radioactivitat natural*. És per això que a la radioactivitat de les centrals nuclears, per a diferenciar-la, la denominem radioactivitat artificial.

En aquests controls de radioactivitat que es fan al voltant de les centrals s'ha vist que la radioactivitat natural és més gran que l'artificial generada per les centrals nuclears que hi ha al territori. Una dada no tan bona és que la radioactivitat artificial que es detecta en aquests estudis prové principalment de l'explosió nuclear de Txernòbil.

Accident de Txernòbil

L'accident de Txernòbil fou un accident nuclear, considerat el més greu de la història, que passà a Txernòbil (Ucraïna, llavors Unió Soviètica) el dissabte 26 d'abril de 1986. Aquell dia es va produir una explosió pel sobreescalfament de l'hidrogen acumulat dins del nucli, durant una prova en la qual se simulava un tall de subministrament elèctric.

A causa de la manca d'un edifici de contenció a la central nuclear, un plomall de pluja radioactiva es dispersà per zones de l'occident de la Unió Soviètica, Europa oriental, Escandinàvia, el Regne Unit i l'est dels Estats Units. Grans àrees d'Ucraïna, Bielorússia i Rússia en resultaren greument contaminades, el que provocà l'evacuació i el reassentament d'unes 300.000 persones. Un 60% de la pluja radioactiva caigué sobre Bielorússia.

Les centrals nuclears no comporten l'emissió de gasos d'efecte hivernacle i, per això, molts cops es proposen com a possible alternativa de generació elèctrica a l'hora de complir amb el Protocol de Kyoto i les reduccions d'emissions de gasos d'efecte hivernacle que aquest protocol ens imposa.

Protocol de Kyoto

El protocol de Kyoto és un conveni internacional per a la prevenció del canvi climàtic, sota l'auspici de l'Organització de les Nacions Unides (ONU) dins de la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (CMNUCC). El protocol de Kyoto té com a objectiu que els països industrialitzats redueixin les seves emissions fins a un 8% per sota del volum del 1990, sense posar restriccions als països que estan en vies de desenvolupament (com és el cas de la Xina, l'Índia o el Brasil). L'acord va esdevenir d'obligat compliment quan Rússia va ratificar-lo el 16 de febrer de 2005, ja que calia que el ratifiquessin com a mínim els països industrialitzats responsables d'almenys un 55% de les emissions de CO₂. Per la seva banda, el govern dels Estats Units es nega a ratificar el protocol.

Si bé és completament cert que no s'emeten gasos d'efecte hivernacle, cal tenir també present que la radioactivitat és un impacte molt significatiu. Si tots els residus estan ben gestionats i controlats, com a les centrals nuclears actuals, no hi ha cap problema. Ara bé, al territori espanyol no hi ha actualment cap instal·lació per a la gestió de residus radioactius d'alta activitat (vegeu el subapartat 3.1.6). La majoria d'elements combustibles esgotats d'Espanya s'emmagatzemen a les mateixes centrals nuclears, i una petita part en instal·lacions a França, que cobra un lloguer pel manteniment de les instal·lacions.

Caldrà veure, doncs, com es gestionen aquests residus. El gran problema que tindran aquestes instal·lacions és que hauran de servir durant milions d'anys! La magnitud temporal d'aquests residus no és, doncs, menyspreable. A més a més, l'urani és també un element que es troba en quantitats finites a la Terra, per la qual cosa no és una energia renovable ni inesgotable.

4.4. Què hem après?

- Hem conegut com funciona per dins una central tèrmica (de gas, fuel, petroli, carbó o nuclear) i els cicles termodinàmics que s'hi duen a terme, que són el cicle de vapor o cicle de Rankine i el cicle de gas o cicle de Brayton.
- Hem vist també que una central nuclear utilitza, en el fons, el mateix cicle que les centrals tèrmiques de combustibles fòssils, i que l'únic que les diferencia és el combustible i la manera d'obtenir calor. Hem detallat també els impactes ambientals d'aquesta tecnologia.

Fins aquí hem vist el funcionament de les tecnologies convencionals i l'impacte ambiental associat. Les alternatives actuals d'electrificació passen per l'ús de les energies renovables. Ara, doncs, continuarem amb el funcionament i les peculiaritats de les plantes d'energia renovable per a la producció d'energia elèctrica, concretament l'energia eòlica i l'energia solar fotovoltaica.

5. Energies eòlica i fotovoltaica

Fins ara hem descrit detalladament el que podríem anomenar sistemes convencionals de generació d'electricitat. Si bé actualment són els majoritaris quant a generació i potència instal·lada, comporten, com hem vist, problemes ambientals, ja que provenen de fonts de generació no renovable i són contaminants.

En aquest apartat us descriurem què és una font d'energia renovable (encara que segurament tots en teniu una idea i us l'hem descrita a grans trets en el subapartat 3.1.6) i com es quantifiquen els recursos que utilitzen. Després descriurem els sistemes d'aprofitament de l'energia eòlica i els d'aprofitament de l'energia solar fotovoltaica, que transformen el vent i la radiació solar, respectivament, en energia elèctrica.

Què aprendrem?

- Veurem amb detall què es considera una font d'energia renovable;
- exposarem la importància de la valoració dels recursos renovables en el lloc on vulguem construir una planta elèctrica eòlica o fotovoltaica;
- veurem com es valoren el recurs vent i el recurs radiació solar;
- coneixerem un dels problemes de les energies renovables: la dificultat de regulació;
- introduïrem els diferents elements que formen un parc eòlic, des dels aerogeneradors als altres elements auxiliars;
- veurem l'impacte, positiu i negatiu, de la implantació de l'energia eòlica;
- presentarem els diferents tipus de plantes d'aprofitament de l'energia solar i veurem les opcions que tenim per implantar l'energia fotovoltaica; i
- analitzarem les ajudes que ofereix actualment el govern per fomentar el desenvolupament de les energies renovables.

Què suposarem?

Suposarem que teniu clares les fórmules de càlcul d'àrees circulars; els factors de conversió d'unitats, sobretot de les unitats d'energia; i les operacions bàsiques de la solució de problemes mitjançant la resolució d'equacions d'una variable.

5.1. Què és una font d'energia renovable?

Una font d'energia renovable és aquella que, en consumir-la, no condiciona la seva disposició futura.

En el cas dels combustibles fòssils, aquests es van formar en un període molt concret de l'evolució de la Terra i existeixen en una quantitat finita. El consum d'aquests recursos fòssils no és, per tant, renovable; cada barril de petroli que consumim no es recupera, o es recupera a una velocitat tan lenta que es considera que no es recupera.

Hi ha, però, altres fonts energètiques, concretament els salts d'aigua, la radiació solar o el vent, l'ús de les quals no comporta l'esgotament del recurs. En aquest cas parlem de recursos renovables.

5.2. Estudi dels recursos renovables

La primera diferència notable de les instal·lacions basades en energies renovables respecte de les que no ho són és que les primeres s'han d'ubicar en emplaçaments on hi hagi disponibilitat i qualitat del recurs renovable que utilitzen. Pel que fa a les centrals tèrmiques o nuclears que hem vist en l'apartat 4, l'emplaçament està més condicionat per la necessitat de refrigeració que no pas per la disponibilitat del recurs consumit (petroli, barres de combustible nuclear, etc.), el qual es pot transportar fàcilment fins a l'emplaçament de la central. El vent o la radiació solar no es poden concentrar, acumular ni transportar, i per tant caldrà calcular la disponibilitat del recurs renovable en cada emplaçament.

Així, les centrals tèrmiques, excepte algunes de carbó que s'abasteixen directament d'una mina pròxima, s'emplacen en ubicacions on hi ha una bona comunicació i l'abastament de combustible té un cost raonable, o en els punts on la xarxa elèctrica és apta per a la connexió de la central. Per tant, hi haurà altres criteris de selecció de l'emplaçament que podran tenir igual o més importància que la disponibilitat de combustible: la xarxa elèctrica, la necessitat d'una massa d'aigua que ajudi a evacuar la calor generada en el procés, etc.

En el cas de les energies renovables, el primer factor, en molts casos determinant, serà la disponibilitat del recurs. Si tenim una bona zona, ventosa o assolada, generarem més energia i això ens determinarà la rendibilitat econòmica de la instal·lació. Per tant, la disponibilitat del recurs renovable condicionarà directament la viabilitat econòmica de la instal·lació.

Vegem, doncs, per al cas de l'energia eòlica i de l'energia solar, com es determina la disponibilitat del recurs renovable, sempre amb la instal·lació prèvia d'una planta de generació elèctrica.

5.2.1. Vent

El vent és un moviment de l'aire provocat per diferències de pressions atmosfèriques o diferències de temperatura.

El vent s'origina globalment per la variació de la pressió atmosfèrica, però localment es genera per les característiques geogràfiques i tèrmiques de l'aire. Els elements que influeixen en la generació del vent són:

1) Localment, a les zones de costa hi ha un règim de vents, i aquestes brises són ben conegudes per la població local. Durant el dia, amb la radiació solar, la terra assoleix una temperatura més alta que la de la superfície del mar. D'aquesta manera es crea un corrent d'aire de mar a terra. Quan el sol es pon, la terra es refreda més que el mar, ja que la massa d'aigua té més inèrcia tèrmica i conserva millor la temperatura. S'inverteix, per tant, la diferència de temperatures i, com a conseqüència, també la direcció del vent. A la nit anirà des de la terra cap al mar. A les valls de muntanya passa un efecte semblant, ja que no s'escalfen igual els vessants de les muntanyes que el fons de la vall.

2) Globalment hi ha tres elements que afecten la generació de vent:

- el moviment de les masses d'aire generades per la forma de la Terra i la radiació incident;
- la rotació de la Terra, que fa que els moviments anteriors tendeixin a girar cap a la dreta; i
- els vents de tipus estacional que afecten cada zona dels diferents continents.

Per exemple, en la figura 30 veiem els valors de l'*Atlas eòlic europeu* per als 50 m d'altura.

Per a valorar els vents correctament haurem de fer una evolució d'escala: començarem per l'escala global, passarem a la regional i finalment a la local. Cadascuna afecta diferents aspectes relatius a la ubicació dels parcs.

Selecció de parcs eòlics

Un aspecte que es pot tenir en compte a l'hora de seleccionar un lloc ventós són certes característiques que es donen en aquests emplaçaments, com ara:

- la toponímia del lloc: si una serralada o una muntanya es diu Puigventós, Forat del Vent, Pla de la Calma, etc., ens està donant una idea de quin tipus de clima hi ha.
- els arbres: podeu observar que els arbres de les zones ventoses no creixen rectes, sinó que sempre tenen una certa inclinació. Aquesta inclinació és fruit de la força del vent.

Si volem conèixer la potència que podem extreure del recurs eòlic a cada zona del territori, necessitarem la corba de distribució de la probabilitat de velocitat del vent a la zona, ja que aquesta la potència es calcula a partir de l'equació següent:

$$P = 1/2 \cdot A \cdot v^3 \quad (41)$$

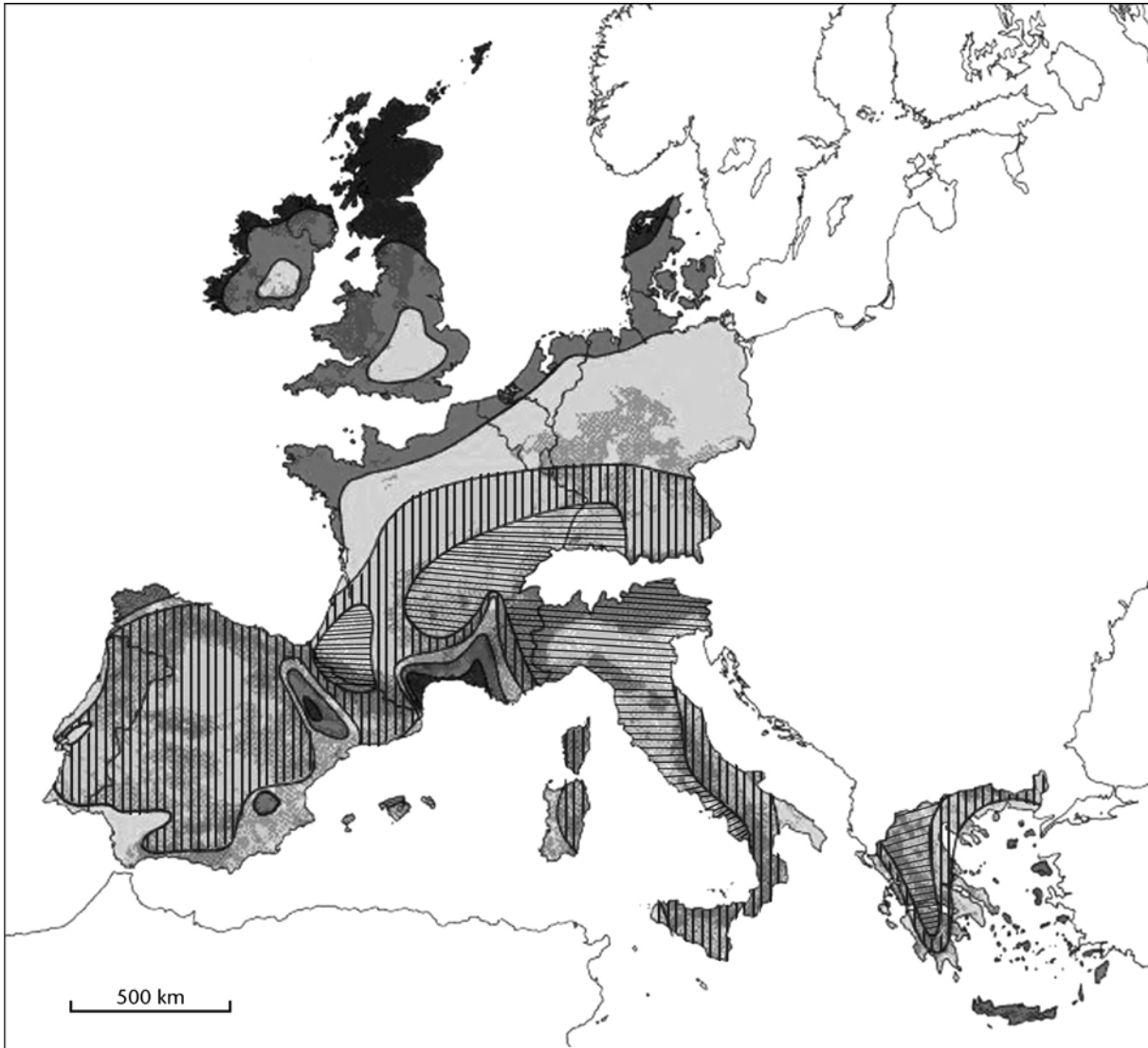
En aquesta equació tenim que P , la potència (en W), és igual a la meitat del producte de la ρ , o densitat de l'aire (en kg/m³), per l'àrea circular A que escombren les pales (en m²) i per la velocitat v del vent (en m/s).

El concepte d'inèrcia tèrmica associat a la conservació de temperatura de la matèria es descriu en el subapartat 1.4.1. d'aquest mòdul.

Pales

Les pales són la part de l'aerogenerador que gira amb l'acció del vent i que descriurem en l'apartat 5.3.2. d'aquest mòdul.

Figura 30. Atlas eòlic europeu



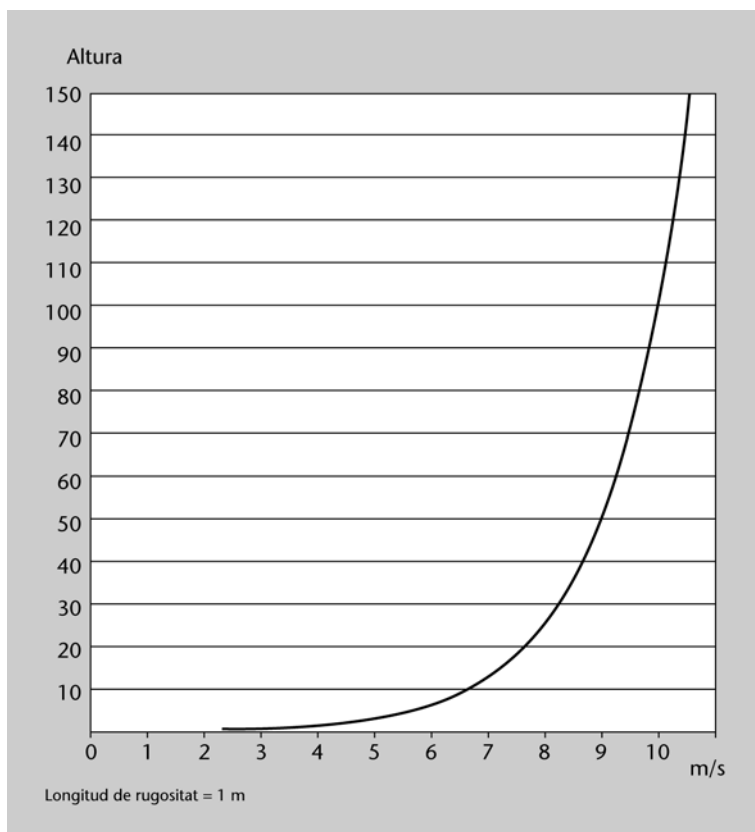
Recursos eòlics a 50 m sobre el nivell del sòl per a cinc situacions topogràfiques diferents										
	Terreny arrecerat		Plana oberta		Costa marítima		Mar obert		Turons i crestes	
	m·s ⁻¹	W·m ⁻²	m·s ⁻¹	W·m ⁻²	m·s ⁻¹	W·m ⁻²	m·s ⁻¹	W·m ⁻²	m·s ⁻¹	W·m ⁻²
	> 0,6	> 250	> 7,5	> 500	> 8,5	> 700	> 9,0	> 800	> 11,5	> 1.800
	5,0-6,0	150-250	6,5-7,5	300-500	7,0-8,5	400-700	8,0-9,0	600-800	10,0-11,5	1.200-1.800
	4,5-5,0	100-150	5,5-6,0	200-300	6,0-7,0	250-400	7,0-8,0	400-600	8,5-10,0	700-1.200
	3,5-4,5	50-100	4,5-5,5	100-200	5,0-6,0	150-250	5,5-7,0	200-400	7,0-8,5	400-700
	< 3,5	< 50	< 4,5	< 100	< 5,0	< 100	< 5,5	< 200	< 7,0	< 400

Font: Dades extretes de Windatlas (www.windatlas.dk).

El que veiem en aquesta equació és que la velocitat està elevada al cub, per la qual cosa és el factor més determinant de l'equació i, per tant, serà aquest el que voldrem conèixer. La correcta avaluació de la velocitat del vent és de gran importància, ja que és el terme que més afecta el resultat. Així, una diferència de l'ordre del 10% en la seva valoració significa una diferència del 30% en la producció obtinguda. Aquests valors, econòmicament, poden tenir un efecte desastrós.

Fins ara hem parlat del vent horitzontal. Verticalment, la distribució del vent també varia per un efecte de cisalla. A la zona pròxima a la terra, la velocitat del vent és zero i, a mesura que anem pujant, augmenta, fins que s'estabilitza i deixa de créixer. A les serralades, l'increment de la velocitat del vent amb l'alçada és molt més acusat, i per això els aerogeneradors sovint es col·loquen a les carenes. Una distribució tipus en funció de l'altura del vent és la que es mostra en la figura 31.

Figura 31. Velocitat del vent a diferents alçades



Per concloure com es resol actualment la quantificació i la valoració del recurs eòlic d'un emplaçament concret, cal mencionar que hi ha paquets informàtics que, a partir de les dades del vent i la topografia d'un emplaçament determinat, obtenen els paràmetres següents:

- la velocitat mitjana del vent i la distribució de freqüències de la velocitat,
- la distribució de freqüències en les diferents direccions (rosa dels vents),
- la variació del vent amb l'alçada i la posició, i
- l'estadística de ràfegues i valors extrems.

Paquets informàtics

Els paquets informàtics que permeten obtenir valors concrets del vent a partir de les dades genèriques i la topografia del lloc consisteixen, principalment, en simulacions estadístiques i dinàmiques del tipus MATLAB, simulació CFD (dinàmica de fluids computacional) o TRNSYS (sistema de càlcul per elements finits).

Web d'interès

Si voleu conèixer amb més profunditat les característiques del vent, el seu origen, els factors determinants i fins i tot calcular la rugositat del terreny, us convidem a visitar la pàgina web de l'Associació Danesa de la Indústria Eòlica (www.windpower.org), concretament la visita guiada pel món de l'energia eòlica, disponible en espanyol en l'enllaç següent: <http://www.talentfactory.dk/es/tour/wres/index.htm>

Com a idea, s'ha de dir que la quantificació del recurs eòlic no és gens fàcil. Cal tenir clar, doncs, que hi ha un risc important pel que fa a la construcció i el disseny dels parcs eòlics.

5.2.2. Radiació solar

A diferència del vent, la radiació solar és un terme molt més conegut i tabulat, que ens serà fàcil de determinar. Per conèixer, doncs, la disponibilitat de radiació, el millor és recórrer a valors de radiació tabulats per mes i fer-ne una valoració anual total.

Cal mencionar que hi ha certa diferència en els valors de radiació que s'obtenen, en funció de les diferents fonts. Si es pot, sempre és bo dur a terme una doble valoració, sobretot en l'àmbit econòmic o de cobertura de les necessitats. També s'hi poden adoptar factors de seguretat per garantir que la instal·lació fotovoltaica que construïm sigui suficient per a cobrir les demandes.

A part de la radiació, veurem que aplicarem factors correctors a aquesta dada per tal d'ajustar-la al màxim. Tindrem com a mínim tres factors correctors:

1) Factor d'ombres. En funció de l'emplaçament, les construccions del voltant, els arbres, la topografia del terreny, etc., tindrem que, en determinades èpoques de l'any, hi ha menys radiació incident en el nostre emplaçament perquè els elements del voltant hi projecten ombres durant algunes hores del dia. Això passa sobretot a primera i darrera hora del dia, quan el sol està més baix i les ombres són més llargues. Podem aplicar aquest aspecte amb un terme fix o bé el podem calcular amb paquets informàtics de simuladors d'ombres.

2) Factor de neteja de l'atmosfera. En funció de l'emplaçament i de l'entorn, l'atmosfera pot estar més o menys neta. En un lloc de muntanya, més alt i sense pol·lució, aquest factor incrementa la radiació (es multiplica el valor de les taules per 1,05). Per contra, en entorns urbans on hi hagi pols, contaminació, etc., el rendiment de la captació de la radiació solar serà més baix, per la qual cosa el valor tabulat es reduirà (es multiplicarà per 0,95).

3) Factor de desaprofitament de les hores baixes de radiació solar. Els valors tabulats de radiació solar inclouen tots els moments del dia. A la sortida i a la posta del sol, la radiació solar incideix molt esbiaixada sobre la superfície del captador i aquesta radiació no s'aprofita. A l'hora de fer càlculs, s'estima que la radiació que es perd per aquesta raó és del 6%. Per tant, multiplicarem el valor tabulat de la radiació incident per un factor de 0,94.

Nivells de radiació

En el cas de Catalunya, la millor font per obtenir la radiació anual d'un emplaçament és l'*Atlas de radiació solar a Catalunya* (edició de l'any 2000), disponible a la web de l'Institut Català d'Energia (ICAEN).

Per a valors estatals, o més globals, cal que consulteu els organismes oficials de les administracions competents en cada zona. També hi ha paquets informàtics disponibles amb els valors de radiació completament tabulats.

A més a més, en casos concrets, hi poden haver altres factors correctors o de pèrdues de la radiació.

5.2.3. El problema de la regulació de les energies renovables

Com hem vist, el vent és un recurs que cal avaluar amb molta cura, ja que hi ha múltiples factors que l'influencien. La radiació solar, en canvi, és un aspecte molt més conegut i tabulat, per la qual cosa la seva determinació no acostuma a requerir gaires estudis previs i simplement n'hi ha prou amb l'adopció de factors correctors a l'hora de fer els càlculs.

Sigui com sigui, tant per al vent com per a la radiació solar, el que sí que és difícil és saber concretament, dia a dia, quina serà la disponibilitat del recurs (vent o sol) i, com a conseqüència, quina serà l'energia que generarem. Tanmateix, per què ho volem saber, això?

Com hem explicat en el subapartat 3.2, el sistema elèctric funciona a partir del mercat elèctric, regulat per l'OMEL. En aquest mercat elèctric, cada dia es determinen la demanda i la generació elèctrica. Això vol dir que les plantes eòliques i les fotovoltaïques han de predir l'energia que injectaran a la xarxa elèctrica cada hora del dia, amb dos dies d'antelació! Aquest aspecte afegeix, doncs, un inconvenient a les energies renovables, ja que, per cada predicció equivocada que es faci en la producció d'energia elèctrica, l'OMEL penalitza econòmicament el productor.

Les centrals fotovoltaïques podran fer més fàcilment aquesta predicció, ja que tenen menys potència i, per tant, hi poden cometre un error més petit. En el cas dels parcs eòlics, aquests disposen de serveis contractats de predicció del vent, els quals, amb models de simulació i les dades meteorològiques, ajusten al màxim les prediccions de generació elèctrica.

Així i tot, amb els models de previsió meteorològica no n'hi ha prou i, per exemple, per a un parc eòlic de 50 MW de potència elèctrica es poden tenir errors de previsió de l'ordre del 50%. El que sí que s'ha vist és que, en el conjunt de l'estat, si sumem la potència de diferents plantes fins a un total de 9.000 MW, els errors de previsió disminueixen fins al 5%. És a dir, que en unir diferents plantes, els errors d'unes i altres es compensen i s'assoleixen nivells de predicció més bons. En el sector es diu que les unions de parcs eòlics, amb una potència conjunta de 500 MW, ajuden a reduir molt la distorsió.

Sigui com sigui, el que sí que caldrà fer en un futur, si es vol que el sistema elèctric pugui funcionar de manera que ofereixi qualitat i fiabilitat amb les energies renovables, és construir instal·lacions de regulació. Efectivament, encara que la previsió que hem fet del vent o de la radiació solar sigui en-

Web d'interès

Un exemple de predicció del vent el trobem a la web www.theyr.com, on s'ofereixen models de previsió de fins a quatre dies d'antelació.

certada, el que cal perquè funcioni el sistema elèctric és que l'energia es creï en el moment en què es consumeix. Però per a les energies renovables això no va així; l'energia es genera quan hi ha el recurs, és a dir, quan fa vent per a la planta eòlica i quan és de dia i fa sol per a les plantes fotovoltaïques. Cal doncs construir instal·lacions que ajudin a regular la generació i la demanda i puguin actuar en els moments en què aquestes no es complementin: quan es genera i no hi ha demanda o, a la inversa, quan hi ha demanda i no es genera.

De fet, aquesta idea no és nova. Les centrals nuclears, que com hem mencionat en el subapartat 4.3, no es poden aturar, generen electricitat contínuament, dia i nit. Com que es va veure que la construcció d'aquestes centrals podia afectar el sistema elèctric, paral·lelament s'hi van construir centrals de regulació per bombeig d'aigua (vegeu el subapartat 4.1). És a dir, a les nits, quan sobra energia, bombegen aigua des d'un embassament inferior a un de superior; i de dia, quan hi ha demanda d'energia, turbinen aigua de l'embassament superior a l'inferior.

En general, aquest aspecte no afecta les centrals convencionals, que poden regular la seva producció simplement augmentant o disminuint el consum de combustible. Les centrals no emmagatzemen l'energia en acumuladors gegants perquè no es disposa de la tecnologia per fer-ho i perquè això significaria més costos econòmics i més pèrdues energètiques. Així, el millor per a les centrals convencionals és produir l'energia en el moment de la demanda.

Així doncs, hem de tenir clar que si el sistema elèctric evoluciona en la seva major part vers un sistema d'energies renovables, amb generació en el moment en què es dóna el recurs i no en el moment que es dóna la demanda d'electricitat, caldrà construir centrals de regulació que puguin actuar sobre el mercat elèctric en els moments en què la generació i la demanda no coincideixin.

5.3. Energia eòlica

Un cop hem vist com funciona la determinació dels recursos eòlics i l'aspecte de regulació elèctrica que cal introduir en les energies renovables, desenvoluparem més a fons l'energia eòlica en aquest apartat i la fotovoltaica en el següent, el subapartat 5.4.

Com hem vist en el subapartat 5.1.1, podem calcular la potència que hi ha en el vent a partir de l'equació 41.

Però aquesta potència continguda en el vent no la podem aprofitar al 100%, tal com determina la llei de Betz, formulada pel físic alemany Albert Betz l'any 1926.

La llei de Betz afirma que únicament podrem convertir menys de 16/27 (aproximadament el 59%) de l'energia cinètica del vent en energia mecànica mitjançant un aerogenerador.

Això es deu al fet que el flux d'aire no es pot aturar, és a dir, un cop el vent passa a través d'un aerogenerador, aquest no es queda amb velocitat zero, en calma, sinó que continua existint. Per tant, aquí hi ha un primer límit per a l'aprofitament de l'energia eòlica.

A més a més, a part de la llei de Betz, cal tenir en compte que tindrem unes pèrdues elèctriques aproximades de l'11% i unes pèrdues mecàniques de més o menys el 6%.

Si sumem les tres limitacions (la llei de Betz, les pèrdues elèctriques i les mecàniques), veiem que com a màxim podrem extreure un 42% de la potència del vent, en un moment de màxim rendiment.

Com a valor estimatiu, la mitjana del rendiment de generació elèctrica amb la tecnologia eòlica està al voltant del 20%-22% del recurs eòlic disponible. Aquest rendiment pot semblar baix, però si el comparem amb les tecnologies de generació d'electricitat a partir de combustió, el rendiment que obteníem en aquells casos era del 30%, tal com hem detallat en el subapartat 4.2.3, i la resta és calor que hem d'evacuar. En el cas de l'energia eòlica, les pèrdues seran simplement el vent que segueix el seu curs natural.

5.3.1. Criteris per a la implantació de l'energia eòlica

Com a criteris generals per a la implantació d'un parc eòlic, caldrà tenir en compte els cinc aspectes següents:

1) Caldren mesures de velocitat del vent a la zona i el recurs eòlic disponible haurà de ser suficient per a fer rendible la generació d'electricitat. Ho valorarem a partir de les hores equivalents (hores a potència màxima de l'aerogenerador).

Caldren 2.200-2.500 hores equivalents a l'any, més o menys. Per exemple, en la figura 5.3 tenim la corba de potència de l'aerogenerador de la marca Gamesa, model G87-2 MW. Per tant, si volem comprovar que sigui apte per a un emplaçament concret, ens haurem d'assegurar que hi hagi vent amb una velocitat entre 13 i 25 m/s durant 2.200 hores a l'any. Si el vent predominant en aquest lloc té una velocitat inferior, haurem d'optar per altres models d'aerogenerador.

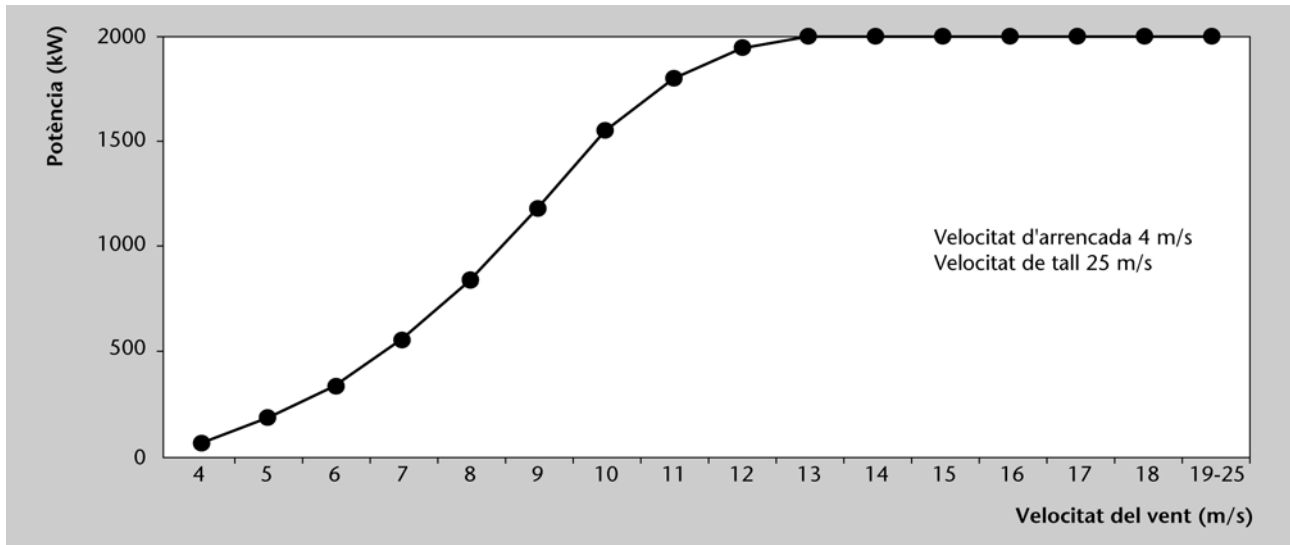
Albert Betz

Albert Betz (1885 Schweinfurt - 1968 Göttingen) fou un físic alemany pioner en la tecnologia de les turbines eòliques. L'any 1910 es va graduar en Enginyeria Naval i l'any 1911 va començar a investigar a l'Institut d'Aerodinàmica de la Universitat de Göttingen. L'any 1920 va publicar la llei de Betz. En el seu llibre *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen* ("Energia eòlica i el seu ús en aerogeneradors"), publicat l'any 1926, dona una bona visió del coneixement que es tenia de l'energia eòlica i dels aerogeneradors en aquella època. La seva teoria sobre la formació de les ales encara és avui dia el fonament per a la construcció d'aerogeneradors.

Corba de potència

La corba de potència d'un aerogenerador és un gràfic que indica quina serà la potència elèctrica disponible a l'aerogenerador per a diferents velocitats del vent.

Figura 32. Corba de potència de l'aerogenerador Gamesa G87-2MW



Font: Dades extretes de Gamesa (<http://www.gamesacorp.com/es>).

2) Caldrà assegurar-se que tenim la possibilitat d'evacuació de l'energia elèctrica generada a la xarxa elèctrica existent. Alhora haurem de valorar la distància que tenim fins al punt d'evacuació (que pot implicar la construcció de noves línies) i la capacitat d'absorció d'energia de la xarxa en aquest punt. Tot això ens ho haurà de dir la companyia distribuïdora local o bé Red Eléctrica de España, si ens connectem directament a la línia d'alta tensió.

3) Caldrà minimitzar l'impacte ambiental. Per a la construcció d'un parc eòlic cal crear-hi accessos, que s'usaran per a construir el parc i per explotar-lo. Caldrà valorar també l'afecció al medi, al patrimoni cultural, visual, etc., i la possible afecció a l'avifauna local.

4) Caldrà veure si hi ha un consens majoritari al territori a favor de la construcció del parc eòlic i comunicar adequadament la potenciació de l'economia local i industrial que comporta una instal·lació com un parc eòlic en un municipi.

5) Caldrà valorar la capacitat financera del promotor per a construir i gestionar bé el parc. D'aquest aspecte, però, se n'ocupa principalment el banc o caixa que dóna el crèdit al promotor perquè pugui realitzar el projecte.

Passem ara a descriure amb major detall els diferents elements que formen un parc eòlic.

5.3.2. Aerogeneradors

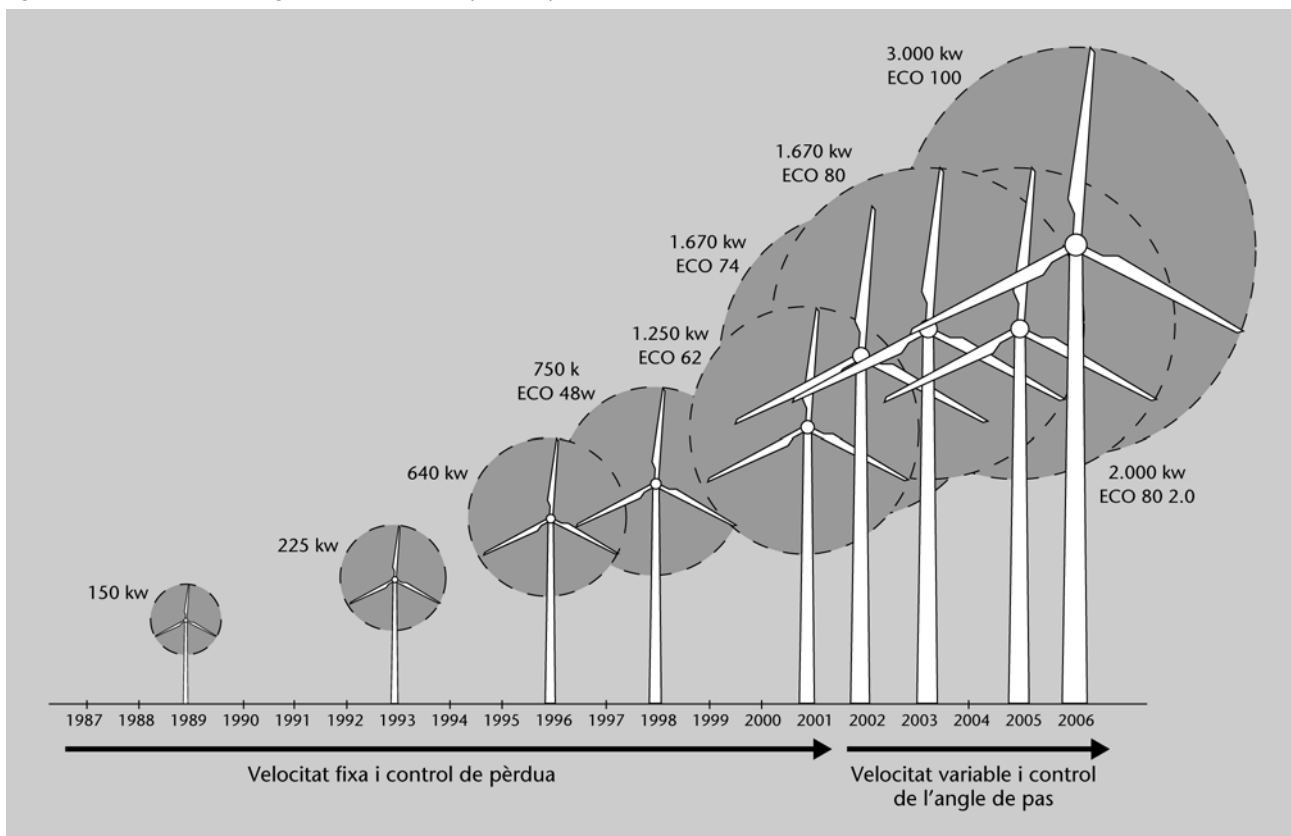
Els **aerogeneradors** són els aparells que transformen l'energia cinètica del vent en energia elèctrica.

Concretament, l'energia cinètica del vent fa girar les aspes, i l'energia cinètica d'aquestes aspes és la que genera electricitat en un alternador. Com en el cas

dels generadors elèctrics o de les turbines, el moviment de l'eix es transforma en energia elèctrica.

Com a apunt històric, els aerogeneradors es van començar a instal·lar a mitjan anys cinquanta. En un principi, i com es pot veure en la figura 33, aquestes màquines tenien poca potència i unes dimensions més petites. Per a poder incrementar la potència dels aerogeneradors es va augmentar les dimensions de les màquines, fins arribar a l'actualitat, en què hi ha aerogeneradors amb pales de 100 m, és a dir, aproximadament la mateixa longitud que un camp de futbol de primera divisió.

Figura 33. Evolució dels aerogeneradors fabricats per l'empresa Ecotècnia



Font: Adaptat d'Alstom-Ecotècnia.

Comentem ara amb detall les parts que formen un aerogenerador. Externament, aquest té quatre parts diferenciades i bàsiques, com podeu observar en la figura 34:

- 1) Fonamentació: tots els aerogeneradors s'han d'instal·lar sobre una llosa de formigó, que els faci d'ancoratge en el terreny i n'asseguri l'estabilitat.
- 2) Torre: és la part d'acer que aguanta les pales. La torre pot ser d'acer massís o bé de gelosia, com les torres elèctriques. Per les mides que tenen i les forces que han d'aguantar, normalment s'escull la torre d'acer massissa, que tot i tenir un cost més alt, també aporta més garanties.
- 3) Rotor: està format per les pales de l'aerogenerador i la caixa, que és la peça que uneix les pales. Les pales són un dels elements dels aerogeneradors més delicats de fabricar i cal que estiguin molt ben equilibrades. La punta de pala és un ele-

ment clau, la forma de la qual pot fer que s'obtingui un 5%-6% més d'energia, i és també l'element que més condiona el soroll que emet un aerogenerador.

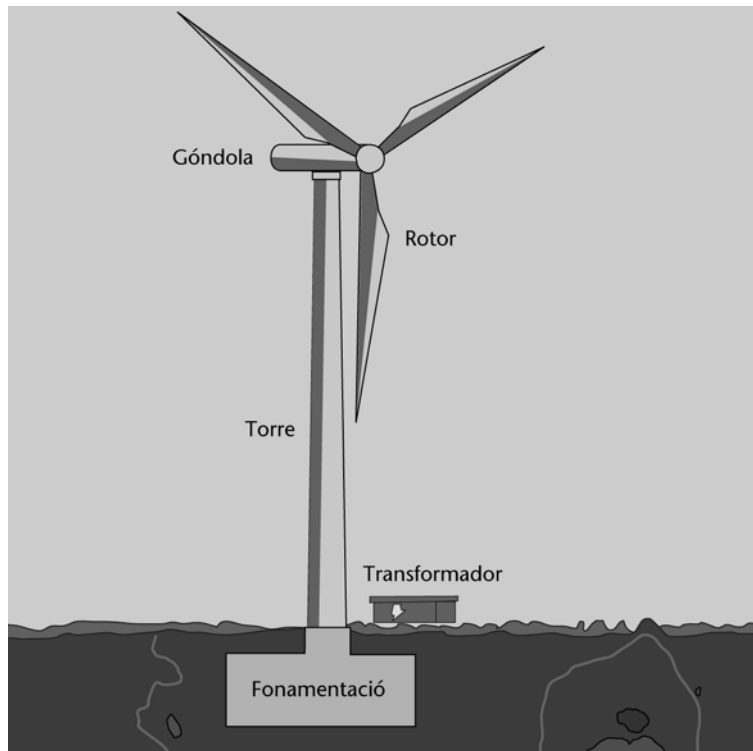
4) Gòndola: és la part de l'aerogenerador que està darrere del rotor. En el seu interior hi ha tots els mecanismes necessaris per a transformar el vent en electricitat.

Gòndola

Els elements que hi ha a l'interior de la gòndola són:

- la multiplicadora, el generador i el transformador: transformen l'energia cinètica de l'eix en energia elèctrica;
- el mecanisme d'orientació de l'aerogenerador: consta del motor d'orientació i la corona d'orientació;P
- el sistema de control: format per l'anemòmetre, el penell i el controlador; i
- altres elements de seguretat, com el fre mecànic.

Figura 34. Parts d'un aerogenerador



Font: Adaptat de Danish Wind Industry Association (<http://windwithmiller.windpower.org/>).

Quant als costos dels aerogeneradors, és interessant que sapiguen que la torre representa un 33% del cost total i les pales un 18%, és a dir, que aquests dos elements representen un 51% del cost total. La resta correspon a tots els altres elements (cablejat, etc.).

Fins aquí hem vist les principals parts d'un aerogenerador. Una de les qualitats més destacades d'aquesta tecnologia és la seva naturalesa eminentment mecànica, a part de la base electrònica del controlador. Aquest aspecte fa que la tecnologia dels aerogeneradors sigui molt robusta i que les màquines es puguin reparar ràpidament i amb més facilitat. Això també permet crear llocs de treball a les zones pròximes als parcs eòlics, per la necessitat de mecànics de molins durant l'explotació de la planta. Entrem ara en els aspectes més tècnics dels aerogeneradors.

Web d'interès

En el camp de l'energia eòlica, hi ha diversos recursos educatius que fan molt comprensible aquesta energia. Cal mencionar especialment el recurs que ofereix l'Associació Danesa de la Indústria Eòlica, i que podreu trobar en l'enllaç següent:

<http://windwithmiller.windpower.org/es/kids/index.htm>

Us recomanem que feu el curs accelerat d'energia eòlica, en què coneixereu les principals característiques d'aquesta tecnologia, de manera fàcil i entenedora, en un entorn gràfic.

Coefficient de potència i corba de potència dels aerogeneradors

Hi ha dos conceptes clau a l'hora de definir les característiques dels aerogeneradors, que ens aporten la mateixa informació: el coeficient de potència i la corba de potència de l'aerogenerador.

1) El coeficient de potència

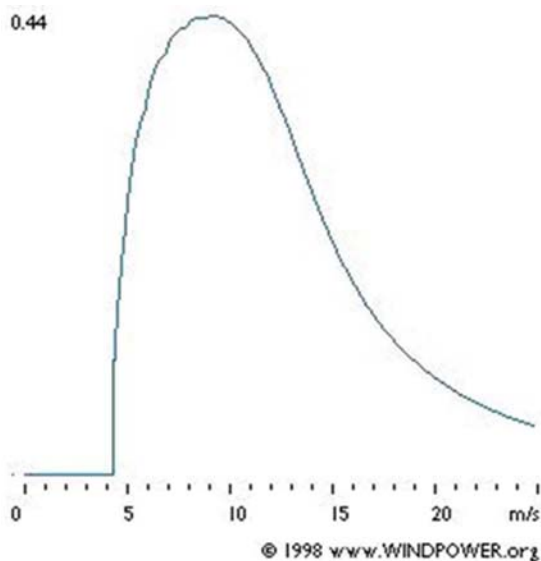
El coeficient de potència és la relació entre la potència elèctrica disponible i la potència eòlica d'entrada, i es defineix a partir del terme c_p .

El terme c_p es llegeix "ce sub pe" i no l'heu de confondre amb la calor específica que hem tractat en el subapartat 1.4.1. Aquest terme és molt interessant, ja que ens permet obtenir directament, a partir de la velocitat del vent, la potència eòlica que ens dóna l'aerogenerador. Com? Doncs a partir de la fórmula de la potència del vent que ja us hem presentat en l'equació 41 del subapartat 5.3. Si multipliquem aquesta fórmula pel coeficient de potència obtindrem directament la potència que dóna el molí per a cada velocitat del vent. Així, si coneixem aquesta dada, la fórmula de la potència de l'aerogenerador serà:

$$P = 1/2 \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \quad (42)$$

on els termes són els que ja hem presentat al principi de l'apartat. El terme c_p no serà, però, constant per a totes les velocitats, sinó que, tal com podeu veure en la figura 35, varia per a cada velocitat. El valor màxim d'aquest coeficient es dóna amb la velocitat de disseny de l'aerogenerador (en el cas de la figura 35, aquesta velocitat és de 9 m/s i el c_p és 0,44). A mode de valoració dels aerogeneradors, si el coeficient de potència màxim c_p és superior a 0,5, podem dir que es tracta d'una bona màquina. Si, en canvi, és inferior a 0,4, es tracta d'una màquina dolenta o de poca qualitat.

Figura 35. Gràfic del coeficient de potència d'un aerogenerador



Font: Dades extretes de www.windpower.org

2) La corba de potència de l'aerogenerador

La **corba de potència** ens indica la potència elèctrica de l'aerogenerador a diferents velocitats del vent.

De fet, la informació que conté és la mateixa que la del gràfic del coeficient de potència, però es presenta de forma diferent. Cal dir que en aquest gràfic podem apreciar implícitament els conceptes de:

- a) **velocitat d'arrencada:** quan comença a donar potència l'aerogenerador;
- b) **velocitat nominal:** aquella velocitat en què obtenim el màxim rendiment i també el màxim c_p ; i
- c) **velocitat d'aturada:** velocitat a què l'aerogenerador s'atura per seguretat.

Teniu un exemple de corba de potència en el gràfic de la figura 32.

Per tal que veieu com estan relacionats els termes de coeficient de potència i corba de potència, us proposem l'exercici següent.

Activitat 5.1.

A partir de la corba de potència de la figura 32, extraieu el gràfic del coeficient c_p per a l'aerogenerador Gamesa 87-2MW, sabent que el diàmetre de l'àrea d'escombratge és de 87 m i que la densitat de l'aire és d' $1,2 \text{ kg/m}^3$ (la podeu considerar constant). Quin és el c_p màxim? Es tracta d'una bona màquina?

Solució

Primer cal determinar els termes de l'equació de potència elèctrica de l'aerogenerador que coneixem. L'equació que cal seguir és la 42.

Coneixem $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ per l'enunciat.

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (d/2)^2 = \pi \cdot (87/2)^2 = 5.945 \text{ m}^2 \quad (43)$$

P i v estan determinades pel gràfic.

Es tracta de calcular, per cada velocitat, el coeficient de potència c_p a partir de l'equació 42, aïllant el terme c_p :

$$c_p = P / (1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3) \quad (44)$$

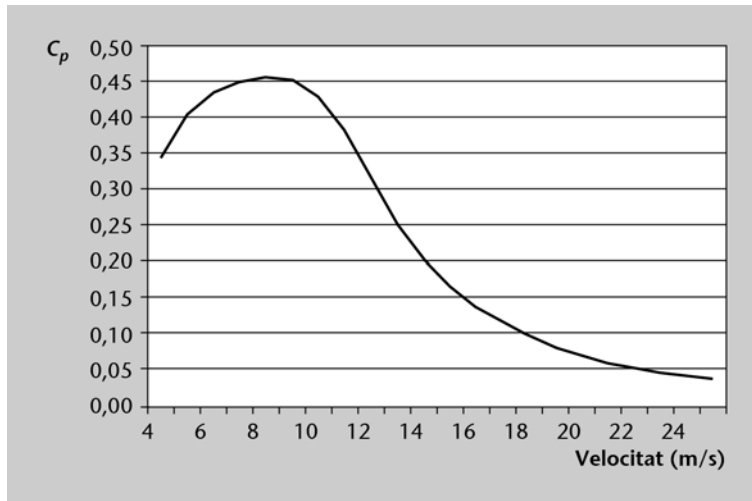
Les parelles de punts del gràfic, P i v , són les que es mostren en la taula següent.

Valors de la corba de potència de l'aerogenerador Gamesa 87-2MW

Velocitat (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19-25
Potència (kW)	79	181	335	550	832	1.175	1.530	1.816	1.963	1.988	1.996	1.999	2.000	2.000	2.000	2.000

Obtenim un gràfic del coeficient de potència com el que es mostra en la taula anterior (passant els kW a W).

Figura 36. Gràfic del coeficient de potència d'un aerogenerador



En aquest gràfic, el c_p màxim es de 0,456 per a una velocitat de 8 m/s. Podem dir, doncs, que es tracta d'una màquina estàndard, ni molt bona ($c_p > 0,5$) ni molt dolenta ($c_p < 0,4$).

Un cop tenim l'aerogenerador seleccionat per a un emplaçament concret, és important conèixer també com es resol la distribució dels aerogeneradors sobre el terreny. Com a aspecte clau, l'alineació dels aerogeneradors estarà determinada per la direcció del vent principal a l'emplaçament del parc eòlic.

5.3.3. Elements auxiliars

A part dels aerogeneradors, els parcs eòlics tenen altres elements que són clau per assegurar el bon funcionament del parc:

a) Els camins d'accés. Per a construir un parc eòlic caldrà que tinguem un camí d'accés a cada aerogenerador. Aquests camins són imprescindibles i caldrà dissenyar-los bé, ja que han de permetre la circulació dels combois especials que transportaran les pales i les parts de la torre fins al parc. Aquests elements, per les seves dimensions, s'han de tenir en compte des del moment inicial de disseny del parc eòlic.

b) El cablejat que uneix els diferents aerogeneradors amb el transformador del parc eòlic. Aquest cablejat es posa normalment soterrat pels camins d'accés.

c) El transformador, igual que en qualsevol central de generació d'electricitat, és imprescindible per transformar el voltatge de l'electricitat generada pels aerogeneradors a la tensió o el voltatge de la línia elèctrica a què està connectat el parc eòlic. En alguns casos també caldrà allargar la xarxa elèctrica existent fins al parc eòlic. Cal destacar que el centre de transformació del parc i la connexió de la xarxa elèctrica són factors determinants de la viabilitat tècnica i econòmica del parc eòlic.

d) El sistema de gestió i control. Es tracta d'un element auxiliar important per als parcs eòlics, i que cal implantar per fer-ne possible l'explotació. El sistema de gestió del parc eòlic ens permetrà controlar-ne el funcionament i fer

un seguiment detallat de l'estat del parc eòlic en cada moment. Cal tenir en compte que hi poden haver aerogeneradors que no es vegin des de l'edifici de control, per la qual cosa és necessari disposar de dades, en temps real, de l'estat de tots els aerogeneradors del parc eòlic. Amb aquests sistemes, completament informatitzats, podem fer un seguiment exhaustiu dels paràmetres següents:

- la producció d'electricitat (diària, mensual i anual);
- la disponibilitat de màquines i l'estat de manteniment de cada aerogenerador;
- les hores equivalents de funcionament del parc que tenim fins al moment (per a poder tenir un control de la producció anual);
- la velocitat i la direcció del vent, i també el règim de gir dels aerogeneradors; i
- les possibles incidències i alarmes dels centres de control dels aerogeneradors.

És important tenir clar, doncs, que a part dels aerogeneradors hi ha un seguit d'elements auxiliars imprescindibles per fer funcionar un parc eòlic. En alguns casos, el fet que aquests factors no estiguin ben resolts pot comportar que el parc no es construeixi o que el rendiment del parc sigui inferior al que es va calcular en el projecte de disseny. Caldrà, per tant, tenir-los molt en compte. A més a més, l'impacte ambiental és un altre element que també cal tenir en compte.

5.3.4. Impacte ambiental

Si bé és cert que l'energia eòlica és una energia renovable, i que com a tal pot ajudar a transformar el model energètic actual, dependent de les energies fòssils, en un de més sostenible, hi ha certs impactes ambientals que haurem de tenir en compte.

Els parcs eòlics, igual que molts altres projectes, estan subjectes al procediment d'avaluació d'impacte ambiental dels projectes, per la qual cosa s'ha d'obtenir una autorització administrativa per a poder-los construir.

El procediment dels estudis d'impacte ambiental és complex, però és important que sapiguen que s'hi analitzen els elements naturals i socials que hi ha a l'entorn de l'emplaçament seleccionat. A més, també busca obtenir la millor solució possible per al projecte, és a dir, que escull, d'entre les possibles alternatives, aquella que minimitza l'impacte global del projecte i s'hi estableixen a la vegada mesures correctores.

Vegem, en els següents apartats, l'impacte negatiu i positiu associat a la construcció d'un parc eòlic.

Impacte ambiental negatiu

Els impactes negatius d'un parc eòlic són, principalment:

1) L'impacte dels aerogeneradors sobre les aus: per a protegir l'avifauna és imprescindible, en la fase d'estudi d'impacte ambiental, determinar les espècies

d'aus que habiten a la zona i els moviments migratoris que s'hi donen. En funció de les poblacions que hi hagi caldrà prendre les mesures adients.

2) L'impacte visual: aquest és un punt que també es té en compte en el projecte i que s'estudia a fons abans de decidir l'emplaçament dels aerogeneradors. Per a poder-lo avaluar, s'estudia la conca visual del projecte, és a dir, la zona del territori en què serà perceptible la instal·lació. Un cop es coneixen els possibles punts d'observació, es fan muntatges fotogràfics per a saber com s'apreciaran les instal·lacions des de cada zona. Es tracta d'un fet cultural i social, i de ben segur que l'acceptació d'aquest tipus d'instal·lacions augmentarà amb el temps.

3) L'impacte acústic: el soroll depèn de la forma que tingui la punta de les pales de l'aerogenerador i de la velocitat de gir. Les normatives actuals estableixen que els aerogeneradors no es poden posar a menys de certa distància dels nuclis de població o de les cases aïllades. Les distàncies actuals garanteixen que les molèsties acústiques en els punts habitats són mínimes. Tot i això, és un aspecte que també es té en compte a l'hora de dissenyar els parcs.

Altres impactes ambientals negatius

A part de l'impacte sobre les aus, l'impacte visual i l'impacte acústic, que són els més coneguts, durant el desenvolupament i la projecció dels parcs eòlics també hi ha altres impactes, com ara:

- L'efecte de parpelleig: amb aquest nom es coneix l'efecte que fa l'ombra de les aspes en girar sobre el territori quan el sol és baix. Aquest aspecte es té en compte a l'hora de decidir la ubicació dels aerogeneradors, per a assegurar-se que no es provoquen molèsties a la població dels voltants.
- L'afecció al patrimoni històric i arqueològic: abans de construir els parcs eòlics es duu a terme una prospecció arqueològica del terreny, per assegurar-se que no s'afecten restes arqueològiques no catalogades. Aquest aspecte es duu a terme en la majoria de projectes que es fan en sòl no construït (línies elèctriques, carreteres, etc.).

Fins aquí hem vist els principals impactes negatius que pot tenir un parc eòlic sobre l'entorn. Entrem ara a valorar els aspectes positius que comporta la construcció dels parcs.

Impacte ambiental positiu

Entre els aspectes positius d'un parc eòlic hi ha els següents:

1) Energia generada pels parcs eòlics: l'energia, com hem vist en l'apartat 3, és un aspecte totalment necessari per a la societat actual. No ens podem plantejar viure sense ella i en fem un ús molt notable. Actualment, com hem vist, l'energia prové de fonts amb més impacte ambiental que l'energia eòlica (residus radioactius, fums, emissions, etc.). Per tant, si volem continuar amb el nivell energètic global, cal que optem per formes de generació més respectuoses i que s'alimentin de fonts renovables, com l'energia eòlica.

2) Emissions evitades: els parcs eòlics generen energia elèctrica sense emetre cap tipus de contaminant a l'ambient. Tenim, doncs, que l'impacte ambiental és molt

més baix que el d'una central tèrmica. Aquesta tecnologia tampoc no genera gasos d'efecte hivernacle, per la qual cosa no contribueix al canvi climàtic.

3) Protecció contra incendis: com que els parcs eòlics s'emplacen en entorns rurals, ajuden a la detecció d'incendis, ja que el personal d'explotació del parc pot detectar els incendis pròxims. A més a més, tots els parcs han de tenir una bassa amb aigua per a apagar possibles incendis del mateix parc. Quan l'incendi no es dona en el parc, sinó als voltants, els bombers utilitzen també aquestes basses. En aquest sentit, s'ha comprovat que els parcs eòlics ajuden a la prevenció i l'extinció d'incendis.

4) L'impacte econòmic de l'energia eòlica en el municipi: quan un municipi disposa d'un parc eòlic, els ingressos municipals s'incrementen notablement, ja que l'ajuntament recapta el 2%-3% de la facturació del parc eòlic en forma d'impostos. Aquests ingressos ajuden, per tant, al desenvolupament dels equipaments municipals. A més a més, els parcs eòlics necessiten treballadors, tècnics qualificats, que són locals, per la qual cosa també contribueixen a la creació de llocs de treball.

Impacte econòmic

La construcció de parcs eòlics en alguns municipis de baixa densitat de població ha fet que, amb els diners recaptats, s'organitzessin viatges gratuïts per a tot el poble.

Valoració global de l'impacte ambiental d'un parc eòlic

En aquest apartat hem vist, doncs, els impactes principals, tant negatius com positius, que té la implantació dels parcs eòlics. En molts punts del territori on es planteja la construcció d'un parc eòlic, s'hi creen plataformes en contra dels parcs, amb arguments diversos, però molts cops s'al·ludeix a arguments de protecció del medi ambient. És a dir, que s'argumenta en contra dels parcs eòlics per a protegir el medi ambient, la fauna i la vegetació. Això fa que en alguns casos arribem a sentir o llegir en els mitjans que "els ecologistes estan en contra de la construcció d'un parc eòlic".

Greenpeace, organització ecologista d'àmbit mundial, que de ben segur coneixeu, està completament a favor del desenvolupament dels parcs eòlics. Està comprovat que l'energia eòlica, si es realitza un bon estudi previ del seu impacte ambiental en l'entorn i per a les aus, té molts més efectes positius que negatius. Com en tot, però, segur que podem trobar casos de parcs eòlics que no s'han construït correctament i que, per tant, han provocat efectes negatius sobre el medi.

5.4. Energia fotovoltaica

Fins aquí hem vist les principals característiques dels parcs eòlics. Ara passem a descriure una altra de les energies renovables: la solar fotovoltaica. En aquest apartat revisarem els principals tipus de plantes fotovoltaiques i d'instal·lacions connectades a la xarxa. En l'apartat 6 descriurem tots els elements necessaris per a construir una planta fotovoltaica.

Tècnics d'energia fotovoltaica

Els tècnics competents en aquestes instal·lacions són els enginyers industrials i els enginyers de telecomunicació, entre altres.

5.4.1. Introducció: tipus de plantes solars

L'energia solar es pot aprofitar de diferents maneres, transformant-la degudament perquè pugui satisfer les nostres necessitats energètiques. A continuació llistem els tres tipus d'aplicacions d'energia solar que s'utilitzen actualment:

1) L'energia solar tèrmica

Com el seu nom indica, les instal·lacions d'energia solar tèrmica capten l'energia solar amb la finalitat de cobrir les necessitats tèrmiques.

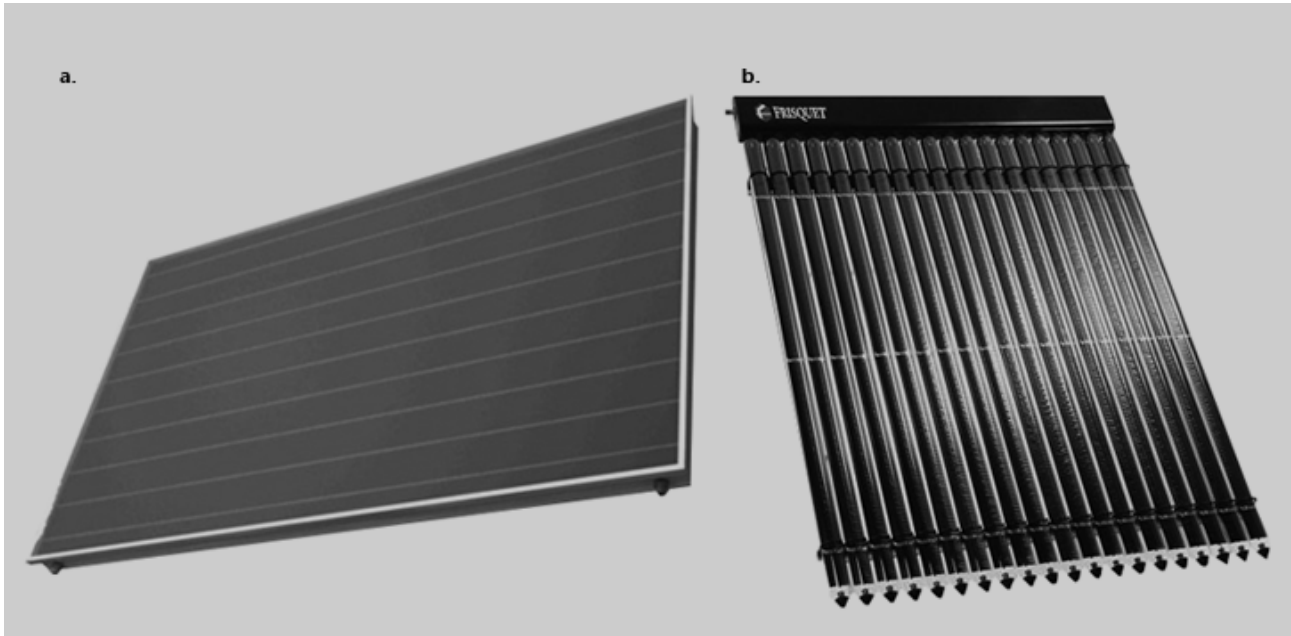
S'instal·la en edificis amb demanda d'aigua calenta, principalment habitatges, poliesportius, escoles, etc. La instal·lació consta d'uns captadors negres, que absorbeixen la radiació solar i escalfen un líquid que circula pel seu interior. Aquest líquid circula fins a un intercanviador, on escalfa aigua. Aquesta aigua calenta s'utilitza per a la dutxa, les piscines, la calefacció, etc. Per tal d'assegurar que sempre hi haurà aigua calenta, el sistema ha de tenir algun tipus de suport, com per exemple una caldera de gas o un escalfador termoelèctric.

Hi ha diferents tipus de líquids que es poden utilitzar a les plantes solars. Normalment és aigua amb glicol o altres productes químics (com els anticongelants) que garanteixen el bon funcionament de la instal·lació. No se sol fer servir aigua sola perquè cal evitar que el líquid utilitzat canviï d'estat, és a dir, que no es congeli ni s'evapori (les temperatures de treball de les instal·lacions solars poden estar per sota dels 0 °C i per sobre dels 100 °C).

Es tracta, doncs, d'un aprofitament merament tèrmic del sol, sense generar en cap cas electricitat. Aquest tipus d'instal·lacions són molt rendibles i ajuden a satisfer la major part de la demanda d'aigua calenta dels edificis. A Espanya, actualment és obligatori instal·lar energia solar tèrmica en tots els edificis de nova construcció.

Els captadors són com els que es mostren en la figura 37. Malgrat que puguin semblar dues tecnologies diferents, tots dos són captadors tèrmics. El de tipus (a) és el més habitual i s'anomena captador pla. El (b), anomenat captador de tubs de buit, assoleix temperatures més altes i, com que el seu cost també és més alt, es reserva únicament per a les aplicacions d'alta temperatura. Per als sistemes experimentals d'aire condicionat amb energia solar tèrmica s'utilitzen els captadors de tipus (b).

Figura 37. Captadors solars tèrmics

a. Captador pla. Font: <http://webdosb.com/images/ASTERSA/captador%20solar.jpg>. b. Captador de tubs de buit. Font: <http://img.archiexpo.es>.

2) L'energia solar termoelèctrica

Les plantes solars termoelèctriques transformen la radiació solar en energia elèctrica.

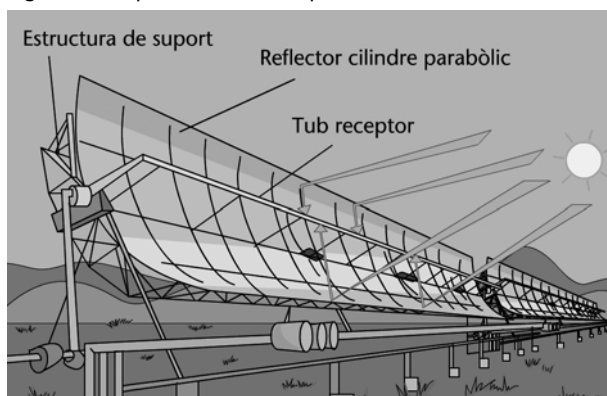
El procés consisteix a evaporar un fluid, mitjançant la concentració dels rajos solars, per a activar posteriorment una turbina i generar electricitat. Són les anomenades *centrals termoelèctriques*. Els dos tipus de plantes que es construeixen són:

a) Captadors de cilindre parabòlic: són captadors que reflecteixen els raigs solars que reben a la superfície i els concentren en un tub central. Per aquest tub circula un fluid especial, que en rebre l'escalfor solar i incrementar la temperatura es converteix en vapor. Aquest vapor, igual que en el cicle de Rankine explicat en el subapartat 4.2.2, es fa passar per una turbina, que acoblada a un generador produeix energia elèctrica. Aquestes instal·lacions són com la que es mostra en la figura 38, i el conjunt del reflector cilíndric gira seguint la trajectòria solar.

Fluid de treball

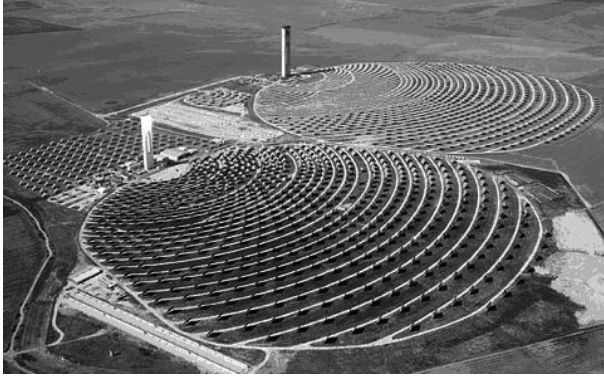
Els fluids de treball poden ser, entre altres, aire, vapor d'aigua, sodi fos o sals foses, segons la tecnologia que es faci servir.

Figura 38. Captador de cilindre parabòlic



b) Centrals de concentració solar de torre: aquestes també fan un efecte similar. Disposen d'un camp de miralls per a concentrar els raigs solars en una torre, o receptor central, en el qual es genera vapor que es turбина per a produir electricitat. Aquestes centrals són com la que es mostra en la figura 39. Per ara és una tecnologia en fase experimental, però les plantes de la figura són dues plantes amb una potència elèctrica de 10 MW cadascuna.

Figura 39. Central de concentració solar de torre



Font: Ecología Microservos (<http://eco.microservos.com>).

3) L'energia solar fotovoltaica

Per a acabar, la radiació solar es pot captar en una cèl·lula fotovoltaica, on es transforma directament en energia elèctrica de corrent continu.

D'aquests tres tipus d'aplicacions de l'energia solar, únicament desenvoluparem més a fons l'energia solar fotovoltaica. En els subapartats 5.4.2 i 5.4.3 detallarem els possibles tipus de plantes i els sistemes que es connecten a la xarxa elèctrica. En l'apartat 6 detallarem els diferents elements que formen una planta solar fotovoltaica autònoma, és a dir, que no està connectada a la xarxa.

5.4.2. Tipus de plantes solars fotovoltaiques

L'energia solar fotovoltaica es pot instal·lar per satisfer diferents necessitats i també en diferents emplaçaments. Per cadascun d'aquests aspectes tindrem diferents tipus de plantes. Establim, per tant, dues classificacions per a les instal·lacions fotovoltaiques: en funció de la connexió a la xarxa i en funció de l'emplaçament de la instal·lació.

1) En funció de si es tracta d'una instal·lació connectada a la xarxa elèctrica o no, tindrem dos tipus diferents de plantes:

a) Instal·lació fotovoltaica autònoma

L'energia solar fotovoltaica es pot instal·lar per a solucionar un problema d'electrificació, és a dir, per a produir electricitat en un lloc on no arriba la xarxa elèctrica.

En aquest cas estarem parlant d'una instal·lació autònoma. Aquest tipus de plantes les descriurem en l'apartat 7.

b) Instal·lació fotovoltaica connectada a la xarxa

En aquest cas, el que farem serà produir energia que injectarem a la xarxa elèctrica i posteriorment cobrarem en funció de l'energia que hàgim generat.

Com que es tracta d'un tipus d'instal·lació subvencionada, en funció del marc de subvencions que hi hagi vigent serà més o menys atractiu construir-les (en el subapartat 5.4.3 s'explica el marc legal). Aquestes instal·lacions estan formades pels mateixos elements que l'anterior, tret que no disposen de sistemes per acumular l'energia elèctrica generada.

Sigui com sigui, en el cas de les instal·lacions autònomes, el que buscarem serà satisfer la demanda d'electricitat. Seran, per tant, instal·lacions dissenyades a partir del càlcul de la demanda. En el cas de les instal·lacions connectades a la xarxa, l'únic objectiu que tindrem serà aconseguir el màxim de beneficis econòmics i, per tant, optimitzarem la rendibilitat de la instal·lació i no ens importaran els períodes en què no generin, ja que no estaran cobrint cap demanda. El plantejament d'un tipus de plantes i el d'altres és, com veieu, completament diferent.

2) També podem classificar les instal·lacions **en funció del lloc on situem els captadors**. D'aquesta manera tindrem la classificació següent:

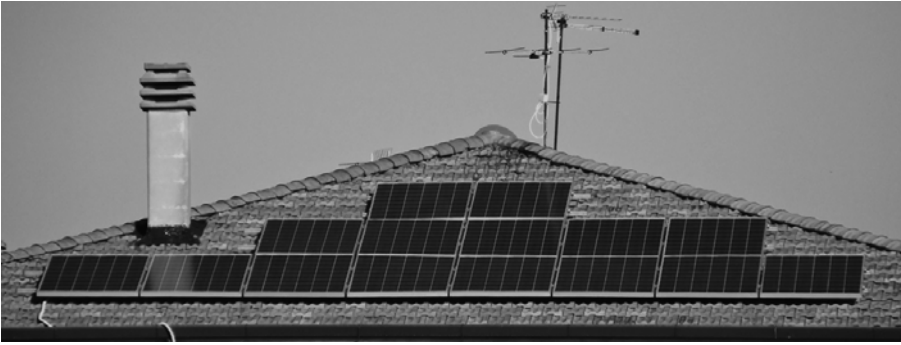
a) Instal·lacions ubicades en cobertes d'edificis

Es tracta d'instal·lacions que aprofiten les cobertes dels edificis, sense ocupar terreny natural.

Podem tenir encara dos subgrups dins d'aquest grup:

- Instal·lacions integrades en coberta: són aquelles en què les plaques fotovoltaiques es col·loquen directament sobre la coberta o bé substituint-la. Aquestes instal·lacions tenen poc impacte visual i són les que millor s'integren. Com que l'orientació i la inclinació serà la que tingui la teulada, es generarà menys electricitat que en altres casos. Una instal·lació d'aquest tipus és la que es mostra en la figura 40.

Figura 40. Plaques solars fotovoltaiques integrades en coberta



Font: <http://4.bp.blogspot.com>.

Instal·lacions sobre coberta amb un sistema de suport: l'orientació i la inclinació dels captadors condicionen la generació d'energia. Així, en alguns casos es prima la generació elèctrica abans que la integració arquitectònica en l'edifici. Aquestes instal·lacions consten d'una estructura, normalment metàl·lica, que dona més inclinació a les plaques solars, com es pot veure en la figura 41.

Figura 41. Plaques fotovoltaiques en coberta amb sistema de suport



Font: Inmoweb (<http://www.inmoweb.com>).

b) Instal·lacions solars fotovoltaiques sobre el terreny

En altres casos ens podem trobar instal·lacions ubicades directament sobre el terreny natural.

Hi ha també dos subgrups en funció del suport que tinguin les plaques solars:

- Estructura fixa: es tracta d'instal·lacions com les que hem vist de coberta amb estructura, però en lloc d'estar sobre la coberta estan sobre el terreny. Es cargolen sobre cimentacions de formigó perquè tinguin la robustesa i l'estructura necessàries. Les instal·lacions d'aquest tipus són com les que es mostren en la figura 42.

Figura 42. Instal·lació solar fotovoltaica sobre el terreny i fixa



Font: Vade Solar (<http://www.vade-solar.es>).

Seguidors solars: per a aprofitar més la radiació solar, hi ha instal·lacions que es construeixen sobre uns elements mòbils que segueixen el recorregut del sol. Aquest seguiment pot ser a un eix (només orienta del cel cap al terra) o bé a dos eixos (segueixen completament la trajectòria solar). La instal·lació que es mostra en la figura 43 és de seguiment a dos eixos.

Sistemes de seguiment solar

El seguiment solar es pot fer amb un cicle programat, que adapta cada dia el moviment a la trajectòria solar, o bé amb sensors de radiació. Els dies ennuvolats, a les instal·lacions que tenen seguiment per radiació podem veure seguidors orientats de diferent manera. Aquests sistemes tenen també controls de seguretat per al vent, per a evitar que la força del vent les pugui fer caure.

Figura 43. Instal·lació solar fotovoltaica sobre el terreny amb seguidors



Font: Incoesa (<http://www.incoesa.com>).

5.4.3. Connexió a la xarxa: marc legal

A dia d'avui, les instal·lacions solars fotovoltaïques no són rendibles a causa dels costos. En el cas de les instal·lacions aïllades, que analitzarem amb més profunditat en l'apartat 6, sí que poden sortir econòmicament viables, respecte a les possibles alternatives d'electrificació. Les que no són econòmicament viables són les instal·lacions connectades a la xarxa.

Us preguntareu: i si és així, com és que se'n construeixen? Doncs perquè hi ha un sistema de primes i incentius, per part de l'administració, que les fan més atractives, tal com hem explicat en el subapartat 3.2.1.

Com a idea, us ha de quedar clar, doncs, que l'energia solar fotovoltaica connectada a la xarxa no és econòmicament viable si no disposa d'aquest sistema de primes. Les primes les paga l'Estat i, per tant, hipotequen en part el sistema elèctric actual. Perquè us feu una idea del nivell econòmic de les primes, segons el Reial Decret 661/2007, les primes que s'hi podien obtenir eren de 0,30 €/kWh, quan el cost del kilowatt hora elèctric està al voltant dels 0,05-0,06 €. Estem parlant, doncs, de primes que quintupliquen el cost real del kilowatt hora!

És important que es promoguin les energies renovables, sobretot en les seves fases inicials i de desenvolupament. Quan es tracta de tecnologies que no són madures, calen incentius per a crear els teixits industrial i comercial necessaris per a construir-les amb un cost assequible. Cal tenir en compte, però, que si les primes que es donen són massa bones es produeix exactament la situació inversa, és a dir, que s'especula amb la construcció de les plantes d'energies renovables. I aquesta especulació, i el benefici que n'obtenen els agents que hi participen, l'acabem pagant tots.

Per últim, dir que si actualment aquestes plantes no són viables per si soles és perquè el preu de l'electricitat (el cost en €/kWh) és molt baix. És a dir, que estem en una època en què l'energia té un cost molt baix. La tendència en un futur serà, de ben segur, un increment notable dels preus, relacionat directament amb l'increment del preu del petroli. En el moment en què el cost de l'electricitat d'origen fòssil s'incrementi, les plantes fotovoltaïques seran econòmicament viables per si soles i, per tant, es podran construir sense la necessitat de primes ni ajudes de les administracions.

5.5. Què hem après?

- Hem après com es valoren els recursos renovables de vent i radiació solar, un aspecte que té una gran importància en la implantació de les plantes d'energies renovables, sobretot en el cas de l'energia eòlica, en què els errors de quantificació del vent poden significar desviacions greus de l'energia generada.
- Hem après a realitzar els càlculs elementals de quantificació de l'energia eòlica que podem obtenir amb un model d'aerogenerador determinat. Hem vist també les diferents opcions d'aprofitament de l'energia solar, de les quals únicament estan en fase més madura l'energia solar tèrmica per escalfar aigua a les llars i la fotovoltaica, mentre que la resta encara estan en fase de desenvolupament i proves.

L'energia solar fotovoltaica és molt important i pot arribar a solucionar problemes d'electrificació. Continuarem, doncs, analitzant els diferents elements que formen una planta solar fotovoltaica, primer de manera descriptiva i després dimensionant-los per a un cas concret.

6. Sistema fotovoltaic autònom

En aquest apartat continuarem amb la descripció dels sistemes fotovoltaics, però aquest cop detallarem el dimensionat de cada element d'un sistema fotovoltaic autònom.

Una **planta fotovoltaica autònoma** és aquella que es dissenya i es projecta per satisfer una demanda elèctrica concreta.

El més freqüent és que aquests sistemes abasteixin una casa aïllada.

En aquests casos, l'alternativa al projecte pot ser la construcció d'una línia elèctrica de diversos quilòmetres. Això, com comentarem en l'apartat 7, pot tenir un cost molt elevat i, a més a més, un cop connectats a la xarxa elèctrica podem tenir una qualitat de servei molt baixa. Així doncs, en aquests casos, a l'hora de fer l'estudi econòmic, el que ens determinarà la viabilitat econòmica no serà el preu del kilowatt hora elèctric de la xarxa, sinó el cost de construir la línia elèctrica. Altres vegades, el cost econòmic no serà l'element determinant d'aquestes instal·lacions, sinó que el que es valorarà realment serà l'augment de la qualitat de vida que es deriva del fet de tenir electricitat.

A continuació veurem, en primer lloc, quines són les característiques principals dels diferents elements que formen els sistemes autònoms de generació d'energia a partir de cèl·lules fotovoltaïques. Posteriorment us mostrarem un exemple de càlcul de dimensionat i, finalment, plantejarem possibles alternatives d'electrificació rural autònoma amb energies renovables.

Què aprendrem?

- Coneixerem els diferents tipus de mòduls fotovoltaics que hi ha;
- veurem com funciona la tecnologia fotovoltaica i les magnituds que determinen les diferents propietats dels mòduls que es fan servir;
- us presentarem el funcionament de les bateries i les característiques d'aquests elements que cal tenir en compte a l'hora de dissenyar les instal·lacions;
- llistarem els altres elements que formen una instal·lació solar fotovoltaica; i
- calcularem i dimensionarem una instal·lació solar fotovoltaica que pugui abastir l'energia necessària per a casa nostra.

Què suposarem?

Suposarem que coneixeu les magnituds principals d'un circuit elèctric, com ara el voltatge, la intensitat i la resistència; els factors de conversió d'unitats, sobretot d'energia i de potència; i el corrent altern i continu.

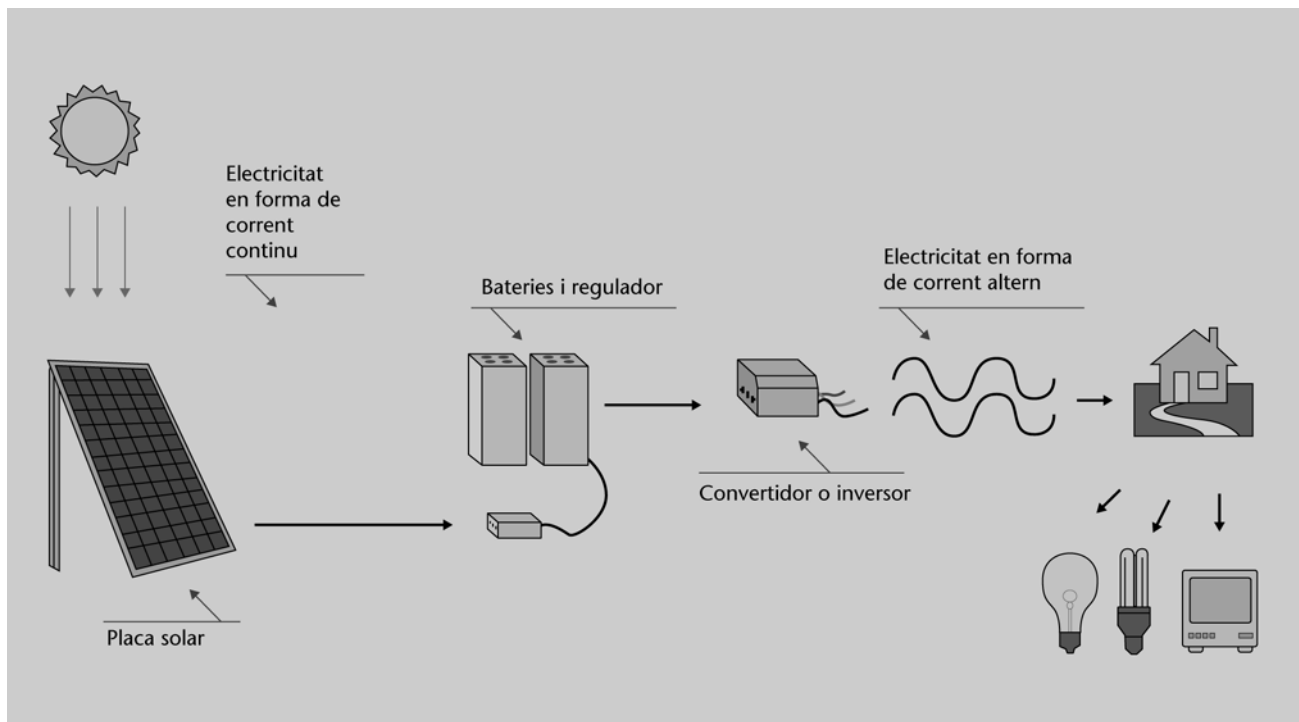
6.1. Elements que formen una instal·lació fotovoltaica

Per a entendre com funciona una planta solar fotovoltaica, descriurem els diferents elements que la formen, els diferents tipus que hi pot haver i les característiques que cal tenir en compte per dimensionar-los.

Els diferents elements que formen una instal·lació solar fotovoltaica autònoma són els que podeu veure en la figura 44:

- els panells fotovoltaics com a sistema de captació,
- les bateries per acumular energia,
- el regulador, i
- l'inversor.

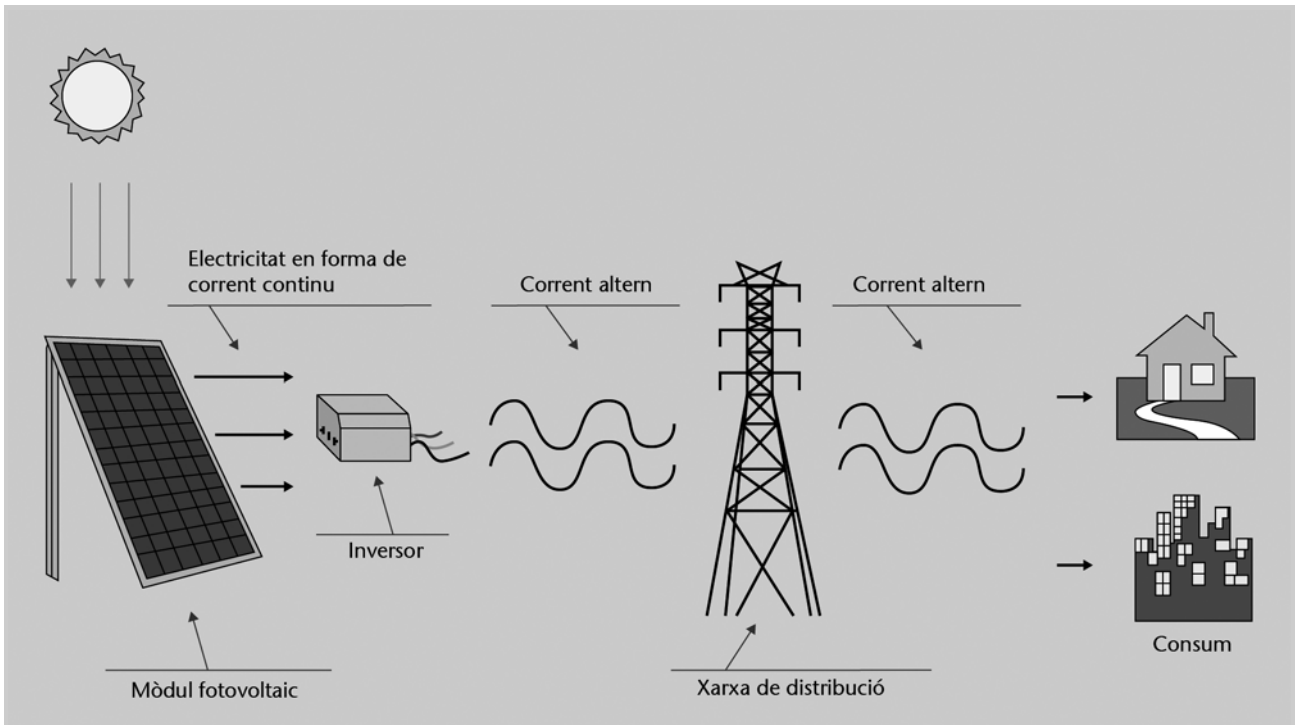
Figura 44



Esquema d'una instal·lació solar fotovoltaica autònoma.

Per a qui tingui curiositat per a saber com són les plantes fotovoltaiques connectades a la xarxa, i no les autònomes, dir-vos que, en realitat, els elements que formen la instal·lació són els mateixos i que l'únic que varia és el sistema d'acumulació. Les plantes connectades a la xarxa no disposen de sistema d'acumulació ni de regulador, sinó que quan es genera l'energia, aquesta s'injecta a la xarxa i es ven en aquell moment. Posteriorment, quan hi ha consum elèctric nocturn, es consumeix energia de la xarxa. Les plantes connectades a la xarxa disposen, doncs, d'un transformador i d'un punt de connexió a la xarxa, en lloc d'un sistema de bateries per acumular-hi energia, tal com podeu veure en la figura 45. La resta d'elements que formen la planta són els mateixos.

Figura 45. Instal·lació fotovoltaica connectada a la xarxa



Les plantes fotovoltaiques grans que es connecten a la xarxa no disposen d'acumuladors perquè representaria un element més, amb costos notables d'adquisició i manteniment, i pèrdues per conversions més grans de l'energia elèctrica generada. A més, no aporta beneficis econòmics, sinó que més aviat reportarà menys ingressos a causa de les pèrdues de conversió.

6.1.1. Sistema de captació

El primer que definirem serà el funcionament d'una placa fotovoltaica i quins tipus hi ha.

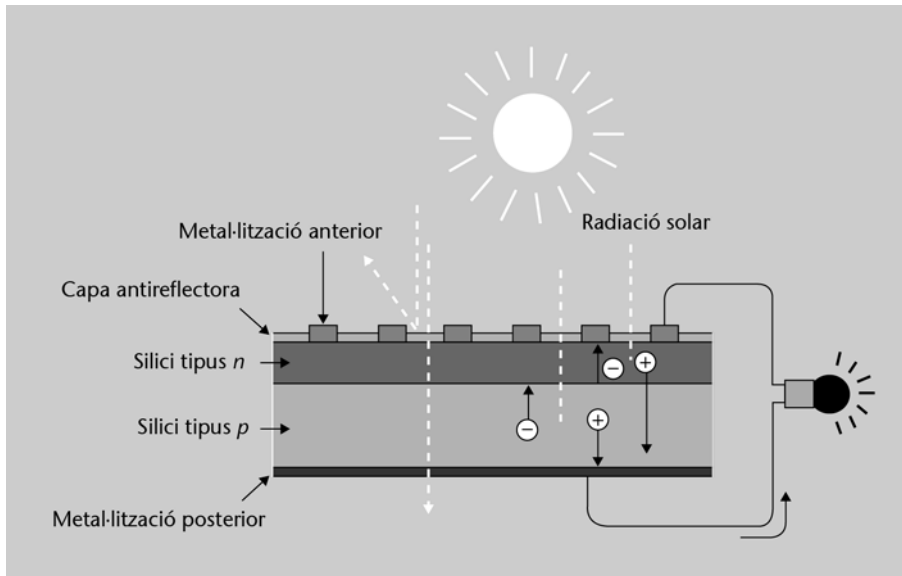
Una placa fotovoltaica està formada per un conjunt de cèl·lules de silici dopat (un material semiconductor) interconnectades entre si. Concretament, una cèl·lula són dues capes de silici, una dopada positivament (silici de tipus p) i l'altra negativament (silici de tipus n), i uns contactes positius a la part anterior de la cèl·lula (que acostumen a ser de plata) i un contacte posterior negatiu.

Dopatge positiu i negatiu

Els semiconductors són materials per als quals, mitjançant l'addició d'impureses durant la seva fabricació, es poden adaptar les propietats elèctriques perquè satisfacin millor necessitats concretes. En el cas del silici de tipus p (o positiu) s'hi introdueix bor, i en el cas del silici de tipus n (o negatiu) s'hi introdueix fòsfor. Les impureses s'introdueixen quan el silici està fos, i queden posteriorment a l'interior de l'estructura del material. Aquest procés s'anomena dopatge.

Podeu veure aquests elements en la figura 46.

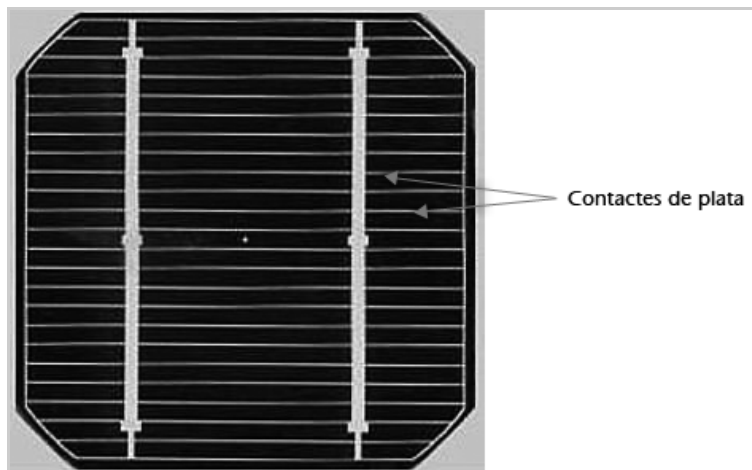
Figura 46. Esquema del funcionament d'una cèl·lula fotovoltaica



Així, quan aquests materials semiconductors dopats reben l'energia d'un fotó de la radiació solar, alliberen un electró. Aquest electró viatja per l'interior del material fins que el capta algun dels contactes de plata que hi ha sobre el silici. En aquest moment es genera electricitat. Cal dir que el corrent generat per una cèl·lula fotovoltaica és continu, no altern.

En la figura 47 podeu veure la imatge d'una cèl·lula fotovoltaica, en la qual s'aprecien perfectament tots els contactes de plata que se situen en la superfície de la cèl·lula.

Figura 47. Cèl·lula fotovoltaica



A partir d'aquest principi bàsic de funcionament hi ha diferents patents constructives que milloren, en major o menor grau, el rendiment global de la transformació d'energia solar en electricitat. Es pot modificar la forma o el circuit de contactors, o fer que el silici pugui captar més energia solar amb una superfície rugosa, per a posar-ne només dos exemples.

Tipus de panells fotovoltaics

A part del disseny específic de la cèl·lula, un aspecte que sí que heu d'aprendre a distingir és el tipus de silici que forma el captador fotovoltaic. Aquests són els tres tipus de silici, de més a menys rendiment: monocristal·lí, policristal·lí i amorf.

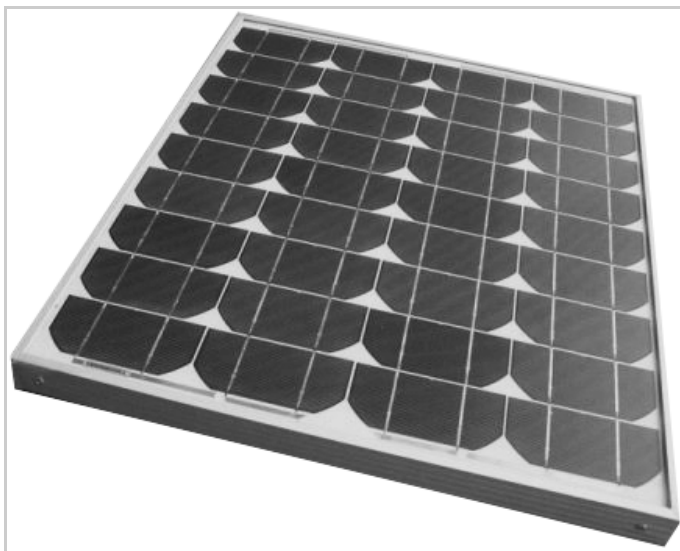
1) Silici monocristal·lí

El silici monocristal·lí és el tipus de silici de més qualitat i, per tant, amb el que s'obté més rendiment en la transformació d'energia solar a electricitat. També és el més car.

En aquest cas, les cèl·lules de silici es fabriquen de tal manera que el cristall de silici que es forma a partir del silici fos és el mateix en tot el material. Aquest tipus de silici és el més fosc i la seva superfície és homogènia.

Podem distingir els panells de silici monocristal·lí perquè les cèl·lules que el formen no n'ocupen completament la superfície. Per què? Perquè en la fabricació de les cèl·lules s'obté una barra de silici de secció circular de la qual, posteriorment, es tallen les cèl·lules amb fil de diamant (com si féssim talls d'una llonganissa). Com que el silici monocristal·lí és car i a més a més té bon rendiment, en la fabricació dels panells no es retalla per complet aquesta secció circular, sinó que únicament es retallen les parts exteriors, i així queda el panell, com un conjunt de cèl·lules aixamfranades. Aquest tipus de mòdul té un rendiment mitjà del 14%-15% i té prestacions acceptables amb radiació solar baixa. Una cèl·lula de silici monocristal·lí és la que s'ha mostrat en la figura 47, i un panell monocristal·lí és el que hi ha en la figura 48, on podeu veure que no tota la superfície està ocupada per silici.

Figura 48. Panell de silici monocristal·lí



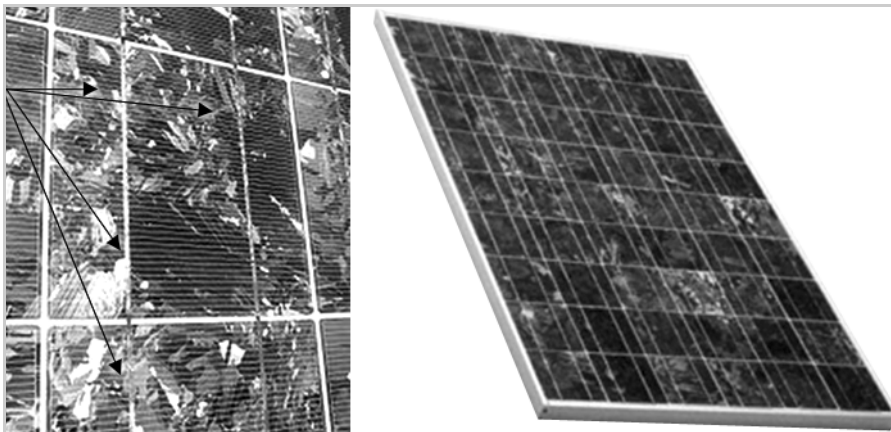
Font: Solostocks (<http://imagenes.solostocks.com>).

2) Silici policristal·lí

Quan en el procés de fabricació es refreda el silici, si es fa lentament, el silici se solidifica i forma cristalls diferents. Aquest és el silici policristal·lí. En aquest cas, el rendiment és menor que el del silici monocristal·lí, però el material també és menys car.

El panell fotovoltaic es construeix amb cèl·lules de secció quadrada, per la qual cosa s'ocupa perfectament tota la superfície del panell. Aquest tipus de mòdul té un rendiment mitjà del 12%-13% i un rendiment molt baix amb radiació solar baixa. En la figura 49 podeu veure una cèl·lula de silici policristal·lí, en la qual s'aprecien els diferents cristalls (senyalats amb fletxes) i un panell, que com podeu apreciar no té, en aquest cas, cap part sense cobrir de silici.

Figura 49. Cèl·lula i panell de silici policristal·lí



Fonts: Wikimedia Commons (esquerra) i Proyectos técnicos y maquinaria LTDA [<http://blog.ptmcolombia.com>] (dreta).

Figura 49

El procés de fabricació de les cèl·lules de silici comença amb la purificació del silici, segons diferents processos patentats. Posteriorment, aquest silici fos se solidifica. En funció dels processos de purificació i solidificació obtenim un tipus de silici o un altre.

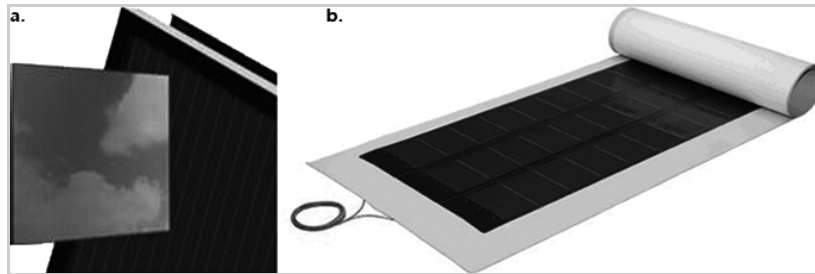
3) Silici amorf

L'últim tipus de silici, anomenat silici amorf, no té cristalls, i sovint es fa refredar ràpidament sobre suports de plàstic o vidre.

De fet, aquests és el silici amb el que estem més familiaritzats, ja que quasi totes les calculadores tenen una placa de silici amorf per a poder-se engegar quan no tenen piles. Aquest tipus de silici té un to vermellós, a diferència dels altres que són més aviat blavosos, i el seu rendiment és molt menor. S'utilitza per a les instal·lacions solars fotovoltaïques que es fan a les naus industrials. Té aplicació, doncs, en aquells casos en què es vol tenir uns ingressos per generació elèctrica addicionals, amb una instal·lació de baix cost i que s'amortitza en un temps més o menys raonable. Mai no es farà servir en instal·lacions autònomes, ja que el seu baix rendiment requeriria duplicar o triplicar la superfície necessària de panells fotovoltaïcs. Aquest tipus de mòdul té un rendiment mitjà del 6%, però

presenta un bon comportament amb radiació solar baixa. En la figura 50 podeu veure el detall d'una cèl·lula de silici amorf i també un tipus de captador flexible de silici amorf, com els que es col·loquen a les naus industrials.

Figura 50. Cèl·lula i panell de silici amorf



Fonts: a. Solostocks (<http://imagenes.solostocks.com>) i b. Architekten Information System (<http://www.ais-online.de>).

En funció del tipus de silici que escollim, tindrem més o menys rendiment. En els casos en què la superfície no sigui un factor limitant, com és el cas de les naus industrials, es podrà escollir un tipus de silici amorf, de menys rendiment, però amb un cost molt més econòmic. Per a les instal·lacions autònomes haurem d'escollir un panell de silici monocristal·lí o policristal·lí, en funció dels costos i de la superfície que tinguem.

Per a acabar, és interessant que coneguem l'evolució del mercat del silici. La puresa del silici que es fa servir en electrònica ha de ser del 99,9%. Inicialment, com que la demanda de silici per a la construcció de panells fotovoltaics era baixa, es feia servir per aquestes aplicacions el silici de rebuig de la indústria electrònica. A poc a poc, però, la demanda de silici per a aplicacions fotovoltaïques ha augmentat a tot el món, i actualment supera la demanda de silici del sector electrònic. El mercat de fabricació del silici és molt reduït i hi ha poques instal·lacions al món que es dediquin a la purificació d'aquest element. La disponibilitat de silici a costos raonables és, doncs, un punt feble en el mercat de l'energia solar fotovoltaica.

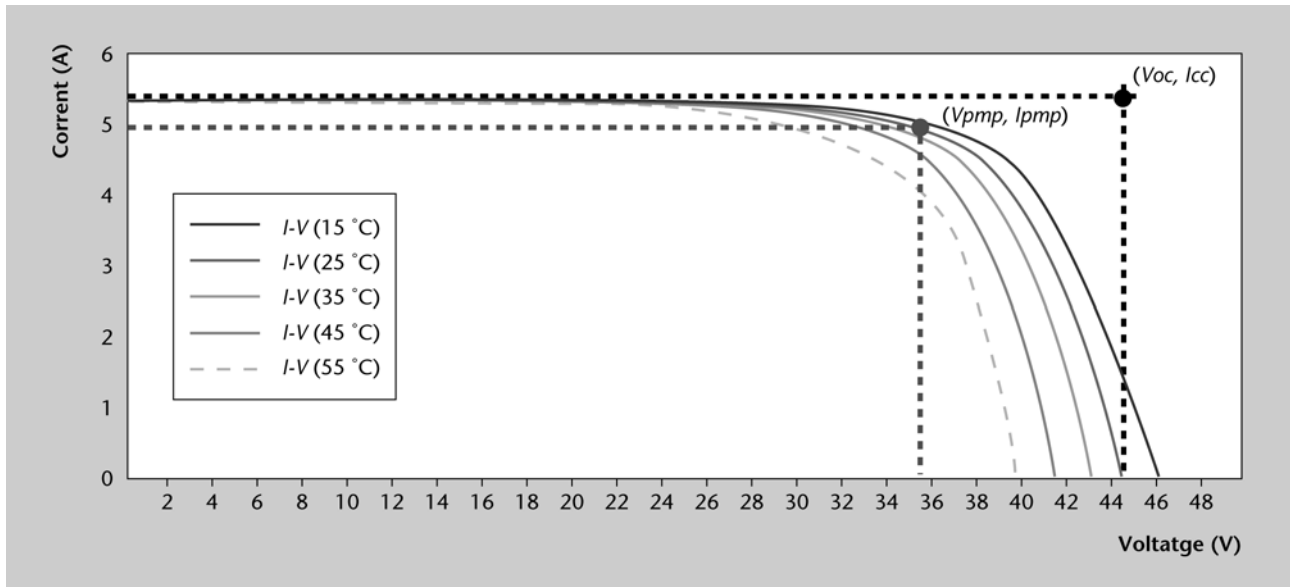
Corba *I-V*

Abans de començar a definir els paràmetres característics d'un panell solar, és important tenir en compte que, per la seva naturalesa, una cèl·lula solar és un generador de corrent i no pas de voltatge. Aquest principi és important per a entendre el comportament de la cèl·lula fotovoltaica davant les variacions dels principals paràmetres que l'afecten, que són la radiació solar incident, el voltatge de treball i la temperatura de treball.

Per a mostrar el comportament d'un mòdul solar fotovoltaic, el que s'utilitza normalment és la corba *I-V* (intensitat-voltage) per a una radiació solar incident de 1.000 W/m^2 (és un assaig normatiu que permet comparar així els diferents gràfics obtinguts). Un exemple és el que trobem en la figura 51, que és la corba d'un mòdul fotovoltaic facilitada pel seu fabricant. Fixeu-vos que hi ha afegit, a més a més, les corbes resultants en cas de variació de la temperatura.

Com podeu apreciar en la figura 51, el voltatge màxim varia en funció de la temperatura. Com menys temperatura, més voltatge, és a dir, millor rendiment. Així, a l'estiu, una placa fotovoltaica als Pirineus tindrà més bon rendiment que la mateixa placa a Granada, on tindrà menys rendiment per sobreescalfament.

Figura 51. Corba I-V d'un mòdul fotovoltaic.



Aquesta corba ens permet descriure alguns punts característics que ens serviran per catalogar, definir i comparar els mòduls de diferents materials o fabricants.

1) Corrent de curtcircuit o I_{cc} (o I_{sc} , de l'anglès *short circuit*): correspon al valor de tall de la corba amb l'eix d'ordenades, és a dir, el punt de tall amb l'eix de la intensitat, quan el voltatge és zero. És el corrent que obtindrem si posem en contacte els contactors positius i els negatius de la cèl·lula, és a dir, si curtcircuitem la cèl·lula, i és el corrent màxim que ens pot donar la placa fotovoltaica. En el cas del gràfic de la figura 51, el corrent de curtcircuit és de 5,13 A.

2) Voltatge de circuit obert o V_{co} (o V_{oc} , de l'anglès *open circuit*): quan el mòdul no té cap càrrega connectada (i per tant no circula intensitat pel circuit) i la seva superfície està il·luminada, el voltatge augmenta lleugerament i arriba a un màxim. És el punt del gràfic en què la intensitat val zero, és a dir, el punt de tall amb l'eix d'abscisses. En el nostre cas, per a una temperatura de 25 °C, el voltatge de circuit obert serà de 44,6 V.

3) Punt de màxima potència: dels diferents punts que formen la corba I-V, n'hi ha un que determina una potència màxima. Com que estem parlant de corrent continu, la potència (P) és el producte del voltatge (V) per la intensitat (I), és a dir:

$$P = V \cdot I \quad (45)$$

Per tant, el punt de màxima potència serà aquell que en el gràfic maximitzi l'àrea del rectangle que obtenim per cada punt. En el nostre cas, i seguint l'exemple de la figura 50, el punt de màxima potència a 25 °C és el d'intensitat (I_{pmp} , intensitat del punt de màxima potència) igual a 4,77 A i voltatge (V_{pmp} , voltatge del punt de màxima potència) igual a 35,7 V. Tindrem, per tant, que la màxima potència (W_p) d'aquest mòdul és de 170 W ($35,7 \cdot 4,77$). Aquest va-

lor el traurem de les característiques proporcionades pel fabricant, ja que el punt del gràfic on es maximitza l'àrea no és evident i caldria usar mètodes matemàtics per a trobar-lo, els quals queden fora de l'abast d'aquest mòdul.

4) Factor de forma (FF): és una relació matemàtica que posa de manifest la proporcionalitat entre el valor de la superfície del rectangle delimitat pel punt de màxima potència ($V_{pmp} \cdot I_{pmp}$) (assenyalat en la figura 51) i el rectangle que es formaria des dels valors màxims de la corba ($V_{co} \cdot I_{cc}$) (assenyalat en la figura 50). Es tracta d'un valor adimensional que és útil per a comparar el comportament del panell davant de variacions de radiació o temperatura.

Matemàticament es calcula com:

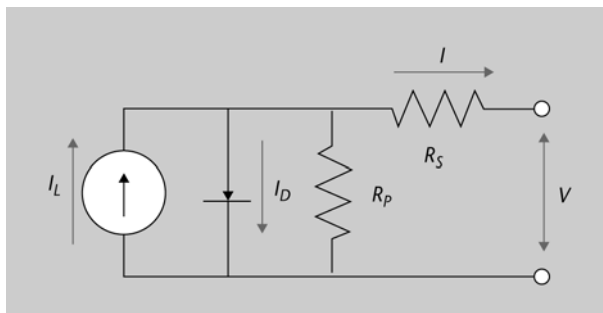
$$FF = (V_{pmp} \cdot I_{pmp}) / (V_{co} \cdot I_{cc}) \quad (46)$$

En el nostre cas, el factor de forma serà igual a 0,74. Com més s'aproximi a 1, millor serà el comportament del mòdul amb les variacions.

Circuit elèctric equivalent que descriu una cèl·lula fotovoltaica

Una cèl·lula fotovoltaica és un generador de corrent (I_L), que té un component de pèrdues que podem assimilar a un díode directament polaritzat (I_D). També hi tenim uns contactes elèctrics que s'oposen al pas del corrent i que podem assimilar a una resistència en sèrie (R_S). Finalment, hi ha uns fenòmens de recombinació interna d'electrons en els extrems del material que són difícils de quantificar i representar, i que s'assimilen a una resistència en paral·lel (R_P). Si amb tots aquests factors fem una representació de l'esquema del circuit elèctric, obtenim el que es mostra en la figura 52, on s'hi representen tots els elements que hem descrit.

Figura 52. Circuit elèctric equivalent d'una cèl·lula fotovoltaica



6.1.2. Acumulació: bateries

Els sistemes autònoms, no connectats a la xarxa, necessiten un sistema d'acumulació que permeti independitzar el moment de generació de l'electricitat del moment de demanda.

En el cas de les instal·lacions fotovoltaïques, aquesta funció la realitza normalment un sistema de bateries. Per complir amb les seves funcions, és important que el sistema d'acumulació permeti diversos cicles de càrrega i descàrrega sense perdre propietats d'acumulació.

Les funcions bàsiques del sistema de bateries són:

- subministrar una potència instantània superior a la dels mòduls fotovoltaics;
- mantenir estable el voltatge de la instal·lació;
- subministrar energia en els moments en què no hi hagi radiació. Aquesta situació es pot donar, per exemple, en els cicles dia-nit o quan, a causa del mal temps, no es produeixi energia elèctrica fotovoltaica.

Les bateries que s'utilitzen majorment a les instal·lacions solars fotovoltaiques són les de plom i àcid, per motius econòmics. L'àcid d'aquestes bateries és normalment àcid sulfúric.

Un aspecte bàsic per al funcionament de les bateries és la capacitat d'acumulació, que us detallem en el subapartat següent.

Capacitat d'acumulació de les bateries

La capacitat d'acumulació (C_B) de les bateries és una qüestió bàsica que cal tenir en compte. Aquesta s'expressa en amperes hora (Ah) i es calcula multiplicant la intensitat de descàrrega que pot proporcionar la bateria (I , en amperes) pel temps de descàrrega (t , en hores).

Així:

$$C_B (\text{Ah}) = I (\text{A}) \cdot t (\text{h}) \quad (47)$$

Quant a la càrrega d'energia de la bateria, la profunditat de descàrrega és el paràmetre que ens indica a quin nivell de descàrrega hem arribat (al 50% de la capacitat, al 10%, etc.).

Per exemple, una bateria que indiqui una capacitat d'acumulació de 650 Ah_{c100} pot proporcionar 6,5 A en una descàrrega de 100 h, o bé 13 A en una descàrrega de 50 h.

En realitat, però, la capacitat d'acumulació no és lineal. Caldrà tenir molt en compte que, en funció del tipus de descàrrega que fem, el rendiment de la bateria no serà el mateix. Si fem una descàrrega suau i lenta, el rendiment serà bo i sí que podrem aprofitar tota la capacitat de càrrega indicada.

Si, per contra, fem una descàrrega ràpida, d'una gran intensitat en poques hores, la bateria s'escalfarà i, per tant, el rendiment de la reacció serà més baix i, com a conseqüència, perdrem també capacitat de la bateria. El mateix passarà amb el règim de càrrega: si la carreguem amb una intensitat alta i en poques

Temps de descàrrega

El temps de descàrrega és el temps que transcorre des que comencem a consumir energia de la bateria fins que aquesta arriba al final del cicle, és a dir, a l'estat de mínima càrrega que pot assolir sense perdre capacitat de càrrega o fer-se malbé.

Capacitat d'una bateria

El valor de la capacitat de descàrrega s'expressa en amperes hora i un subíndex c100, que indica que aquesta capacitat de la bateria la tindrem per a un cicle de descàrrega de 100 h.

hores, tindrem menys energia acumulada. De fet, si mai heu tingut problemes amb la bateria del cotxe després de deixar-lo parat durant un temps, haureu vist que, a vegades, el mecànic proposa deixar-la una nit fent una càrrega suau i profunda. D'aquesta manera, si la bateria està en condicions, es pot tornar a recuperar sense que hagi perdut la seva capacitat. En casos extrems en què se'n faci un mal ús, la bateria serà irrecuperable i l'haurèm de canviar.

En qualsevol cas, si mantenim un sistema de càrrega i descàrrega suau de les bateries aconseguirem allargar-ne la vida útil. És per això que en una instal·lació solar fotovoltaica amb acumulació és imprescindible disposar d'un regulador, com el que descriurem en el subapartat següent.

6.1.3. Regulació

Un element clau de les instal·lacions fotovoltaïques, per protegir els panells fotovoltaics i les bateries, i alhora allargar-ne la vida útil, és el regulador.

Un **regulador** és un aparell que gestiona la instal·lació i que, amb certa informació, dóna ordres i fa actuar el sistema solar per a evitar danys als elements.

Cal protegir sobretot el sistema de bateries, que juntament amb els panells són els elements més cars.

Les principals funcions o prestacions dels reguladors són:

- Protecció contra la sobrecàrrega de l'acumulador (també es coneix com a tall per alta): és la funció bàsica del regulador, i en la seva absència, les bateries s'escalfarien i això podria provocar problemes de funcionament o avaries.
- Alarma per bateria baixa: el regulador emet senyals sonors o lluminosos quan l'acumulador està força descarregat. D'aquesta manera, l'usuari pot moderar el seu consum i evitar descàrregues profundes de les bateries, que són perjudicials per a la vida útil d'aquestes.
- Desconnexió per bateria baixa (o tall per baixa): si el nivell de càrrega de l'acumulador és massa baix, el regulador talla directament el subministrament elèctric per a evitar descàrregues profundes de les bateries, que són perjudicials, tal com hem vist en el subapartat 6.1.2.
- Protecció contra curtcircuits: aquesta funció permet protegir el regulador mateix i el sistema de bateries contra els curtcircuits que es puguin donar en els circuits elèctrics de consum de la instal·lació.

- Visualització de funcions: molts reguladors tenen diferents opcions que ens permeten obtenir informació de l'estat de la instal·lació en cada moment. Per exemple, la intensitat que donen els mòduls fotovoltaics, l'estat de les bateries, etc.

A l'hora de seleccionar un regulador haurem de tenir en compte dos paràmetres:

- 1) el voltatge de funcionament, que haurà de ser el mateix que el del sistema de bateries (12, 24 o 48 V); i
- 2) la intensitat màxima de comandament, que haurà de ser un 10% superior a la màxima que puguin donar els mòduls fotovoltaics instal·lats.

Hi ha dos tipus de reguladors: els de tipus paral·lel i els de tipus sèrie. Els primers només són recomanables per a les instal·lacions petites, ja que tenen moltes menys prestacions i s'espatllen més sovint per sobreescalfament. En les instal·lacions grans es faran servir, doncs, els de tipus sèrie.

Actualment, la versió més sofisticada d'aquests equips són els reguladors amb seguiment del punt de màxima potència. Aquests reguladors independitzen elèctricament el sistema de bateries del camp de captadors solars, i permeten així que els panells fotovoltaics no treballin al voltatge del sistema de bateries (12, 24 o 48 V), sinó que poden treballar en el punt de màxima potència i així obtenim més energia.

6.1.4. Inversor continu-altern

Fins aquí hem vist tres elements clau d'una instal·lació fotovoltaica: els mòduls que capten i transformen l'energia solar; les bateries que acumulen l'energia; i el regulador que protegeix els elements d'un possible mal funcionament. A part d'aquests tres elements, una instal·lació fotovoltaica ha de tenir un element que s'encarregui de transformar el corrent continu dels mòduls fotovoltaics o de les bateries en corrent altern apte per al consum de la instal·lació elèctrica. Aquest element és l'inversor o ondulator.

A les primeres instal·lacions d'energia solar fotovoltaica s'adaptaven tots els consums i aparells de l'habitatge per tal que poguessin funcionar amb corrent continu. Aquest fet provocava que la gamma d'electrodomèstics i aparells fos molt reduïda, a part que també resultaven més cars per la poca sortida que tenien.

Corrent continu

El corrent continu és aquell que no varia amb el temps. El corrent altern té un comportament sinusoidal, amb una freqüència de, per exemple, 50 Hz a Europa i 60 Hz a Amèrica.

Amb l'evolució de l'electrònica de potència van aparèixer els aparells convertidors de corrent continu a corrent altern, que són els anomenats **inversors** o **onduladors**.

L'ús dels inversors comporta una sèrie d'avantatges, com poden ser:

- la facilitat de compra d'aparells elèctrics, la qual cosa permet accedir als d'alta eficiència;
- el manteniment de valors i forma d'ona estables de voltatge, independentment de l'estat de càrrega de les bateries; i
- el fet de treballar a voltatges superiors, la qual cosa permet reduir la secció del cablejat de l'habitatge, amb el consegüent estalvi econòmic, i instal·lar-hi les proteccions elèctriques habituals. També es redueixen les pèrdues per efecte Joule.

En resum, l'inversor possibilita que casa nostra funcioni com si estigués connectada a la xarxa. L'ús d'aquests aparells també comporta certs inconvenients, com ara que:

- la instal·lació consta d'un element més, i si aquest s'espantia no hi haurà subministrament;
- l'inversor té certes pèrdues que s'han de compensar amb la instal·lació de més captadors fotovoltaics (s'estima que les pèrdues associades oscil·len entorn del 5%);
- per a les instal·lacions petites, el cost de l'inversor pot representar una despesa important (entorn del 20% de la inversió);
- els inversors barats poden causar problemes d'interferències i sorolls en ràdios, telèfons mòbils o emissores.

Les principals característiques que defineixen un inversor són:

- a) El voltatge o la tensió nominal d'entrada: haurà de ser la mateixa que la de l'acumulador (12, 24, 48 V).
- b) El voltatge de sortida: serà de 230 V, el normal a la xarxa elèctrica europea.
- c) La potència nominal en kW: serà la potència màxima que podrà subministrar l'inversor a la instal·lació. Entre la gamma d'inversors, haurem de triar el que ens porti la potència màxima que necessitem, i si no n'hi ha cap, podem optar per connectar-ne dos. Aquesta potència correspondria, en cas que féssim a casa nostra una instal·lació fotovoltaica autònoma, a la potència que tenim contractada a la companyia elèctrica.
- d) Estabilitat del voltatge de sortida: per motius de qualitat i bon funcionament dels aparells, s'haurà de mantenir entorn del 10%, que és el mateix que admeten les xarxes elèctriques.

e) Tipus d'ona: en funció del model d'inversor podem tenir tres tipus d'ones diferents, cosa que afectarà també la qualitat del corrent que subministrarem:

- Ona quadrada: són els més senzills i econòmics, però també poc estables. No suporten gaires sobrecàrregues i causen moltes interferències en els aparells electrònics de ràdio i telefonia. Serveixen principalment per als circuits d'il·luminació i càrregues resistives.
- Ona sinusoidal modificada: són els més comuns per la seva bona relació qualitat-preu, i suporten bé les sobrecàrregues, però també poden causar interferències i sorolls en els aparells de telecomunicacions.
- Ona sinusoidal pura: són els equips que proporcionen més qualitat de servei i són molt estables. Suporten bé els pics de consum i no causen interferències. Són també els més cars.

f) Capacitat de sobrecàrrega i protecció tèrmica: haurem de tenir molt en compte si tenim motors elèctrics a la instal·lació, ja que en arrencar els motors, aquests poden consumir fins a cinc vegades la seva potència nominal.

g) Eficiència: l'eficiència de l'inversor estarà en funció de la potència de subministrament. Haurem de verificar que, en el rang normal de treball, el rendiment de l'inversor sigui alt.

h) Engegada automàtica i estat d'espera: l'inversor es connecta automàticament en detectar-hi consum, i quan no n'hi ha pot apagar circuits per a evitar els possibles "consums fantasmes", dels quals parlarem en el subapartat següent.

i) Protecció contra la inversió i els curtcircuits: aquestes opcions són bàsiques per a protegir la instal·lació durant la seva vida útil.

Així doncs, l'inversor serà un element més de la instal·lació solar fotovoltaica, que ens permetrà transformar el corrent continu de les cèl·lules fotovoltaïques o de les bateries en corrent altern. D'aquesta manera, el consum i la instal·lació seran iguals als de les instal·lacions connectades a la xarxa.

En cas que tinguem una instal·lació connectada a la xarxa, l'inversor que haurem de seleccionar haurà de ser l'adequat a aquesta aplicació. En el mercat hi ha gammes d'inversors optimitzats per a la connexió a la xarxa i altres optimitzats per a les instal·lacions solars autònomes. Per tant, tindrem en compte aquest factor a l'hora de seleccionar el model d'inversor adequat a cada cas.

6.2. Dimensionament de la instal·lació

Un cop hem descrit tots els elements que formen una instal·lació solar fotovoltaica, és el moment de passar a descriure com es dimensiona una instal·lació d'aquest tipus.

Per fer-ho, anirem pas a pas, i definirem quins són els diferents aspectes a tenir en compte i els càlculs que hem de fer.

Activitat

A mesura que aneu llegint l'apartat, feu el càlcul de la instal·lació solar fotovoltaica que necessitaríeu per satisfer el consum de la vostra llar.

A tall de resum, el dimensionament de la instal·lació que us detallem tot seguit tindrà en compte els conceptes següents:

- 1) Dades d'entrada
 - a) Demanda energètica (característiques dels consums a cobrir)
 - b) Càlcul de l'energia necessària
 - c) Radiació solar incident
- 2) Dades a calcular
 - a) Potència dels mòduls necessària
 - b) Capacitat i voltatge de l'acumulador
 - c) Secció de cable necessària
 - d) Tipus d'equips auxiliars necessaris
 - e) Rendibilitat econòmica del sistema

6.2.1. Demanda energètica

El primer que cal tenir en compte per fer el càlcul d'una instal·lació solar fotovoltaica autònoma és la demanda d'electricitat que tindrem.

Per dur a terme els càlculs, anirem veient, per a cada equip, quin és el consum mitjà i obtindrem així un consum o una demanda a satisfer.

En l'exemple que desenvolupareu, el càlcul de la instal·lació de la vostra llar, us serà fàcil conèixer els diferents consums, ja que actualment disposeu d'electricitat i ja hi esteu acostumats. El problema que hi ha sovint en calcular la demanda és que, com que encara no es té electricitat (penseu que la instal·lació es posa, precisament, per a passar a tenir-ne), no es quantifiquen bé els consums. Normalment, quan es demana al futur usuari les hores de consum dels diferents aparells, aquest tendeix a respondre a la baixa.

S'ha vist que, un cop en funcionament, l'electricitat és molt útil per a la llar i cada cop hi ha més consums que no estaven calculats, així que les instal·lacions es queden "petites" de seguida. Serà important, doncs, tenir certa psicologia amb el futur usuari i preveure l'ús d'aparells electrònics futurs, perquè la instal·lació sigui tan adequada als usos necessaris com sigui possible.

Per a començar amb el càlcul de consums, el primer que haurem de determinar serà:

- 1) tipus d'utilització: caps de setmana o diària
- 2) estacionalitat de la utilització: estiu / hivern
- 3) nombre d'usuaris del sistema
- 4) instal·lació existent: producció i subministrament (si n'hi ha)

A partir d'aquestes dades farem una previsió i elaborarem una taula de consum, tenint en compte la potència i l'ús que es farà dels diferents equips, pel que fa al consum mitjà diari. En el cas de casa vostra, que és l'exemple que heu d'anar fent en paral·lel a la lectura d'aquest apartat, us serà senzill. En els casos en què no hi ha una instal·lació prèvia, haurem d'utilitzar dades i valors mitjans.

Per a determinar els consums elèctrics, el més exacte seria agafar els catàlegs dels fabricants dels diferents equips i extreure'n les dades. Com que això representaria una inversió de temps considerable, es pot optar per utilitzar taules amb el valor més normal de consum dels diferents aparells, com la que us adjuntem a continuació.

Els consums els dividirem en dues categories:

- 1) Aparells d'ús variable: són aquells que es fan servir unes hores determinades al dia, quan l'usuari els connecta. El consum que tindrem serà el producte de la seva potència en watts (W), que és la indicada en la figura 53, per les hores (h) diàries de funcionament previstes.

Figura 53. Potència elèctrica dels aparells domèstics d'ús variable

Aparell	Potència (W)	Aparell	Potència
Bombeta d'incandescència	25-100 (60)	Receptor de ràdio	35-50
Bombeta de baix consum	9-20 (15)	Batedora	200-300
Fluorescent	4-58 (36)	Extractor de cuina o de bany	50-70
Bombeta halògena	15-300	Reproductor de vídeo	30-45
Televisor	50-150	Planxa	800-2.000
Ràdio	10-25	Aspirador	300-600
Casset	35-50	Ordinador	100-150
Tocadiscs	100-200	Monitor en color	100-200
Bomba d'aigua	70-500	Impressora	15-25
Assecador de cabells	500-2.000	Mòdem telefònic	15-30
Ventilador	25-50	Torradora	500-1.000
Cuina elèctrica	2.000-7.000	Microones	500-700

Aparell	Potència (W)	Aparell	Potència
Forn elèctric	1.500-2.500	Espremedor de taronges	30-160
Liquadora	200	Cafetera elèctrica	600-1.100
Fregidora	1.400-2.100		

2) Aparells d'ús continuat: l'ús d'aquests aparells és continuat durant tot el dia, o bé per cicles, com és el cas de la rentadora. En la figura 54 s'adjunten alguns valors d'aquests consums

Figura 54. Energia elèctrica consumida pels aparells domèstics d'ús continuat

Aparell	Energia (Wh/dia)	Aparell	Energia (Wh/dia)
Radiotelèfon	150	Amplificador d'antena	125-150
Rentadora en fred	400 / rentada	Contestador automàtic	175-250
Rentadora 90 °C (5 kg)	1.800-2.500 / rentada	Radiorellotge	65-100
Rentavaixel·la (14 serveis)	1.300-1.700 / rentada	Ambientador elèctric	20-30
Assecadora 5 kg	3.200-3.500 / assecat	Espantamosquits elèctric	20-30
Nevera normal (combi, 300 l)	1.700-2.500	Nevera normal (300 l)	800-1.500
Nevera de baix consum (combi, 300 l)	800-1.200	Congelador normal (300 l)	1.500-2.000
Nevera de baix consum (300 l)	300-400	Congelador de baix consum (250 l)	650-800

A part d'aquests dos grups de consums, i sobretot per al càlcul del consum de casa vostra, és molt important que tingueu en compte els anomenats *consums fantasmies*. Aquests són els consums que es generen de manera completament inconscient, i sobretot són deguts al mode en espera o *stand-by* dels aparells. Aquests consums, que poden semblar insignificants, tenen una repercussió notable en el consum global, i es diu que representen entre el 2% i el 5% de l'energia mundial consumida! Tot això ens ho estalviariem si apaguéssim els aparells totalment, o bé si connectéssim un conjunt d'aparells a una regleta amb interruptor i l'apaguéssim quan deixem de fer-ne ús. Actualment ja hi ha una normativa que en un futur prohibirà la comercialització dels aparells que tinguin aquest tipus de consum. Perquè els pugueu determinar, us adjuntem la taula de la figura 55, de la que podreu extreure els valors més comuns d'aquests consums.

Figura 55. Energia elèctrica diària dels "consums fantasmies"

TV apagat, en estat d'"encès remot"	300 Wh/dia
Vídeo	260 Wh/dia
Forn de microones amb rellotge	160 Wh/dia

En la figura 55, la unitat Wh/dia significa l'energia en watts hora (Wh) que consumeix un aparell en un dia.

Alimentadors de petits aparells	200 Wh/dia
Equip de so amb control remot	160 Wh/dia
Caldera de gas amb encesa electrònica	250 Wh/dia
Alarma domèstica	160 Wh/dia
Telèfon amb alimentació elèctrica	240 Wh/dia
Fax sense funcionar però activat	240 Wh/dia

Per a les instal·lacions solars fotovoltaïques es desaconsella completament l'ús d'aparells d'escalfament elèctric: forns elèctrics, microones, radiadors elèctrics, termos elèctrics, rentadores d'aigua calenta, assecadores, etc. Caldrà buscar alternatives a aquests consums per a les instal·lacions solars fotovoltaïques autònomes.

Activitat

Per a calcular el vostre consum, situeu aquests aparells, si en feu ús, en una zona separada de la taula de càlcul, per tal de veure quina repercussió tenen en el consum global i com variarà el dimensionat de la instal·lació si els teniu en compte o no.

A partir de les dades de les figures precedents, elaboreu una taula com la que s'adjunta i caracteritzeu el vostre consum diari. Això seria el que faríem per a determinar la demanda futura del nostre sistema.

Consums variables				
Aparell	Núm. d'aparells	Potència (W)	Temps (h/dia)	Energia (Wh/dia)
Total consums variables				
Consum continuats				
Aparell	Núm. d'aparells o serveis/dia	Energia (Wh/dia o servei)		Energia (Wh/dia)
Total consums continuats				
Consums fantasmes				
Aparell	Núm. d'aparells o serveis/dia	Energia (Wh/dia o servei)		Energia (Wh/dia)
Total consums fantasmes				
Total consum diari previst				

6.2.2. Càlcul de l'energia necessària

Un cop hàgiu determinat el consum diari previst, li aplicarem un factor global per a determinar l'energia que hauran de subministrar els mòduls fotovoltaics. Com que el rendiment dels diferents elements que formen la instal·lació fotovoltaica (regulador, inversor i bateries) no és del 100%, el valor de l'energia diària que han de subministrar els mòduls fotovoltaics sempre serà superior al valor del consum diari previst.

Per a determinar el rendiment de la instal·lació utilitzarem un valor estàndard de rendiment global, que serà del 75% per a les instal·lacions que disposin de subministrament de corrent altern, i del 80% per a les instal·lacions que disposin de subministrament de corrent continu (que és més alt perquè no tenen l'inversor).

Així doncs, per efectuar el càlcul dividirem el total del consum diari que hem obtingut en l'apartat anterior pel rendiment de la instal·lació. L'expressió matemàtica serà:

$$\text{Energia necessària} = \text{Consum diari previst} / \text{Rendiment global instal·lació} \quad (48)$$

Exemple de dimensionat (I): plantejament del càlcul

Comencem a desenvolupar el nostre exemple (vosaltres haureu de fer-ho amb els valors que obtingueu del càlcul de la instal·lació necessària a casa vostra). Si en el subapartat 6.2.1 tenim una demanda de 1.850 Wh, i tenim una instal·lació que funciona amb corrent altern (i, per tant, amb un rendiment del 75%), l'energia necessària, i que hauran d'aportar el conjunt de mòduls fotovoltaics, serà de 2.467 Wh.

D'aquesta manera hem obtingut l'energia necessària per a la nostra instal·lació.

6.2.3. Radiació solar disponible

Un cop hem determinat la demanda que haurem de satisfer amb els mòduls fotovoltaics, hem de quantificar el recurs que tindrem, és a dir, la radiació solar incident.

Com que en el cas de les instal·lacions fotovoltaïques autònomes es vol disposar d'energia elèctrica durant tots els dies de l'any, utilitzarem com a valor de radiació solar incident el corresponent al moment de menys radiació: el mes de desembre o solstici d'hivern. Ho fem així perquè ens volem assegurar que cobrim la demanda en la pitjor situació de l'any, quan la radiació solar incident és més baixa. Així, si per a aquest dia la producció elèctrica és suficient per satisfer la demanda, segur que ho serà per a la resta de dies de l'any.

Per conèixer el valor de la radiació solar incident, recorrerem a les taules de radiació global diària de l'emplaçament. Els valors de la radiació solar incident

es presenten en taules com la que s'adjunta en la figura 56, extreta de l'*Atlas de radiació solar de Catalunya* i que correspon a la ciutat de Barcelona.

Figura 56. Taula de la radiació solar incident per a la ciutat de Barcelona

Radiació solar global diària sobre superfícies inclinades (MJ/m²/dia). Estació: Barcelona

Orientació: 0°													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
0°	6,80	9,65	13,88	18,54	22,25	24,03	23,37	20,42	16,05	11,40	7,73	6,04	15,04
5°	7,70	10,56	14,72	19,15	22,58	24,21	23,63	20,93	16,85	12,32	8,66	6,94	15,71
10°	8,56	11,41	15,47	19,67	22,78	24,25	23,74	21,31	17,54	13,17	9,55	7,80	16,29
15°	9,37	12,19	16,14	20,07	22,84	24,13	23,70	21,59	18,13	13,95	10,38	8,61	16,78
20°	10,12	12,90	16,70	20,35	22,76	23,87	23,52	21,76	18,61	14,63	11,15	9,37	17,17
25°	10,81	13,52	17,17	20,51	22,60	23,48	23,24	21,80	18,98	15,23	11,85	10,07	17,46
30°	11,43	14,07	17,52	20,54	22,32	23,02	22,86	21,71	19,23	15,73	12,47	10,71	17,65
35°	11,97	14,52	17,77	20,45	21,90	22,43	22,34	21,48	19,36	16,13	13,01	11,28	17,73
40°	12,44	14,88	17,91	20,23	21,35	21,70	21,69	21,12	19,37	16,43	13,47	11,77	17,71
45°	12,83	15,15	17,94	19,89	20,67	20,84	20,90	20,63	19,26	16,63	13,85	12,19	17,58
50°	13,14	15,32	17,86	19,43	19,87	19,86	20,00	20,02	19,03	16,72	14,13	12,53	17,33
55°	13,36	15,40	17,67	18,85	18,95	18,77	18,97	19,29	18,68	16,71	14,32	12,78	16,98
60°	13,49	15,37	17,36	18,16	17,92	17,60	17,84	18,44	18,22	16,59	14,42	12,95	16,53
65°	13,53	15,25	16,95	17,36	16,83	16,41	16,71	17,48	17,65	16,36	14,42	13,04	16,00
70°	13,49	15,03	16,44	16,46	15,70	15,14	15,48	16,43	16,97	16,03	14,33	13,03	15,38
75°	13,35	14,72	15,83	15,47	14,48	13,78	14,18	15,35	16,19	15,60	14,14	12,94	14,67
80°	13,13	14,31	15,12	14,41	13,18	12,36	12,80	14,17	15,31	15,08	13,86	12,77	13,87
85°	12,82	13,81	14,32	13,29	11,82	10,93	11,35	12,93	14,34	14,45	13,50	12,51	13,00
90°	12,43	13,23	13,44	12,11	10,41	9,57	9,99	11,62	13,30	13,74	13,04	12,16	12,08

Enllaços d'interès

L'*Atlas de radiació solar de Catalunya* es pot descarregar de:

- <http://www20.gencat.cat/docs/icaen/Migracio%20automatica/Documents/Activitats%20i%20dades%20energetiques/Arxius/monografic12.pdf>

Per a altres emplaçaments, podeu consultar l'*Atlas de radiació solar a Europa*:

- <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/radmonth.php>

Per obtenir els valors de radiació solar incident, caldrà que tinguem en compte dos factors:

1) L'orientació del mòdul respecte al sud: a l'hemisferi nord, l'orientació amb més radiació és cap al sud. Quan el mòdul solar estigui orientat completament al sud tindrem un angle d'orientació de 0°. Per a les altres orientacions que no siguin exactament cap al sud, haurem de dir quin angle tenim respecte a aquest (per exemple, 45° si es tracta d'una orientació sud-est o sud-oest, o 90° si és una orientació est o oest, etc.). La radiació és la mateixa si estem orientats cap a l'est o cap a l'oest, i només ens importa el valor absolut de l'angle. En la taula de la figura 56, l'orientació és de 0°, és a dir, que els valors són vàlids per als mòduls orientats completament cap al sud.

2) La inclinació del mòdul respecte a l'horitzontal: també caldrà tenir en compte l'angle del mòdul amb el terra. Si el mòdul està paral·lel al terra, tindrem una inclinació de 0°. A mesura que aixequem el mòdul tindrem angles diferents, fins a arribar a un màxim de 90°, que seria el cas d'un mòdul col·locat en una paret. Fixeu-vos que en la taula de la figura 56 cada fila indica un grau d'inclinació diferent dels mòduls.

Si observeu els valors de la taula de la figura 56 podeu apreciar que el mes més desfavorable és el mes de desembre i que, per tant, la inclinació que escolliríem seria la de 65°. Així maximitzem l'energia solar incident per a aquest mes.

Per a les instal·lacions connectades a la xarxa no es buscarà cobrir el dia de condicions més desfavorables, sinó que es buscarà la producció màxima anual. Caldrà, per tant, veure quina inclinació capta més radiació solar incident en tot l'any. Si tornem a la radiació de la ciutat de Barcelona (figura 56), veiem que la inclinació ideal en aquest cas seria de 35°.

Exemple de dimensionat (II): valors de radiació

Continuant amb el nostre exemple de dimensionat, prendrem el valor de radiació solar a Barcelona i agafarem una inclinació de 65°, com per a una planta solar fotovoltaica autònoma.

Observeu que les dades de radiació de les taules venen expressades en megajoules (MJ) per metre quadrat i dia. Aquest valor ens indica l'energia total diària que incideix en una superfície.

Els fabricants de mòduls fotovoltaics, en canvi, expressen la producció dels mòduls en watts pic (W_p). Aquest valor expressa la potència del mòdul per a una radiació estàndard de potència 1.000 W/m^2 . Per a poder efectuar els càlculs, el que farem serà calcular les hores de sol pic equivalents. Què volem dir? Doncs que, a partir de l'energia de la radiació solar incident, calcularem el nombre d'hores equivalents que necessitem perquè una radiació de potència 1.000 W/m^2 ens doni la mateixa energia. Aquest valor ens servirà per calcular, en el subapartat 6.2.4, el nombre de mòduls necessaris.

Per a convertir l'energia de la radiació solar incident de les taules de la figura 56 a hores de sol pic equivalents, realitzarem els passos següents:

1) Passem l'energia de radiació de $\text{MJ/m}^2/\text{dia}$ a $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$, tenint en compte que $3,6 \text{ MJ}$ equivalen a 1 kWh . Dividirem, doncs, el valor de la radiació per $3,6$.

Per exemple, en el nostre cas tenim una radiació de $13,04 \text{ MJ/m}^2/\text{dia}$, que equival a $3,62 \text{ Wh/m}^2/\text{dia}$.

2) Calculem les hores de sol pic equivalents, dividint l'energia de radiació que hem obtingut en l'anterior apartat per la potència de radiació estàndard de calibrar els mòduls. Aquest valor acostuma a ser de 1.000 W/m^2 , però haurem de comprovar en el full de característiques tècniques del mòdul (descrites en el subapartat 6.1.1) que el valor de radiació per al qual s'han obtingut els resultats és de 1.000 W/m^2 . Així tindrem:

$$\begin{aligned} \text{Hores de sol pic, HSP (h)} &= \text{Energia radiació de les taules (kWh/m}^2/\text{dia)} \\ &/ \text{Potència de calibrat dels mòduls (kW/m}^2) \end{aligned} \quad (49)$$

En el nostre cas, dividim $3,62 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ per $1 \text{ kW/m}^2 (= 1.000 \text{ W/m}^2)$, i obtenim un valor $3,62$ hores de sol pic al dia.

D'aquesta manera haurem obtingut, a partir de les taules de radiació solar incident i del full de característiques tècniques del mòdul fotovoltaic que utilitzem, el nombre d'hores equivalents de radiació solar incident a 1.000 W/m^2 , que ens indica l'energia que tindrem disponible per a la nostra instal·lació.

6.2.4. Nombre de mòduls fotovoltaics necessaris

Un cop tenim la demanda diària a cobrir i les hores de sol pic equivalents per a la radiació solar incident de l'emplaçament de la instal·lació, passem a calcular el nombre de mòduls necessaris.

El càlcul del nombre de mòduls és el més important, ja que determinarà el càlcul de la resta de components i també ens determinarà el cost de la instal·lació.

Per a saber el nombre de mòduls farem un dels dos càlculs que us detallem a continuació, en funció del tipus d'ús de la planta:

Per a instal·lacions d'ús diari, farem el càlcul a partir de les dades obtingudes en els subapartats 6.2.1, 6.2.2 i 6.2.3, de la manera següent:

$$\text{Nombre de mòduls} = \text{Energia necessària (Wh/dia)} / (\text{Potència pic del mòdul (W}_p) \cdot \eta_{camp} \cdot \text{Radiació solar (HSP/dia)}) \quad (50)$$

2) Per a instal·lacions de cap de setmana, farem el càlcul també a partir de les dades obtingudes en els subapartats 6.2.1, 6.2.2 i 6.2.3, però en aquest cas suposarem tres dies de demanda a la setmana. Així, l'equació queda de la manera següent:

$$\text{Nombre de mòduls} = 3 \cdot \text{Energia necessària (Wh/dia)} / (\text{Potència pic del mòdul (W}_p) \cdot \eta_{camp} \cdot 7 \text{ Radiació solar (HSP/dia)}) \quad (51)$$

D'aquestes equacions, els dos termes que encara no coneixem són:

a) la potència pic del mòdul l'obtindrem del full tècnic que elabora el fabricant, com es mostra per exemple en la figura 57. En el full del fabricant veiem els diferents tipus de mòduls en columnes (IS-165, IS-170, IS-175, IS-180) amb els valors característics obtinguts pel fabricant en els assaigs de laboratori i explicats en el subapartat 6.1.1 (V_{oc} , I_{cc} , I_{pmp} , V_{pmp} i $P_{màx}$).

Watts pic

Els watts pic (W_p) són equivalents als watts elèctrics normals, però s'utilitzen en el camp de l'energia fotovoltaica per indicar la potència màxima (pic) que podem obtenir dels mòduls.

Figura 57. Dades tècniques d'un mòdul fotovoltaic d'Isotofón

COMPORTAMIENTO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA	IS-165	IS-170	IS-175	IS-180
POTENCIA ELÉCTRICA MÁXIMA (P_{max})	165	170	175	180
TENSIÓN EN CIRCUITO ABIERTO (V_{oc})	44,3	44,6	44,8	45,2
TENSIÓN EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (V_{mpp})	35,6	35,7	36,2	36,5
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (I_{sc})	5,0	5,13	5,20	5,30
CORRIENTE EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (I_{mpp})	4,64	4,77	4,84	4,93
EFICIENCIA (%)	13,1%	13,4%	13,8%	14,2%
TOLERANCIA DE POTENCIA ($\%P_{max}$)	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$

Datos medidos en simuladores solares Clase A, según IEC-60904-9 Ed.2, certificado por TÜV Rheinland

b) el *rendiment del camp de captadors* (η_{camp}) és el valor que inclourà en el càlcul les pèrdues que es donen a la instal·lació, per la brutícia dels mòduls, la tolerància del fabricant, etc. Aquest rendiment tindrà un valor entre 0,70 i 0,80.

El símbol η correspon a la lletra grega eta minúscula.

Així doncs, a partir d'aquests valors podrem obtenir el nombre de mòduls necessaris per a la nostra instal·lació, en funció de la demanda i de la radiació solar incident.

Exemple de dimensionat (III): quantitat de panells

Continuem ara amb el dimensionat de la instal·lació necessària per a casa vostra, calculant el nombre de panells necessaris. Si seguim amb les dades que teníem a l'exemple:

- hem de produir una energia de 2.467 Wh (subapartat 7.2.2);
- el mes més desfavorable tenim 3,62 HSP (subapartat 7.2.3);
- considerarem que utilitzem els mòduls IS-170 de la taula de la figura 57, que ens donen una potència pic de 170 Wp; i
- suposarem que la nostra instal·lació és d'us diari, per tant, usem l'equació 50.

Així doncs, el nombre de mòduls estarà entre els següents marges:

$$\text{Núm. mòduls} = 2.467 \text{ Wh} / (170 \text{ Wp} \cdot 0,7 \cdot 3,62 \text{ h}) = 5,73 \quad (52)$$

$$\text{Núm. mòduls} = 2.467 \text{ Wh} / (170 \text{ Wp} \cdot 0,8 \cdot 3,62 \text{ h}) = 5,01 \quad (53)$$

Com que hem de seleccionar un nombre sencer de mòduls, n'escollirem sis, ja que un nombre parell de mòduls sempre ajuda a fer més senzilla la connexió de camp d'aquests. A més, si triem cinc mòduls no cobrirem la demanada.

6.2.5. Capacitat del sistema d'acumulació: nombre de bateries

El conjunt de bateries forma el sistema d'acumulació de la instal·lació. Així doncs, té la doble funció d'emmagatzemar energia diària per satisfer la demanda en hores en què no hi ha producció i també haurà d'aportar energia els dies que no se'n generi (per mal temps, per exemple).

Per tot això, el factor més important que haurem de tenir en compte és el nivell d'autonomia que volem assumir amb la instal·lació.

Els criteris que us proposem per a determinar els dies d'autonomia són els següents:

- de 7 a 15 dies per a instal·lacions totalment autònomes de difícil accés, on haurem de tenir tants dies d'autonomia com dies successius de núvols mostrin les estadístiques meteorològiques de la zona;

- de 4 a 6 dies per a sistemes d'electrificació rural d'ús diari. Podrem reduir aquest valor a 3 dies si disposem d'un generador o grup electrogen d'engegada automàtica; i
- de 2 a 3 dies per a l'electrificació d'habitatges de cap de setmana.

Per calcular la capacitat del sistema de bateries aplicarem l'expressió següent:

$$\text{Capacitat de la bateria (Ah)} = (\text{Energia necessària (Wh)} \cdot \text{Dies d'autonomia}) / (\text{Voltatge de les bateries (V)} \cdot \text{Profunditat de descàrrega de la bateria}) \quad (54)$$

Per a saber la profunditat de descàrrega de la bateria hauríem de seguir les indicacions del fabricant de bateries, però si no les tenim podem aplicar els barems següents:

- de 0,6 a 0,8 per a acumuladors estacionaris d'alt volum d'electròlit;
- de 0,4 a 0,5 per a acumuladors de tipus monobloc;
- de 0,2 a 0,3 per a acumuladors d'arrencada d'automòbil (que si bé no són molt recomanables, hi ha instal·lacions que els utilitzen).

La profunditat de descàrrega de les bateries, és a dir, el nivell percentual de càrrega mínima que pot assolir un acumulador, l'hem descrit en el subapartat 6.1.2.

Així, a partir dels valors del fabricant i dels dies d'autonomia que necessitem, determinarem el nombre de bateries necessàries de la nostra instal·lació.

Exemple de dimensionat (IV): quantitat de bateries

Calculem, per al nostre exemple, la capacitat necessària de les bateries. Per fer-ho utilitzarem les dades tècniques d'unes bateries de tipus monobloc que s'adjunten en la taula 58. En aquesta taula veiem, en la primera columna, els diferents models disponibles de bateries; en la segona, la tensió nominal de cadascuna; i en la tercera, dues possibles capacitats de càrrega (C_p) que hem descrit en l'apartat 6.1.2: una per a una descàrrega de 10 h i l'altra per a una descàrrega de 100 h. Com veieu, amb la descàrrega ràpida (10 h) sempre tenim un valor de C_p menor que amb la de 100 h. La resta de columnes indiquen les dimensions de les bateries i el pes.

Figura 58. Dades tècniques de diferents models de bateria de tipus monobloc (Isofotón)

MODEL	Tensió (V)	Capacitat a 25 °C (Ah)		Llargada (mm)	Amplada (mm)	Alçària (mm)	Pes amb àcid (kg)
		10 h	100 h				
12.AV.45	12	33	45	221	176	277	20,8
12.AT.68	12	50	68	221	176	277	24,8
12.AV.90	12	66	90	311	176	277	33,7
12.AV.136	12	100	136	389	176	277	45,6
12.AV.158	12	116	158	469	176	277	53,5

MODEL	Tensió (V)	Capacitat a 25 °C (Ah)		Llargada (mm)	Amplada (mm)	Alçària (mm)	Pes amb àcid (kg)
		10 h	100 h				
12.AV.204	12	150	204	553	176	277	65,5
6.AT.244	6	189	244	284	229	332	45,8
6.AT.279	6	216	279	284	229	332	48,7
6.AT.314	6	243	314	284	229	332	51,6

Els valors que utilitzarem seran l'energia necessària (2.467 Wh), els dies d'autonomia (5 dies), el voltatge de la bateria (12 V) i el valor de profunditat de descàrrega (0,45). Si substituïm aquests valors en l'equació 6.10, obtenim que la capacitat de descàrrega és:

$$\text{Capacitat de descàrrega} = (2.467 \cdot 5) / (12 \cdot 0,45) = 2.284 \text{ Ah}_{c100} \quad (55)$$

Amb aquesta descàrrega, les qualitats de la majoria de bateries es mantenen, per la qual cosa serà el cicle de descàrrega que utilitzarem per fer els càlculs.

En el nostre cas, i tenint en compte els diferents models que hi apareixen, seleccionariem el model 12.AV.204, ja que és el més gran i així tindrem menys unitats. Considerant que la capacitat és de 204 Ah_{c100}, tal com podem veure en la taula de la figura 58, si fem el càlcul tenim:

$$\text{Nombre de bateries} = 2.284 \text{ Ah}_{c100} / 204 \text{ Ah}_{c100} = 11,19 \quad (56)$$

Així doncs, necessitarem dotze bateries d'aquest model (el nombre enter immediatament superior a l'obtingut).

Ah

Ah són amperes hora.

Capacitat d'una bateria

El valor de la capacitat de descàrrega s'expressa en amperes hora i un subíndex c100, que indica que aquesta capacitat de la bateria la tindrem per a un cicle de descàrrega de 100 h.

6.2.6. Selecció dels altres elements de la instal·lació

A part dels elements principals de la instal·lació, que són els panells solars i les bateries, cal determinar la resta d'elements que formen la instal·lació i que hem descrit en el subapartat 6.1: el regulador, l'inversor, el cablejat i les proteccions.

En aquest apartat els dimensionarem per al nostre exemple, que recordeu que consta de sis mòduls fotovoltaics del model 170 i de dotze bateries del model 12.AV.204.

Paral·lelament, podeu fer els càlculs per a la vostra instal·lació.

El regulador

Per seleccionar el regulador tindrem en compte la intensitat màxima que pot suportar, la qual està determinada per la intensitat màxima que pot generar el camp de mòduls fotovoltaics. D'aquesta manera, el càlcul que farem serà:

$$\text{Intensitat màxima del regulador} > 1,10 \text{ intensitat màxima del camp de mòduls} \quad (57)$$

El valor 1,10 de l'equació 57 és simplement un factor de seguretat que es pren, per assegurar-se que no s'arriba mai al límit de la intensitat.

Exemple de dimensionat (V): tria del regulador

Si fem el càlcul per al nostre exemple, el nombre de mòduls és sis, i per facilitar-ne el muntatge, farem tres grups en paral·lel de dos mòduls en sèrie. Si mirem les especificacions del mòdul fotovoltaic de la figura 57 veiem que, per al model 170, la intensitat màxima és de 5,13 A. Per tant, segons aquesta configuració, tindrem:

$$I_{max} > 1,10 \cdot 5,13 \cdot 3 = 16,93 \text{ A} \quad (58)$$

Els reguladors tenen intensitats màximes de 10, 15, 20 i 25 A. En el nostre cas, escollirem un regulador de 20 A d'intensitat màxima com a mínim, que és la intensitat immediatament posterior a la intensitat que hem obtingut.

L'inversor

Per seleccionar l'inversor, el paràmetre clau serà la potència màxima de consum que podem tenir. És a dir, la demanda màxima simultània que hi haurà a la llar.

Pel que fa al càlcul, el que fem és sumar totes les potències dels aparells que hem llistat en el subapartat 6.2.1 i aplicar-hi un factor. Aquest factor es coneix com a **coeficient de simultaneïtat**, i indica el percentatge del total de la potència instal·lada que hem de fer servir simultàniament. Així, la potència de l'inversor que seleccionarem serà:

$$\begin{aligned} \text{Potència del convertidor} < & (\text{Suma de la potència nominal} \\ & \text{de tots els aparells de consum}) \cdot 0,75 \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \text{Potència del convertidor} > & (\text{Suma de la potència nominal} \\ & \text{de tots els aparells de consum}) \cdot 0,5 \end{aligned} \quad (60)$$

És a dir, la potència estarà continguda entre el 50% i el 75% de la potència nominal de tots els aparells de consum, ja estadísticament s'ha calculat que és la potència màxima que s'utilitza d'una instal·lació elèctrica.

Aquesta operació ens determinarà el rang de potència en què hem de seleccionar l'inversor.

Si en el nostre cas tenim un aparell amb una potència unitària, per si sol, superior al valor obtingut, haurem de considerar que aquesta potència és la de disseny de l'inversor. O, el que és el mateix, quan obtinguem el valor de potència haurem d'assegurar-nos que no hi ha cap aparell elèctric a la nostra instal·lació amb una potència superior.

Exemple de dimensionat (VI): tria d'un inversor

Continuant amb el nostre exemple, suposem que la potència total instal·lada que hem obtingut de les taules del subapartat 6.2.1 és de 3.850 W (hem de sumar la potència dels consums ocasionals i la dels continuats). Per tant, la potència del nostre inversor haurà de complir, segons les equacions 34 i 35:

$$P_{\text{convertidor}} < 2.887,5 \text{ W}$$

$$P_{\text{convertidor}} > 1.925 \text{ W}$$

Així doncs, escolliríem un inversor que tingui 2.000 o 2.500 W de potència màxima en funció dels models disponibles al catàleg del fabricant.

Si a la nostra instal·lació tenim un forn elèctric amb una potència de 3.000 W, haurem de comprar un convertidor que admeti aquesta potència màxima. Com que això augmentarà el cost del convertidor, pot ser bo intentar plantejar alternatives (per exemple, en aquest cas, un forn de gas).

Cablejat i proteccions

Finalment, el cablejat i les proteccions que seleccionarem seran les mateixes que per a una instal·lació normal de corrent altern, per exemple la de casa nostra. Així, per calcular aquests paràmetres seguirem les indicacions del Reglament electrotècnic per a baixa tensió, o la normativa estatal que s'hi apliqui. El càlcul d'aquests elements queda fora de l'abast d'aquesta assignatura.

6.3. Sistemes híbrids fotovoltaics-eòlics

Per a acabar amb aquest apartat, i a tall de conclusió, indicarem que en alguns casos es poden construir sistemes híbrids. Aquests sistemes no seran exclusivament fotovoltaics o eòlics, sinó que poden tenir una combinació de les dues fonts renovables.

Certament, el vent i la radiació solar són dos factors que es complementen molt bé: a l'estiu, quan la radiació solar incident és elevada, el vent és quasi nul. A l'hivern, o quan fa núvol i mal temps, el vent està present i la radiació solar no.

Un bon plantejament pot ser, per tant, desenvolupar sistemes híbrids per a electrificar de manera més fiable una o diverses llars. Aquests sistemes seran especialment interessants per a electrificar petites comunitats.

Amb un petit aerogenerador podem reduir notablement la superfície dels captadors solars. La figura 59 mostra la imatge d'una instal·lació d'aquest tipus.

Figura 59. Sistema d'electrificació rural híbrid: eòlica i solar



Font: Soliclíma (<http://www.soliclima.es>).

6.4. Què hem après?

Hem après els elements principals que formen una instal·lació solar fotovoltaica autònoma, les seves característiques i com dimensionar-los. Hem calculat també una instal·lació per a casa nostra, i això ens ajuda a veure la necessitat d'energia que tenim!

L'energia fotovoltaica no és l'única que pot servir per obtenir energia en zones o construccions que no tinguin accés a la xarxa elèctrica. Continuarem, doncs, amb unes indicacions sobre els sistemes generadors aïllats.

7. Sistemes generadors aïllats

Fins ara hem analitzat el sistema elèctric, el que conforma la xarxa elèctrica, i les energies renovables. Hem estudiat també els sistemes autònoms fotovoltaics, que serveixen per a electrificar zones que no tenen accés a la xarxa. En aquest apartat us descriurem aquells sistemes que també són capaços de generar electricitat, però que no ho fan connectats a la xarxa, sinó que són sistemes autònoms.

Què aprendrem?

Veurem diferents alternatives d'electrificació per a zones o construccions que no tinguin accés a la xarxa elèctrica.

Què suposarem?

Suposarem que teniu coneixements sobre electrificació i conversió d'energia, com els que hem detallat en els apartats anteriors.

7.1. Sistemes generadors aïllats

Per què són necessaris els sistemes de generació elèctrica autònoma? Encara que ens pugui semblar que la xarxa elèctrica està estesa per tot el territori i que ja no té sentit plantejar-se alimentacions autònomes, hi ha molts casos en què aquesta opció és necessària. Quins? Doncs, per exemple, els dos casos que us mostrem a continuació, per als quals també descrivim breument els motius d'electrificació autònoma:

- Masies o pobles allunyats de la xarxa elèctrica: hi ha certs nuclis de població localitzats en zones remotes del territori. Els accessos són difícils, gairebé no hi ha població fixa i, en el seu moment, la companyia elèctrica no va allargar la xarxa elèctrica fins al poble. En aquests casos, l'alternativa de generació aïllada és sovint molt atractiva, econòmicament i quant a fiabilitat.
- Obres i actuacions puntuals: en molts casos es duen a terme treballs de construcció puntuals, en llocs urbans o rurals en què no hi ha cap xarxa elèctrica a què ens puguem connectar. A vegades, tot i haver una xarxa, les autoritzacions per a la connexió temporal són llargues i es prefereix, per estalviar temps, optar per una generació autònoma. De ben segur que haureu vist els generadors mòbils de corrent elèctric que hi ha en moltes obres (també coneguts en castellà com a *burras*). Són uns remolcs grocs que disposen de rodes per a poder-los arrossegar, i que es fan servir per a fer funcionar diverses màquines elèctriques d'execució d'obres (serres, radials, etc.).

A part d'aquests hi pot haver altres casos, com les fires o les atraccions puntuals, els mercats d'artesania, les festes musicals a les places, els concerts, etc.

En molts casos, doncs, hi haurà una demanda d'energia elèctrica que no podrem satisfer amb la xarxa elèctrica. En aquests casos haurem de trobar una solució:

- Si necessitem una solució temporal, només per a un període relativament curt, i disposem de combustible, el que farem serà optar per un generador dièsel o de gasolina.
- Si necessitem una solució més definitiva, per a tenir energia contínuament i a un preu assequible, i a més a més no disposem d'un accés fàcil o d'un subministrament proper de gasolina o gasoil, optarem per sistemes autònoms d'energies renovables. Aquests poden estar formats per energia eòlica, solar fotovoltaica, minihidràulica, biomassa o una combinació d'aquestes.

7.2. Què hem après?

Hem vist que hi ha diferents opcions d'electrificació per a les zones sense accés a la xarxa, i que el millor sistema d'electrificació dependrà dels costos i del tipus de solució que necessitem, si ha de ser temporal o permanent.

8. Problemes resolts

8.1. Enunciats

1) Digueu quina de les afirmacions següents és veritable o falsa:

- a) L'entropia d'un sistema tancat pot disminuir.
- b) L'entropia d'una massa determinada disminueix en tota compressió isoterma.
- c) L'energia interna i l'entropia són funció exclusivament de la temperatura.

2) Un quilogram d'oxigen passa dels 300 K i 2 bars de pressió fins als 1.500 K i 1,5 bars. Després se sotmet a una compressió isoterma i finalment passa per un procés isentròpic. Al final torna a estar en l'estat inicial:

- a) Deduïu com serà l'entropia en els diferents processos. Augmenta o disminueix?
- b) Dibuixeu el diagrama T - S corresponent al procés.

3) Calculeu l'energia anual teòrica que podreu obtenir d'un aerogenerador de 80 m de diàmetre, a partir de la corba de potència de la figura 60 i considerant la corba de freqüències del vent de la zona.

Calculeu també el coeficient de potència màxim d'aquest aerogenerador i digueu si es tracta d'un bon aerogenerador o no.

Figura 60. Full de característiques tècniques de l'aerogenerador

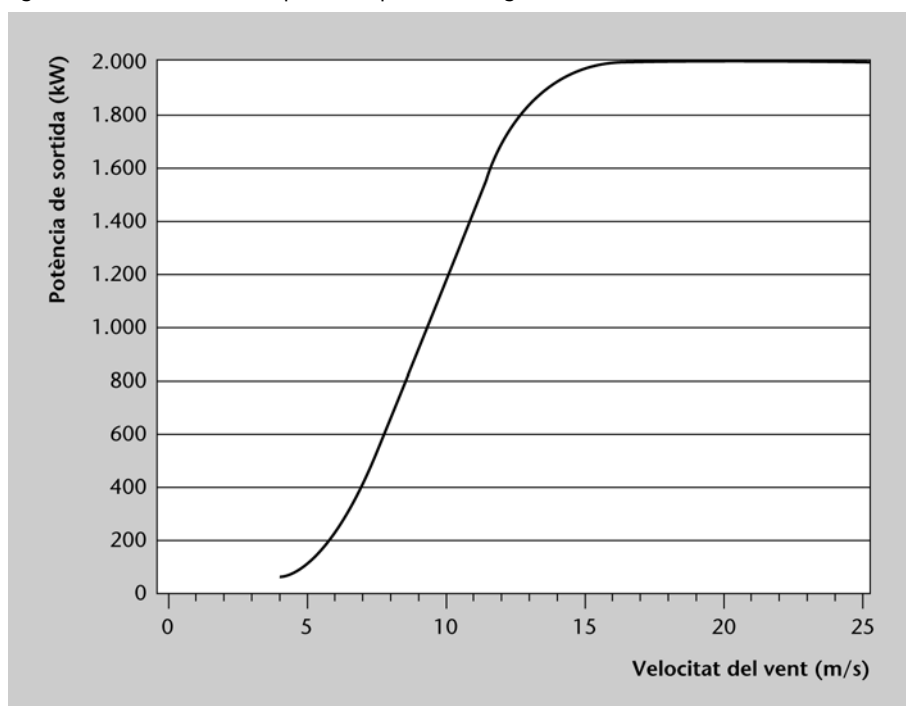
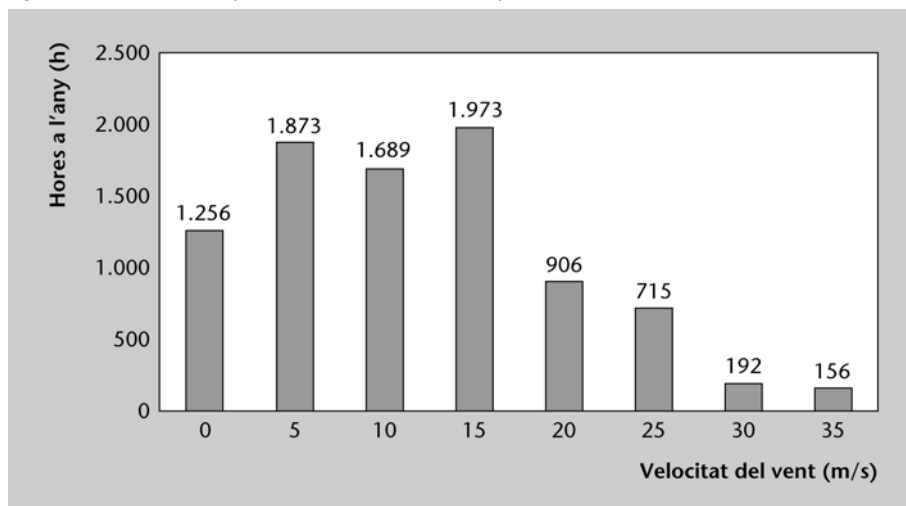


Figura 61. Corba de freqüència del vent de la zona (previsió)



4) En una masia rural aïllada, uns amics vostres volen instal·lar-hi un sistema d'energia solar fotovoltaica per a tenir electricitat els mesos d'estiu (de juny a setembre). Els aparells de què volen disposar són: dotze punts de llum, televisió i vídeo, ràdio, batidora, ordinador, rentadora, nevera combi i microones. Com que saben que teniu algunes nocions de disseny d'aquests sistemes, us pregunten quants mòduls fotovoltaics els hi caldran i quantes bateries necessitaran. Us adjuntem les característiques tècniques dels mòduls fotovoltaics i de les bateries, a més de la taula de radiació solar del municipi.

Figura 62. Característiques dels mòduls fotovoltaics

COMPORTAMIENTO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR DE PRUEBA	IS-165	IS-170	IS-175	IS-180
POTENCIA ELÉCTRICA MÁXIMA (P_{max})	165	170	175	180
TENSIÓN EN CIRCUITO ABIERTO (V_{oc})	44,3	44,6	44,8	45,2
TENSIÓN EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (V_{mpp})	35,6	35,7	36,2	36,5
CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO (I_{sc})	5,0	5,13	5,20	5,30
CORRIENTE EN EL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (I_{mpp})	4,64	4,77	4,84	4,93
EFICIENCIA (%)	13,1%	13,4%	13,8%	14,2%
TOLERANCIA DE POTENCIA ($\%P_{max}$)	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$

Datos medidos en simuladores solares Clase A, según IEC-60904-9 Ed.2, certificado por TÜV Rheinland

Font: Isofotón.

Figura 63. Taula de bateries

Model	Tensió (V)	Capacitat a 25°C (Ah)		Llarg (mm)	Ample (mm)	Alçària (mm)	Pes amb àcid (kg)
		10 h	100 h				
12.AV.45	12	33	45	221	176	277	20,8
12.AT.68	12	50	68	221	176	277	24,8
12.AV.90	12	66	90	311	176	277	33,7
12.AV.136	12	100	136	389	176	277	45,6
12.AV.158	12	116	158	469	176	277	53,5
12.AV.204	12	150	204	553	176	277	65,5
6.AT.244	6	189	244	284	229	332	45,8
6.AT.279	6	216	279	284	229	332	48,7
6.AT.314	6	243	314	284	229	332	51,6

Font: Isofotón.

Figura 64. Taula de radiació solar ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$).

Orientació: 0°													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
0°	5,44	8,45	12,80	17,52	21,21	22,89	22,08	18,96	14,46	9,76	6,11	4,53	13,71
5°	6,05	9,21	13,56	18,10	21,54	23,08	22,34	19,44	15,17	10,49	6,73	5,06	14,26
10°	6,64	9,91	14,24	18,61	21,75	23,14	22,47	19,81	15,79	11,17	7,33	5,56	14,72
15°	7,19	10,56	14,84	19,00	21,82	23,06	22,46	20,06	16,31	11,78	7,88	6,03	15,10
20°	7,69	11,14	15,35	19,28	21,77	22,84	22,32	20,24	16,74	12,32	8,38	6,47	15,40
25°	8,15	11,66	15,77	19,45	21,63	22,49	22,06	20,29	17,07	12,79	8,84	6,87	15,61
30°	8,57	12,11	16,10	19,50	21,38	22,08	21,72	20,21	17,30	13,18	9,25	7,23	15,73
35°	8,93	12,48	16,32	19,43	21,00	21,54	21,26	20,02	17,42	13,49	9,60	7,54	15,77
40°	9,24	12,78	16,45	19,24	20,50	20,88	20,67	19,71	17,43	13,72	9,89	7,81	15,70
45°	9,49	13,00	16,48	18,94	19,87	20,09	19,96	19,27	17,34	13,87	10,12	8,03	15,55
50°	9,68	13,14	16,41	18,52	19,13	19,19	19,13	18,73	17,15	13,93	10,29	8,21	15,30
55°	9,81	13,19	16,23	18,00	18,28	18,18	18,20	18,07	16,85	13,90	10,40	8,33	14,96
60°	9,88	13,17	15,96	17,36	17,33	17,07	17,15	17,31	16,45	13,79	10,44	8,40	14,53
65°	9,89	13,06	15,59	16,63	16,30	15,97	16,09	16,45	15,95	13,60	10,42	8,41	14,03
70°	9,83	12,87	15,13	15,80	15,25	14,78	14,97	15,49	15,35	13,32	10,33	8,38	13,46
75°	9,72	12,60	14,58	14,88	14,11	13,51	13,76	14,51	14,67	12,97	10,18	8,29	12,81
80°	9,54	12,25	13,94	13,88	12,90	12,18	12,48	13,44	13,90	12,53	9,96	8,15	12,09
85°	9,31	11,83	13,22	12,85	11,62	10,81	11,15	12,31	13,06	12,02	9,69	7,96	11,31
90°	9,01	11,34	12,43	11,75	10,29	9,54	9,85	11,12	12,14	11,44	9,35	7,72	10,49

8.2. Solucions

1)

a) Falsa. Segons la mateixa definició d'entropia, l'entropia en un sistema sempre augmenta.

b) Veritable. Si es produeix una compressió isoterma, la variació d'entropia està associada a la variació de calor. Com que el sistema perd calor durant la compressió, en el procés es produeix una disminució de l'entropia.

c) Falsa. L'energia interna i l'entropia depenen d'altres variables com les calors específiques a pressió o volum constant, calor cedida o absorbida en el procés.

2)

a) Primer descriurem els processos que tenen lloc. Inicialment, tenim una massa d'1 kg d'oxigen amb una temperatura T_1 de 300 K i una pressió P_1 de 2 bars. S'incrementa la temperatura a T_2 (1.500 K) i la pressió P_2 és d'1,5 bars. Recordem la definició del segon principi de la termodinàmica (equació 38):

$$\Delta S = \Delta Q/T \quad (61)$$

És a dir, la variació d'entropia és igual a la variació de calor entre la temperatura del sistema.

En els processos a què se sotmet l'oxigen quan passa d'un estat a un altre, què passa amb l'entropia? augmenta o disminueix? Vegem-ho per cada pas.

Procés d'1 a 2 (de 300 K i 2 bars a 1.500 K i 1,5 bar)

Si recordeu, la calor és una magnitud física que és mesurable i que depèn de la calor específica i de la variació o increment de temperatura. Com en el procés d'1 a 2 es produeix un increment de temperatura, la variació de calor en el procés serà positiva, ja que l'increment de temperatura es calcula com la diferència entre la temperatura final i inicial, és a dir, la diferència $T_2 - T_1$ dona un valor positiu. Si la calor és positiva, segons el conveni utilitzat, és una calor que s'absorbeix en el procés d'1 a 2 i, per tant, en aplicar la definició del segon principi de la termodinàmica (eq. 61), l'entropia augmentarà.

Per tant, en el procés d'1 a 2 es produeix un augment de l'entropia a causa de l'absorció de calor.

Procés de 2 a 3 (compressió isoterma)

En el procés de 2 a 3, l'oxigen té una temperatura T_2 de 1.500 K i la pressió P_2 és d'1,5 bars. Per a passar a l'estat 3 es realitza una compressió isoterma, és a dir, el procés de 2 a 3 serà un procés a temperatura constant ($T = \text{constant} = 1.500 \text{ K}$). Com que el sistema perd calor durant la compressió, en el procés es produeix una disminució de l'entropia.

Per tant, en un procés de compressió isoterma, l'entropia disminueix.

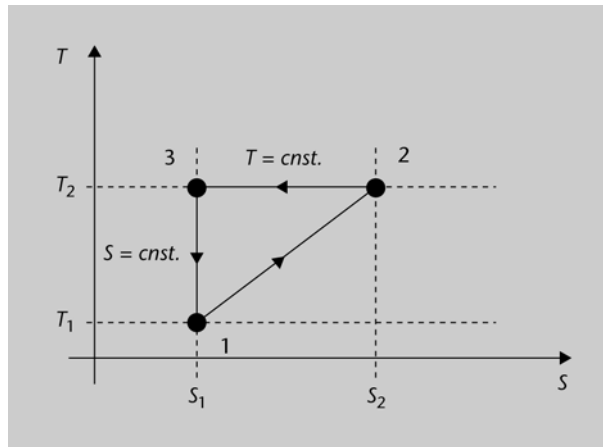
Procés de 3 a 1 (procés isentròpic)

En el procés de 3 a 1, l'oxigen passa per un procés isentròpic, és a dir, un procés a entropia constant ($S = \text{constant}$). L'oxigen té una temperatura T_3 de 1.500 K i l'entropia és S_3 , que coincideix amb l'entropia inicial, és a dir, S_1 . El pas a l'estat 1 es realitza a $S = \text{constant}$ (no hi ha variació d'entropia en un procés isentròpic).

b) Dibueixeu el diagrama T - S

Partint dels processos i valors anteriors, s'observa que l'oxigen passa per diferents estats termodinàmics identificats com a 1, 2 i 3. En cadascun d'aquests, l'oxigen tindrà uns valors de pressió (P) i temperatura (T) i, per tant, d'entropia (S).

Figura 65.



3)

El que cal fer és determinar quina és la potència que obtenim del generador per cada velocitat. Partint de les dades del gràfic, obtenim els valors següents:

Taula 66. Taula de velocitats del vent i potència

Velocitat del vent (m/s)	0	5	10	15	20	25	30	35
P (kW)	0	100	1.200	2.000	2.000	2.000	0	0

Un cop tenim la potència per cada velocitat del vent, calculem l'energia que obtenim al llarg de l'any de la manera següent:

$$E \text{ (kWh)} = P \text{ (kW)} \cdot t \text{ (h)} \quad (62)$$

Per tant, multipliquem el valor de les hores equivalents de cada velocitat del vent que ens dóna el gràfic per la potència, i obtenim els resultats següents:

Figura 66. Taula d'energia del vent

Hores a l'any (h)	1.256	1.873	1.689	1.973	906	715	192	156
Velocitat vent (m/s)	0	5	10	15	20	25	30	35
P (kW)	0	100	1.200	2.000	2.000	2.000	0	0
E (kWh)	0	187.300	2.026.800	3.946.000	1.812.000	1.430.000	0	0

És a dir, que obtindrem una energia anual aproximada de 9.402 MWh per any.

Per a calcular el coeficient de potència de l'aerogenerador haurem d'usar l'equació 42:

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \quad (63)$$

De la qual, si aïllem el terme del coeficient de potència tenim:

$$c_p = P / (1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3) \quad (64)$$

La rho (ρ) és la densitat de l'aire i val $1,2 \text{ kg/m}^3$.

A és l'àrea d'escombratge de les pales. L'enunciat ens diu que el diàmetre de l'aerogenerador és de 80 m, per tant:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (80/2)^2 = 5.026,5 \text{ m}^2 \quad (65)$$

Del gràfic de l'aerogenerador extraïem la potència que tenim per cada velocitat del vent, per a aquest aerogenerador, i obtenim els valors següents:

Figura 67. Taula de velocitats del vent i potència de l'aerogenerador

$v \text{ (m/s)}$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$P \text{ (kW)}$	50	100	200	400	700	900	1.200	1.500	1.700	1.900	1.950

$v \text{ (m/s)}$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$P \text{ (kW)}$	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000

A partir de cada velocitat i potència obtingudes, anem calculant el coeficient de potència de l'aerogenerador (atenció: les unitats de potència han d'estar en watts, i no pas en kilowatts). Obtenim així els resultats següents:

Figura 68. Coeficient de potència

$v \text{ (m/s)}$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$P \text{ (kW)}$	50	100	200	400	700	900	1.200	1.500	1.700	1.900	1.950	2.000
c_p	0,26	0,27	0,31	0,39	0,45	0,41	0,40	0,37	0,33	0,29	0,24	0,20

$v \text{ (m/s)}$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$P \text{ (kW)}$	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
c_p	0,16	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04

Així, tenim un coeficient de potència màxim de 0,45 per a una velocitat de 8 m/s. Es tracta, per tant, d'una màquina mitjana, ni molt bona (per sobre de 0,5) ni molt dolenta (per sota de 0,4).

4)

El primer que hem de fer és determinar la demanda elèctrica que tindrem. Utilitzem, doncs, la taula de càlcul del consum que hem detallat, i l'omplim amb les dades de l'enunciat del problema:

Figura 69. Taula de consum diari previst

Consums variables				
Aparell	Nombre d'aparells	Potència (W)	Temps (h/dia)	Energia (Wh/dia)
Punt de llum	12	20	3,0	720
Televisió	1	125	3,0	375
Vídeo	1	45	2,0	90
Minicadena	1	180	5,0	900
Batedora	1	250	0,5	125
Ordinador	1	150	2,0	300
Microones	1	650	0,5	325
Total consum variables				2.835
Consums continuats				
Aparell	Nombre d'aparells o serveis dia	Energia (Wh/dia o servei)		Energia (Wh/dia)
Rentadora	0,5	400		200
Nevera	1	1.200		1.200
Total consums continuats				1.400
Total consum diari previst (Wh)				4.325

Suposem que tindrem una instal·lació en corrent altern i, per tant, hem d'aplicar un factor de 0,75 de rendiment total de la instal·lació. Així doncs, l'energia diària necessària serà de:

$$4.325/0,75 = 5.647 \text{ Wh/dia} \quad (66)$$

Prenem ara els valors de radiació i busquem el mes més desfavorable d'entre els que s'utilitzarà la instal·lació (de juny a setembre). Veiem que el mes més desfavorable és setembre i, per tant, escollirem la inclinació dels mòduls que maximitza els resultats, que és la de 40° (l'adjuntem).

Figura 70. Radiació solar de l'emplaçament (de l'enunciat del problema)

Orientació: 0°													
Inclinació	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Anual
40°	9,24	12,78	16,45	19,24	25,50	20,88	20,67	19,71	17,43	13,72	9,89	7,81	15,70

Tindrem així una radiació solar incident mínima de 17,43 MJ/m²/dia.

Si convertim aquest valor a kWh/m² i dia:

$$17,43 \text{ MJ/m}^2 \text{ i dia} \cdot 1 \text{ kWh}/3,6 \text{ MJ} = 4,84 \text{ kWh/m}^2 \text{ i dia} \quad (67)$$

Com que les taules dels mòduls fotovoltaics mostren els valors estàndards de prova, per a obtenir les hores de sol pic (HSP) hem de dividir per una radiació d'1 kWh/m². Així:

$$4,84 \text{ kWh/m}^2 \text{ i dia} \cdot 1 \text{ HSP/1 kWh/m}^2 = 4,84 \text{ HSP al dia} \quad (68)$$

Com que tindrem una instal·lació d'ús diari, calcularem el nombre de mòduls necessaris a partir de l'equació 51:

$$\text{Nombre de mòduls} = \text{Energia necessària (Wh/dia)} / (\text{Potència pic del mòdul (} W_p \text{)} \cdot \eta_{\text{camp}} \cdot \text{Radiació solar (HSP/dia)}) \quad (69)$$

El rendiment de camp estarà entre 0,70 i 0,80. Si fem un càlcul, per cada mòdul de potència diferent i per cada rendiment del sistema, obtenim el següent:

Figura 71. Nombre de mòduls

$P_{max} (W_p)$	165	170	175	180
$rend = 0,7$	10,10	9,80	9,52	9,26
$rend = 0,8$	8,84	8,58	8,33	8,10

Vistos els resultats, el millor serà optar per **deu mòduls del mòdul IS-170**, atès que:

- no arribem a cobrir la demanda amb vuit mòduls de cap altre model; i
- amb deu mòduls del IS-165 no cobriríem la demanda, ja que el resultat obtingut és superior a 10. Així i tot, ho podríem considerar com una solució, si per exemple econòmicament comportés un estalvi important, però haurem de tenir en compte que la instal·lació pot estar lleugerament infra-dimensionada i, per tant, es poden donar situacions en què no es cobreixi la demanda.

Passem ara a calcular el nombre de bateries. Per a fer-ho, utilitzarem l'equació 54:

$$\text{Capacitat de bateria (Ah)} = (\text{Energia necessària (Wh)} \cdot \text{Dies autonomia}) / (\text{Voltatge de les bateries (V)} \cdot \text{Profunditat de descàrrega de la bateria}) \quad (70)$$

L'energia necessària és de 5.647 Wh/dia. Suposarem tres dies d'autonomia, ja que en el clima mediterrani, i durant el període d'estiu, difícilment hi ha més de tres dies seguits sense radiació. Usarem bateries de 12 V i de tipus monobloc, i suposarem que la profunditat de descàrrega és de 0,45. Per tant, amb aquests valors tenim:

$$\text{Capacitat de la bateria (Ah)} = (5.647 \cdot 3) / (12 \cdot 0,45) = 3.137 \text{ Ah} \quad (71)$$

Si fem el càlcul per cada model de bateria de 12 V que hi ha en la taula, obtenim els resultats següents:

Figura 72. Nombre de bateries

c100	45	68	90	136	158	204
núm. bateries	69,72	46,14	34,86	23,07	19,86	15,38

Serà una bona opció triar **20 bateries del model 12.AV.158** o bé **16 bateries del model 12.AV.204**.

Resum

Hem començat el mòdul amb conceptes que formen part de la nostra vida quotidiana, com la calor, l'energia i la temperatura. Els hem definit formalment i hem mostrat quins processos es produeixen entre ells. Bàsicament, que la calor es transmet per conducció, convecció i radiació i que la temperatura és una mesura de la calor.

A continuació hem definit els conceptes d'energia interna del sistema i d'entropia. El primer ens dóna idea de tota l'energia continguda en el sistema (cinètica, potencial, etc.) i el segon del desordre. També hem vist que la pressió, la temperatura i el volum defineixen un sistema termodinàmic. D'altra banda, un sistema termodinàmic estarà en equilibri quan estigui en equilibri tèrmic, mecànic i químic.

Per a acabar aquesta primera part, hem vist les tres lleis de la termodinàmica:

- 1) La llei zero, que ens diu que en posar en contacte dos cossos amb temperatures diferents, acabaran assolint la mateixa temperatura.
- 2) La primera llei de la termodinàmica, que ens diu que l'energia es conserva, no es crea ni es destrueix.
- 3) La segona llei de la termodinàmica, que ens diu que l'entropia sempre creix. Aquesta llei reflecteix, per tant, que els processos tenen lloc en una única direcció.

Als països industrialitzats, la demanda energètica té una tendència creixent, fins al punt que actualment ja no podem concebre la nostra societat sense energia i, sobretot, sense energia elèctrica. Per a valorar com és aquest consum d'energia, ens hem de referir a termes com l'energia primària, que inclou les pèrdues que tenim en el sistema i que, a més a més, ens permet tenir una visió global de les fonts energètiques utilitzades. Actualment, en el cas d'Espanya, si analitzem l'energia primària consumida veiem que prové en més d'un 80% de combustibles fòssils (petroli, gas natural i carbó), els quals són recursos que provenen de fora del nostre territori.

A més a més, dins del sector energètic, l'energia elèctrica és la que té un potencial de creixement més gran (amb la implantació dels vehicles elèctrics, per exemple), però és necessari tenir present que aquesta no és una energia primària i que, per tant, té associats uns rendiments de generació pròxims al 40%.

D'altra banda, l'impacte del sistema energètic actual és múltiple. Hi destaquen impactes ambientals d'abast global com l'efecte hivernacle provocat pel

consum de combustibles fòssils; la generació de residus nuclears; els conflictes geoestratègics a escala mundial, etc. En aquest context, les energies renovables emergeixen com una alternativa real que cal tenir present.

El mercat elèctric és un element complex, en què els diferents actors (productors, transportistes i distribuïdores, comercialitzadores i consumidors) actuen coordinadament, mitjançant l'operador del mercat, perquè en cada instant l'energia elèctrica produïda sigui equivalent a l'energia consumida.

Les centrals tèrmiques són actualment la tecnologia més important del mercat elèctric espanyol. Aquestes duen a terme cicles termodinàmics de tipus Rankine (associat al vapor) o de tipus Brayton (associat al gas). Dels diferents tipus de centrals tèrmiques, les de més rendiment són les de cicle combinat, que realitzen a la vegada el cicle de vapor i el del gas, i assoleixen rendiments de generació pròxims al 55%, en lloc del rendiment del 30%-35% de les centrals tèrmiques convencionals.

Les centrals nuclears també duen a terme el cicle de Rankine per a generar electricitat, és a dir, que en essència són també centrals tèrmiques. L'única diferència entre aquestes i les centrals que cremen combustibles fòssils és la font de calor que utilitzen. En no cremar combustibles fòssils, no emeten gasos d'efecte hivernacle, però generen residus radioactius de diferent intensitat, la gestió dels quals no està del tot resolta actualment.

En aquest context, les energies renovables es presenten com una alternativa de generació d'energia elèctrica amb un avantatge doble: no emeten gasos d'efecte hivernacle i no comporten la dependència de l'exterior, ja que consumeixen un recurs local i inesgotable.

L'aspecte poc avantatjós de les tecnologies renovables és que no tenen la facilitat de regulació de les centrals tèrmiques (que poden regular la potència amb la introducció de més o menys combustible). El vent i la radiació solar no es regulen, i per tant, si el sistema elèctric del futur cobreix la demanda exclusivament amb energies renovables, haurà de resoldre aquest fet.

Un aspecte molt important a considerar, abans de la construcció de les plantes d'energies renovables, és estudiar els recursos disponibles en cada emplaçament concret. La radiació solar és un recurs fàcilment quantificable i hi ha moltes taules que la quantifiquen. El vent és un recurs molt més local, que varia en funció de l'alçada, la topografia, la rugositat del terreny, etc., i que haurem de quantificar molt bé, ja que la potència que en podem extreure depèn de la seva velocitat al cub.

L'energia del vent s'obté a partir dels aerogeneradors. El primer limitant de la tecnologia està determinat pel teorema de Betz, que estableix que només podem extreure menys de 16/27 parts de l'energia continguda en el vent. Els

aerogeneradors es caracteritzen per la seva corba de potència o coeficient de potència per cada velocitat del vent, i amb aquests termes podem valorar l'energia que en podem extreure per a una freqüència de vent determinada. La implantació de parcs eòlics, però, comporta un impacte ambiental negatiu, sobretot paisatgísticament, per la qual cosa caldrà tenir cura a l'hora de definir els emplaçaments aptes per a la seva construcció.

L'energia solar té diferents aplicacions, des de les merament tèrmiques (com la producció d'aigua calenta per a la dutxa o la calefacció) a la producció d'energia elèctrica. Aquesta darrera conversió es pot dur a terme mitjançant cicles de Rankine, en què el fluid s'escalfa amb radiació solar o bé directament, amb cèl·lules fotovoltaïques. Les cèl·lules fotovoltaïques estan formades per silici dopat, és a dir, que li introdueixen impureses per a millorar-ne el comportament elèctric. Es tracta, en essència, d'un generador d'intensitat i el seu comportament està descrit per la corba d'intensitat-voltatge.

En les aplicacions de l'energia fotovoltaïca per a l'electrificació autònoma cal dimensionar amb cura els diferents elements que formen el sistema: el nombre de mòduls fotovoltaïcs i el sistema de bateries, però també el regulador, l'inversor, el cablejat i les proteccions de la instal·lació.

Entre les diferents opcions disponibles per als sistemes de generació elèctrica autònoma, hem d'analitzar-les totes i determinar quina és la que més convé en cada emplaçament on hi hagi una demanda i la xarxa elèctrica no hi arribi o el cost de fer-la arribar sigui molt alt. Si necessitem una solució temporal, escollirem principalment un sistema de generador autònom amb motor de gasoil o gasolina. Com a solució a llarg termini, escollirem les plantes fotovoltaïques o bé els sistemes híbrids d'energia fotovoltaïca i eòlica.

Exercicis d'autoavaluació

- Digueu quina d'aquestes afirmacions és veritable:
 - La temperatura és energia.
 - La temperatura d'un cos depèn de la velocitat de les partícules, el seu nombre, la seva mida i el seu tipus.
 - La calor és una mesura de l'energia.
 - Totes les anteriors són falses.
- Digueu quina d'aquestes afirmacions és falsa:
 - La conductivitat tèrmica és una propietat característica dels materials.
 - La conductivitat tèrmica no depèn de la temperatura.
 - La conductivitat tèrmica ens dóna una idea de la facilitat que presenten els materials al pas de la calor a través seu.
 - Es diu que un material és un bon conductor si té un valor alt de conductivitat tèrmica.
- La transmissió de calor es produeix per tres mecanismes: conducció, convecció i radiació. Digueu quina de les següents afirmacions és la correcta:
 - La conducció es produeix, exclusivament, en medis sòlids.
 - La convecció és característica de situacions en què està present un gas.
 - Quan un sòlid i un líquid amb diferent temperatura estan en contacte i intercanvien calor, el mecanisme d'intercanvi és la convecció.
 - La radiació és una forma d'intercanvi de calor a partir de partícules subatòmiques.
- En un calorímetre, s'injecta vapor d'aigua a 100 °C en 250 g d'aigua a 20 °C. Quan l'aigua del got està a 60 °C, la quantitat de vapor d'aigua injectada és...
 - 17,2 g.
 - 4,5 g.
 - 15,0 g.
 - 68,8 g.(Dades: C_e de l'aigua = 4.180 J/kg K, $c_e = 2,26 \cdot 10^6$ J/kg)
- El primer principi de la termodinàmica s'enuncia:
 - "La quantitat d'energia que es transfereix a un sistema en forma de calor (Q) més la quantitat d'energia transferida al sistema en forma de treball (W) ha de ser igual a l'augment d'energia interna (U) del sistema."
 - "La quantitat d'energia que es transfereix a un sistema en forma de calor (Q) menys la quantitat d'energia transferida al sistema en forma de treball (W) ha de ser igual a l'augment d'energia interna (U) del sistema."
 - "L'augment d'energia interna (U) del sistema sempre és constant."
 - "Mai no es realitza treball ni es perd calor en un sistema termodinàmic."
- L'energia primària és un terme que ajuda a tenir una visió global del consum energètic, ja que...
 - ... no inclou les pèrdues per transformació energètica.
 - ... representa el total de consum energètic, igual que l'energia final.
 - ... inclou les pèrdues de transformació i transport de l'energia.
 - ... ens valora l'energia consumida per un país en relació amb el seu PIB.
- L'energia elèctrica...
 - ... és un tipus d'energia primària.
 - ... és un tipus d'energia secundària i d'energia final.
 - ... és un tipus d'energia secundària, que cal transformar abans del consum.
 - ... és l'energia més neta que existeix, perquè no genera emissions en consumir-la.
- Respecte als impactes ambientals, socials i econòmics associats a l'energia elèctrica, podem afirmar que...
 - ... els combustibles fòssils no comporten conflictes socials, per tractar-se de recursos propis.
 - ... qualsevol tipus de combustió, i també la de biomassa o llenya, provoca un efecte hivernal per l'emissió de diòxid de carboni.
 - ... l'energia nuclear és l'única opció per combatre el canvi climàtic.
 - ... el millor és optar per la racionalització i l'estalvi energètic en un primer terme i desenvolupar plantes d'energies renovables.
- Els agents que intervenen en el mercat elèctric són...
 - ... els productors, REE i les distribuïdores locals, les comercialitzadores i els grans consumidors, coordinats per l'OMEL.
 - ... les centrals tèrmiques, les distribuïdores, els comerciants i els consumidors, coordinats per l'OMEL.
 - ... els productors, les distribuïdores locals, les comercialitzadores i els consumidors, coordinats per REE.
 - ... els productors, REE i les distribuïdores locals i les comercialitzadores, coordinats per l'OMEL.

10. Les centrals tèrmiques més eficients són...

- a) ... les que utilitzen gas natural i el cicle de Rankine.
- b) ... les centrals nuclears.
- c) ... les centrals de cicle combinat, que realitzen el cicle de Rankine associat al vapor i el cicle de Brayton associat al gas.
- d) ... les centrals de cicle combinat, que realitzen el cicle de Rankine associat al gas i el cicle de Brayton associat al vapor.

11. Els recursos renovables de radiació solar i vent...

- a) ... s'han de quantificar adequadament per a cada emplaçament.
- b) ... es poden emmagatzemar i transportar fins al punt de consum.
- c) ... es poden regular fàcilment.
- d) ... estan sempre disponibles, i en fem el consum necessari en cada moment.

12. Podem afirmar respecte de l'energia eòlica...

- a) ... que té impactes positius, com ara que utilitza un recurs local i que provoca un efecte de parpelleig.
- b) ... que la velocitat del vent és l'aspecte que més afecta a l'hora de determinar la potència que en podem extreure.
- c) ... que el teorema de Betz suposa que podem extreure tota l'energia continguda al vent.
- d) ... que caldrà conèixer la corba de potència i el coeficient de potència d'un aerogenerador per a determinar la potència que pot generar.

13. L'energia solar...

- a) ... únicament es pot transformar en electricitat amb cèl·lules fotovoltaïques.
- b) ... es pot transformar en energia elèctrica amb cèl·lules fotovoltaïques i també mitjançant un cicle de Brayton associat a un fluid escalfat amb radiació solar.
- c) ... es pot transformar en electricitat mitjançant l'efecte fotovoltaic amb (de més a menys rendiment) silici amorf, silici monocristal·lí i silici policristal·lí.
- d) ... necessita sempre bateries per a poder-se utilitzar també a les plantes fotovoltaïques connectades a la xarxa elèctrica.

14. Si necessitem un sistema de generació elèctrica aïllada...

- a) ... escollirem la implantació d'un generador amb motor de gasoil, si necessitem una solució a llarg termini.
- b) ... avaluarem el cost de fer-hi arribar la línia elèctrica, que és l'opció més fiable.
- c) ... implantarem un sistema híbrid eòlic i fotovoltaic, com a solució temporal.
- d) ... analitzarem el cost econòmic de fer-hi arribar la xarxa elèctrica i el contrastarem amb el cost d'una instal·lació fotovoltaica, com a solució a llarg termini.

Solucionari

1. b; 2. b; 3. c; 4. a; 5. a; 6. c; 7. b; 8. d; 9. a; 10. c; 11. a; 12. b; 13. b i 14. d.

Glossari

acumulador *m* Sistema que permet independitzar, en el cas d'una instal·lació solar fotovoltaica, la generació d'energia del moment de consum. El sistema està format normalment per bateries de tipus plom-àcid. Les bateries estan formades per parts anomenades cèl·lules, les quals tenen un voltatge de 2 V.

aerogenerador *m* Aparell que transforma l'energia cinètica del vent en energia elèctrica. Concretament, l'energia cinètica del vent fa girar les aspes, i l'energia cinètica d'aquestes aspes és la que genera electricitat en un alternador. Com en el cas dels generadors elèctrics o de les turbines, el moviment de l'eix es transforma en energia elèctrica.

calor *m* Contingut energètic d'un sistema. No és una nova forma d'energia, sinó una transferència d'energia en què intervenen un gran nombre de partícules.

calor específica *f* Relació entre la calor que guanya una unitat de massa (1 kg en el Sistema Internacional d'unitats) d'una determinada substància i l'augment de temperatura que experimenta.

calor latent *f* Relació entre la transferència de calor i la quantitat de massa en el procés de canvi d'estat.

caloria *f* Quantitat de calor necessària per augmentar un grau la temperatura d'un gram d'aigua líquida. L'equivalència entre joules i calories és $1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$.

canvi climàtic *m* Alteracions en el clima a causa de la modificació de la concentració de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera actual.

capacitat d'acumulació *f* Terme bàsic de les bateries que es calcula multiplicant la intensitat de descàrrega I (en amperes) que pot proporcionar la bateria pel temps de descàrrega t (en hores). S'expressa en Ah (amperes hora).

captador fotovoltaic *m* Element capaç de transformar la radiació solar en energia elèctrica. Està format per un conjunt de cèl·lules fotovoltaïques de silici dopat (un material semiconductor) interconnectades entre si.
sin. **panell fotovoltaic**, **placa fotovoltaica**

cèl·lula fotovoltaica *f* Element bàsic d'un captador fotovoltaic que consta de dues capes de silici, una dopada positivament (silici de tipus p) i l'altra negativament (silici de tipus n), i uns contactes positius a la part anterior de la cèl·lula (que acostumen a ser de plata) i un contacte posterior negatiu.

central de bombeig *f* Instal·lació que pot funcionar de manera reversible: pot generar electricitat a partir de l'energia acumulada en un salt d'aigua i pot consumir electricitat i bombear aigua d'un nivell inferior a un superior. Són instal·lacions que s'utilitzen sobretot per regular el mercat elèctric i ajustar les diferències entre l'oferta i la demanda.
sin. **central reversible**.

central de cycle combinat *f* Central tèrmica que disposa de dos cicles termodinàmics: un cicle de Rankine per al vapor en circuit tancat que pren l'energia d'un procés de combustió i un cicle de Brayton per als fums de la crema del combustible. El rendiment de generació d'aquestes instal·lacions està al voltant del 55%.

central nuclear *f* Central tèrmica que obté la calor necessària per activar el cicle de Rankine del vapor de la fissió nuclear dels elements combustibles, fets d'urani.

central reversible *f* Vegeu **central de bombeig**.

central tèrmica *f* Central que, a partir d'un cicle termodinàmic, genera electricitat. Aquest tipus de centrals duu a terme un únic cicle termodinàmic, que pot ser de tipus Brayton o de tipus Rankine. El rendiment mitjà d'aquestes instal·lacions està al voltant del 30%.

cicle de Brayton *m* Cicle termodinàmic obert de generació d'energia elèctrica a partir d'una turbina de gas.

cicle de Rankine *m* Cicle termodinàmic tancat de generació d'energia elèctrica a partir d'una turbina de vapor.

coeficient de potència *m* Relació entre la potència elèctrica disponible i la potència eòlica d'entrada. Aquest terme ens permet obtenir directament, a partir de la velocitat del vent, la potència eòlica que ens dona l'aerogenerador.

conducció *f* Mecanisme de transferència d'energia tèrmica entre dos sistemes basat en el contacte de les seves partícules sense flux de matèria i que tendeix a igualar la temperatura entre dos punts.

convecció *f* Sistema de transmissió d'energia característic dels fluids (gasos i líquids).

combustió *f* Reacció química que es duu a terme a partir d'un combustible (petroli, carbó, fusta, etc.) mesclat amb oxigen. Com a resultat de la combustió s'obté diòxid de carboni i aigua, entre altres elements (monòxid de carboni, cendres, etc.).

combustible fòssil *m* Combustible aparegut a partir de la concentració de matèria orgànica prehistòrica, sotmesa a pressió i acumulada en llocs concrets de la Terra. N'hi ha de tres tipus: el carbó (sòlid), el petroli (líquid viscos) i una mescla de metà, propà, butà, etc. (gasós). La combustió intensiva de combustibles fòssils està alterant la composició de l'atmosfera per l'emissió del diòxid de carboni captat ara fa milions d'anys pels organismes, i això és el que es coneix com a canvi climàtic.

comercialitzadora *f* Agent del mercat elèctric que emet contractes amb els consumidors d'energia i s'encarrega de considerar-los en el mercat de l'energia elèctrica.

contaminant primari *m* Monòxid de carboni, òxids de nitrogen (que provoquen pluja àcida) o partícules en suspensió (cendres i pols amb una mida de partícula molt petita i que poden penetrar a l'organisme través de les vies respiratòries). Afecta principalment les zones properes al punt d'emissió, és a dir, a prop de la xemeneia.

contaminant secundari *m* Gas d'efecte hivernacle, principalment diòxid de carboni. Aquest tipus de contaminant es diferencia del contaminant primari perquè té un efecte global, no únicament en el punt d'emissió, sinó a tot el planeta.

corba I-V *f* Corba característica d'un captador fotovoltaic.

corba de potència d'un aerogenerador *f* Corba que indica la potència elèctrica de l'aerogenerador per a les diferents velocitats del vent.

corrent de curtcircuit *m* Paràmetre característic d'un captador fotovoltaic que correspon al valor de tall de la corba I-V amb l'eix d'ordenades, és a dir, el punt de tall amb l'eix de la intensitat, quan el voltatge és zero. Se simbolitza com I_{cc} o I_{sc} (de l'anglès *short circuit*).

diagrama de Sankey *m* Representació gràfica del consum d'energia en un ecosistema natural o artificial, a partir de franges que representen, segons el seu gruix, la quantitat d'energia corresponent, i segons la seva direcció, el destí final d'aquesta energia.

disposició geològica profunda *f* Tipus de sistema de gestió dels residus nuclears.

dopatge *m* Procés pel qual s'introdueixen impureses en un material semiconductor.

energia *f* Capacitat que té un cos de realitzar treball o bé de transformar o escalfar.

energia elèctrica *f* Forma d'energia que sorgeix de l'existència d'una diferència de potencial entre dos punts. Això permet establir un corrent elèctric entre ambdós (quan se'ls posa en contacte mitjançant un conductor elèctric) per obtenir-ne treball. Es tracta d'un tipus d'energia secundària i també d'un tipus d'energia final.

energia final *f* Energia que consumim realment, és a dir, la que paguem amb les nostres factures de gas i electricitat.

energia interna *f* Energia comptabilitzada per la suma de l'energia cinètica de les molècules i els àtoms que constitueixen el sistema, l'energia de rotació i vibració, a més de l'energia potencial entre les molècules

energia lliure *f* Energia present a la natura, en forma de temperatura, energia potencial, moviment, etc.

energia primària *f* Energia lliure que pot ser captada i aprofitada per l'home. Els principals tipus d'energia primària són els combustibles fòssils (carbó, petroli i gas natural), l'energia nuclear i les energies renovables (solar, eòlica, biomassa, etc.). És un terme molt utilitzat en l'estadística energètica, ja que inclou les pèrdues per transformacions energètiques del sistema.

energia secundària *f* Forma d'energia obtinguda a partir de l'energia primària.

energia solar *f* Energia primària amb l'origen en la radiació solar.

energia útil *f* Energia que realment necessitem, la que s'utilitza per satisfer la necessitat que origina el consum, la que aprofitem. La diferència entre l'energia final i l'energia útil serà el rendiment de l'aparell que utilitzem.

entorn *m* Regió de l'espai que existeix més enllà de la frontera.

entropia *f* Tendència natural al desordre.

factor de forma *m* Relació matemàtica, per a la corba I - V d'un captador solar fotovoltaic, que posa de manifest la proporcionalitat entre el valor de la superfície del rectangle delimitat pel punt de màxima potència (V_{pmp} , I_{pmp}) i el rectangle que es formaria des dels valors màxims de la corba (V_{oc} , I_{cc}).

font d'energia renovable *f* Font d'energia que, en consumir-la, no condiciona la seva disposició futura, com per exemple l'energia eòlica, l'energia solar, l'energia mareomotriu, etc.

frontera *f* Límit del sistema definit per una superfície arbitrària.

gas d'efecte hivernacle *m* Gas que provoca l'efecte conegut com a canvi climàtic, ja que altera la concentració de gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera actual, principalment diòxid de carboni i metà.

instal·lació d'energia solar fotovoltaica *f* Instal·lació que capta la radiació solar en una cèl·lula fotovoltaica, la qual la transforma directament en energia elèctrica, de corrent continu.

instal·lació d'energia solar tèrmica *f* Instal·lació que capta l'energia solar amb la finalitat de cobrir les necessitats tèrmiques.

instal·lació d'energia solar termoelectrónica *f* Instal·lació que capta la radiació solar en forma de calor i que la transforma en energia elèctrica.

intensitat de l'energia primària *f* Valoració de l'increment de consum de l'energia primària d'un país, associat al seu producte interior brut (PIB) anual.

inversor *m* Element d'una instal·lació fotovoltaica que a partir de l'electrònica de potència permet la transformació del corrent continu dels mòduls fotovoltaics o de les bateries en corrent altern apte per al consum de la instal·lació elèctrica.
sin. **ondulador**

kelvin *m* Unitat de mesura de la temperatura absoluta en el Sistema Internacional d'unitats.

kTEP *f* Kilotona equivalent de petroli, que és una unitat d'energia. Una kTEP equival a 1.000 TEP (tones equivalents de petroli), i tenim les equivalències següents: 1 TEP = 41.868.000.000 J (joules) = 11.630 kWh (kilowatts hora). En anglès, TEP correspon a TOE (*tonne of oil equivalent*).

lleï de Betz *f* Lleï formulada pel físic alemany Albert Betz l'any 1926, que diu que únicament podem convertir menys de 16/27 (aproximadament el 59%) de l'energia cinètica del vent en energia mecànica amb la utilització d'un aerogenerador.

lleï de conservació de l'energia *f* Vegeu primer principi de la termodinàmica.

magnitud extensiva *f* Magnitud en què el valor corresponent a tot el cos és igual a la suma del valor de cada una de les seves parts. En són exemple la massa, el volum d'un cos o l'energia d'un sistema termodinàmic.

magnitud intensiva *f* Magnitud en què el valor corresponent a tot el cos no és igual a la suma del valor de cada una de les seves parts. La temperatura n'és un exemple.

ondulador *m* Vegeu inversor.

paret adiabàtica *f* Paret que no permet l'intercanvi de calor o energia tèrmica.

paret rígida *f* Paret que no es pot desplaçar i que no varia el volum del sistema.

paret impermeable *f* Paret que no permet el pas de matèria.

paret diatèrmana *f* Paret que permet el pas d'energia tèrmica.

paret mòbil *f* Paret que es pot desplaçar.

panell fotovoltaic *f* Vegeu **captador fotovoltaic**.

placa fotovoltaica *f* Vegeu **captador fotovoltaic**.

pressió *f* Magnitud intensiva que es defineix com la força per unitat d'àrea o superfície.

primer principi de la termodinàmica *m* Principi que afirma que, com l'energia no es crea ni es destrueix, la quantitat d'energia que es transfereix a un sistema en forma de calor (Q) més la quantitat d'energia transferida al sistema en forma de treball (W) ha de ser igual a l'augment d'energia interna (U) del sistema.
sin. **lleï de conservació de l'energia**

procés adiabàtic *m* Procés termodinàmic sense transferència de calor.

procés isòbar *m* Procés termodinàmic a pressió constant.

procés isocor *m* Procés termodinàmic a volum constant.

procés isoterm *m* Procés termodinàmic a temperatura constant.

productor elèctric *m* Instal·lació que genera energia elèctrica partir de diferents tipus d'energia primària (hidràulica, tèrmica, nuclear, solar, eòlica, etc.). Per a caracteritzar-la es valora la potència instal·lada i la cobertura anual de la demanda o *mix* de generació. Pot generar en règim especial (amb ajudes i incentius per part del govern) o en règim ordinari (sense aquestes ajudes).

punt de màxima potència *m* Punt que comporta una potència màxima entre els diferents punts que formen la corba I - V d'un captador fotovoltaic. El punt de màxima potència serà aquell que en el gràfic maximitzi l'àrea del rectangle que obtenim per a cada punt. Els valors de la intensitat i del voltatge en aquest punt s'anomenen intensitat del punt de màxima potència (I_{pmp}) i voltatge del punt de màxima potència (V_{pmp}), respectivament.

radiació *f* Tipus de mecanisme per a la transferència de calor. És l'emissió contínua d'energia radiant per un cos.

Red Eléctrica de España, S. A. *f* Organisme que s'encarrega del manteniment i la gestió de les infraestructures de transport d'energia elèctrica en alta tensió a l'Estat espanyol.

regulador *m* Aparell que gestiona una instal·lació fotovoltaica i que, amb certa informació, dóna ordres i fa actuar el sistema solar per a evitar danys dels elements.

segon principi de la termodinàmica *m* Lleï que afirma que l'entropia (S), és a dir, el desordre d'un sistema aïllat, mai no pot decreïxer.

semiconductor *m* Material per al qual, mitjançant l'addició d'impureses durant la seva fabricació, es poden adaptar les propietats elèctriques perquè satisfacin millor necessitats concretes. En el cas del silici de tipus p o positiu s'hi introdueix bor, i en el cas del silici de tipus n o negatiu s'hi introdueix fòsfor. Les impureses s'introdueixen quan el silici està fos, i queden posteriorment a l'interior de l'estructura del material. Aquest procés s'anomena dopatge.

silici amorf *m* Silici dopat que no té cristalls en la seva estructura de solidificació, ja que sovint es fa refredar ràpidament sobre suports de plàstic o vidre. És el tipus de silici fotovoltaic amb menys rendiment i més barat.

silici monocristal·lí *m* Silici dopat de tal manera que, en refredar-se el material, s'hi forma un únic tipus de cristall. És el tipus de silici de més qualitat i, per tant, del que s'obté més rendiment en la transformació d'energia solar a electricitat. També és el més car.

silici policristal·lí *m* Silici dopat de tal manera que, en el procés de fabricació en què es refreda el silici, aquest se solidifica i forma diferents cristalls. En aquest cas el rendiment és més baix que el del silici monocristal·lí, però el material també és menys car.

sistema obert *m* Sistema en què pot haver flux de matèria i energia a través de la seva frontera, denominada superfície de control.

sistema aïllat *m* Sistema en què no hi ha intercanvi ni de massa ni d'energia amb els voltants.

sistema tancat *m* Sistema en què no hi ha flux de matèria a través de la seva frontera, encara que hi pot haver flux d'energia amb el medi circumdant.

sistema generador aïllat *m pl* Sistema de generació elèctrica que és capaç de generar electricitat, però que no ho fa connectat a la xarxa, sinó que és un sistema autònom per a l'autoconsum.

sistema termodinàmic *m* Regió de l'espai que és objecte d'estudi.

temperatura *f* Mesura de la calor o de l'energia tèrmica de les partícules d'una substància.

univers *m* Conjunt del sistema i l'entorn.

voltatge de circuit obert *m* Paràmetre característic de la corba *I-V* d'un captador fotovoltaic que s'esdevé quan el mòdul no té cap càrrega connectada (i per tant no circula intensitat pel circuit) i la seva superfície està il·luminada. És el punt en què el voltatge observat s'incrementa lleugerament i arriba a un màxim. Se simbolitza amb V_{co} o V_{oc} (de l'anglès *open circuit*).

volum *m* Magnitud extensiva definida com la propietat que tenen els cossos d'ocupar un determinat espai.

Bibliografia

Coll, P.; Pretel, C.; Cortés, G. (2003). *Tecnologia Energètica* (temes 0 al 4). Barcelona: CPDA-ETSEIB.

Cusidó, J. A.; Puigdomènech, J.; Hervada, C.; Batet, Ll. (2002). *Mòduls ambientals del Departament de Física i Enginyeria Nuclear*. Barcelona: Edicions UPC.

Incropera, D. *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Prentice Hall.

Kreith, Bohn (2001). *Principios de Transferencia de Calor*. Thomson Learning (Paraninfo).

Llorens, Miranda (1999). *Ingeniería Térmica*. Grupo editorial Ceac, S.A.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2008). *La Energía en España 2008*. Madrid.

Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (2008). *Perfil ambiental de España 2008. Informe basado en indicadores NIPO 770-09-185-7*. Madrid.

Moran, Shapiro (1995). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Barcelona: Editorial Reverté, S. A.

Mott, R. L. (1994). *Mecánica de Fluidos Aplicada* (4a edició). Prentice Hall Hispanoamericana, S. A.

Munson, Young, Okiishi (1999). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Ed. Limusa.

Operador del Mercado Ibérico de Energía - Polo Español, S.A. (2008). *Informe anual 2008*. Madrid.

Ortega, X.; Batet, Ll.; Coll P. (2003). *Tecnologia Energètica* (temes 5 al 8). Barcelona: CPDA-ETSEIB.

Potter, Wiggert (1998). *Mecánica de Fluidos*. Pearson Prentice Hall.

Red Eléctrica de España, S.A. (2008). *El sistema eléctrico español 2008*. Madrid.

Wark, Kenneth (1995). *Termodinámica* (5a edició). Mèxic: McGraw-Hill.

