

Capitolul I

I. SISTEME ENERGETICE

1.1 Introducere

Dezvoltarea activităților cu caracter energetic de-a lungul timpului a cunoscut diferite stadii de organizare a acestora, mergând de la caracterul separat al rezervării aprovizionării cu agenți energetici de către fiecare consumator, până la stadiul actual al organizării de tip sistem, permis de posibilitățile tehnice de realizare a instalațiilor, impus de cerințele de siguranță în funcționare și de eficiența economică.

Mai întâi au apărut forme de organizare în cadrul surselor clasice de energie primară (combustibili) prin funcționarea corelată a proceselor specializate de extracție, de transport și de distribuție la consumatori. Ulterior au apărut asemenea organizări și în cazul producerii principalelor forme de energie utilă: electrică, termică.

Datorită posibilităților tehnice oferite de electricitate, instalațiile de producere și transport a energiei electrice ca și a altor agenți energetici și-au sporit gradul de integrare și eficiență folosind mijloace automate pentru conducerea funcționării ca și tehnici moderne de circulație și prelucrare a informațiilor. Nivelul de integrare a activităților de producere și distribuție a energiei atins în prezent, în ansambluri mari de instalații, a căror funcționare este strâns corelată, poate fi caracterizat corect prin : *noțiunea de sistem*.

Prin această noțiune se înțelege un ansamblu de părți componente a căror stare se influențează reciproc, astfel încât modificarea stării uneia conduce la schimbarea stării întregului ansamblu. Analiza structurii și proprietăților sistemelor (nu numai a acelor energetice) face obiectul unei teorii formale (care nu ia în considerare modul de realizare fizică a conceptelor sistemului) – teoria sistemelor. Această teorie folosește variabila de intrare și de ieșire (prin care se realizează legătura sistemului cu ambianța sa) , precum și variabile de stare (care descriu starea sistemului).

Există mai multe tipuri de sisteme:

- Sisteme liniare care pot fi modelate prin ecuații liniare în care intră variabilele menționate;

- Sisteme neliniare, care pot fi modelate prin ecuații neliniare (chiar dacă o parte din acestea sunt liniare) ;
- Sisteme stocastice, a căror comportare evoluează în timp, în funcție de experiența acumulată în funcționare. Organizarea sistemică este o caracteristică a lumii în prezent.

Societatea a ajuns la o înțelegere globală în domeniile sale vitale de activitate, printre care și cel energetic. De asemenea, gradul de cunoaștere a mediului natural de către oameni a permis recunoașterea organizării strâns corelate a lumii vii cu natura nevie. Toate sistemele în general, sistemul energetic în particular, pot fi divizate în părți componente mari, care pot funcționa independent și au în interiorul lor conexiuni mai strânse decât față de exterior deci față de restul sistemului. În felul acesta se poate stabili o organizare ierarhizată a sistemelor după mărime și legăturile dintre ele.

Sistemele energetice își desfășoară activitățile în cadrul economic, social și natural al unui teritoriu. Se poate admite faptul că sistemele energetice sunt subsisteme ale sistemelor economice (naționale, regionale, etc...) ca și ale sistemului ecologic. Într-adevăr dezvoltarea energeticii este dirijată în scopul satisfacerii nevoilor de energie ale activităților producătoare de bunuri materiale, prestatoare de servicii cât și ale populației. În acest scop se produc cantitățile și calitățile necesare de agenți energetici. În această interdependență există și calea inversă, prin faptul că economia națională creează posibilitățile materiale de desfășurare a activităților energetice.

Energia nu este însă singura necesitate a economiei naționale. Aceasta mai are nevoie de materii prime, forță de muncă, etc... Această stare de lucruri face ca sistemul energetic să fie considerat un subsistem al sistemului economic. În privința relației dintre sistemul energetic și cel ecologic, se ajunge de asemenea la concluzia că sistemul energetic este un subsistem în raport cu mediul natural. Între aceste două sisteme există legături directe – mediul natural este unicul furnizor de energie primară pentru sistemul energetic cât și reciproc – sistemul energetic returnează mediului natural deșeurile activității sale.

Datorită faptului că mediul natural are o sferă de cuprindere cantitativă mult mai mare decât sistemul energetic, acesta din urmă are poziția de subsistem, fiind inclus în precedentul.

Pentru a pune în evidență organizarea ierarhică a sistemelor energetice, se vor folosi noțiunile de: *macrosistem*, *sistem*, *microsistem*.

1.2 Structura sistemului energetic

În cazul sistemelor energetice se poate atribui denumirea de *macrosistem* ansamblului activităților de producere și distribuție a energiei de toate formele, organizate pe același teritoriu. După mărimea (în ordine crescătoare) a teritoriului pe care își desfășoară activitățile, macrosistemele pot fi: naționale, regionale, continentale, planetare.

Părțile componente ale macrosistemului energetic, specializate pe anumite forme sau purtător de energie cuprinzând, la rândul lor, mari ansambluri de instalații repartizate pe teritorii vaste, având principii și metode proprii de funcționare și dezvoltare sunt denumite *sisteme*. Sistemele componente ale macrosistemului energetic sunt indicate în figura 1.1.

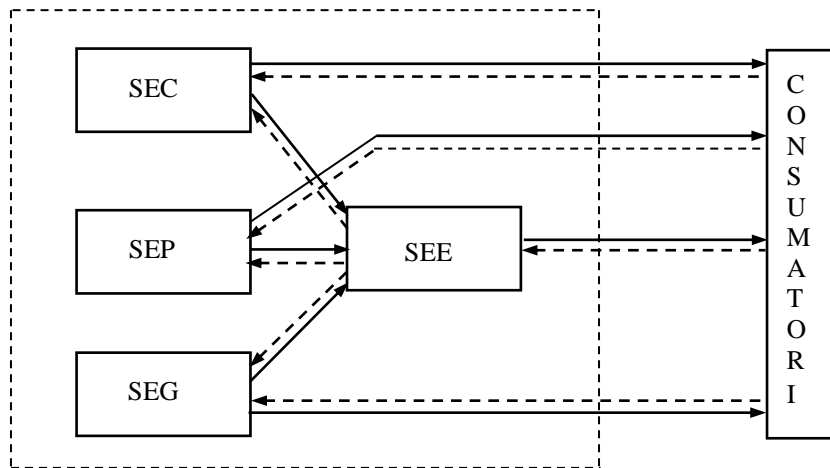


Figura 1.1 Structura macrosistemului energetic

Liniile pline reprezintă legăturile directe, sub formă de fluxuri de energie, iar liniile întrerupte corespund legăturilor inverse de natură informațională.

Notațiile din figura 1.1 au următoarele semnificații:

- SEC - Sistemul energetic al cărbunilor;
- SEP - Sistemul energetic al petrolului ;
- SEG - Sistemul energetic al gazelor naturale ;
- SEE - Sistemul electroenergetic.

În categoria de *microsisteme* energetice se pot include sistemele izolate de alimentare cu energie, desfășurate pe zone mici, în cadrul cărora necesitățile energetice sunt asigurate din resurse locale, convenționale sau neconvenționale.

Asemenea microsisteme pot avea denumirea de - solare, - eoliene, - hidroenergetice, sau - complexe după sursa principală de energie primară disponibilă.

1.3 Sistemul electroenergetic

Sistemul electroenergetic reprezintă acea parte a sistemului energetic, care cuprinde activitățile din domeniul producerii, transportului și distribuției energiei electrice. În prezent structura sistemelor electroenergetice este, în general aceeași pentru toate țările dezvoltate ca și pentru țara noastră.

Conform funcțiilor îndeplinite, structura minimă a unui sistem electroenergetic este aceea din figura 1.2.



Figura 1.2 Componenta unui sistem electroenergetic

În sistemele electromagnetice, energia electrică se prezintă exclusiv sub formă de curent alternativ trifazat. Folosirea curentului alternativ permite modificarea, prin transformatoare, a parametrilor tensiune și intensitate potrivit etapelor de transport, distribuție și utilizare a energiei, iar sistemul trifazat permite sporirea cantității de energie tranzitată de 3 ori în raport cu sistemul monofazat, folosind instalații cu numai 50% mai dezvoltate.

Ținând seama de suprafața de teren pe care este organizat ca sistem unic, structura sistemului electroenergetic poate fi diferită. Pentru țări mijlocii și mici, inclusiv pentru țara noastră, structura actuală a sistemului electroenergetic poate fi reprezentată în principiu, ca în figura 1.3.

Sursele de energie electrică cuprinse în figura 1.3 sunt:

- CTE - centrale termoelectrice de mare putere
- CHE - centrale hidroelectrice de mare putere

- CNE - centrale nucleare-electrice
- CL - centrale electrice de importanță locală, mai ales termoelectrice, destinate alimentării platformelor industriale;
- MC - microcentrale, mai ales hidroelectrice sau centrale eoliene.

În centrale, energia electrică este produsă de către generatoarele sincrone la tensiuni cuprinse între 6 și 24 KV (medie tensiune MT). Pentru a putea transporta energia, cu pierderi (prin efect Joule) cât mai reduse, la distanțele, uneori mari, până la marii consumatori, tensiunea este ridicată la un nivel denumit foarte înaltă tensiune FIT, (care pentru țara noastră este de 400 KV), în stațiile de transformare și conexiuni (STC) amplasate lângă centrale. Aceste stații sunt legate între ele printr-un inel de linii de transport la foarte înaltă tensiune (LTFIT). În sistemul electroenergetic al României, o parte din STC și LTFIT mai funcționează în prezent la o tensiune mai mică (220 KV), urmând a trece la nivelul superior pe măsura creșterii puterii în centrale.

În apropierea marilor concentrări de consumatori (centre industriale sau orașe mari) sunt amplasate stațiile de transformare și interconexiune (STIC). Aici, cu ajutorul autotransformatoarelor FIT/IT (în România 400/110 KV), se trimite energia în rețeaua de distribuție, care funcționează la înaltă tensiune IT. Prin intermediul liniilor acesteia (LDIT), energia este livrată direct unor mari consumatori sau este adusă în apropierea unor concentrări de consumatori mai mici. Rețeaua de distribuție de înaltă tensiune este interconectată la nivel regional, iar la nivel național numai parțial.

La liniile de distribuție sunt racordate stațiile de transformare (ST) în care tensiunea este coborâtă în continuare de la nivelul de înaltă tensiune la medie tensiune, iar prin liniile de distribuție de medie tensiune (LDMT) sunt alimentați direct o serie de consumatori industriali. Majoritatea consumatorilor este însă alimentată la joasă tensiune - JT (0.4 KV), prin intermediul posturilor de transformare (PT) racordate tot la LDMT. În rețeaua de distribuție de joasă tensiune există o serie de interconexiuni locale între posturile de transformare alimentate de la aceeași ST sau chiar de la stații diferite. De asemenea stațiile de transformare situate la distanțe mici între ele (de exemplu în orașe mari sau în zone industriale) pot fi interconectate pe partea de medie tensiune. Sursele de energie electrică de importanță mai mică sunt racordate la sistem la nivele de tensiune cu atât mai joase cu cât au putere mai redusă.

Astfel centralele locale (CL) sunt racordate la stațiile de transformare, iar microcentralele (MT) la posturile de transformare. Structura prezentată a sistemului energetic este o structură rațională, teoretică. Aspectul real al configurației sistemului depinde însă de particularitățile geografice și economice care privesc amplasarea surselor de energie, a consumatorilor, relief, etc...

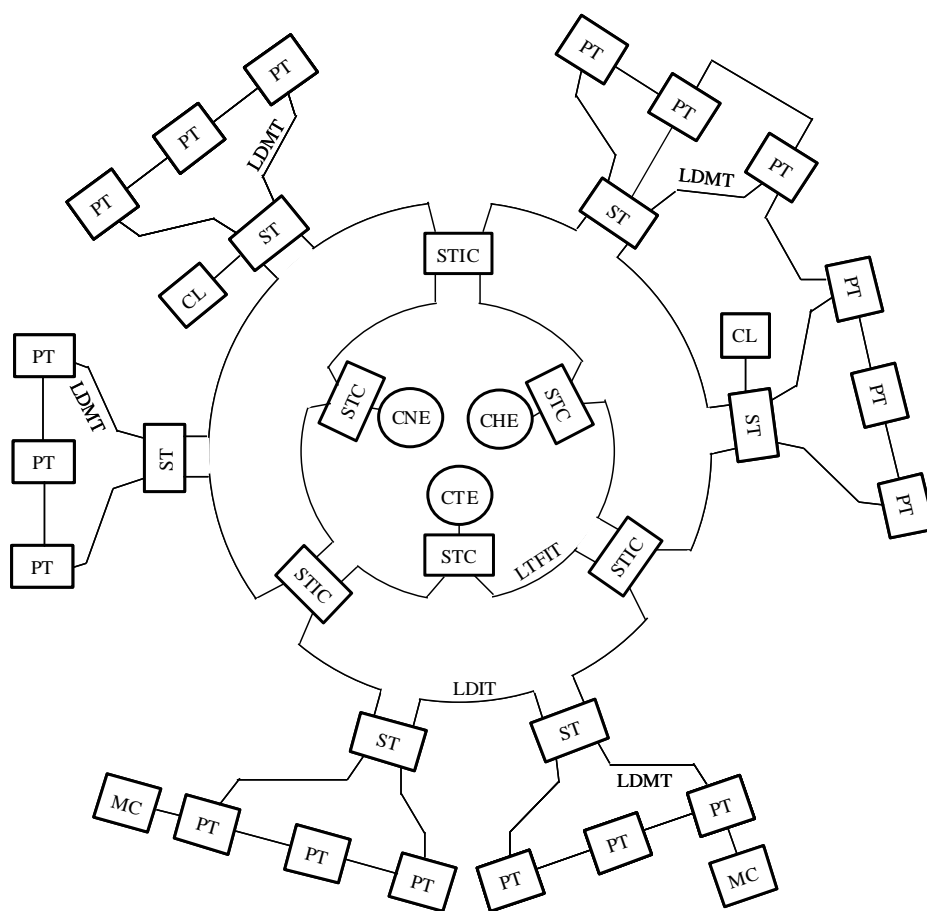


Figura 1.3 - Structura sistemului electroenergetic

Sistemele electroenergetice s-au dezvoltat datorită cerințelor crescânde de a realiza o siguranță cât mai mare în alimentarea consumatorilor și obținerea unei eficiențe economice cât mai ridicate. Ambele cerințe sunt îndeplinite prin realizarea interconexiunilor între surse și între consumatori, la nivele diferite de tensiune. În cazul schemelor de tip radial, ca în figura 1.2, ieșirea din funcțiune a unui element din cauza unei defecțiuni interne sau a unei influențe externe (fenomen natural), întrerupe funcționarea întregii scheme. De asemenea graficul de sarcină al sursei este direct dependent de acela al consumatorului, neexistând mijloace de acumulare a energiei, de mari proporții.

În cazul schemei sistemului electroenergetic din figura 1.3, există interconexiuni la toate nivelele de tensiune (FIT, IT, MT, JT). Acestea acționează pe o suprafață de teren cu atât mai mare cu cât tensiunea la care funcționează este mai înaltă. Schemele care prezintă asemenea legături sunt denumite *buclate*. Datorită acestor interconexiuni centralele electrice pot fi programate în funcțiune, în raport cu eficiența economică proprie, pe măsura cererii de energie a consumatorilor.

Vor căpăta prioritate în funcționare centralele mai economice, iar celelalte vor interveni în caz de avarie sau de depășire a puterii furnizate de primele. Numai prin intermediul interconexiunilor se poate funcționa în acest fel, fără a deranja consumatorii.

Observație: Pentru claritatea exprimării nu a fost amintit aici aspectul pierderilor de energie prin transportul acesteia în sistem, ceea ce face ca programarea funcționării să fie o problema de optimizare cu mai multe restricții. Pe de altă parte, existența interconexiunilor mărește siguranța în alimentare a consumatorilor în sensul că, dacă o centrală, o linie sau o stație devin indisponibile din orice motiv, consumatorii aferenți pot fi preluați de către restul sistemului. Datorită interconexiunilor, cantitatea fizică de echipament necesară pentru un anumit nivel de siguranță în alimentare, este considerabil mai mică decât în cazul schemelor radiale.

În cadrul sistemelor electroenergetice, o condiție strict necesară pentru funcționarea interconectată a surselor este păstrarea aceleași valori a frecvenței curentului alternativ în toate instalațiile componente. Diferențele de frecvență între centrale ar fi însoțite de variații rapide ale mărimii și sensului de circulație a energiei în sistem, care pot deteriora instalațiile componente. Asemenea situații numite "*pierderea sincronismului*"

pot surveni în cazul unor avarii grave de tipul scurtcircuitelor polifazate, dacă protecțiile respective nu funcționează prompt și corect.

În cazul statelor cu teritorii foarte întinse și grad de concentrare diferit al populației, organizarea unui sistem unic, interconectat nu se poate realiza în mod economic prin structura prezentată anterior. În asemenea cazuri, structuri de felul aceleia din figura 1.3 se realizează pe teritorii mai restrânse, iar între aceste sisteme "locale" se prevăd legături prin:

- linii de transport în curent alternativ la FIT sau UIT (ultraînaltă tensiune), mergând până la 750 și 1150 KV

- linii de transport în curent continuu (LTCC în figura 1.4).

Procedeu acesta permite funcționarea celor două sisteme cu frecvențe diferite. Sistemele 1 și 2 pot reprezenta chiar și sistemele unor țări vecine. Asigurarea stării de funcționare normală a instalațiilor sistemului se realizează și prin existența unor dispozitive de protecție împotriva regimurilor de defect (care, cel mai frecvent sunt scurtcircuitate) sau de suprasarcină. De asemenea există sisteme automate pentru reglarea tensiunii, frecvenței, puterii, etc...

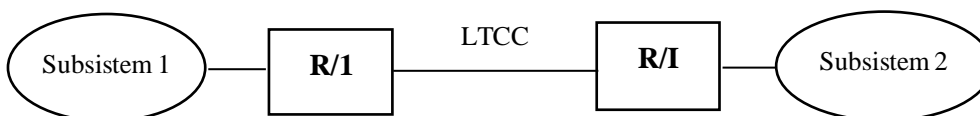


Figura 1.4 Interconectarea sistemelor locale în curent continuu

1.4 Conducerea exploatarei sistemelor energetice

Realizarea avantajelor tehnice ale interconectării surselor și consumatorilor în cadrul sistemelor energetice poate fi obținută numai prin menținerea permanentă a stării optime de funcționare pentru ansamblul sistemului. Pentru aceasta, este necesară conducerea centralizată a tuturor instalațiilor componente. Acest mod de organizare a conducerii respectă câteva principii generale:

- integrarea într-o concepție strategică de conducere;
- utilizarea unui flux informațional adecvat;
- asigurarea realizării eficienței economice;
- asigurarea fiabilității sistemului;
- realizarea unei structuri organizatorice rațională, suplă și evolutivă.

Conducerea sistemului energetic se realizează prin dispecerat. Principalele funcții ale dispeceratului energetic sunt:

- coordonarea regimurilor de funcționare și a manevrelor în instalațiile sistemului;
- asigurarea calității energiei livrate (frecvența și tensiunea pentru energia electrică, temperatura și presiunea pentru energia termică);
- urmărirea permanentă a stocurilor de energie primară;
- reglarea circulației și a schimburilor de energie în cadrul sistemului și în raport cu sistemele învecinate.

Realizarea acestor funcțiuni de la un singur nivel de decizie pentru toate instalațiile unui sistem energetic este imposibilă din cauza numeroaselor decizii și comenzi care trebuie realizate, uneori simultan. Din acest motiv conducerea prin dispecer se realizează pe mai multe trepte ierarhizate fie din punct de vedere teritorial, fie din punct de vedere al organizării instalațiilor deservite. O treaptă de conducere prin dispecer conține cel puțin:

a) *un compartiment de comandă operativă*, încadrat cu personal de specialitate, care urmărește funcționarea instalațiilor asupra cărora are autoritate de conducere operativă. Acesta coordonează regimurile de funcționare și manevrele din aceste instalații, atât în funcționare normală cât și în regim de avarie.

Fiecare treaptă execută și deciziile treptei superioare și poate lua decizii proprii pentru treptele inferioare, subordonate. Personalul din compartimentul de comandă își desfășoară activitatea într-o cameră de comandă, având la dispoziție aparatură pentru urmărirea stării instalațiilor și mijloace de comunicație pentru schimburi de informații sau de comenzi.

b) *un compartiment de regimuri de funcționare*, în care se prevăd și se elaborează programele de funcționare a instalațiilor și manevrele pe perioadele următoare, se urmărește și se analizează modul de realizare a acestora.

În cadrul sistemului energetic național al României, conducerea prin dispecer se realizează în patru trepte:

- dispecerul energetic național (DEN);
- dispeceri energetici ai subsistemelor componente (DES);
- dispeceri energetici teritoriali (DET);
- dispeceri energetici locali (DEL).

Dispecerii energetici locali sunt structurați tehnologic astfel:

- dispeceri de distribuție în rețele de electricitate, de gaze, de petrol;
- dispeceri în centralele electrice;
- dispeceri în schemele de amenajare hidroenergetică;
- dispeceri de platforme industriale.

Fluxul informațional în cadrul acestei scheme de organizare are următoarele caracteristici:

- are o circulație ascendentă, de la treptele inferioare către treptele superioare;
- la treptele inferioare cantitatea de informații este mare, iar gradul de prelucrare redus;
- cu cât se trece la trepte mai înalte, numărul informațiilor se reduce, iar conținutul lor se îmbogățește prin sinteză.

1.5 Dezvoltarea sistemelor energetice

Sistemele energetice au un pronunțat caracter dinamic. Prin modificarea permanentă a cererii de energie, a surselor de energie disponibile, a procedurilor de conversie a energiei, a procedurilor tehnologice de transport și a tehnologiilor de consum, componența și structura sistemelor energetice este în permanentă schimbare. Aceste schimbări se fac din mers, păstrând starea de funcționare a sistemului.

Activitatea de dezvoltare a sistemelor energetice este foarte amplă, mergând de la principii generale și strategii de dezvoltare până la precizări foarte concrete privind investițiile în sistem. Planificarea dezvoltării sistemelor energetice se face cu luarea în considerare a unor principii, specifice macrosistemelor precum:

- *principiul coordonabilității* - potrivit căruia, din punct de vedere al coordonării, conducerea ierarhizat-descentralizată a sistemelor mari, compuse din mai multe sisteme interconectate, poate fi la fel de bună ca și conducerea centralizată, cu condiția să existe un sistem coordonator.
- *principiul incompatibilității* - pe măsură ce complexitatea sistemului crește, posibilitatea de a descrie comportarea sa cu ajutorul unui model scade, până la un nivel dincolo de care precizia și calitatea modelării se exclud reciproc; de aceea este necesară o adaptare continuă a modelelor la structura și complexitatea sistemelor.
- *principiul fiabilității* - care arată că un anumit nivel de fiabilitate se

definește ca un compromis optim între nivelul rezervelor (stocurilor) și daunele provocate de nealimentarea cu energie;

- *principiul economicității* - care arată că optimul economic al unui macrosistem este diferit de optimul fiecărui sistem în parte, între sistemele componente pot exista compensații limitate de economicitate pe ansamblu a macrosistemului.

Studiile de dezvoltare ale sistemelor energetice conțin mai multe etape:

- prognoza resurselor primare și a capacității tehnologiilor de conversie;
- prognoza consumului total și pe tipuri de energie;
- studiul participării resurselor la acoperirea categoriilor de consum;
- definirea structurii sistemului energetic;
- elaborarea balanței energetice naționale;
- studiul interacțiunii cu sistemele vecine, a fiabilității, a stocurilor de energie primară și a rezervelor de instalații;
- studiul efectelor ecologice;
- studiul asigurării cu personal calificat;
- studiul structurii organizatorice;
- studiul eficienței economice pe ansamblul sistemului.

În urma efectuării acestor studii și a îmbunătățirii soluțiilor adoptate, se poate trece la detalierea etapelor de dezvoltare și precizarea ritmului de execuție a obiectivelor noi necesare.

Capitolul II

II. COMPARAREA ECONOMICĂ A VARIANTELOR DE DEZVOLTARE ALE SISTEMELOR ENERGETICE

Realizarea unui obiectiv energetic, care să îndeplinească un anumit rol în sistem, se poate face în mai multe moduri, reprezentând soluții tehnice diferite ale aceleiași probleme. Alegerea variantei optime trebuie să se bazeze pe o analiză multilaterală a condițiilor și restricțiilor tehnice, a duratei de execuție, a comportării în exploatare a obiectivului proiectat, etc... Alegerea soluției care se va aplica efectiv, se va face, pe baza unor criterii economice, dintr-un număr (uneori mare) de variante, care să acopere cât mai complet posibilitățile de realizare tehnică. Se pot utiliza mai multe metode de comparație economică.

2.1 Metoda duratei de recuperare a investițiilor

În cadrul acestei metode, se calculează timpul după care beneficiul (B) obținut din funcționarea obiectivului, va egala costul inițial al investiției (I). Acest beneficiu se poate prezenta sub diferite forme: beneficiu economic propriu-zis, rezultat dintr-o activitate productivă, economii rezultate prin reducerea unor pierderi de energie, etc... Calculul timpului de recuperare se face în mod simplu:

$$t_{rec} = \frac{I}{B} \quad (2.1)$$

Un asemenea calcul are caracter estimativ deoarece nu ia în considerare dobânzile aferente fondurilor imobilizate pe mai mulți ani. Investiția totală cuprinde mai multe capitole:

- investiții directe respectiv costurile, conform proiectului, pentru materiale, lucrări de construcții, echipamente, montaj;
- investiții conexe reprezentând costul eliberării terenului, regularizări sau devieri ale unor cursuri de apă, modificarea traseelor unor drumuri, linii electrice, conducte, etc...

- investiții colaterale constând în costul lucrărilor de asigurare a obiectivului cu utilități precum alimentări cu apă, gaze, electricitate, telecomunicații, drumuri, etc...

- fonduri circulante de primă dotare necesare pentru punerea în funcțiune a obiectivului. În cadrul acestei metode, se poate face o comparație a variantelor luând în considerare și cheltuielile anuale de exploatare. Fie două variante A și B, caracterizate prin costul investițiilor I_A și I_B și cheltuielile anuale de exploatare c_A și c_B . Dacă :

- $I_A > I_B$ și $c_A > c_B$ – este mai avantajoasă varianta B;
- $I_A < I_B$ și $c_A < c_B$ – este mai avantajoasă varianta A;
- $I_A < I_B$ și $c_A > c_B$ – atunci la un moment t , este valabilă egalitatea:

$$I_A + c_A \cdot t = I_B + c_B \cdot t \quad (2.2)$$

De unde :

$$t = \frac{I_A - I_B}{c_B - c_A} \quad (2.3)$$

Mărimea acestui timp se compară cu o durată (T'_n) normată sau stabilită pe altă cale. Dacă:

$t < T'_n$ este avantajoasă varianta B;

$t > T'_n$ este mai avantajoasă varianta A.

Metoda duratei de recuperare a investiției se aplică în fazele preliminare ale proiectării când nu este necesară o precizie foarte mare.

2.2 Metoda cheltuielilor anuale de calcul

Față de metoda precedentă, aceasta ia în considerare costul exploatării obiectivului pe toată durata de funcționare. Se introduce astfel costul total necesar realizării și exploatării obiectivului:

$$I_t = I + C_e \cdot T_n \quad (2.4)$$

în care C_e este costul anual al exploatării, iar T_n durata de funcționare

normată sau estimată. Cheltuiala anuală, notată cu Z , se calculează prin raportare la T_n .

$$Z = C_e + \frac{I}{T_n} \quad (2.5)$$

Soluția optimă este aceea pentru care Z este minim.

2.3 Metoda cheltuielilor totale actualizate

Creșterea duratelor de execuție, mai ales la obiectivele de mare amploare, provoacă imobilizări îndelungate ale fondurilor de investiții. Aceasta are urmări asupra economiei naționale datorită faptului că circulația fondurilor aduce beneficii.

Astfel o sumă de bani S va valora peste un an $S(1+a)$, iar o sumă de aceeași mărime din anul viitor, valorează în prezent $\frac{S}{(1+a)}$, în care “ a ” se numește rata de actualizare. Pentru o perioadă de timp t , rezultă:

$$S \xrightarrow{t} S \cdot (1+a)^t \text{ sau } S \cdot (1+a)^{-t} \xrightarrow{t} S \quad (2.6)$$

Acest mod de calcul se aplică tuturor componentelor de cheltuieți luate în considerare, defalcate în cote anuale. Componentele pot diferi de la caz la caz, dar acelea cu caracter mai general sunt cele mai frecvent luate în calcule. Printre acestea, în cazul obiectivelor energetice, figurează:

- a) *investițiile totale* pentru realizarea obiectivului, compuse din capitolele menționate anterior și în plus, *investițiile pentru echivalare*, referitoare la capacitatea de producție a obiectivului;
- b) *cheltuieli anuale de producție* inclusiv consumul propriu tehnologic precum și *cheltuielile de echivalare* pentru producția de energie;
- c) *costul daunelor* economice suportate de consumatori datorită nelivrării energiei ca urmare a întreruperilor în alimentare datorate furnizorului.
- d) *valoarea remanentă* sau *reziduală* a obiectivului.

O particularitate a aplicării aceste metode în energetică este operația de echivalare a variantelor. Prin aceasta se înțelege aducerea în mod fictiv, a variantelor la efecte tehnice identice pentru sistemul energetic. În mod firesc,

diferite variante de proiectare ale unui obiectiv energetic diferă între ele prin puterea instalată și producția de energie realizată în total sau eșalonat în timp, ca și prin consumurile proprii tehnologice.

Prin echivalare, variantele care au parametri energetici mai reduși sunt aduse la nivelul variantelor maxime pentru puterea instalată, respectiv pentru producția de energie. Se consideră că diferențele constatate cu privire la puterea instalată se acoperă de către o centrală de echivalare, iar producția de energie neacoperită, ca fiind acoperită prin funcționarea aceleași centrale de echivalare.

Centrala de echivalare se definește în concordanță cu politica energetică urmată în perioada respectivă. De regulă, aceasta este centrala de tipul considerat cel mai puțin avantajos economic prin natura proceselor de conversie sau a energiei primare folosite. În felul acesta se stimulează promovarea soluțiilor mai economice, care răspund și altor cerințe stabilite de politica statului. De exemplu, pentru perioada deceniului 1980 – 1990 s-au definit drept centrale de echivalare:

- o centrală de bază, ca fiind o termocentrala cu 4 turboagregate cu aburi de 330 MW fiecare, funcționând cu păcura la prețul mediu pe piața mondială.

Păcura era considerată drept combustibil marginal, la care nu se apelează și a cărui utilizare în electroenergetică se restrânge la minim;

- o centrală de vârf, ca fiind o termocentrala având trei turboagregate cu gaze în circuit deschis, cu temperatura inițială a gazelor de 800 °C și durata de utilizare de 1000 – 2000 ore/an. Formula de calcul a cheltuielilor totale analizate, cuprinzând componentele menționate anterior este:

$$CTA = \sum_{i=1}^{D'} I_i \cdot (1+a)^{-i} + \sum_{i=d+1}^{D'} c_i \cdot (1+a)^{-i} + \sum_{i=d+1}^{D'} p_i \cdot (1+a)^{-i} - v_r \cdot (1+a)^{-D} - w_n \cdot (1+a)^{-D'} \quad (2.7)$$

Relația este scrisă considerând ca moment al actualizării anul de începere al investiției. Notațiile au următoarea semnificație:

a - rata de actualizare; d - durata de execuție a lucrărilor; D - durata de funcționare a obiectivului; D' - intervalul de studiu; i - anul curent;

I_i - mărimea investiției în anul i ; c_i - cheltuieli anuale de producție;

p_i - daune anuale datorate nerespectării programului de alimentare a consumatorilor; v_r - valoarea reziduală a obiectivului, care va fi dezafectat după termenul normat de funcționare (acest termen apare în relație dacă $D' > D$); w_n - valoarea remanentă a obiectivului la sfârșitul perioadei de studiu (acest termen apare în calcul dacă $D' < D$). Pentru actualizarea factorilor cuprinși în relația (2.7), duratele de execuție, de studiu și de viață au fost considerate ca în fig. 2.1.

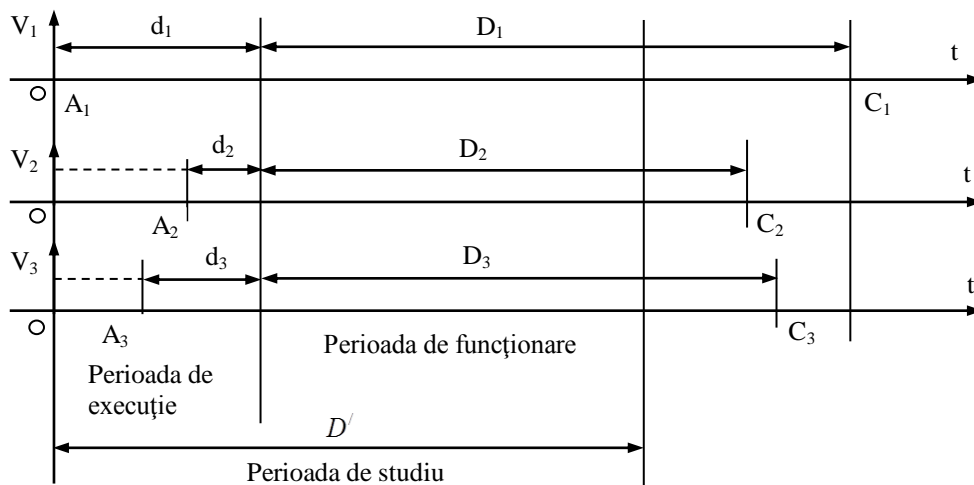


Figura 2.1 Reprezentarea duratelor de execuție, funcționare și studiu pentru variantele V_1, V_2, V_3 .

Capitolul III

III. CURBELE DE SARCINĂ ALE SISTEMELOR ENERGETICE

3.1 Tipuri de curbe de sarcină

Curbele de sarcină reprezintă variația în timp a consumului de energie. Cu ajutorul curbelor de sarcină se poate stabili modul de funcționare a surselor de energie din punct de vedere al capacităților de producție (puteri) și a variației în timp a acestora. Aceste curbe de sarcină constituie elementul de plecare în activitatea de prognoză a dezvoltării sistemelor energetice. Mai ales în cazul sistemului electroenergetic, importanța curbelor de sarcină este deosebită datorită corelării foarte rigide a producției cu consumul de energie electrică, în absența unor instalații de stocare adecvate. Curbele de sarcină se întocmesc la diferite nivele în cadrul consumatorilor de energie: pentru un agregat, secție, unitate economică, nod al sistemului sau pe ansamblul sistemului energetic. La acest ultim nivel curba de sarcină a surselor de energie diferă de aceea a consumatorilor numai în măsura în care există instalații de stocare.

În funcție de modul de reprezentare a variației sarcinii în timp există:

- curbe de sarcină în timp real
- curbe clasate de sarcină.

În primul caz, puterea debitată (consumată) este reprezentată în modul cronologic de variație. Asemenea curbe se pot obține direct, prin înregistrarea consumului în funcție de timp.

Al doilea tip de curbă se obține prin prelucrarea curbei în timp real, rezultând graficul de variație a puterii în ordinea strict descrescătoare a mărimii acesteia, păstrându-se aceeași durată totală de cerere a fiecărei valori a puterii în intervalul considerat figura 3.1.

Din punct de vedere a intervalului de timp la care se referă, cel mai mult utilizate sunt curbele de sarcină zilnice și anuale. Forma lor diferă sensibil. De exemplu, pentru sistemul energetic al României, cele două curbe de sarcină au aspectul din figura 3.2.

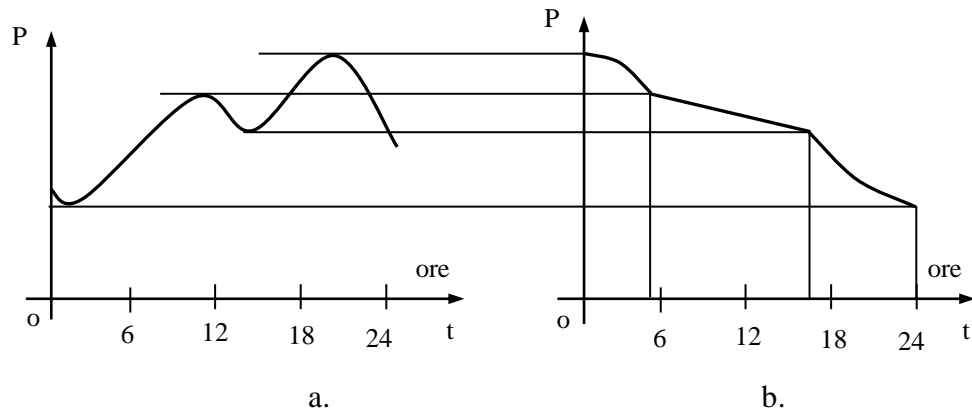


Figura 3.1 Curbe de sarcină în timp real și clasată

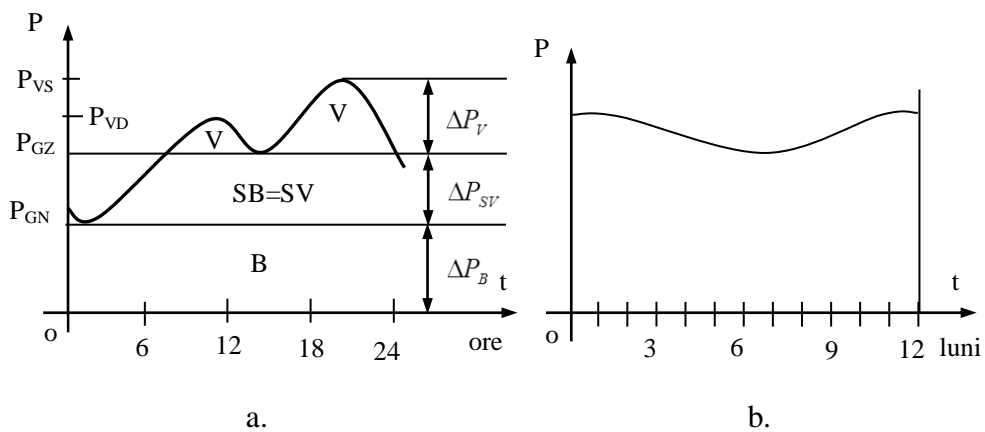


Figura 3.2 Curbele de sarcină zilnică și anuală

Forma curbei zilnice de sarcină se explică prin modul de eșalonare pe durata zilei a diferitelor activități, în principal activitatea de producție industrială ca și a transportului, serviciilor, etc...

Vârful de seară este accentuat de intervenția consumului casnic și public pentru iluminat, încălzit, etc... Poziția în timp a vârfurilor și golurilor ca și nivelul acestora depind de tipul preponderent al consumului, de anotimp și de tipul de zi (lucrătoare sau de repaus).

Forma curbei anuale de sarcină depinde și de tipul de climă din teritoriul considerat: în zonele temperate, minimumul din timpul verii corespunde scăderii consumului pentru încălzire și iluminat. Curba zilnică de sarcină se poate împărți în zone orizontale, în funcție de regimul de funcționare al surselor care participă la acoperirea cererii, figura 3.2.a:

- zona de vârf (V), situată deasupra nivelului P_{GZ} al puterii la minimumul de zi;
- zona de semivârf sau de semibază ($SV \equiv SB$), situată între minimumul de zi și cel de noapte, P_{GN} ;
- zona de bază (B), situată sub nivelul P_{GN} .

Modul de funcționare al surselor în funcție de încadrarea în aceste zone este diferit:

- în zona de bază, funcționare neîntreruptă, la sarcină constantă;
- în zona de semibază, funcționare cu o pornire și o oprire zilnică;
- în zona de vârf, funcționare cu două porniri și două opriri zilnice.

Fiecare din zone este acoperită prin participarea simultană a mai multor surse, astfel încât fiecare dintre ele poate avea intervale de funcționare cu sarcină constantă, chiar și în zonele de vârf sau de semivârf ale graficului.

Variația sarcinii în intervalul considerat (o zi), se poate aprecia cu ajutorul unor indicatori:

- sarcina medie:

$$P_m = \frac{W}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (3.1)$$

- factorul de aplatizare

$$\gamma = \frac{P_m}{P_{\max}} = \frac{P_m}{P_{VS}} \quad (3.2)$$

- coeficientul de minim

$$\alpha = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{P_{GN}}{P_{VS}} \quad (3.3)$$

- durata de utilizare a puterii maxime

$$T_u = \frac{W}{P_{\max}} = \frac{P_m \cdot T}{P_{VS}} = \gamma \cdot T \quad (3.4)$$

Contribuția celor trei zone, în totalul consumului se poate evalua prin:

- ponderea energiei zonei în total

$$w_V = \frac{W_V}{W}; \quad w_{SV} = \frac{W_{SV}}{W}; \quad w_B = \frac{W_B}{W} \quad (3.5)$$

- ponderea puterii zonei față de puterea maximă

$$p_V = \frac{\Delta P_V}{P_{VS}}; \quad p_{SV} = \frac{\Delta P_{SV}}{P_{VS}}; \quad p_B = \frac{\Delta P_B}{P_{VS}} \quad (3.6)$$

Confirm acestor definiții, rezultă:

$$w_V + w_{SV} + w_B = 1; \quad p_V + p_{SV} + p_B = 1 \quad (3.7)$$

Din punctul de vedere al funcționării surselor de energie (centralele electrice sau termice), regimul optim este acela cu sarcină constantă. Ca urmare, se aplică măsuri tehnice și organizatorice în scopul aplatizării graficului de sarcină.

Din punctul de vedere al furnizorului, principala măsură este tarifarea diferențiată, stimulativă pentru uniformizarea consumului sau pentru evitarea accentuării vârfurilor, în sensul măririi prețului în perioadele de vârf de sarcină.

De asemenea sistemul energetic își poate realiza instalații de stocare a energiei. Consumatorii au și ei o serie de mijloace de a răspunde acestei cerințe:

- repartizarea consumului industrial pe trei schimburi ;
- programarea utilajelor mari consumatoare în golul de noapte;
- decalarea orarului de activitate în funcție de ceilalți consumatori;
- reducerea sarcinii pe durata iernii prin programarea reparațiilor la echipamentele mari consumatoare, etc...

3.2. Expresii analitice ale curbelor de sarcină

În scopul folosirii lor pentru calcule cu privire la programarea funcționării centralelor și rețelelor electrice, curbele de sarcină se exprimă prin modele matematice deduse prin aproximarea variației puterii în timp cu ajutorul unor funcții simple.

Curbele de sarcină în timp real (zilnice sau anuale) se pot liniariza sub forma unei succesiuni de segmente orizontale cu durata de o oră (sau mai mică) în cazul curbei zilnice și cu durata de o lună în cazul curbei anuale, figura 3.3. Ordonata la care se situează aceste segmente se determină din condiția egalității ariilor delimitate de segmentele respective și de segmentele curbei în același interval, astfel încât ea reprezintă puterea medie în acel interval.

Curbele clasate de sarcină se pretează mai bine la exprimare matematică prin liniarizare, folosind un număr variabil de segmente de dreaptă. Expresiile analitice pentru asemenea reprezentări sunt:

a) pentru curba clasată modelată printr-un singur segment, folosind notațiile din figura 3.4.a.

$$P = P_M - \frac{P_V}{T_o} t \quad (3.8)$$

b) pentru curba modelată prin două segmente, figura 3.4.b.

pentru $t < T_1$:

$$P^{(1)} = P_M - (P_M - P_1) \cdot \frac{t}{T_1} \quad (3.9)$$

În scopul uniformizării expresiilor, relația precedentă se poate pune sub forma:

$$P^{(1)} = P_M - \lambda_1 \cdot \frac{P_V}{T_o} \cdot t \quad (3.10)$$

Factorul dimensional λ_1 se determină prin identificarea coeficienților celor două expresii:

$$\lambda_1 = \frac{T_o}{T_1} \cdot \frac{P_M - P_1}{P_V} \quad (3.11)$$

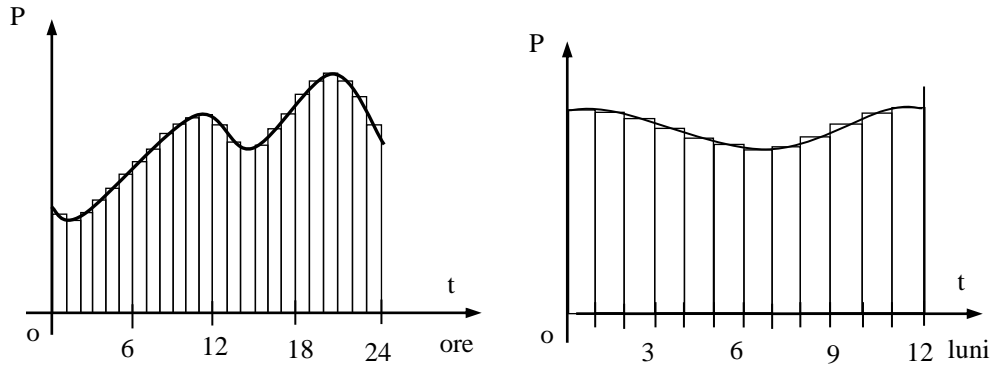


Figura 3.3 Liniarizarea curbelor de sarcină în timp real

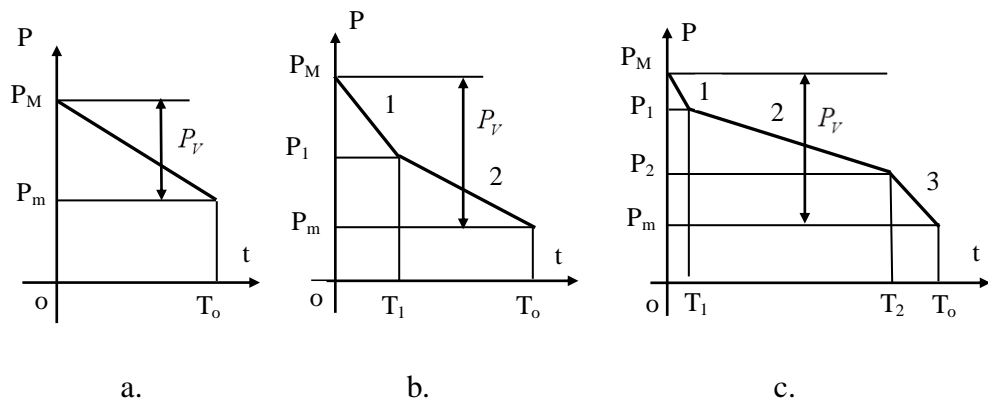


Figura 3.4 Liniarizarea curbelor clasate de sarcină

- pentru $t > T_1$ se obține:

$$P^{(2)} = P_1 - \frac{P_1 - P_m}{T_o - T_1} \cdot (t - T_1) \quad (3.12)$$

ceea ce se poate pune sub forma:

$$P^{(2)} = q_2 \cdot P_M - \lambda_2 \cdot \frac{P_V}{T_o} \cdot t \quad (3.13)$$

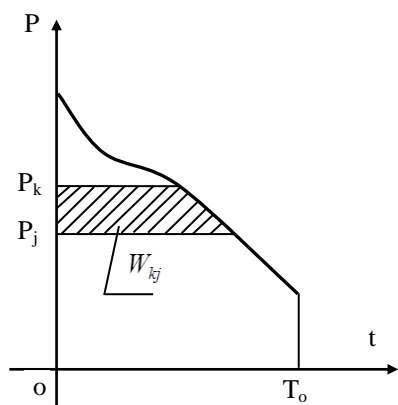
de unde, prin identificare, rezultă coeficienții adimensionali:

$$q_2 = \frac{P_1 T_o - P_m T_1}{P_M (T_o - T_1)}; \lambda_2 = \frac{T_o}{T_o - T_1} \cdot \frac{P_1 - P_m}{P_V} \quad (3.14)$$

Printr-un procedeu identic se obțin și expresiile pentru cazul din figura 3.4. c.

3.3. Utilizarea curbelor clasate de sarcină pentru calculul energiei produse de surse

Încadrarea surselor de energie (electrică) în curba clasată a puterii, zilnică sau anuală, se face prin atribuirea unei benzi orizontale într-una din zonele curbei (între punctele P_k și P_j din figura 3.5). Delimitarea zonelor



de vârf și semivârf pe curba clasată se poate face numai cunoscând nivelele de putere care se definesc pe curba în timp real.

Energia cuprinsă în banda delimitată în figura 3.5 și care face parte din zona de sarcină variabilă în timp, se poate calcula cu relația:

$$W_{kj} = \int_{P_j}^{P_k} t(P) \cdot dP \quad (3.15)$$

Figura 3.5 Încadrarea surselor în curba clasată de sarcină

Expresia de calcul a acestei

energii depinde de modul de modelare a curbei clasate și de zona în care este încadrată sursa considerată. Pentru curba liniarizată printr-un singur segment de dreaptă se obține: - pentru zona de baza

$$P < P_m; \quad t(P) = T_o \quad (3.16)$$

$$W_{kj} = \int_{P_j}^{P_k} T_o dP = T_o (P_k - P_j) \quad (3.17)$$

- pentru zona de sarcină variabilă, din expresia (3.8) rezultă:

$$t = (P_M - P) \cdot \frac{T_o}{P_V} \quad (3.18)$$

astfel încât:

$$W_{kj} = \int_{P_j}^{P_k} (P_M - P) \cdot \frac{T_o}{P_V} \cdot dP = \frac{P_M T_o}{P_V} (P_k - P_j) - \frac{T_o}{2P_V} (P_k^2 - P_j^2)$$

de unde, prin simple calcule obținem:

$$W_{kj} = \frac{T_o}{2P_V} \cdot (P_k - P_j) \cdot [2P_M - (P_k + P_j)] \quad (3.19)$$

În mod analog se procedează și pentru curba clasată modelată prin două segmente de dreaptă. Pentru zona de bază rămâne valabilă expresia (3.17). Pentru zona variabilă, ținând seama de identitatea formală a expresiilor analitice ale celor două segmente (3.10) și (3.13) cu expresia (3.8), valabilă în cazul expus mai sus, și de prezența factorilor adimensionali λ și q rezultă expresiile:

- pentru zona ($P_1 < P < P_M$)

$$W_{kj}^{(1)} = \frac{T_o}{2\lambda_1 P_V} \cdot (P_k - P_j) \cdot [2P_M - (P_k + P_j)] \quad (3.20)$$

- pentru zona ($P_m < P < P_1$)

$$W_{kj}^{(2)} = \frac{T_o}{2\lambda_2 P_V} \cdot (P_k - P_j) \cdot [2q_2 P_M - (P_k + P_j)] \quad (3.21)$$

Reprezentând într-un sistem de axe (P/P_M , $W/P_M T_o$) variația energiei cuprinse în graficul de sarcină în funcție de mărimea puterii, se obține așa numita *curbă integrală a puterii*.

Capitolul IV

IV. CONVERSIA ENERGIEI

4.1 Considerații generale

Din cele mai vechi timpuri omenirea s-a preocupat de utilizarea energiei primare într-o formă potrivită intereselor sale.

Astfel energia hidrolică sau energia eoliană a fost transformată în energie mecanică pentru propulsarea navelor sau acționarea unor mecanisme puse în slujba omului, energia chimică a lemnului a fost transformată în căldură pentru prepararea hranei, apei calde, etc... , iar energia solară a fost folosită în cele mai diverse procese ale economiei rudimentare. Procesele de conversie ale energiei au evoluat odată cu apariția mașinii cu abur, descoperirii electricității, utilizării energiei nucleare, etc...

Prin conversie vom defini transformarea energiei chimice a combustibililor, energiei solare, hidrolice, eoliene, etc... în căldură, energie electrică sau alte forme.

Conversia energiei are la bază relația lui Einstein, $E = mc^2$, care exprimă faptul că energia și masa nu se conservă independent, ci împreună, în raportul egal cu c^2 . Astfel, dacă masa de 1 kg ar putea fi total convertită în energie s-ar obține o cantitate de 25 miliarde kWh, însă actualul nivel tehnic nu permite o conversie mai bună de 1 % din masa totală realizată în cele mai puternice reacții de fuziune.

Principalele căi de conversie a energiei primare în energie utilă sunt: conversia energiei chimice a combustibililor fosili în căldură, conversia căldurii în energie mecanică, conversia energiei mecanice în energie electrică, conversia energiei de fuziune în căldură, conversia energiei de fuziune în plasmă, conversia energiei chimice în energie electrică.

Tipurile de instalații care asigură procesele de conversie menționate sunt: cazanele, turbinele cu abur, generatoarele electrice, reactoarele nucleare, generatoarele magnetohidrodinamice, pilele de combustie.

În continuare vom folosi frecvent noțiuni, relații, legi din termodinamică, electrotehnică, etc... , conversia energiei fiind prin excelență un domeniu interdisciplinar.

4.2 Lucrul mecanic efectuat de un sistem

Noțiunea de lucru mecanic efectuat de sistem, când variază starea sistemului, joacă un rol important în termodinamica.

Pentru a scrie expresia lucrului mecanic al unui sistem în cazul general, se notează parametrii externi ai sistemului prin a_1, a_2, a_3, \dots (coordonatele generalizate ale corpurilor exterioare în sens lagrangean), iar prin A_1, A_2, A_3, \dots forțele generalizate corespunzătoare acestor parametri.

Aceste forțe acționează asupra corpurilor și sunt produse de interacțiunea acestora cu sistemul nostru. Atunci lucrul mecanic este egal cu:

$$dL = \sum A_i da_i \text{ respectiv } L_{12} = \int_1^2 A_i da_i \quad (4.1)$$

Forțele generalizate A_i depind, în general, de parametrii externi a_1, \dots, a_n și de starea internă a corpului (temperatura τ , parametrii interni ξ). În general lucrul mecanic depinde de drumul de trecere dintr-o stare într-alta. Respectiv :

$$dL = -dE(a, \tau, \xi)$$

4.3 Legea conservării energiei pentru sisteme izolate adiabatic

Numim sistem izolat adiabatic un sistem pus în astfel de condiții (inclus într-un astfel de înveliș), încât starea lui nu poate varia decât pe calea variației parametrilor externi. Variația temperaturii corpurilor exterioare nu influențează starea sistemului. Într-un sistem izolat adiabatic, la trecerea dintr-o stare determinată a sistemului, în altă stare determinată a sistemului, lucrul mecanic nu depinde de modul cum se face această trecere, ci depinde numai de starea inițială și de cea finală a sistemului. Din independența lucrului mecanic de drum, rezultă imediat necesitatea existenței unei funcții de stare - energia sistemului. Valoarea energiei se obține prin integrarea expresiei lucrului mecanic:

$$E = -\int dL + const.$$

Energia sistemului astfel definită este egală cu energia mecanică-cinetică și potențială, a tuturor moleculelor, atomilor și celorlalte particule componente ale sistemului nostru. Dacă din energia sistemului separăm E_{cin} (energia cinetică) și E_p (energia potențială) vom găsi energia internă a sistemului:

$$E = E_{cin} + E_p + E_{int} \quad (4.2)$$

Dacă sistemul se află în stare de echilibru, energia totală E coincide cu energia internă.

4.4 Primul principiu al termodinamicii

La baza formulării principiului întâi al termodinamicii stă condiția echivalenței lucrului mecanic și căldurii conform căreia schimbul de căldură și de lucru mecanic cu exteriorul reprezintă cele două moduri prin care se poate modifica energia internă a unui sistem în urma unei transformări.

Într-o transformare ciclică, suma algebrică a lucrului mecanic și căldurii schimbate de un sistem cu exteriorul, este întotdeauna egală cu zero.

$$L + Q = 0$$

Având în vedere existența celor două moduri de schimb de energie între sistem și exterior, principiul întâi exprimă tocmai bilanțul energetic (conservarea energiei) pentru o transformare oarecare a sistemului.

$$E_2 - E_1 = L + Q \quad (4.3)$$

adică: variația energiei a unui sistem în urma transformării din starea inițială 1, în starea finală 2, este egală cu suma dintre cantitatea de căldură Q și lucrul mecanic L schimbate cu exteriorul în cursul transformării. În forma generală principiul întâi al termodinamicii se enunță astfel:

"Suma dintre lucrul mecanic și căldura schimbate cu exteriorul într-o transformare oarecare este o mărime independentă de felul transformării, ea fiind dependentă doar de stările inițială și finală ale sistemului termodinamic considerat".

4.5 Al doilea principiu al termodinamicii

Principiul al doilea reprezintă un ansamblu de legi care se referă, în primul rând, la starea de echilibru și în al doilea rând la procesele care au loc în sistemele fizice. Se poate lua ca teză fundamentală rezultatul generalizat al faptelor experimentale, care afirmă imposibilitatea realizării unui perpetuum mobile de speța a doua, formulat astfel: "este imposibil să se construiască un dispozitiv care să permită obținerea unui lucru mecanic pozitiv numai pe seama răcirii unui corp, fără ca alte schimbări să aibă loc în alte corpuri". Conform celui de-al doilea principiu al termodinamicii se poate afirma pentru un *proces izotermic*: "dacă sistemul descrie un proces ciclic, izotermic și revine, deci în starea inițială, atunci lucrul mecanic total nu poate fi pozitiv", iar pentru un *proces adiabatic*: "există stări ale unui sistem termic omogen, care nu pot fi atinse, plecând dintr-o stare dată, printr-un proces adiabatic".

În starea de echilibru termodinamic, toți parametrii interni ai unui sistem sunt funcții de parametrii externi și de energia sistemului. Faptul important este, prin urmare, că la echilibru starea sistemului nu este determinată numai de parametrii externi ci și de încă o mărime, care poate fi, în particular, fie energia, fie temperatura.

4.6. Entropia, expresia generală a celui de al doilea principiu pentru procese reversibile

În ecuația fundamentală a termodinamicii

$$dQ = T \cdot dS \quad (4.4)$$

T - reprezintă temperatura termodinamică absolută, exprimată în grade Kelvin, iar mărimea S este o funcție de starea sistemului, adică de parametrii externi a_i și de temperatură τ , adică $S = S(a_1, a_2, \dots, a_n, \tau)$, funcție care se numește entropia corpului. Pentru un proces reversibil închis :

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 \quad (4.5)$$

această relație se numește integrala lui Clausius.

4.7 Ciclul Carnot

În istoria termodinamicii un rol foarte important l-a jucat studiul proprietăților procesului ciclic teoretic, reversibil format din două transformări izoterme și două adiabatice, numit ciclul Carnot. În ciclul ideal Carnot, dintr-o cantitate de căldură Q_1 disponibilă la temperatura $T_1 > T_2$ se poate obține într-un proces reversibil desfășurat între temperatura T_1 și temperatura ambiantă T_0 , lucrul mecanic maxim:

$$L_{\max} = \frac{Q_1 \cdot (T_1 - T_0)}{T_1} = Q_1 \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \quad (4.6)$$

Din proces se cedează mediului ambiant cantitatea de căldură:

$$Q_0 = Q_1 \cdot \frac{T_0}{T_1} \quad (4.7)$$

care nu poate fi transformată în lucru mecanic. Acest proces este reprezentat în diagrama $T - S$ din figura 4.1. Aria 1-2-3-4 corespunde lucrului mecanic L_{\max} , aria 1-2-5-6 căldurii disponibile Q_1 , iar aria 4-3-5-6 căldurii evacuate în mediul ambiant. Randamentul energetic al acestui ciclu ideal este:

$$\eta_L = \frac{L_{\max}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1} = 1 - \frac{Q_0}{Q_1} = 1 - \frac{T_0}{T_1} \quad (4.8)$$

Se constată că, deși procesul este ideal, fără pierderi, numai o parte din căldura disponibilă Q_1 se poate transforma în lucru mecanic, restul trecând în mediul ambiant, în care rămâne fără posibilitatea de a produce lucrul mecanic. Înseamnă că, din punctul de vedere al posibilității de a obține lucrul mecanic, din cantitatea totală de căldură disponibilă Q_1 , nu intră în considerare decât acea parte $Q_1 - Q_0 = Q_1 \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_1}$, care are o temperatură mai mare decât a mediului ambiant și numai aceasta este transformabilă în lucru mecanic.

Acest fapt explicat prin principiul al doilea al termodinamicii, a fost remarcat încă spre sfârșitul veacului al XIX^{-lea} și a condus, cu decenii în urmă, la diferite denumiri date acelei părți a căldurii care este transformabilă în lucrul mecanic, fără a se fi ajuns însă la o tratare unitară a acestei probleme. Rant propune în 1953 pentru această noțiune denumirea scurtă și sugestivă de *exergie*, declanșând prin aceasta direct și indirect, o remarcabilă activitate științifică în acest domeniu, care este încă în plină desfășurare.

Spre deosebire de *entalpie*, care exprimă conținutul de căldură al unui fluid într-o anumită stare, *exergia* exprimă lucrul mecanic maxim ce s-ar putea obține cu acel fluid într-o transformare reversibilă până la starea mediului ambiant. Este de subliniat că, în timp ce entalpia corespunde unei stări reale date, exergia reprezintă numai o capacitate de a presta lucru mecanic, care poate sau nu să fie folosită. Energia este definită de relația:

$$E_x = (I_1 - I_o) - T_o \cdot (S_1 - S_o) \quad (4.9)$$

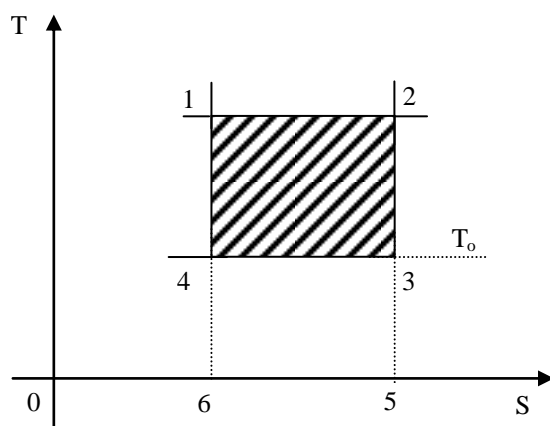
în care:

I_1 - este entalpia la starea inițială 1;

I_o - este entalpia la starea mediului ambiant;

S_1 și S_o - entropia la starea inițială, respectiv la cea a mediului ambiant;

T_o - temperatura mediului ambiant;



În cazul procesului teoretic, căldurii Q_1 , disponibile la temperatura T_1 , îi corespunde exergia:

$$E_{x1} = Q_1 \left(1 - \frac{T_o}{T_1} \right)$$

(aria 1-2-3-4), în timp ce entalpia respectivă este reprezentată de întreaga arie 1-2-5-6.

Figura 4.1 Ciclul Carnot în diagrama T – S

Capitolul V

V. CONVERSIA ENERGIEI MECANICE ÎN ENERGIE ELECTROMAGNETICĂ ȘI INVERS

Pentru a înțelege natura fenomenului electromagnetic vom defini câmpul electromagnetic.

Câmpul electromagnetic este o formă specifică a materiei, deosebită de corpuri, care există și în vid (în afara corpurilor) și care poate exercita acțiuni ponderomotoare (forțe și momente) asupra corpurilor. Ca orice formă de materie, el are energie și impuls și le poate transmite corpurilor.

Aspectele câmpului electromagnetic sunt câmpul electric și câmpul magnetic. Deosebirile dintre aceste două aspecte au un caracter relativ și nu permit considerarea lor distinctă decât în cazuri particulare. Existența câmpului electromagnetic și în particular a undelor electromagnetice și în afara corpurilor arată că nu există spațiu lipsit de materie.

Dacă într-o regiune de spațiu lipsesc la un moment dat corpurile, care la rândul lor reprezintă numai una din formele materiei, o astfel de regiune se numește vid. Acest vid este însă totodată sediul altor forme ale materiei ca de exemplu a câmpului electromagnetic. Vidul poate fi definit ca o stare limită către care se tinde, când densitatea de masă tinde către zero.

5.1 Principalele mărimi care caracterizează starea electromagnetică a corpurilor și câmpului

Teoria macroscopică a fenomenelor electromagnetice, în afară de mărimile "primitive" din celelalte domenii (mecanică, lungime, masă, timp, căldură, temperatură și altele), folosește următoarelor opt mărimi primitive care caracterizează starea electromagnetică a corpurilor și starea câmpului electromagnetic:

- Starea electromagnetică a corpurilor:
 - sarcina electrică q – mărime scalară
 - momentul electric \vec{p} – mărime vectorială
 - intensitatea curentului electric de conducție i – mărime scalară
 - momentul magnetic \vec{m} – mărime vectorială

- Starea electromagnetică a câmpului:

- intensitatea câmpului electric \vec{E} - mărime vectorială
- inducția electrică \vec{D} - mărime vectorială
- intensitatea câmpului magnetic \vec{H} - mărime vectorială
- inducția magnetică \vec{B} - mărime vectorială.

Ca mărimi "derivate" în afară de mărimile primitive menționate se folosesc: fluxul electric, fluxul magnetic, tensiunea electrică U și tensiunea magnetică U_m , capacitatea C , rezistența R , inductivitatea L , etc...

Legile teoriei macroscopice a fenomenelor electrice și magnetice se clasifică în opt legi generale și patru legi de material:

- Legi generale :

- legea inducției electromagnetice ($e = -\frac{d\phi}{dt}$);
- legea circuitului magnetic ($\oint \vec{H}d\vec{e} = \sum i$);
- legea fluxului electric ($\int_{\Sigma} \vec{E}d\vec{s} = \frac{\sum q}{\epsilon}$);
- legea fluxului magnetic ($\int_{\Sigma} \vec{B}d\vec{s} = 0$);
- legea de legătură dintre inducție, intensitate și polarizație în câmpul electric;
- legea de legătură dintre inducție, intensitate și magnetizație în câmpul magnetic;
- legea de conservare a sarcinilor electrice adevărate ($\frac{dq}{dt} = -\int_{\Sigma} \vec{J}d\vec{s}$); în regim staționar ($\int_{\Sigma} \vec{J}d\vec{s} = 0$).
- legea transformării de energie în corpurile parcurse de curent de conducție ($dQ = i^2 \cdot R \cdot dt$), denumită și legea Joule-Lentz ;

- Legi de material :

- legea polarizației electrice ($\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$)
- legea polarizației magnetice ($\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$);
- legea conducției electrice ($U_{AB} = RI$), denumită și legea lui Ohm;
- legea electrolizei.

Cunoscând principalele legi și teoreme ale câmpului electromagnetic vom prezenta succint conversia energiei electromagnetice în energie mecanică și invers.

5.2 Conversia energiei electromagnetice în energie mecanică

O mașină electrică este în principiu un convertizor de energie, care transformă energia electromagnetice în energie mecanică sau invers.

Un astfel de *convertizor de energie electromagnetice* constă în esență din două elemente principale denumite armături: o armătură fixă denumită stator și o armătură mobilă față de prima, denumită rotor la convertizoarele cu mișcare de rotație și translator la cele cu mișcare de translație.

Pentru a se produce forțe, este necesar să se producă un câmp electromagnetic. Câmpul magnetic se realizează cu ajutorul unei bobine parcurse de curent, așezate pe una din cele două armături. În acest câmp se exercită forțe asupra unei alte bobine parcurse de curent sau asupra suprafeței de separație dintre două medii cu permeabilitate magnetică diferită. Dacă bobina sau suprafața de separație aparțin celeilalte armături, atunci cele două armături împreună alcătuiesc un convertizor electromagnetic de energie. În fig. 5.1 este reprezentat un convertizor de acest gen.

Fiecare din cele două armături constă dintr-o bobină și un miez feromagnetic, iar montarea celor două armături este realizată astfel, încât cuprinde un spațiu cu material neferomagnetic. În figură s-au reprezentat axele celor două bobine asociate după regula burghiului drept, sensul de parcurgere a bobinelor care s-a adoptat arbitrar și s-a reprezentat de asemenea sistemul de referință.

Pentru a calcula forțele care acționează asupra armăturii mobile, este necesar să se determine mai întâi câmpul magnetic. Utilizând apoi expresia forței care acționează la suprafața de separație a două medii și expresia forței care acționează asupra conductoarelor parcurse de curent se obțin forțele care acționează asupra fiecărei armături. Această cale, deși se utilizează, nu constituie însă totdeauna cel mai convenabil mod de a obține expresia forțelor. Se va considera cazul când există o bobină pe armătura mobilă. Un rezultat general pentru expresia forțelor care acționează asupra armăturilor se poate obține utilizând sistemul de ecuații dat de: bilanțul energetic și de ecuațiile circuitelor electrice:

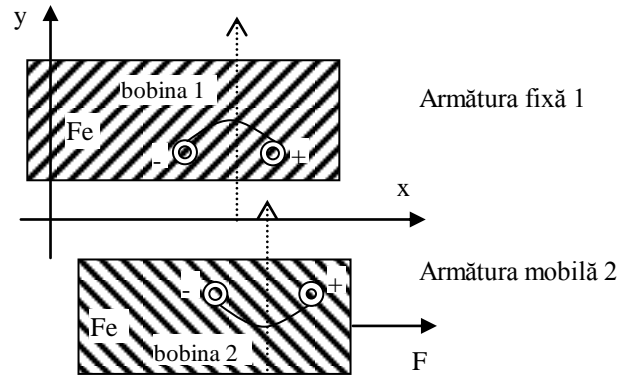


Fig. 5.1 Principiul unui convertizor electromagnetic de energie

Ecuția bilanțului energetic este:

$$\sum_{y=1,2} U_y I_y dt = \sum_{y=1,2} R_y I_y^2 dt + dW_m + F_x dx \quad (5.1)$$

unde: $\sum_{y=1,2} U_y I_y dt$ - reprezintă energia primită de circuitele electrice ale convertizorului pe la borne;

$\sum_{y=1,2} R_y I_y^2 dt$ - pierderi prin efect Joule-Lentz;

dW_m - creșterea energiei câmpului magnetic;

$F_x dx$ - lucrul mecanic efectuat de armătura mobilă.

Ecuțiile circuitelor electrice sunt:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \\ u_2 &= R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \\ \Psi_1 &= L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \\ \Psi_2 &= L_{21} i_1 + L_{22} i_2 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Pentru simplificare se va presupune aici că inductanțele L nu depind de valoarea curentului.

Este important de subliniat că inductanțele din relațiile (5.2) sunt funcții de coordonata x după care se face deplasarea, de aceea ecuațiile în cazul convertizorului electromecanic diferă de acelea ale transformatorului cu două înfășurări. În cazul convertizorului electromagnetic de energie inductanțele sunt deci de forma $L = f(x)$. Forma funcției $f(x)$ depinde de tipul mașinii. Energia câmpului magnetic la momentul t se poate deduce din relația (5.1) care exprimă bilanțul energiei, considerând că sistemul este în repaus, deci $\frac{dx}{dt} = 0$ iar curenții cresc în intervalul de timp de la $t = 0$ la $t = t$ de la valoarea zero până la valorile i_1 și i_2 . Se obține:

$$W_m = \sum_{y=1,2} \int_0^t u_y i_y dt - \sum_{y=1,2,\dots} R_y i_y^2 dt \quad (5.3)$$

Deoarece sistemul este considerat în repaus inductanțele sunt constante și având în vedere că $L_{12} = L_{21}$ se obține:

$$W_m = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2 + L_{12} i_1 i_2 \quad (5.4)$$

Creșterea energiei magnetice ca urmare a deplasării armăturii mobile cu dx în intervalul de timp dt , având în vedere că se produce atât variația curenților cât și variația inductanțelor este:

$$dW_m = L_{11} i_1 di_1 + \frac{1}{2} i_1^2 dL_{11} + L_{12} i_1 di_2 + L_{12} i_2 di_1 + i_1 i_2 dL_{12} + L_{22} i_2 di_2 + \frac{1}{2} i_2^2 dL_{22}$$

Energia primită de sistem pe la bornele circuitelor în intervalul de timp dt este:

$$dW = u_1 i_1 dt + u_2 i_2 dt$$

Ecuațiile tensiunilor se pot scrie:

$$\begin{aligned}
u_1 &= R_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} + i_1 \frac{dL_{11}}{dx} \frac{dx}{dt} + i_2 \frac{dL_{12}}{dx} \frac{dx}{dt} \\
u_2 &= R_2 i_2 + L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} + i_1 \frac{dL_{21}}{dx} \frac{dx}{dt} + i_2 \frac{dL_{22}}{dx} \frac{dx}{dt}
\end{aligned} \tag{5.5}$$

unde s-au pus în evidență componentele derivatei fluxului atât datorită variației curentului cât și datorită variației inductanței. Tensiunea electromotoare indusă într-o bobină constă dintr-o tensiune electromotoare de autoinducție u_{es} , o tensiune electromotoare de transformare indusă de cealaltă bobină u_{etr} o tensiune electromotoare de deplasare u_{er} . Pentru mai multă claritate se vor face următoarele notații ale tensiunilor electromotoare induse într-o bobină:

- u_{es} - tensiunea electromotoare de autoinducție
- u_{etr} - tensiunea electromotoare de transformare indusă de cealaltă bobină
- u_{er} - tensiunea electromotoare de deplasare.

Cu aceste notații ecuațiile (5.5) devin:

$$\begin{aligned}
u_1 &= R_1 i_1 - u_{es1} - u_{etr1} - u_{er11} - u_{er12} = R_1 i_1 - u_{e1} \\
u_2 &= R_2 i_2 - u_{es2} - u_{etr2} - u_{er21} - u_{er22} = R_2 i_2 - u_{e2}
\end{aligned} \tag{5.6}$$

Energia primită pe la bornele sistemului în intervalul de timp dt de circuitele 1 și 2 este:

$$\begin{aligned}
dW_1 &= u_1 i_1 dt = R_1 i_1^2 dt - u_{e1} i_1 dt \\
dW_2 &= u_2 i_2 dt = R_2 i_2^2 dt - u_{e2} i_2 dt
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Din teorema forțelor generalizate se obține:

$$F = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}}{dx} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{dx} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_{22}}{dx} \tag{5.8}$$

Relația (5.7) se poate obține de asemenea ținând seama că $L_{12} = L_{21}$. Puterea dată de forța F este:

$$P_{mec} = F \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} i_1^2 \cdot \frac{dL_{11}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dL_{12}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{1}{2} i_2^2 \cdot \frac{dL_{22}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (5.9)$$

Dar cu notațiile adoptate:

$$u_{er11} = -i_1 \frac{dL_{11}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt};$$

$$u_{er12} = -i_2 \frac{dL_{12}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt};$$

$$u_{er21} = -i_1 \frac{dL_{21}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt};$$

$$u_{er22} = -i_2 \frac{dL_{22}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt};$$

și deoarece $L_{12} = L_{21}$ urmează că:

$$u_{er12} \cdot i_1 = u_{er21} \cdot i_2$$

Înlocuind, se obține expresia puterii determinată de forța care acționează asupra armăturii mobile:

$$P_{mec} = -\frac{1}{2} \cdot (u_{er11} \cdot i_1 + u_{er12} \cdot i_1 + u_{er21} \cdot i_2 + u_{er22} \cdot i_2) \quad (5.10)$$

Din tratarea făcută rezultă că asupra armăturii mobile se exercită forțe numai cel puțin una din inductanțe variază cu deplasarea, rezultând că armătura mobilă produce o putere mecanică numai dacă cel puțin în una din bobine se induce o tensiune electromotoare de deplasare.

Din ecuațiile prezentate rezultă că pentru a avea loc un schimb de energie cu una din sursele celor două circuite, este necesar ca în acel circuit să se inducă o tensiune electromotoare de o anumită valoare.

Capitolul VI

VI. ENERGIA NUCLEARĂ

6.1 Caracterizare generală

Termenul de energie nucleară este folosit pentru a exprima energia degajată prin fenomene de natură fizică, care implică modificarea structurii atomilor unor elemente chimice, fapt calitativ nou în domeniul surselor de energie. Fenomenele fundamentale din această categorie sunt cunoscute sub numele de *fuziune nucleară* (formarea unui nucleu prin contopirea altor două nuclee) și *fisiune nucleară* (desfacerea unui nucleu mai greu în alte două nuclee, mai ușoare).

Sursa energiei degajate în ambele cazuri o constituie *defectul de masă*; energia eliberată în aceste reacții este colosală în raport cu aceea eliberată prin arderea combustibililor fosili.

Al doilea dintre fenomenele specificate (fisiunea) a putut fi stăpânit și este folosit din ce în ce mai mult pentru asigurarea energiei necesare societății. Examinând evoluția surselor de energie folosite de om, se observă că fisiunea nucleară constituie singura alternativă la consumul de combustibili fosili, capabilă să-i înlocuiască în termen relativ scurt în domeniul producerii energiei electrice pentru toate utilizările și a energiei termice mai ales în scop industrial, dar și pentru termoficarea urbană.

În ceea ce privește fuziunea nucleară, aplicația energetică este încă departe de stadiul comercial, dar potențialul energetic al acesteia pare nelimitat comparativ cu dimensiunile consumului mondial actual de energie.

Aprecieri privind energia nucleară comparativ cu energia obținută prin arderea combustibililor fosili sunt:

- mărimea rezervelor, considerată prin prisma energiei ce poate fi eliberată, depășește celelalte surse convenționale luate la un loc;
- conținutul specific de energie este superior cu 5-6 ordine de mărime, iar ritmul de exploatare poate fi suficient de ridicat;
- energia degajată fiind termică, energetica nucleară poate conține aceleași filiere de conversie energetică ca și energia termică degajată prin arderea combustibililor fosili; din acest motiv elementele chimice care pot fi

folosite la producerea energiei nucleare poartă denumirea de *combustibil nuclear*;

- în privința transportului și stocării, combustibililor nucleari necesită cheltuieli mult mai reduse, ceea ce asigură independența amplasării centralelor nucleare-electrice de sursele de extracție a combustibilului;

- principalul inconvenient apare în privința influenței mediului ambiant, fie în procesul de degajare a energiei nucleare, fie în procesul de stocare a deșeurilor provenite din reactoarele nucleare sau din alte etape ale energiei nucleare. Deocamdată energia nucleară se bazează pe reacția de fisiune a izotopului natural de ${}^{235}_{92}\text{U}$.

Instalația care asigură condițiile de obținere și menținere a reacției de fisiune în lanț a izotopului natural de ${}^{235}_{92}\text{U}$ este reactorul nuclear. Fluxul tehnologic într-o centrală termoelectrică și o centrală nucleare-electrică este reprezentat schematic în figura 6.1.

6.2 Potențialul energetic al reacției de fisiune a uraniului

Prin fisiune se înțelege o reacție nucleară în urma căreia nucleul unui element se desface, formându-se alte două nuclee.

O asemenea reacție nucleară poate fi însoțită de degajare de energie. Proveniența acestei energii este defectul de masă al reacției. Considerând un anumit element chimic, caracterizat prin numărul de ordine din tabelul periodic, Z și prin numărul de masă A , nucleul acestuia conține Z protoni și $A - Z$ neutroni. Deși între protoni se exercită forțe electrostatice de respingere, particulele componente sunt menținute în volumul foarte mic al nucleului de către așa-numitele *forțe nucleare de legătură*;

Energia de legătură (E_L) a nucleului este considerată egală cu diferența dintre energia potențială a nucleonilor în câmpul forțelor nucleare de legătură (E_n) și energia potențială a nucleonilor în câmpul forțelor electrostatice (E_e).

La toate elementele chimice se constată că suma maselor nucleonilor este mai mare decât masa nucleului, diferența acestora este denumită *defect de masă*.

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_N \quad (6.1)$$

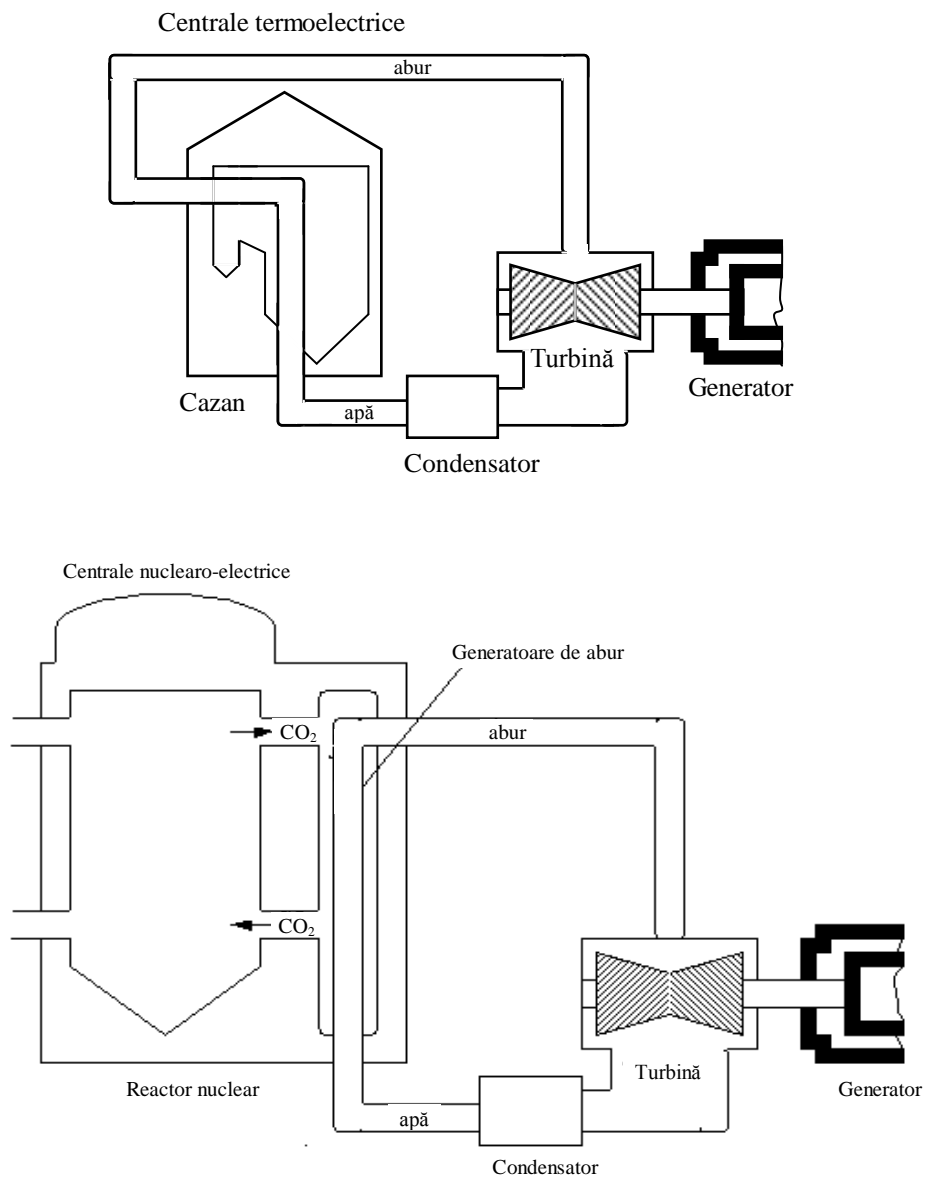


Fig. 6.1 Reprezentarea schematică a fluxului tehnologic într-o centrală termoelectrică clasică și o centrală nuclearo-electrică cu reactor cu uraniu natural, moderat cu grafit și răcit cu CO₂.

iar între energia de legătură și defectul de masă există relația:

$$E_L = \Delta m \cdot c^2 \quad (6.2)$$

unde c reprezintă viteza luminii.

6.3 Funcționarea reactorului nuclear termic

Întrucât neutronii sunt aceia care întrețin reacția de fisiune, asigurarea funcționării reactorului la putere constantă depinde de evoluția în timp a densității de neutroni în zona activă a acestuia.

Neutronii rezultați din reacția de fisiune au energie mare în raport cu temperatura medie din zona activă, fiind denumiți *neutroni rapizi*. Conform teoriei modelului "*picăturii lichide*" pentru reacția de fisiune (Bohr, Wheeler, Frenkel), nucleele având număr par de protoni și impar de nucleoni (cazul ${}_{92}^{235}\text{U}$) fisionează cu *neutronii termici* (energia acestora corespunde temperaturii din zona activă a reactorului), iar celea care au ambele numere pare fisionează cu neutronii rapizi.

În urma unei reacții de fisiune a nucleului de $U-235$ se eliberează un număr de neutroni variabil, între 1 și 5. Cele mai frecvente cazuri sunt însă producerea a 2 neutroni (33,9%) și 3 neutroni (30,2%), astfel că rezultă o medie de 2,43 neutroni/fisiune. Dacă dintre aceștia există cel puțin unul care să producă o nouă fisiune, înseamnă că există condițiile necesare continuării reacției sub formă de *reacție în lanț*.

Probabilitatea de interacțiune dintre neutroni și atomii elementelor din zona activă a reactorului este denumită *secțiune eficace*. Deoarece acest parametru prezintă o valoare mult mai mare în cazul fisiunii $U-235$ cu neutroni termici, decât a fisiunii $U-238$ cu neutroni rapizi (ambii izotopi fiind naturali), $U-235$ a fost ales pentru realizarea reactorilor nucleari din generațiile actuale. Reducerea energiei neutronilor are loc în urma ciocnirilor dintre aceștia și nucleele din mediul străbătut. Cu cât masa acestor nuclee este mai mică, cu atât pierderea de energie a neutronilor este mai mare. Din acest motiv, în zona activă a reactorului se introduce o substanță numită *moderator*, formată din elemente ușoare (H_2O , D_2O , C - *grafit*) cu rolul de a *termaliza* neutronii. Definim o generație de neutroni prin mulțimea

neutronilor existenți în reactor între două fisiuni succesive și o vom caracteriza prin densitatea neutronilor n , sau numărul total al acestora N . Întrucât neutronii sunt expuși și unor fenomene de absorbție și de ieșire din zona activă a reactorului, evoluția densității lor în timp se exprimă prin *factorul de multiplicare*, definit astfel:

$$k = \frac{\text{numarul de neutroni produși într-o generație}}{\text{numarul de neutroni din generația precedentă}}$$

Pot exista următoarele situații:

- $k = 1$ - reactorul se află în stare critică, puterea produsă este constantă;

- $k < 1$ - reactorul se află în stare subcritică, puterea degajată scade;

- $k > 1$ - reactorul se află în stare supracritică, puterea degajată crește.

Mărirea factorului de multiplicare depinde de mai multe fenomene care au loc în zona activă a reactorului.

Considerând, la un moment dat, prezența activă în zona activă a N neutroni termici, care sunt absorbiți în combustibil, după producerea reacțiilor de fisiune sau captură vor rezulta $\eta \cdot N$ neutroni rapizi, figura 6.2, unde:

$$\eta = \frac{\sum f}{\sum a} \cdot \nu \quad (6.3)$$

ν - reprezintă numărul mediu de neutroni rapizi rezultați dintr-o fisiune, iar raportul secțiunilor macroscopice de fisiune și de absorbție ține seama de faptul că numai o parte din neutronii termici absorbiți de combustibil produc fisiuni.

Ca exemplu: pentru uraniu natural $\eta = 1.02$, iar pentru izotopul $U-235$, $\eta = 2.06$. O parte din neutronii rapizi pot produce fisiuni. Creșterea numărului de neutroni pe această cale se caracterizează prin *factorul de fisiuni rapide*, ε .

$$\varepsilon = \frac{\text{numarul de neutroni din fisiuni (termice + rapide)}}{\text{numărul de neutroni din fisiunile termice}}$$

De exemplu, pentru reactoarele termice, care folosesc uraniul natural sau ușor îmbogățit, $\varepsilon = 1.02 \div 1.08$. O parte din neutroni sunt absorbiți de $U-238$ prin așa-numita "*captură de rezonanță*", parte caracterizată prin factorul p - *probabilitatea de scăpare la rezonanță*, definit ca raportul:

$$p = \frac{\text{numărul de neutroni ce trec prin domeniul energiilor de rezonanță}}{\text{numărul de neutroni ce intra în domeniul energiilor de rezonanță}}$$

Pentru uraniul natural $p = 0.9$. Neutronii termici pot fi absorbiți și de alte elemente din zona activă (moderator, agent de răcire, materiale de structură), deci numai o parte inter-acționează cu combustibilul.

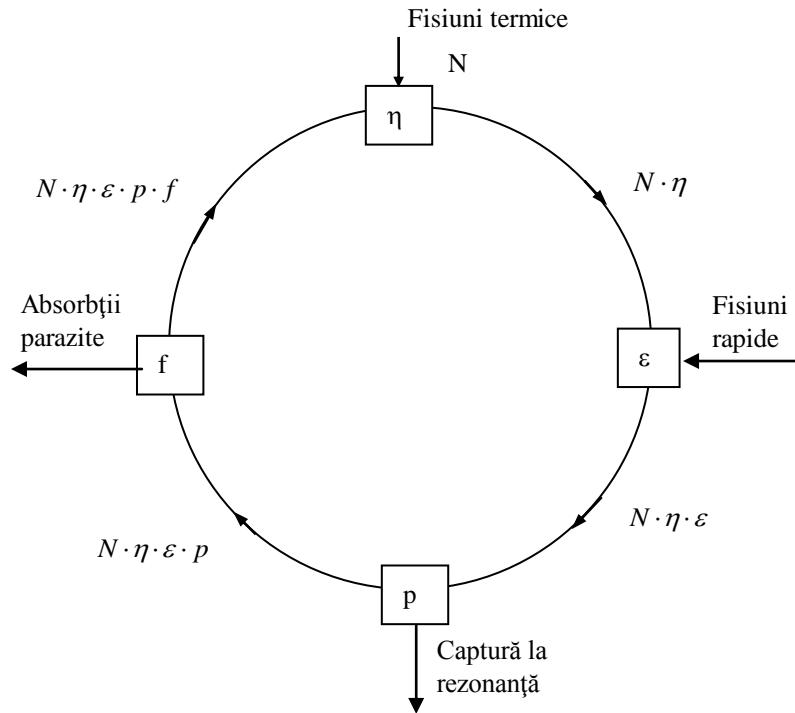


Figura 6. Structura factorului de multiplicare.

Se introduce *factorul de utilizare termică* f .

$$f = \frac{\text{numărul neutronilor termici absorbiti de combustibil}}{\text{numărul total de neutroni termici absorbiti}}$$

În urma acestor fenomene, plecând de la numărul inițial de neutroni termici, N , absorbiți de către combustibil, în generația următoare vor fi $N \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$ neutroni, astfel încât factorul de multiplicare este:

$$k = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f \quad (6.4)$$

În procesele descrise nu s-a ținut seama de pierderile de neutroni în afara zonei active (s-au considerat dimensiunile acesteia ca infinite). Introducând factorii: p_r - probabilitatea de evitare a scăpării neutronilor rapizi; p_t - probabilitatea de evitare a scăpărilor neutronilor termici; rezultă factorul de multiplicare pentru un reactor real:

$$k = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f \cdot p_r \cdot p_t \quad (6.5)$$

Pentru reducerea scăpărilor de neutroni din zona activă, unele reactoare sunt prevăzute cu așa numiții "reflectori".

O evaluare sumară a puterii reactorului nuclear pleacă de la expresia secțiunii macroscopice de fisiune a combustibilului utilizat.

$$\sum_f = q \cdot \rho \cdot \frac{N_A}{A} \cdot \sigma_f \quad (6.6)$$

în care:

q - reprezintă ponderea de material fisionabil în combustibil;

ρ - este densitatea combustibilului;

N_A - este numărul lui Avogadro;

A - este numărul de masă al izotopului fisionabil;

σ_f - este secțiunea microscopică de fisiune cu neutroni lenți a izotopului fisionabil considerat. De exemplu, pentru uraniul natural se obține :

$$\sum_f = \frac{0,714}{100} \cdot 18,7 \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{235} \cdot 583 \cdot 10^{-24} = 0,196 \text{ cm}^{-1}$$

Considerând o densitate de neutroni în zona activă n (neutroni/cm³) și viteza medie de deplasare a acestora v (m/s), se definește fluxul de neutroni:

$$\phi = n \cdot v \text{ (neutroni/m}^2 \cdot \text{s)} \quad (6.7)$$

Numărul specific de fisiuni este :

$$N_f = \phi \cdot \sum_f \text{ (fisiuni / m}^3 \cdot \text{s)} \quad (6.8)$$

Puterea reactorului :

$$P = \frac{N_f \cdot V}{c_f} \text{ (W)} \quad (6.9)$$

în care V este volumul zonei active (m^3), iar c_f este o constantă:

$$c_f = 3,1 \cdot 10^{10}$$

care reprezintă numărul de fisiuni necesare pentru eliberarea unei energii de 1 J.

Funcționarea reactorului nuclear în regim de putere variabilă înseamnă variația în timp a factorului de multiplicare k . Această variație se definește prin noțiunea de *reactivitate*.

$$\chi = \frac{k-1}{k} \quad (6.10)$$

care exprimă abaterea factorului de multiplicare de la valoarea (6.1).

Reactivitatea este afectată și de variația temperaturii în zona activă, datorită modificării comportării combustibilului, moderatorului și agentului de răcire față de neutroni. Pentru asigurarea funcționării stabile este important ca valoarea coeficientului de variație a reactivității să fie negativă.

Alt fenomen dinamic este *otrăvirea cu produse de fisiune*. Unele produse de fisiune precum *xenonul* și *samariul* au secțiuni eficace de

absorbție a neutronilor termici, foarte mari, astfel încât, în prezența lor, factorul de multiplicare se reduce și puterea reactorului scade.

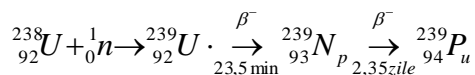
Prezența acestor “otrăvuri” în regim de funcționare la putere constantă este compensată prin proiectarea mărimii reactivității. După oprirea reactorului, concentrația de xenon crește pe seama dezintegrării iodului provenit din fisiuni, astfel încât reluarea funcționării necesită un anumit timp pentru reducerea concentrației de xenon prin dezintegrare ($T = 9.2 \text{ h}$) sau prin absorbție de neutroni termici.

De exemplu la reactorul CANDU acest timp este de circa 32 h.

6.4 Producția de combustibili în reactori nucleari

Cea mai mare parte a uraniului natural este format de izotopul $U-238$ a cărui secțiune eficace de fisiune este foarte mică.

Secțiunea de absorbție este însă importantă, ceea ce înseamnă că, prin capturarea unui neutron, acest izotop se poate transforma; rezultatul acestei transformări este apariția altui element, plutoniul, care nu se regăsește în natură deoarece s-a epuizat prin dezintegrare radioactivă, având o perioadă de înjumătățire relativ scurtă ($\cong 24\ 000$ ani). Reacția de transformare a $U-238$ este:



În continuare nucleele de $Pu-239$ pot suferi reacții de captură succesive prin care apar izotopii $Pu-240$, $Pu-241$, $Pu-242$. Aceștia se găsesc în combustibilul uzat extras din reactoare în proporții cu atât mai mici cu cât masa atomică a lor este mai mare ($Pu-239 \rightarrow 60-70\%$, $Pu-240 \rightarrow 20-35\%$, $Pu-241 \rightarrow 5-10\%$ și $Pu-242 \rightarrow 0-5\%$). Comportarea acestor izotopi în raport cu neutronii termici este diferită, izotopul 240 fiind fertil, iar izotopul 241, fisionabil.

Procesul de producere a combustibilului artificial în reactoarele nucleare se caracterizează cantitativ prin *coeficientul de conversie*.

$$c = \frac{\text{numar de nuclee fisionabile produse}}{\text{numar de nuclee fisionabile consumate}}$$

Dacă $c < 1$ reactorul este denumit *convertor*. Din această categorie fac parte toate reactoarele cu neutroni termici aflate în prezent în exploatare.

Dacă $c > 1$ reactorul este producător. Acest caracter îl posedă reactoarele care funcționează cu neutroni rapizi. Deoarece în reactoarele reproducătoare se generează mai multe nuclee fisionabile decât se consumă, rezultă o mărire a stocului de material fisionabil pe seama reducerii corespunzătoare a materialului fertil. Cu ajutorul acestor reactoare, se poate obține combustibil pentru instalarea unor noi unități.

6.5 Combustibilul nuclear

Denumirea generică de combustibil nuclear se atribuie unor izotopi naturali și artificiali, care participă la producerea de energie în reactoarele nucleare, prin reacția de fisiune. După rolul pe care îl joacă în această tehnologie, se deosebesc două grupe de elemente:

- *elemente fisionabile* care pot participa direct la reacția în lanț. Acestea sunt : ${}_{92}^{235}\text{U}$ (natural), ${}_{92}^{233}\text{U}$ și ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ (artificiali)

- *elemente fertile* care pot participa la reacția în lanț în proporție foarte redusă, dar care se pot transforma în elemente fisionabile artificiale. Acestea sunt: ${}_{92}^{238}\text{U}$ și ${}_{90}^{232}\text{Th}$ (thoriu), izotopi care se găsesc în natură.

Uranium în natură

Uraniumul natural este un amestec de trei izotopi :

${}_{92}^{234}\text{U}$ - în proporție de 0.0057%

${}_{92}^{235}\text{U}$ - în proporție de 0.714%

${}_{92}^{238}\text{U}$ - în proporție de 99.2274%

Uraniumul nu este un element foarte rar în natură, cantitatea totală care se găsește în scoarța terestră fiind mai mare decât în cazul Cd, Ag, Hg, Au și a altor elemente utilizate frecvent.

6.6 Filiera energetică nucleară

Energetica nucleară folosește, în prezent, mai multe tipuri de reactoare, practic toate de tip convertor. Reactoarele reproducătoare

existente, chiar dacă totalizează puteri instalate de ordinul sutelor de MW, sunt extrem de puține și nu au statut comercial ci experimental. Tipurile de reactoare utilizate diferă prin natura principalelor componente: combustibilul, agentul de răcire și moderatorul. Cele mai răspândite sunt:

a) în privința combustibilului

- cu uraniu natural;
- cu uraniu îmbogățit;
- cu combustibil mixt (uraniu-plutoniu sau uraniu-thoriu);

b) după natura moderatorului

- cu moderator grafit;
- cu moderator apă grea (D_2O);
- cu moderator apă ușoară (H_2O), figura 6.3;

c) după natura agentului de răcire

- răcire cu gaze (He , CO_2);
- răcire cu apă grea sau ușoară;
- răcire cu lichide organice;
- răcire cu săruri topite;
- răcire cu metal topit.

Nu sunt posibile orice combinații ale celor trei componente. Cele mai fezabile tehnic și economic sunt folosite în majoritatea aplicațiilor comerciale, formând împreună cu tehnologiile de obținere a acestor componente așa-numitele "*filiere energetice nucleare*".

6.6.1 Reactoare nucleare energetice cu moderator grafit

Grafitul a fost primul moderator utilizat în construcția reactoarelor nucleare. Primele reactoare industriale, de puteri mari, au fost realizate în SUA, în timpul celui de al doilea război mondial, iar mai apoi în Anglia și Franța, în scop militar pentru producerea de plutoniu necesar armelor nucleare. Din anii 1960 începe și construcția de reactoare energetice cu grafit. Tipul de reactor cu moderator grafit, construit în URSS, este răcit cu apă ușoară în fierbere (LWGR sau RBMK în rusă). Acest reactor este mai recent dezvoltat, fiind construit în unități de mare putere (1000 și 1500 MW). Instalat numai în fosta URSS și unele țări din Europa de Est, în total 14500 MW, ocupă 5.4% din totalul mondial. Un reactor de acest tip a suferit în exploatare o avarie foarte gravă (Cernobâl 1986) în urma căreia a explodat

împrăștiind în atmosferă mari cantități de substanțe radioactive. Ca urmare, a analizei construcției și funcționării sale, continuarea construcției de astfel de reactoare a fost oprită.

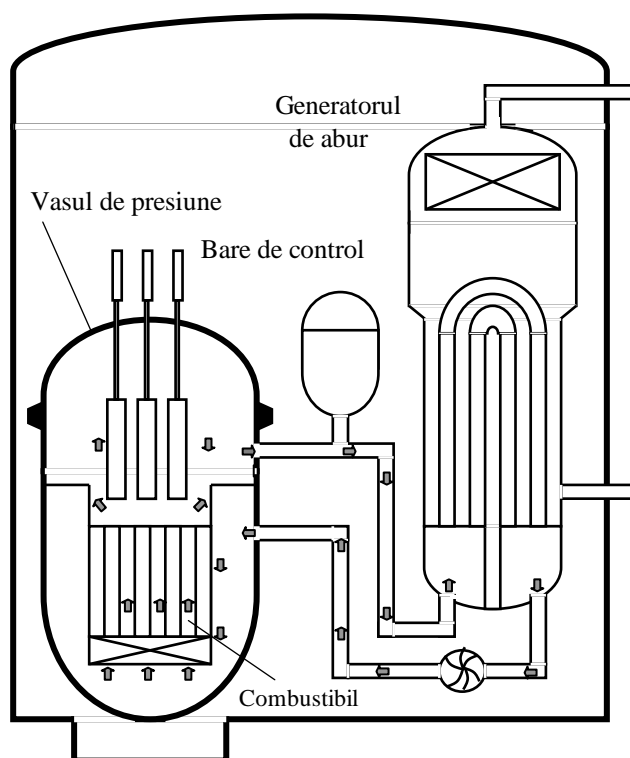


Fig. 6.3 Reactor cu apă sub presiune (PWR)

6.6.2 Reactoare nucleare energetice moderate cu apă grea

Apa grea este cel mai bun moderator folosit în prezent deoarece prezintă cea mai redusă absorbție de neutroni. Astfel se poate asigura folosirea mai eficientă a uraniului natural, ceea ce reprezintă principalul avantaj al acestei filiere, datorită căruia se simplifică ciclul cu combustibil.

Există mai multe variante de reactoare moderate cu apă grea, între care dezvoltarea predominantă o are reactorul răcit cu apă grea sub presiune (PHWR) fabricat în Canada sub denumirea comercială de CANDU.

Gradul de ardere obținut în acest reactor este de 8000-10000 MW_z/tu și poate fi dublat prin folosirea combustibilului mixt ($U + P_u$). Parametrii termici rămân relativ reduși și la aceste reactoare, temperatura apei la ieșirea din reactor fiind de circa 320 °C. În prezent filiera cu apă grea ocupă 5.6% din puterea totală pe plan mondial, cu circa 15000 MW în 26 reactoare.

Reactoarele de tip CANDU cu puterea instalată de 600 MW sunt instalate și în România, la Cernavoda (5 unități), iar 1 unitate este pusă în funcțiune. O secțiune printr-un reactor nuclear moderat cu apă grea (PHWR) de tip CANDU este prezentată în figura 6.4. Schema simplificată a CNE Karachi (Pakistan) echipată cu reactor tip CANDU, răcit și moderat cu apă grea este prezentată în figura 6.5.

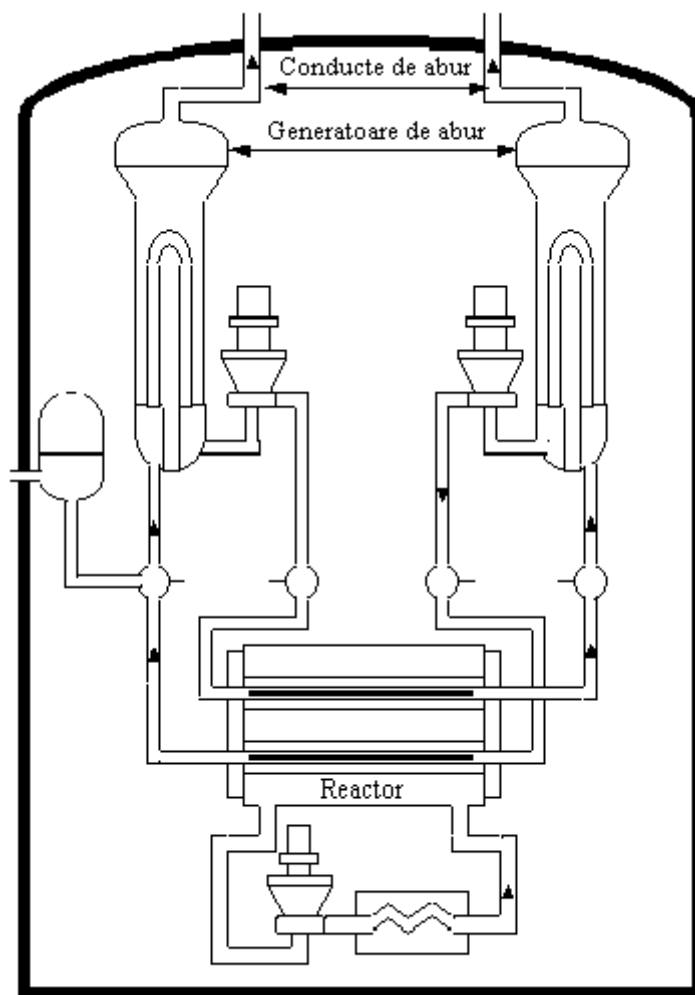


Fig. 6.4 Secțiune printr-un reactor nuclear moderat cu apă grea (PHWR) de tip CANDU

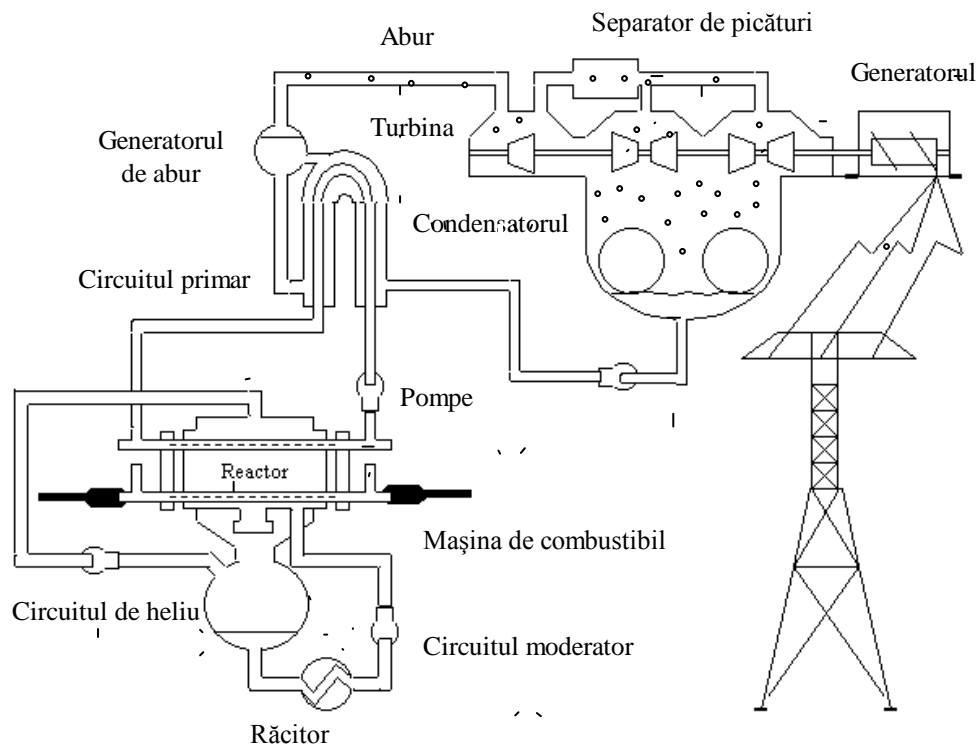


Fig. 6.5 Schema simplificată a CNE Karachi (Pakistan) echipată cu reactor tip CANDU, răcit și moderat cu apă grea

Capitolul VII

VII. ENERGIA SOLARĂ

7.1 Generalități

În estimarea posibilităților de utilizare a energiei solare în aplicațiile terestre trebuie avute în vedere atât avantajele cât și dezavantajele energiei solare.

Principalele *avantaje* sunt următoarele:

- energia solară este practic nepuizabilă;
- este o formă de energie nepoluantă;
- este disponibilă practic pretutindeni;
- „*combustibilul*” solar este gratuit.

Dezavantajele sunt:

- radiația solară incidentă pe Pământ este variabilă, depinzând de: ciclul zi/noapte, ciclul anotimpurilor și condițiile meteorologice locale;
- energia solară la suprafața Pământului este dispersată, atingând la amiază, în cele mai bune condiții, cca. $1\text{KW}/\text{m}^2$.

Variabilitatea radiației solare atrage după sine necesitatea prevederii în sistemele energetice solare a unor subsisteme de stocare a energiei în scopul asigurării livrării de energie în funcție de cerere.

7.2 Probleme generale ale radiației termice

7.2.1 Legile radiației. Noțiuni generale

În accepțiunea fizicii cuantice radiația este un flux de particule, numite fotoni, care se propagă cu viteza luminii purtând cu sine energia $h \cdot \nu$ (în care $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ J·s – constanta lui Planck; ν = frecvența radiației). Pentru cele mai multe aplicații energetice solare, din întregul spectru de radiații posibile, interesează în special radiația termică. Aceasta este emisă de corpurile aflate la o temperatură mai mare de 0 K.

Radiația termică emisă de un corp aflat la temperatura T este de obicei distribuită pe un anumit domeniu de lungimi de undă $\Delta\lambda = 0,2 \div 1000 \mu\text{m}$.

Spectrul radiației electromagnetice este împărțit în diverse zone, după diverse lungimi de undă, ca în figura 7.1.

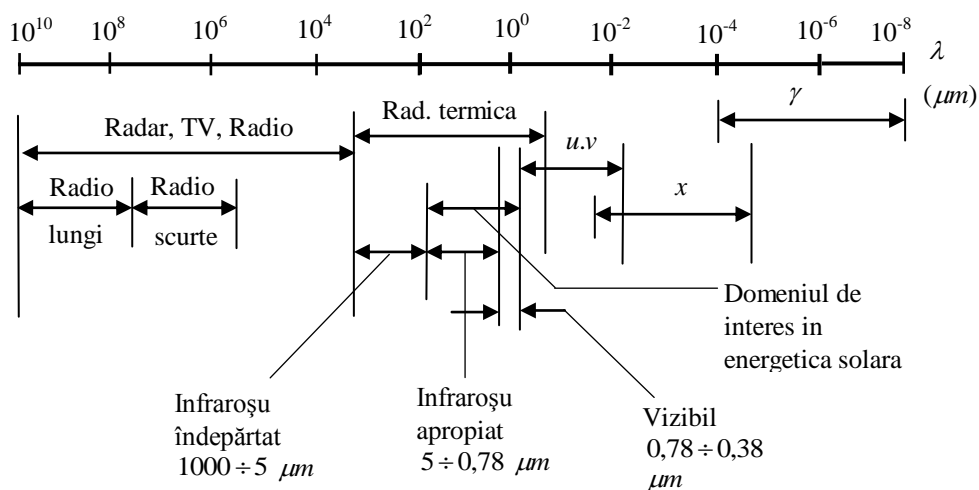


Figura 7.1 Spectrul radiațiilor electromagnetice

Între lungimea de undă λ și frecvența ν există corelația:

$$c = \frac{c_o}{n} = \lambda \cdot \nu \quad (7.1)$$

în care: c este viteza luminii; c_o – viteza luminii în vid; n – indicele de refracție al mediului prin care se propagă.

Radiația care interesează în aplicațiile energetice solare se plasează între ultraviolet și infraroșu apropiat, adică între lungimile de undă $0,2 \div 5 \mu m$. Energia solară din afara atmosferei conține cea mai mare parte din energia sa în domeniul lungimilor de unda $0,2 \div 4 \mu m$, în timp ce energia solară primită la sol este în principal plasată în domeniul $0,29 \div 3 \mu m$. Pentru a înțelege problemele legate de energetica solară sunt necesare unele cunoștințe privind noțiunile și legile radiației pe care le trecem în revista pe scurt.

1. *Legea lui Planck* stabilește că intensitatea spectrală de radiație corespunzătoare lungimii de undă λ pentru corpul absolut negru, este dată de relația:

$$I_{\lambda,n} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c_o^2}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{h \cdot c_o}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1)} \left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right] \quad (7.2)$$

în care: $I_{\lambda,n}$ – reprezintă intensitatea spectrală de radiație, adică energia pe unitatea de suprafață, pe unitatea de timp și pe intervalul de lungime de undă unitar plasat în vecinătatea lungimii de undă λ , pentru radiația corpului absolut negru (indicele n), k - constanta lui Boltzmann, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$.
 2. *Legea lui Wien* precizează la ce lungime de undă $\lambda_{l,max}$, pentru o temperatură dată T, se atinge intensitatea spectrală de radiație maximă $I_{max,T}$:

$$\lambda_{l,max} \cdot T = 2897,8 \left[\mu m \cdot K \right] \quad (7.3)$$

3. În aplicațiile industriale ale energiei solare interesează energia totală a radiației la o anumită temperatură, care rezultă din integrarea legii lui Planck pentru toate lungimile de undă:

$$E_n = \int_0^{\infty} I_{\lambda,n} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad (7.4)$$

în care: E_n - reprezintă puterea emisivă a corpului absolut negru, și se măsoară în W/m^2 ; $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$ este constanta Ștefan - Boltzmann, (sau coeficientul de negreală al corpului absolut negru); T - temperatura absolută la care se află corpul absolut negru, în K.

La incidența radiației solare pe un corp solid apar 3 fenomene: o parte din radiație se reflectă, o parte se absoarbe și restul trece prin corp (dacă este parțial transparent).

În energetica solară avem de-a face atât cu corpuri opace cât și cu corpuri transparente. Vom prezenta mai întâi proprietățile corpurilor opace și apoi pe cele ale corpurilor transparente.

4. *Legea lui Kirchhoff* arată că raportul dintre emitanța ε_ν a unui corp și absorbanța α_ν este o funcție universală de temperatura (T) și frecvența (ν):

$$\frac{\varepsilon_v}{\alpha_v} = \varepsilon_{v_{corpnegru}} = f(T, \nu) \quad (7.5)$$

7.2.2 Proprietățile corpurilor opace

Corpurile opace sunt cele care nu lasă să treacă prin ele radiația incidentă. Principalele proprietăți optice ale acestor corpuri sunt legate de fenomenul de absorbție și reflexie a radiației care cade pe suprafața corpului. Pe lângă acestea ne mai interesează încă o proprietate legată de faptul că orice corp aflat la o temperatură mai mare de 0 K emite radiații electromagnetice. Cu cât temperatura este mai ridicată cu atât aceste radiații sunt mai intense.

Caracterizarea cantitativă a acestui fenomen este strâns legată de o proprietate numită emisivitate. Prin urmare: absorbția, reflexia și emisivitatea sunt principalele caracteristici ale unui corp opac care interacționează cu radiația termică. Aceste caracteristici depind de o serie de factori: natura materialului, unghiul de incidență, lungimea de undă, temperatura, calitatea suprafeței, etc..

7.2.3 Proprietățile de reflexie ale radiației termice la contactul cu diverse corpuri

Există două cazuri limită de reflexie și anume:

- *reflexia direcțională*, ca într-o oglindă perfectă, când fasciculul de raze incidente se reflectă tot sub formă de fascicul sub un unghi polar egal cu cel de incidență;
- *reflexia difuză* în care razele reflectate se distribuie uniform pe toate direcțiile. În realitate fenomenul de reflexie este foarte complex apărând ca o combinație între cele două tipuri de reflexii, direcțională și difuză, predominând una sau alta, funcție de natura și calitățile substanței, (fig. 7.2).

7.3 Schimbul de căldură prin radiație

Cu noțiunile introduse până acum se pot preciza cele mai importante formule de calcul privind schimbul de căldură prin radiație, care intervin de obicei în energetica solară.

Astfel, interesează în primul rând schimbul de căldură prin radiație între două suprafețe de arii S_1 și S_2 , având factorii energetici de emisie ε_1 și ε_2 , și aflându-se la temperaturile T_1 și T_2 :

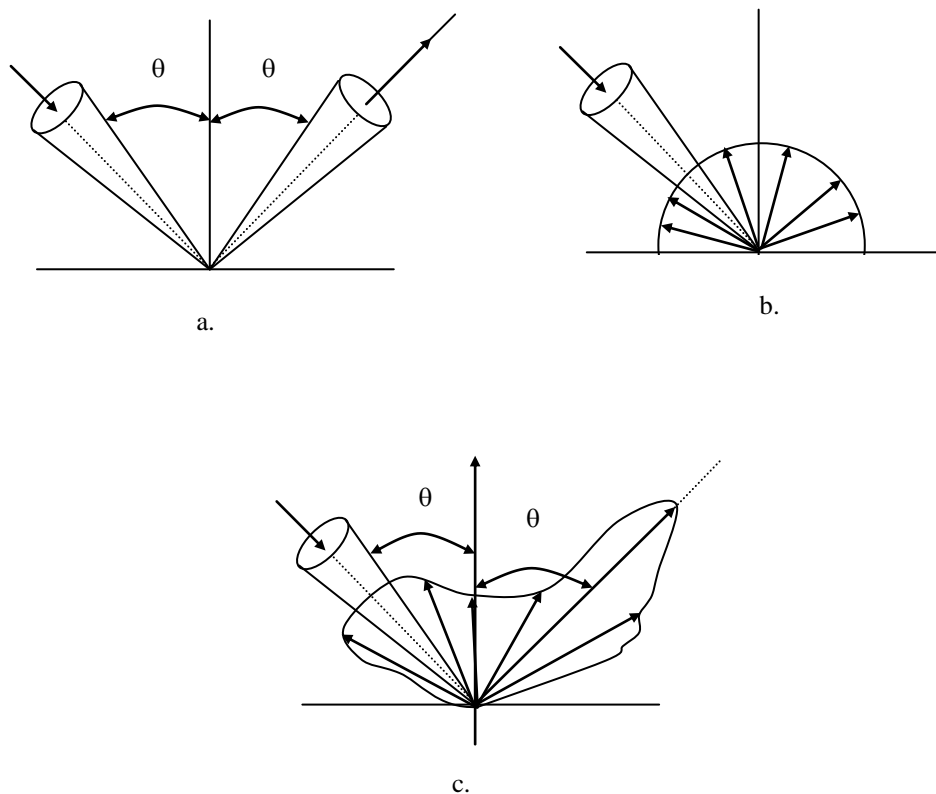


Fig. 7.2 Tipuri de reflexii ale unui fascicul de raze
 a. reflexie direcțională, b. reflexie difuză ,
 c. reflexie reală

$$\dot{Q}_1 = -\dot{Q}_2 = \frac{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)}{(1 - \varepsilon_1) / \varepsilon_1 \cdot S_1 + 1 / S_1 F_{12} + (1 - \varepsilon_2) / \varepsilon_2 \cdot S_2} \quad (7.6)$$

în care: \dot{Q}_1 și \dot{Q}_2 sunt căldurile primite respectiv cedate de cele două

suprafețe în unitatea de timp, iar F_{12} este un factor de formă (ține cont de configurația suprafețelor).

Această relație se particularizează pentru două cazuri care interesează în special în cele ce urmează:

1) Un prim caz este acela al schimbului de căldură între două suprafețe plan paralele, practic infinite ca întindere și relativ apropiate între ele. În acest caz:

$S_1 = S_2 = S$, iar $F_{12} = 1$. Se obține:

$$\dot{Q} = \frac{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \cdot S}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \quad (7.7)$$

2) Al doilea caz este cel în care un corp relativ mic cu o suprafață convexă S_1 este conținut într-un corp mai mare cu o suprafață $S_2 \gg S_1$. În aceste condiții $S_1/S_2 \rightarrow 0$, iar $F_{12} \rightarrow 1$. Se obține:

$$\dot{Q} = \varepsilon_1 \cdot S_1 \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (7.8)$$

Această ecuație se aplică și în cazul în care, de exemplu, un captator plan (vezi subcap. 7.5.1) radiază căldură către cer, pierzând astfel o parte din energia captată.

7.4 Proprietățile corpurilor parțial transparente

Fenomenele care apar la interacțiunea dintre radiația termică și o placă transparentă (geam) sunt foarte complexe deoarece implică: reflexia pe prima interfață, refracția și absorbția prin material, reflexia prin a doua interfață, refracția la ieșirea din material. În plus fasciculele reflectate se rereflectă și refractă când ajung la interfețe. Într-o primă schematizare ce poate admite că fluxul de radiație incident se împarte în trei: o parte se reflectă, o parte se absoarbe și o parte trece prin placa respectivă. Conform cu principiul conservării energiei se poate scrie:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_R + \dot{Q}_A + \dot{Q}_D \quad (7.9)$$

în care :

- \dot{Q}_i - este fluxul radiant incident;
- \dot{Q}_R - este fluxul radiant reflectat;
- \dot{Q}_A - este fluxul radiant absorbit;
- \dot{Q}_D - este fluxul radiant transmis.

Împărțind cu \dot{Q}_i se obține:

$$1 = R + A + D \quad (7.10)$$

în care: R este factorul energetic de reflexie;
 A este factorul energetic de absorbție;
 D este factorul energetic de transmisiune.

Ca și R și A, factorul D este funcție de lungimea de undă λ , de unghiul de incidență, de indicele de refracție n și de coeficientul de extincție K al materialului.

La rândul lor n și K sunt funcții de λ , dar pentru aplicațiile tehnice ale energiei solare se poate considera că n și K sunt independente de λ . Neglijând într-o primă aproximație efectul absorbției se poate arăta că factorul energetic de transmisiune D este legat de R , pentru cazul unui singur geam (figura 7.3), ținându-se cont de reflexiile și refracțiile succesive:

$$\begin{aligned} D_R &= (1-R)^2 + (1-R)^2 \cdot R^2 + \dots + R^{2n} \cdot (1-R)^2 = \\ &= (1-R)^2 \cdot [1 + R^2 + R^4 + \dots + R^{2n}] = \frac{(1-R)^2}{1-R^2} = \frac{1-R}{1+R} \end{aligned} \quad (7.11)$$

În cazul unui sistem format din n geamuri din același material se obține formula:

$$D_{R,n} = \frac{1-R}{1+(2n-1) \cdot R} \quad (7.12)$$

În aceste relații R se poate calcula cu relația lui Fresnel pentru reflexia unei radiații nepolarizate care trece dintr-un mediu cu indicele de refracție n_1 într-un alt mediu cu indicele de refracție n_2 :

$$R = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\operatorname{tg}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (7.13)$$

în care θ_1 și θ_2 sunt unghiurile de incidență și de refracție măsurate față de normală, legate între ele și de indicii de refracție prin formula lui Snell, (legea refracției):

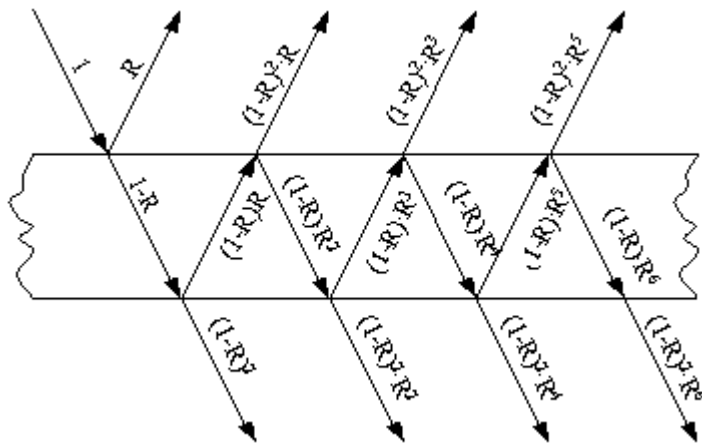


Figura 7.3 Transmiterea radiației printr-un geam.
Schema de calcul pentru D_R

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (7.14)$$

Pentru cazul particular când radiația incidentă este normală pe suprafață $\theta_1 = \theta_2 = 0$ și se obține:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (7.15)$$

În fine, pentru situația în care unul dintre medii este aerul ($n_{\text{aer}} = 1$) rezultă:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (7.16)$$

Pentru a ține seama și de absorbția unei părți din radiație, se calculează factorul de transmisiune D_A care ține cont numai de absorbție, cu formula lui Bouger:

$$D_A = e^{-K \cdot \delta} \quad (7.17)$$

în care: K este coeficientul de extincție (absorbție) (0.04/cm pentru sticla de bună calitate; 0.32/cm pentru sticla de proastă calitate); δ este lungimea drumului parcurs de radiație prin geam, în centimetri.

Se obține astfel factorul energetic de transmisiune total:

$$D = D_R \cdot D_A \quad (7.18)$$

Cu ajutorul acestui factor și cunoscând factorul energetic de absorbție al plăcii absorbante a captatorului plan se poate calcula produsul echivalent al transmisiei-absorbției în ansamblul geam-placă cu formula:

$$\begin{aligned} \overline{D \cdot A} &= D \cdot A + D \cdot A \cdot (1-A) \cdot R_{dif} + D \cdot A \cdot (1-A)^2 \cdot R_{dif}^2 + \dots \\ &+ D \cdot A \cdot (1-A)^n \cdot R_{dif}^n = \\ &= D \cdot A \cdot \left[1 + (1-A) \cdot R_{dif} + (1-A)^2 \cdot R_{dif}^2 + \dots + (1-A)^n \cdot R_{dif}^n \right] = \quad (7.19) \\ &= D \cdot A \cdot \frac{1}{1 - (1-A) \cdot R_{dif}} = \frac{D \cdot A}{1 - (1-A) \cdot R_{dif}} \end{aligned}$$

care rezultă din analiza fenomenelor succesive de reflexie și absorbție din ansamblul geam-placă (figura 7.4). Deoarece reflexia de la placa absorbantă este mai mult difuză decât direcțională, înseamnă că fracțiunea $(1-A) \cdot D$ care se reflectă prima oară de pe placă este radiație difuză și $(1-A) \cdot D \cdot R_{dif}$ se reflectă înapoi la placă. Mărimea R_{dif} (factor energetic de reflexie difuză) se referă la reflexia pe suprafața geamului a radiației incident difuze. Ea poate fi estimată folosind valorile factorului energetic de reflexie direcțională a

sistemului de geamuri pentru un unghi de incidență de 60° . Pentru $n = 1, 2, 3$ sau 4 geamuri de sticlă, $R_{dif} = 0,16; 0,24; 0,29$ și respectiv 0,32.

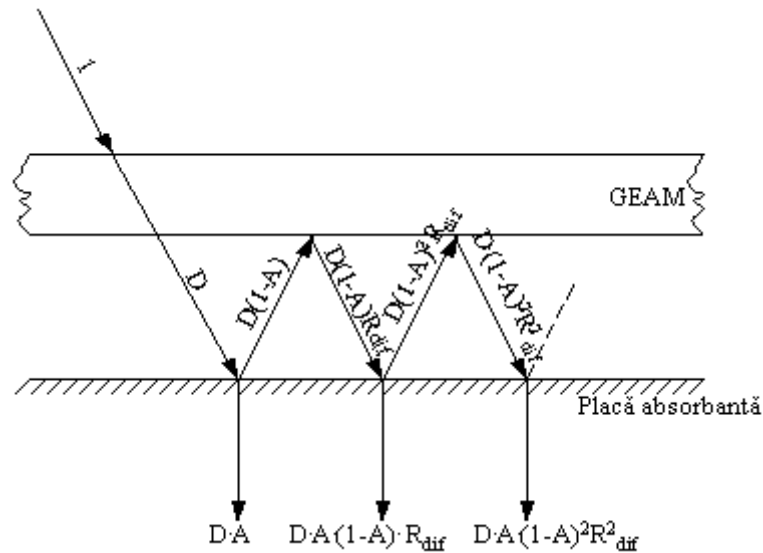


Figura 7.4 Schema de calcul pentru produsul $\overline{D \cdot A}$ în cazul unui captator plan

Fenomenul se repetă la infinit, din care motiv sumarea se face de la 0 la ∞ . Această formulă se va folosi mai departe pentru calculul performanțelor captatoarelor plane.

7.5 Captarea energiei solare

Captatorul solar este elementul esențial al unei instalații care transformă energia radiantă solară într-o altă formă, utilă, de energie.

Deseori, termenul de "*captator solar*" este utilizat pentru a desemna un convertor heliotermic, al cărui scop primar este convertirea energiei solare în căldură. Captatoarele solare pot fi utilizate cu concentrarea sau fără concentrarea radiației solare.

7.5.1 Captatoare fără concentrarea radiației

Captatoarele fără concentrarea radiației sunt captatoare solare la care aria suprafeței ce absoarbe o anumită cantitate de radiații solare este identică cu aria suprafeței care interceptează acea cantitate de radiații solare.

Ele au drept principalele avantaje următoarele:

- utilizează atât radiația solară directă cât și radiația difuză;
- nu necesită orientarea precisă spre soare;
- au o construcție mai simplă decât a captatoarelor cu concentrarea radiației;
- implică o întreținere ușoară.

Domeniul de aplicație al acestor captatoare este cel al temperaturilor moderate, de ordinul a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ peste temperatura ambiantă și anume: în instalații solare de încălzire a apei menajere sau pentru unele procese industriale, în instalații de încălzire și climatizare a clădirilor, în instalații de uscare, în instalații de distilare a apei, precum și în unele instalații de conversiei a energiei solare în energie mecanică și electrică prin ciclul termodinamic.

După forma suprafeței absorbante, captatoarele fără concentrarea radiației pot fi plane, cilindrice, semicilindrice, etc..

7.5.1.1 Probleme generale ale captatoarelor plane

În figura 7.5 este reprezentat schematic un captor plan tipic.

Părțile sale principale sunt:

- suprafața neagră absorbantă a radiației solare, înzestrată cu mijloace de transfer a energiei absorbite către un fluid purtător de căldură.
- una sau mai multe suprafețe transparente pentru radiația solară (geamuri) așezate deasupra suprafeței absorbante, care au rolul de a reduce pierderile de căldură prin convecție și radiație către mediul ambiant.
- izolația termică a suprafeței absorbante, prevăzută pentru a reduce pierderile de căldură prin conducție.
- carcasa.

În esență, funcționarea captatorului plan se bazează pe încălzirea suprafeței absorbante sub acțiunea radiației solare (directe sau difuze).

Căldura este transmisă fluidului aflat în contact termic - direct sau indirect - cu suprafața absorbantă; apoi prin circularea acestui fluid, căldura

este transportată spre alte elemente ale instalației în care este integrat captatorul.

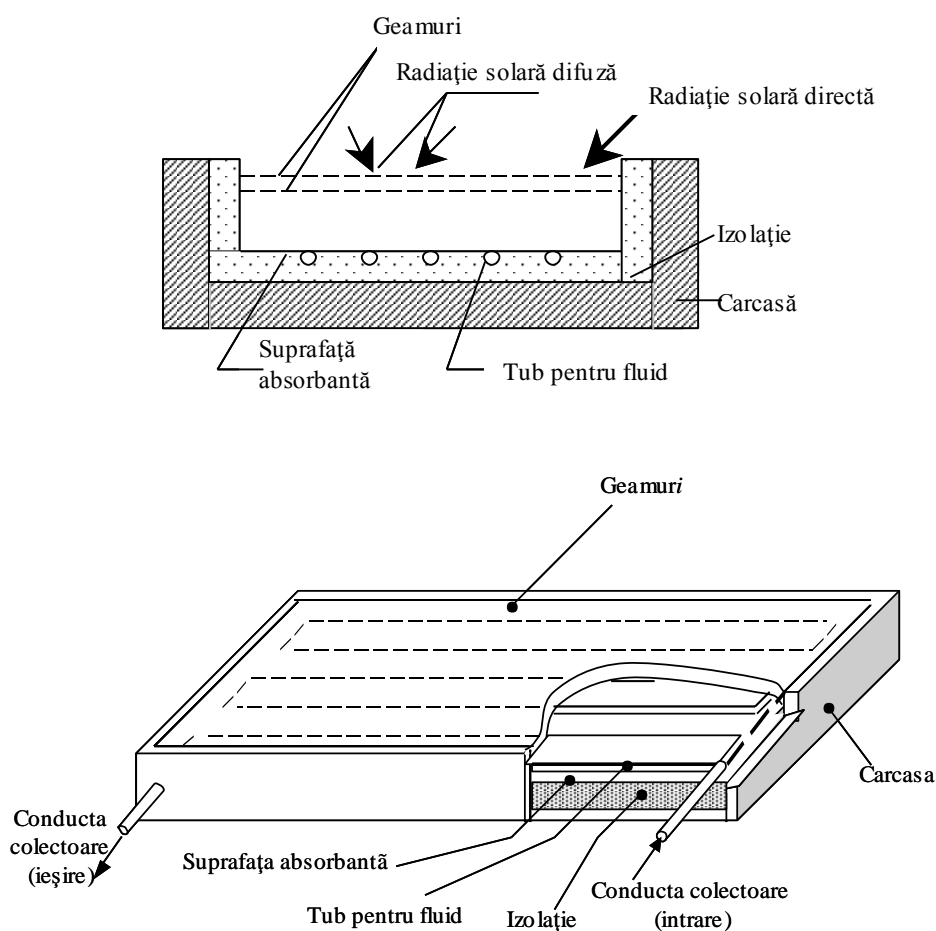


Figura 7.5 Captor solar plan de tip placă-tub

Drept fluid purtător de căldură se folosește în mod curent apa sau aerul. Se cunosc mai multe tipuri constructive de captatoare plane. Performanța oricărui captator solar este descrisă, în ultimă instanță, de bilanțul său energetic, acesta indicând modul în care este distribuită energia solară incidentă în energie utilă și diverse pierderi.

Bilanțul energetic global pentru un captator plan poate fi scris sub forma:

$$S_c \cdot \left[(E \cdot k \cdot \overline{D \cdot A})_d + (E \cdot k \cdot \overline{D \cdot A})_{dif} \right] = \dot{Q}_u + \dot{Q}_p + \dot{Q}_a \quad (7.20)$$

unde:

S_c - este aria suprafeței absorbante (active) a captatorului

E - densitatea de putere radiantă incidentă pe o suprafață orizontală

k - factorul de raportare a densității de putere radiantă din planul orizontal la planul captatorului

$\overline{D \cdot A}$ - produsul echivalent al transmisiei-absorbției în ansamblul geamuri-placă absorbantă

\dot{Q}_u - căldura utilă, transmisă fluidului purtător de căldură în unitatea de timp

\dot{Q}_p - reprezintă pierderile de căldură în unitatea de timp, de la captator la mediul ambiant prin radiație, convecție și conducție

\dot{Q}_a - căldura acumulată în captator, în unitatea de timp.

În ecuația (7.20) indicele “ d ” se referă la radiația directă iar indicele “ dif ” se referă la radiația difuză.

7.5.1.2 Coeficientul global al pierderilor termice din captator

Pentru a ușura calculul unui captator solar plan, este util să se definească un coeficient global al pierderilor termice din captator.

Fie, de exemplu, rețeaua termică prezentată în figura 7.6.a, corespunzătoare unui captator plan cu trei geamuri, de tipul celui din figura 7.5. Coeficientul global K al pierderilor de căldură pentru acest captator va putea fi determinat cu ușurință dacă se va reuși să se transfigureze rețeaua termică din figura 7.6.a în rețeaua termică echivalentă din figura 7.6.b. De aceea în cele de mai jos se va urmări obținerea transfigurării menționate. Pe o suprafață oarecare – de arie unitară – de pe placa absorbantă, caracterizată prin temperatura T_p , este absorbită o cantitate de energie solară în unitatea de timp:

$$E_p = (E \cdot k \cdot \overline{D \cdot A})_d + (E \cdot k \cdot \overline{D \cdot A})_{dif} \quad (7.21)$$

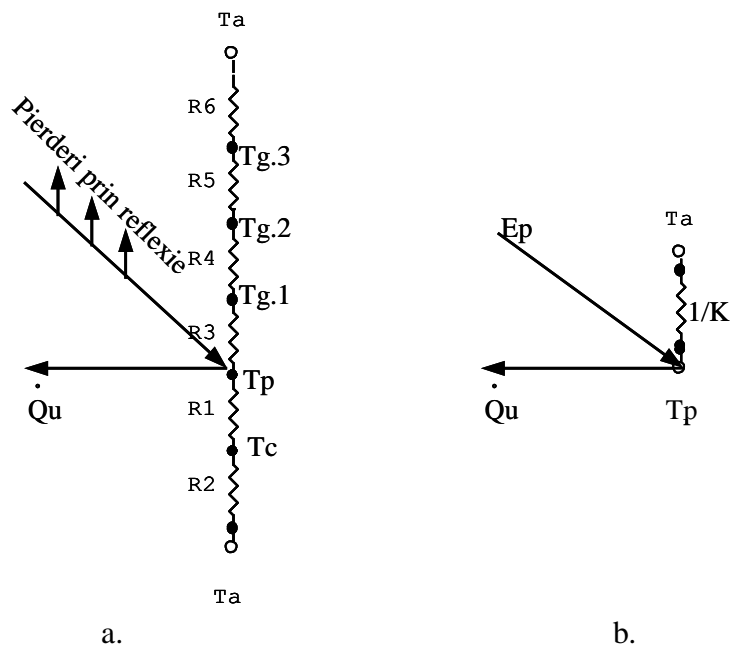


Figura 7.6 Rețeaua termică corespunzătoare unui captator solar plan a. și rețeaua ei echivalentă b.

Conform ecuației (7.20), în regim staționar ($\dot{Q}_a = 0$), o parte din această energie absorbită se regăsește sub formă de căldură utilă (căldură transferată fluidului purtător de căldură), iar altă parte se pierde prin părțile superioară, inferioară și laterală ale captorului.

Pierderilor de căldură prin partea inferioară a captatorului le corespund cele două rezistoare în serie R_1 și R_2 din figura 7.6.a:

R_1 reprezintă rezistența termică corespunzătoare transmisiei căldurii prin conducție, prin izolație, iar R_2 reprezintă rezistența termică corespunzătoare transmisiei căldurii prin convecție și radiație de la carcasă la mediul ambiant. De regulă $R_1 \gg R_2$, încât este posibil să se considere că întreaga rezistență termică este datorată izolației:

$$R_1 + R_2 \cong R_1 = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (7.22)$$

unde δ_i și λ_i reprezintă grosimea izolației și respectiv, coeficientul de conductibilitate termică al izolației.

Pentru majoritatea captatoarelor plane, evaluarea pierderilor de căldură prin părțile laterale este foarte complicată. Însă pentru un captator bine proiectat pierderile prin părțile laterale trebuie să fie mici, astfel încât nu este necesar ca acestea să fie determinate cu mare precizie.

Pierderile de căldură prin partea superioară a captatorului se datoresc radiației și convecției între diversele plăci paralele reprezentate de placa absorbantă și geamuri.

Fluxul termic între placa absorbantă, aflată la temperatura T_p și primul geam, aflat la temperatura $T_{g,1}$ este identic cu fluxul termic între oricare alte două geamuri vecine și identic de asemenea, cu fluxul termic de la ultimul geam la mediul ambiant. Pierderile de căldură, în unitatea de timp pe unitatea de arie, prin partea superioară a captatorului are în aceste condiții expresia:

$$\dot{q}_{p,s} = \alpha_{c,1} \cdot (T_p - T_{g,1}) + \frac{\sigma \cdot (T_p^4 - T_{g,1}^4)}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_g - 1} \quad (7.23)$$

în care: $\alpha_{c,1}$ - este coeficientul de transmisie a căldurii prin convecție de la placa absorbantă la geamul 1; σ - constanta lui Stefan-Boltzmann; ε_p - factorul energetic de emisie al plăcii; ε_g - factorul energetic de emisie al geamului.

Dacă se liniarizează termenul corespunzător radiației din expresia (7.23), poate fi utilizat coeficientul de transmisie a căldurii prin radiație, și expresia (7.23) devine:

$$\dot{q}_{p,s} = (\alpha_{c,1} + \alpha_{r,1}) \cdot (T_p - T_{g,1}) \quad (7.24)$$

unde :

$$\alpha_{r,1} = \frac{\sigma \cdot (T_p + T_{g,1})(T_p^2 + T_{g,1}^2)}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_g - 1} \quad (7.25)$$

În aceste condiții, rezistența termică R_3 din figura 7.6.a poate fi exprimată sub forma:

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_{c,1} + \alpha_{r,1}} \quad (7.26)$$

O expresie analoagă poate fi scrisă pentru fiecare rezistență termică dintre două geamuri vecine, de exemplu:

$$R_4 = \frac{1}{\alpha_{c,2} + \alpha_{r,2}} \quad (7.27)$$

Cu o bună aproximație rezistențele R_4 și R_5 sunt egale. Aceste rezistențe nu sunt însă egale cu rezistența R_3 , întrucât R_3 conține factorul energetic de emisie al plăcii absorbante, care nu este egal cu cel al geamurilor.

Ultima rezistență termică, între geamul superior și mediul ambiant, are în principiu, o expresie tot de forma (7.26) și anume:

$$R_6 = \frac{1}{\alpha_{c,a} + \alpha_{r,a}} \quad (7.28)$$

în care: $\alpha_{c,a}$ este coeficientul de transmisie a căldurii prin convecție de la geamul superior la aerul ambiant, și poate fi calculat cu relația propusă de McAdams :

$$\alpha_{c,a} = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad (7.29)$$

unde v este viteza aerului (vântului), tangențial la suprafața geamului; $\alpha_{r,a}$ este coeficientul de transmisie a căldurii prin radiație și corespunde pierderilor prin radiație către aerul aflat la temperatura T_{cer} . Așa cum este însă definită rezistența R_6 , acest coeficient trebuie raportat la temperatura aerului ambiant, T_a astfel că expresia sa este:

$$\alpha_{r,a} = \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot \frac{T_{g,3}^4 - T_{cer}^4}{T_{g,3} - T_a} \quad (7.30)$$

Pentru un captator cu n geamuri, în relația (7.30) se va înlocui indicele 3 prin n . În condițiile de mai sus, coeficientul global K al pierderilor termice pentru captatorul analizat (neglijând pierderile de căldură prin părțile laterale) va fi egal chiar cu conductanța termică echivalentă a rețelei din figura 7.6.b, și anume:

$$K = K_i + K_s \quad (7.31)$$

unde:

$$K_i = \frac{1}{R_1 + R_2} \quad (7.32)$$

reprezintă coeficientul global al pierderilor termice prin partea inferioară a captatorului iar:

$$K_s = \frac{1}{R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \quad (7.33)$$

reprezintă coeficientul global al pierderilor termice prin partea superioară a captatorului.

7.6 Captatoare cu concentrarea radiației

Captatoarele cu concentrator (sau cu focalizarea radiațiilor) utilizează sisteme optice bazate pe reflexie sau refracție, pentru a mări densitatea fluxului de radiație care cade pe suprafața de captare a receptorului.

În consecință, un captator cu focalizare poate fi considerat ca un caz special de captator plan, modificat prin interpunerea între receptor și Soare a unui concentrator de radiații. Odată cu creșterea densității fluxului de radiație solară care ajunge la receptor scade suprafața necesară de recepție pentru o aceeași cantitate totală de energie captată, ceea ce determină în mod corespunzător scăderea pierderilor termice ale receptorului și conduce în final la obținerea unor temperaturi mai mari în fluidul de lucru.

Funcție de principiul de funcționare și construcția concentratorului se pot obține valori foarte diverse pentru densitatea fluxului de radiație pe

suprafețele absorbante ale receptorului: de la valori relativ mici de $1,5 \div 2$ kW/m^2 până la valori foarte mari de ordinul a $10\,000 \text{ kW/m}^2$.

7.6.1 Clasificarea captatoarelor solare cu concentrator

- a) După principiul fizic al concentrării se deosebesc:
- concentratoare prin reflexie cu ajutorul oglinzilor;
 - concentratoare prin refracție cu ajutorul lentilelor;
 - concentratoare prin reflexie totală folosind prisme optice.
- b) După geometria sistemului optic de concentrare:
- suprafețe generate prin rotație (sferice, parabolice, elipsoidale);
 - suprafețe generate prin translație (cilindri parabolici, circulari, elipsoidali);
 - suprafețe compuse din mai multe suprafețe mici, sisteme cu dublă reflexie, etc..
- c) După forma zonei iluminate pe suprafața receptorului:
- focalizare punctiformă;
 - focalizare liniară;
 - fără focar definit.
- d) După forma receptorului:
- receptor plan;
 - receptor cilindric;
 - receptor sferic, elipsoidal, etc..
- e) După modul de orientare:
- poziție fixă;
 - orientare predominant după o axă;
 - orientare după două axe.

7.6.2 Captatoare cu concentrator fix

7.6.2.1 Concentratorul piramidal

Un mijloc relativ simplu de mărire a fluxului radiației solare care cade pe un captator plan constă în folosirea unor suprafețe plane reflectante, astfel dispuse în raport cu captatorul încât se obține un coeficient de concentrare geometrică între 2 și maximum 6. Se prezintă în continuare un concentrator piramidal destinat sistemelor de încălzire solară a caselor de locuit. În fig. 7.7

se prezintă schematic un astfel de concentrator montat în mansarda unei case cu fațada orientată către sud. Sistemul constă dintr-un perete basculant care are montată pe una din părți o oglindă plană (din plastic aluminizat din Mylar). Acest perete se înclină sub un unghi optim depinzând de latitudinea locului. Pe partea interioară a acoperișului există de asemenea o suprafață reflectantă care preia radiația solară de la prima oglindă și o trimite spre captatorul plan așezat în poziție orizontală. Suprafața necesară a captatorului plan scade cu un factor cuprins între 2 și 6, ceea ce determină scăderea costului întregului sistem. În realitate, ținând cont de factorul energetic de reflexie 0.9 și de dubla reflexie, factorul de concentrare a fluxului radiant se obține înmulțind factorul de concentrare geometric cu cca. 0.8, de unde rezultă $1,6 \div 4,8$. În consecință și costul captatoarelor scade cu acest factor.

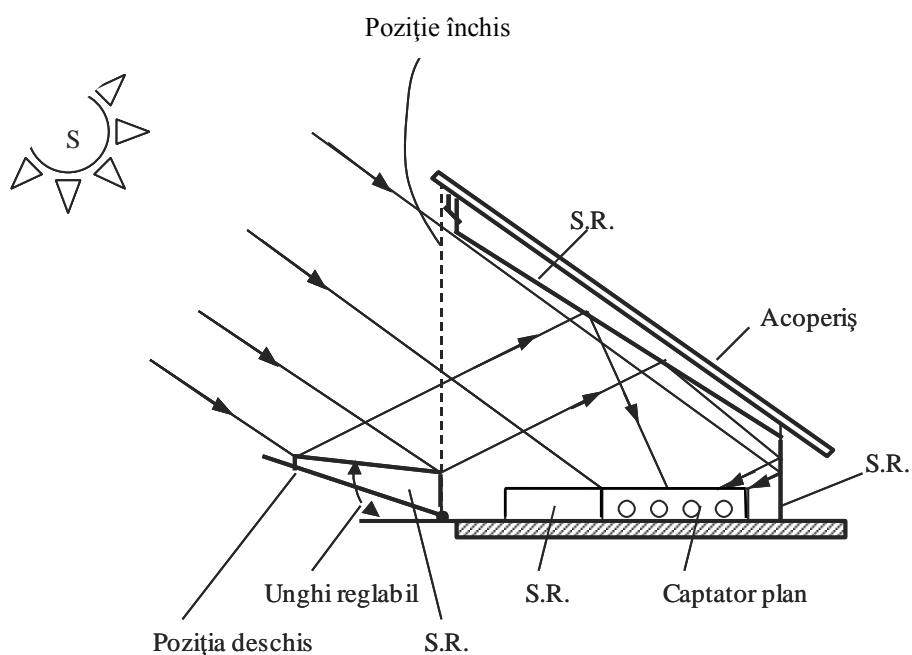


Fig. 7.7 Concentrator piramidal;
SR- suprafață reflectantă.

7.6.2.2 Concentratorul dublu parabolic

Domeniul de temperaturi care poate fi realizat cu un concentrator dublu-parabolic se plasează între captatorul plan și captatorul cu focalizare liniară (cilindro-parabolic) și anume între $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $230\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Principiul de funcționare este următorul: Concentratorul dublu-parabolic este format din două suprafețe cilindrice reflectante având profile parabolice (cu focare diferite) plasate simetric față de planul median al captatorului (fig. 7.8 și fig. 7.9). Acest concentrator, având o poziție unghiulară fixă \hat{i} primește radiația solară pe întreaga lățime D , dirijând-o către suprafața absorbantă a captatorului plan de lățime d , cu condiția ca unghiul $|\gamma| < \theta_{\max}$. În consecință acceptanța unghiulară este $2 \cdot \theta_{\max}$. Aceasta depinde de raportul între lățimea captatorului plan d și lățimea deschiderii D conform relației:

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{d}{D} = \arcsin \frac{1}{c} \quad (7.34)$$

Raportul $c = \frac{D}{d}$ este raportul geometric de concentrare al captatorului dublu-parabolic. Captatorul trebuie orientat pe direcția E – V și înclinat față de orizontală sub un unghi \hat{i} . Dacă $|\gamma| < \theta_{\max}$, sunt primite în captator atât radiația directă cât și cea difuză.

Dacă $|\gamma| > \theta_{\max}$, în receptor intră numai radiație difuză pe lățimea d , cea directă este reflectată înapoi în spațiu. Adâncimea teoretică a captatorului este dată de relația :

$$H_t = d \cdot \frac{c+1}{2} \cdot \sqrt{c^2 - 1} \quad (7.35)$$

S-a constatat că valorile practice ale lui H trebuie să fie de cca $H_t/3$.

Captatorii cu concentrator dublu-parabolic se pot monta în serie formând în ansamblu un captator plan cu concentrare fig. 7.9.b.

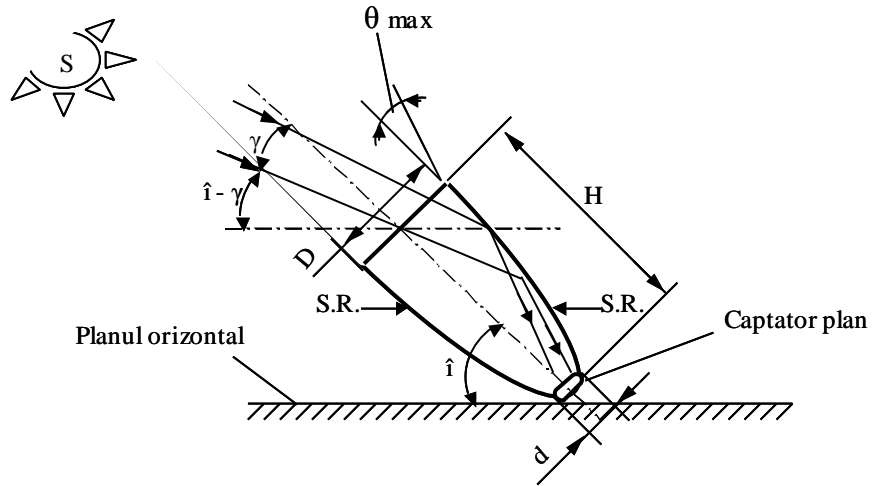


Fig.7.8 Caracteristicile geometrice ale concentratorului dublu-parabolic (SR – suprafață reflectantă).

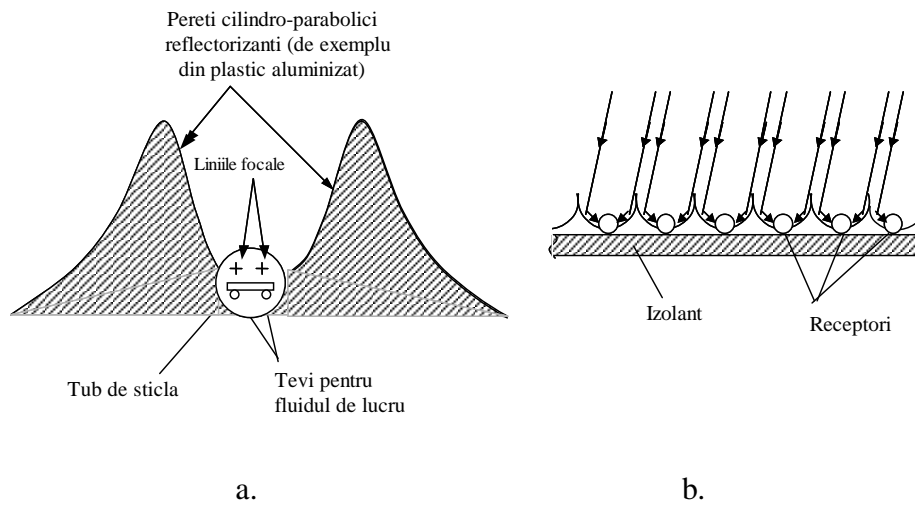


Fig. 7.9 Captator plan prevăzut cu concentratori dublu-parabolici:
a) detaliu b) plasarea receptoarelor și a suprafețelor reflectante ale concentratorilor

7.6.2.3 Concentratorul sferic fix cu receptor mobil

Acest tip de concentrator a fost inventat de W. Gene Steward din S.U.A. Ideea care stă la baza principiului de funcționare este sugerată în fig. 7.10, care arată că o oglindă de forma unei calote sferice fixe are proprietatea de a reflecta radiația solară (indiferent de poziția Soarelui pe cer) către un focar liniar, paralel cu razele Soarelui și care trece prin centrul oglinzii. Receptorul – de formă cilindrică - se poate roti în jurul a două axe, rămânând orientat permanent pe direcția Soarelui și astfel plasându-se mereu în focar. Evident, mișcarea receptorului este mult mai simplă și consumă mai puțină energie mecanică decât mișcarea ansamblului oglindă-receptor.

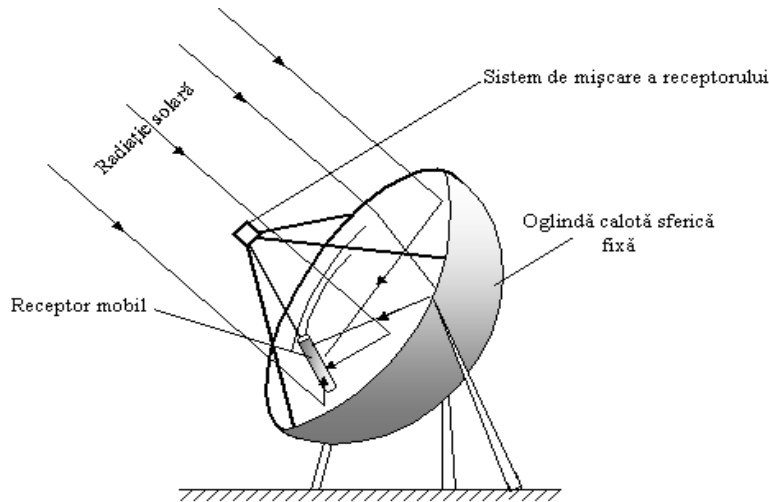


Fig. 7.10 Concentrator sferic fix cu receptor mobil

7.6.2.4 Captatoare cu concentrator mobil

În fig. 7.11 se prezintă schema de principiu a unui captator cu oglinzi Fresnel cu focalizare liniară. Un număr de segmente de oglinzi plane sau curbate (cu distanță focală relativ mare) sunt montate pe un stativ comun, cu posibilitatea de rotire în jurul unei axe orientate E-V. Segmentele se mișcă în timpul zilei astfel încât radiația solară directă să fie dirijată către receptor.

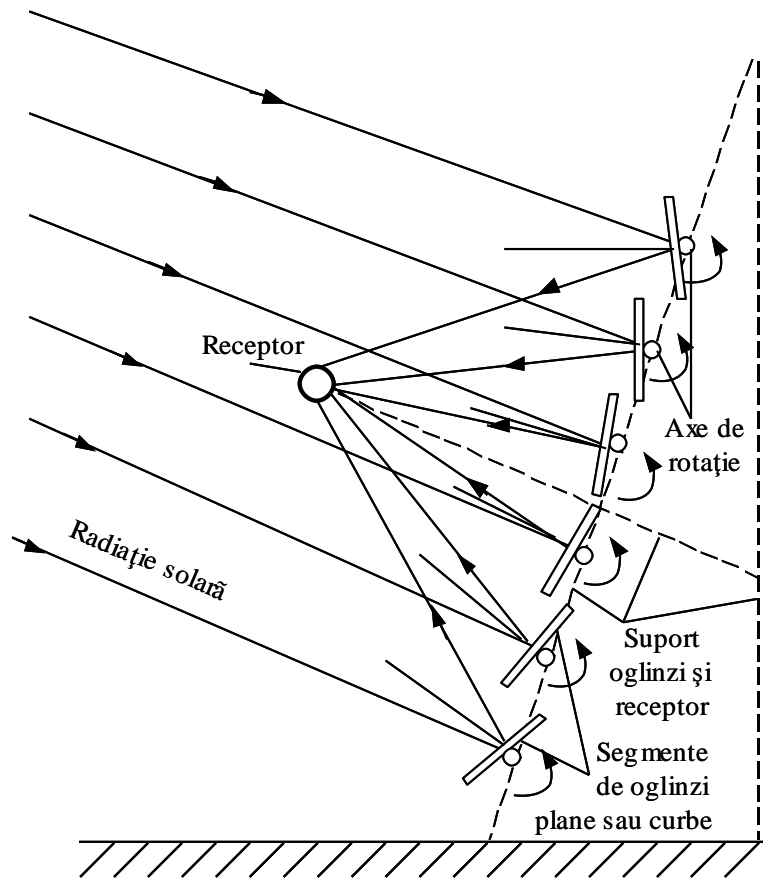


Fig. 7.11 Schema de principiu a unui captator cu oglinzi Fresnel .

7.7 Conversia energiei solare în energie termică destinată încălzirii

După cum arată studiile recente, încălzirea apei cu ajutorul radiației solare, chiar în zone temperate, cum este cea în care se află țara noastră, este mai economică decât dacă s-ar folosi energia electrică.

Cel mai simplu încălzitor al apei este un simplu colector, în mod uzual, unul plat, conectat la un sistem de stocare. El poate să fie sau nu echipat cu o pompă de circulație a apei spre colector (fig. 7.12).

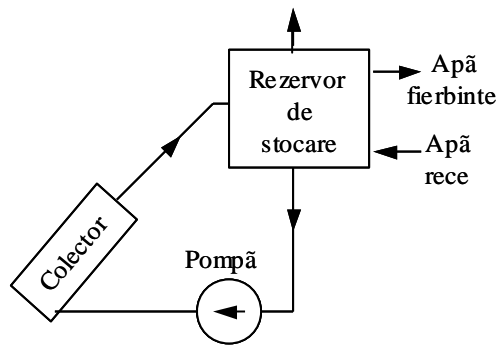
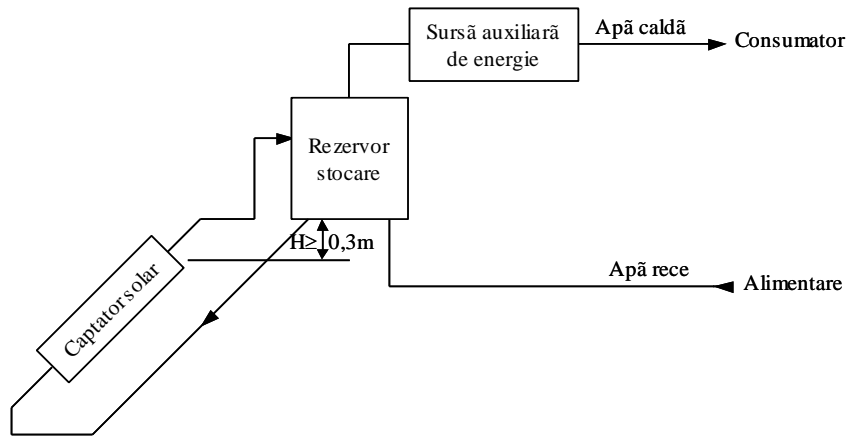


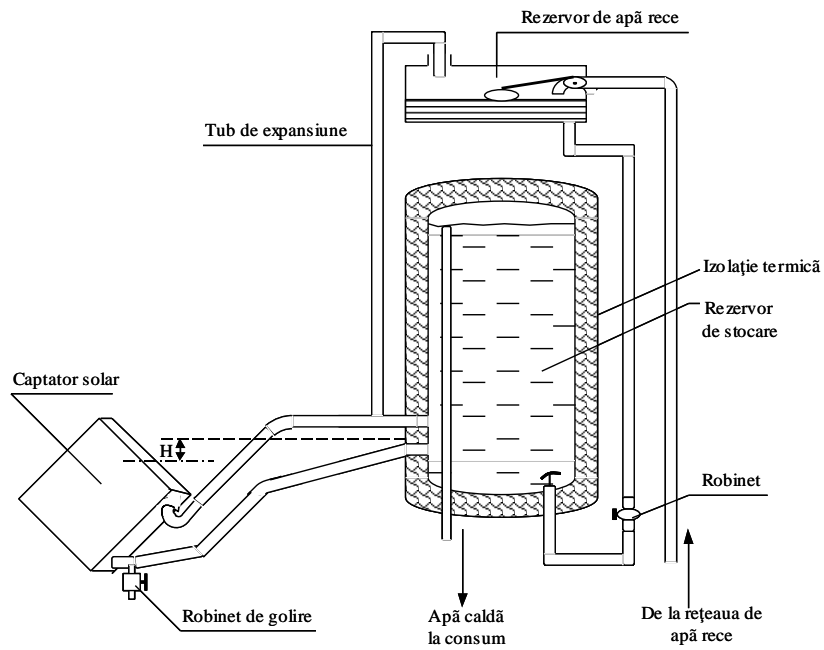
Fig. 7.12 Colector conectat la sistemul de stocare.

Elementele de bază ale unei instalații solare de încălzire a apei sunt captatorul și unitatea de stocare termică. În afara acestora, instalația mai este echipată de regulă, cu o sursă auxiliară de energie. De asemenea, ea mai cuprinde mijloace pentru circulația apei și pentru reglarea sistemului, vase de expansiune, vase de aerisire, etc.. Circulația apei între captator și unitatea de stocare (uzual cu un rezervor cu apă) se poate realiza fie natural, fie forțat. Un sistem de circulație naturală (termosifon) este prezentat schematic în fig. 7.13. În acest sistem apa va circula prin convecție naturală între captator și rezervorul de stocare datorită diferenței de densități care se stabilește ori de câte ori apa din captator este încălzită prin absorbția energiei solare.

În lipsa radiației solare ar putea avea loc inversarea sensului de circulație a apei, ceea ce ar conduce la cedarea căldurii stocate către mediul ambiant. Pentru a exista aceasta, trebuie ca rezervorul de stocare trebuie să fie dispus deasupra captatorului, astfel ca între capetele conductei de legătură dintre partea superioară a captatorului și partea inferioară a rezervorului să existe o diferență de nivel de cel puțin 0.3 m. În cazul unei diferențe de nivel sub 0.3 m trebuie folosită o supapă cu un singur sens. În exemplul prezentat energia auxiliară este “injectată” în apa care pleacă de la rezervor la consumator, pentru a o menține în orice condiții la un nivel minim de temperatură impus de consumator.



a.



b.

Fig. 7.13 Schema unei instalații de încălzire solară a apei, cu circulație naturală
a. schema de principiu; b. schema detaliată

7.8 Centrale electrice solare

Se bazează pe conversia energiei solare în energie termică ce se utilizează într-un ciclu termodinamic. Sistemul indicat în fig. 7.14 diferă de cel din în fig. 7.15 prin aceea că energia primită de colectoarele solare nu este transportată sub formă de căldură și ca radiații a căror energie este concentrată prin reflexie într-un rezervor central. În felul acesta se obțin temperaturi mai ridicate ale fluidului de lucru care acționează apoi într-un circuit termic clasic. Sistemul din fig. 7.15 utilizează un câmp de captatoare solare care încălzesc un fluid la temperatură înaltă. Captatoarele pot fi parabolice, circulare sau cu lentile Fresnel, fig. 7.16 iar lichidul prin care se face transferul de căldură este apa sub presiune. Din punct de vedere termodinamic, energia solară se caracterizează actualmente printr-un nivel scăzut al temperaturii sursei calde. În aceste condiții ciclul are un randament mediocru a cărui valoare maximă teoretică corespunde randamentului ciclului Carnot (fig. 7.17.a. și 7.17.b.).

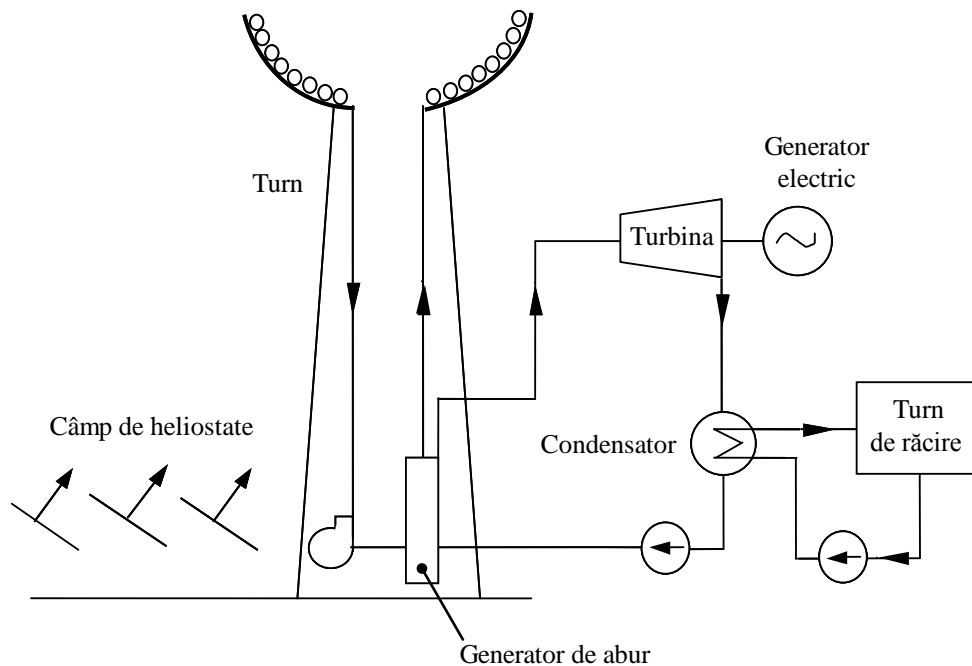


Fig. 7.14 Centrală electrică solară ce utilizează colectoare circulare

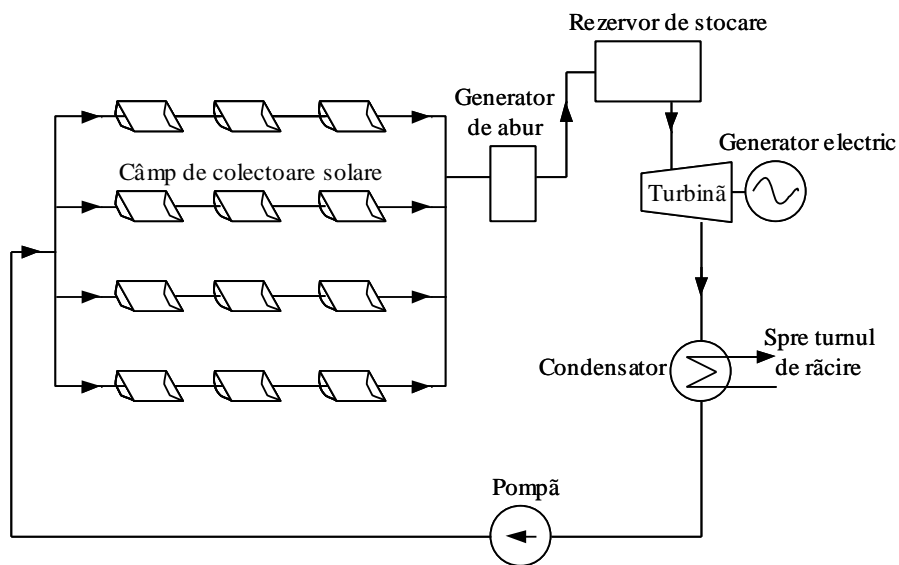


Fig. 7,15 Centrală electrică solară ce utilizează un câmp de colectoare solare plane

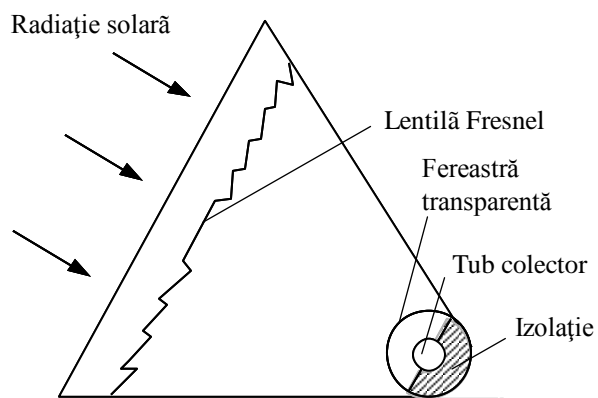


Fig. 7.16 Captator cu lentilă Fresnel

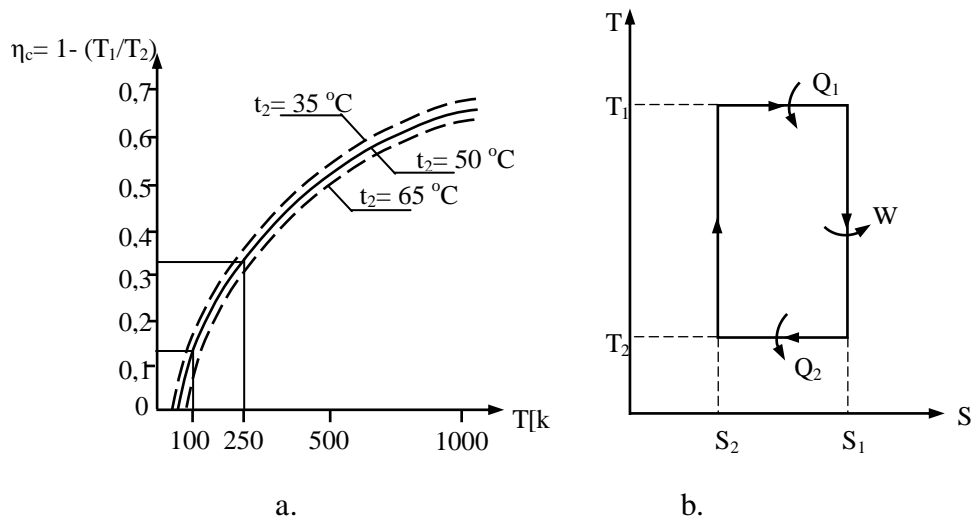


FIG. 7.17. Cielu Carnot :
a) randamentul ; b) variația entropiei cu temperatura.

Turbinele cu abur clasice au un randament mai bun la temperatură înaltă dar randamentul colectorului solar variază invers cu temperatura. De aceea este necesar să se stabilească un sistem optim din punctul de vedere al temperaturii fluidului, puterii centralei și a altor parametri importanți. Creșterea randamentului s-ar putea obține pe baza utilizării ca fluid de lucru în locul vaporilor de apă a altor fluide ca: freon, benzen, trifluoroetanol, hexafluorbenzen, etc... Acestea prezintă în plus și avantajul utilizării unor turbine relativ lente și simple.

7.9 Producerea hidrogenului cu ajutorul energiei solare

Această metodă este una dintre cele mai atractive căi de utilizare a energiei solare, deși în faza actuală este mai speculativă decât alte metode. Astfel în Japonia s-a construit un dispozitiv care permite producerea hidrogenului din apă utilizând energia solară. Acest aparat este compus dintr-o lentilă Fresnel și dintr-o celulă fotochimică. Razele ultraviolete colectate provoacă reacția fotochimică a apei care curge în baia prevăzută cu un catalizator fig. 7.18. Pe de altă parte, razele colectate într-un

element termoelectric produc energia electrică ce electrolizează apa și produce hidrogen.

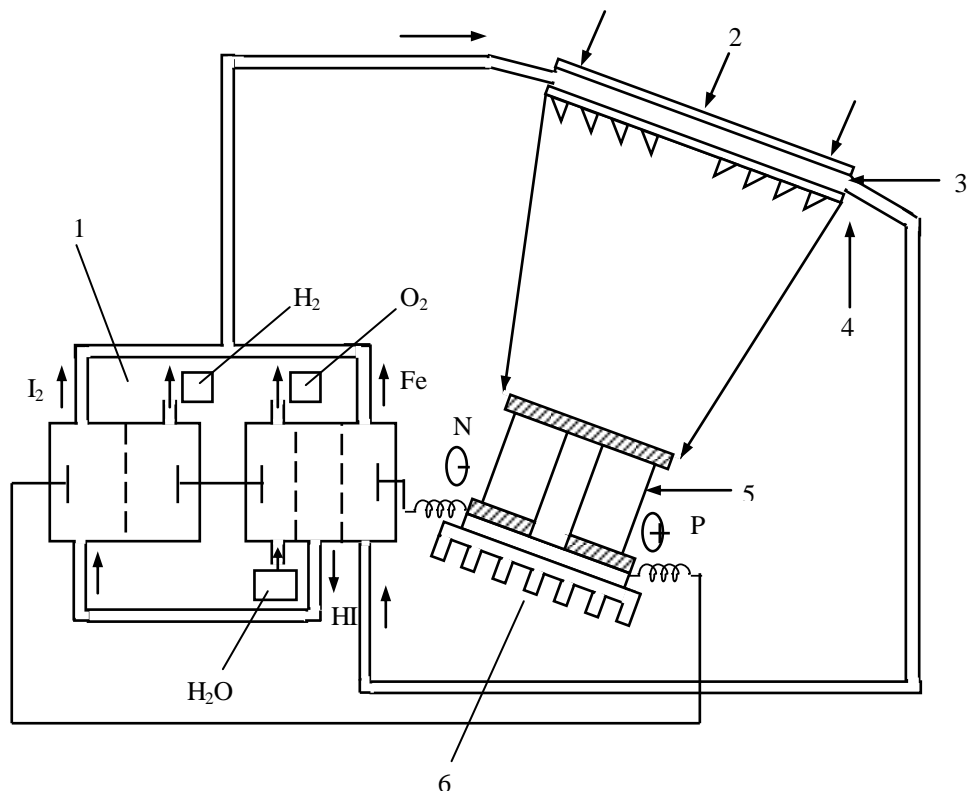


Fig. 7.18. Schema pentru producerea hidrogenului cu ajutorul energiei solare.

1 – baia de electroliză; 2 – razele solare; 3 – celulă de reacție fotochimică; 4 – lentilă Fresnel; 5 – elemente termoelectrice; 6 – palete de refrigerare ;

7.10 Conversia fotoelectrică

Funcționarea celulelor solare se bazează pe efectul fotoelectric, care constă în emisia de purtători de sarcini microscopice dintr-un corp în general solid, sub acțiunea undelor electromagnetice (fig. 7.19.a). Pe baza acestui fenomen, se construiesc cu diferite funcțiuni câteva tipuri de celule, dar cea

solară sau fotovoltaică se deosebește prin realizarea în ea a unei joncțiuni semiconductoare, ceea ce îi dă proprietatea de generator de curent electric sub acțiunea luminii. Funcționarea celulelor solare poate fi studiată considerând joncțiunea p-n în paralel cu o sursă de curent constant, circuitul echivalent simplificat fiind arătat în fig. 7.19.b.

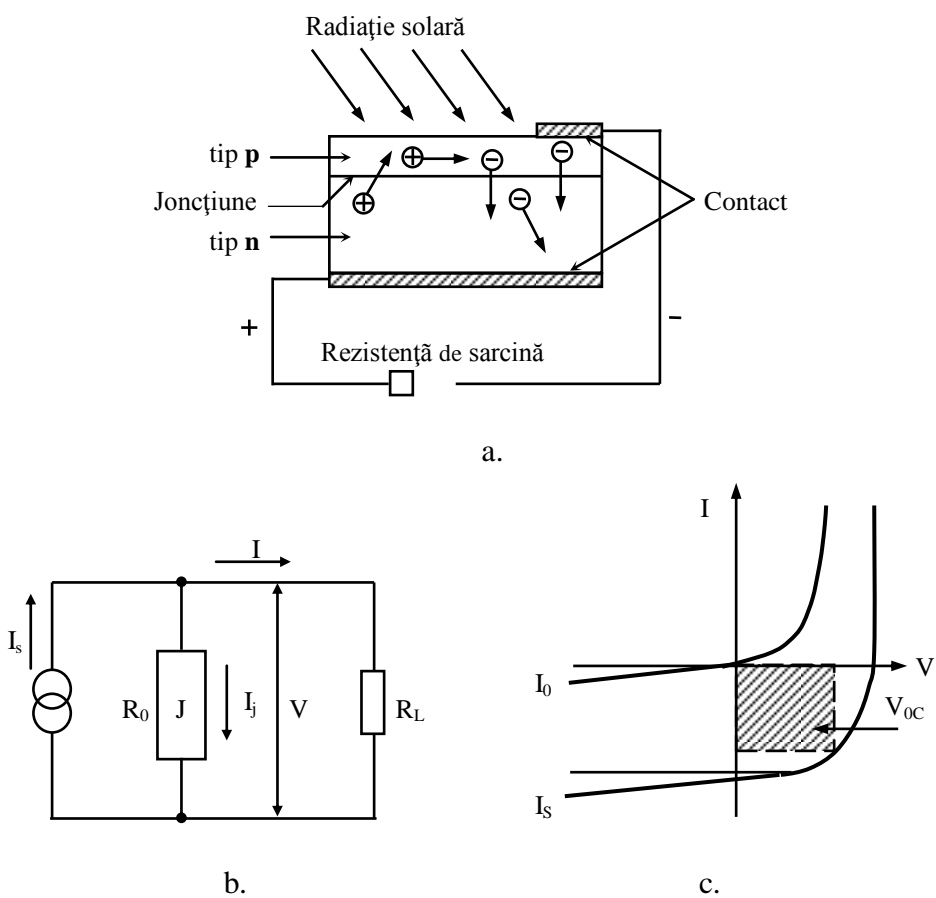


Fig. 7.19 Celula solară
a. construcția; b. schema echivalentă; c. caracteristica tensiune – curent;

Curentul prin joncțiunea p – n este I_j

$$I_j = I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (7.36)$$

unde e – sarcina electronului; V – tensiunea la borne; k – constanta lui Boltzmann; T – temperatura absolută;

Caracteristica tensiune – curent este, conform schemei din fig. 7.19.c, dată de relația:

$$I = I_s - I_j = I_s - I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (7.37)$$

pe figură R_L este rezistența de sarcină, R_o rezistența joncțiunii:

$$R_o = \frac{kT}{eI_o} \quad (7.38)$$

iar V – tensiunea , $V = R_L \cdot I$

Caracteristica tensiune – curent este reprezentată în fig. 7.19.c. Tensiunea maximă V_{\max} apare când $I = 0$, iar:

$$V_{\max} = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_s}{I_o} + 1\right) = V_{0c} \quad (7.39)$$

unde, V_{0c} este tensiunea de mers în gol. Puterea de ieșire:

$$P = R_L \cdot I^2 = V \cdot I = \left\{ I_s - I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \right\} \cdot V \quad (7.40)$$

Capitolul VIII

VIII. ENERGIA EOLIANĂ

8.1 Potențialul energetic eolian

Energia eoliană este o formă transformată a energiei solare, care este transmisă atmosferei prin încălzire de la suprafața pământului. Aprecierea mărimii potențialului energetic eolian este mai dificilă și mai puțin precisă decât a potențialului energetic solar. Astfel, *potențialul eolian teoretic* pentru întreaga atmosferă terestră poate fi stabilit pe baza unui bilanț energetic global. Acest bilanț are însă destule necunoscute, datorită limitelor modelelor matematice ale sistemului mondial. Se admite, în principiu, că o parte de cca. 2% din energia solară care revine pământului este cedată atmosferei:

$$E_A = 0.02 \cdot E_s \quad (8.1)$$

În schimb repartizarea acestei cote în diferite zone ale globului este mai greu de stabilit, deoarece influența mișcărilor aerului se resimte pe mari suprafețe. În vederea captării energiei eoliene este necesară cunoașterea unor caracteristici ale curenților de aer, care au influență directă asupra construcției instalațiilor de conversie. Principalii parametri avuți în vedere sunt:

- viteza vântului
- direcția vântului
- durata anuală a vântului (în funcție de viteză)

În privința *vitezei vântului* măsurătorile meteorologice se dovedesc insuficiente întrucât sunt efectuate la intervale prea mari de timp (6 h). Viteza vântului prezintă fluctuații destul de rapide și ample, ceea ce influențează în mod major puterea dezvoltată de instalația de conversie. Din acest motiv, în vederea determinării producției de energie a captatoarelor eoliene, este necesară o măsurare a vitezei vântului la intervale mult mai mici sau chiar o înregistrare continuă a acesteia.

Viteza vântului se mai caracterizează și prin variația în funcție de altitudine, datorită frecării straturilor de aer cu solul și a influenței diferitelor obstacole.

Direcția vântului are importanță mai ales pentru stabilirea modului de așezare a captatoarelor eoliene în ansambluri de dimensiuni mai mari. Cu ocazia măsurării vitezei vântului se poate determina și direcția acestuia.

Frecvența mișcării aerului se poate exprima în numărul de ore pe durata unui an în care viteza vântului depășește o anumită valoare.

Luând în considerare cea mai mică viteză a vântului care ar putea fi folosită de către instalațiile de conversie ($v = 3$ m/s), s-a constatat că peste 50% din teritoriul țării noastre prezintă condiții de utilizare a energiei solare.

Frecvența anuală a vânturilor cu viteze mai mari de 3 m/s este:

- 7950 ore la Sulina
- 7200 ore în zona montană la peste 1800 m altitudine
- 6500 ore în zona submontană între 1400-1800 m
- 6000 ore în Dobrogea, Moldova centrală, Banat
- 5000 ore în Moldova de Nord, Bărăgan, Crișana
- 3000 ore în Transilvania.

Variația anuală a intensității vântului în țara noastră urmează o tendință generală cu intensificări în perioadele ianuarie-martie, septembrie-noiembrie și cu scăderi în perioadele aprilie-august, decembrie.

Puterea vântului se poate determina plecând de la energia cinetică a unui curent de aer cu viteză constantă:

$$E = \frac{mv^2}{2} \quad (8.2)$$

În această relație m reprezintă masa de aer care trece prin suprafața unui captator eolian într-un interval t .

$$m = \rho \cdot S \cdot v \cdot t = q \cdot t \quad (8.3)$$

iar $q = \rho \cdot S \cdot v$ este debitul masic de aer prin suprafața captatorului.

Puterea curentului de aer se obține divizând prin t energia vântului (8.1), obținând astfel:

$$P = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} = q \frac{v^2}{2} \quad (8.4)$$

Dacă $S = 1 \text{ m}^2$, știind că $\rho = 1.226 \text{ kg/m}^3$, rezultă o relație de calcul rapid a puterii:

$$P = 0.613 \cdot \left(\frac{v}{10}\right)^3 \text{ (KW/m}^2\text{)} \quad (8.5)$$

8.2 Limita de putere a captatoarelor eoliene

Nici unul dintre tipurile de captatoare eoliene nu poate utiliza integral puterea curentului de aer care îl străbate. Puterea maximă preluată se poate determina în principiu, luând în considerare numai modificarea vitezei vântului la trecerea prin roata eoliană. Calculul se efectuează pornind de la ipoteza simplificatoare a incompresibilității aerului la trecerea prin captator.

a) *Cazul captatorului eolian cu ax orizontal*

Se consideră un tub de curent având secțiunea egală cu suprafața descrisă de captatorul eolian în rotație. (figura 8.1.a)

În amonte de captator viteza vântului este v_1 , iar în aval de acesta devine v_2 , în dreptul captatorului viteza fiind v . Puterea preluată de captator poate fi considerată ca diferența puterilor curentului de aer înainte de captator:

$$P_1 = q \cdot \frac{v_1^2}{2}$$

și după captator:

$$P_2 = q \cdot \frac{v_2^2}{2}$$

Considerând același debit de aer: $q = \frac{m}{t} = \rho \cdot S \cdot v$

Rezultă expresia puterii captate:

$$P = \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (8.6)$$

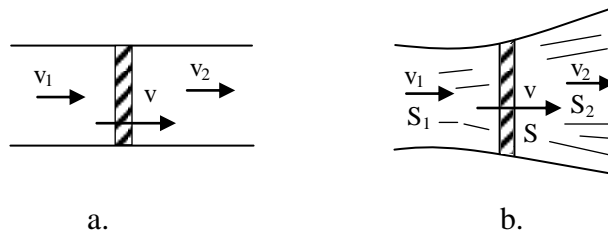


Fig. 8.1 Captatorul cu ax orizontal în tubul de curent

Pe de altă parte, se poate calcula aceeași putere ca produsul dintre variația impulsului curentului de aer la trecerea prin captator și viteza acestuia în dreptul captatorului.

$$P = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot v \quad (8.7)$$

Deoarece:

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = q \cdot (v_1 - v_2) = \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1 - v_2)$$

se obține o altă expresie a puterii preluate:

$$P = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (8.8)$$

Egalând cele două expresii rezultă pentru viteza vântului în dreptul captatorului:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (8.9)$$

cea ce reprezintă o variație liniară a vitezei. Introducând viteza v (8.9) în expresia puterii (8.6) și scoțând în factor viteza v_1 din amonte de captator, se obține:

$$P = P = \frac{\rho \cdot S}{4} \cdot v_1^3 \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right] \quad (8.10)$$

ceea ce înseamnă că puterea preluată depinde de mărimea raportului

$$x = \frac{v_2}{v_1} \quad (8.11)$$

ceea ce reprezintă o variație liniară a vitezei.

Introducând această necunoscută în (8.10), valoarea lui x pentru care puterea preluată este maximă se obține prin rezolvarea ecuației:

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{\rho \cdot S}{4} \cdot v_1^3 \cdot (1+x) \cdot (1-x^2) \right] = 0 \quad (8.12)$$

Rezultă, pentru condiția de maxim, soluția $x = 1/3$, pentru care puterea preluată este:

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{v_1^3}{2} \quad (8.13)$$

Așadar, puterea maximă preluată se ridică la cca. 0,592 din puterea curentului de aer. Această valoare este cunoscută sub numele de limita lui Betz.

b) *Cazul captatoarelor cu ax vertical*

În această situație, curentul de aer traversează de două ori suprafața captatorului, modificându-și de doua ori viteza (fig. 2), astfel încât puterea preluată de captator se va obține ca:

$$P = F_1 \cdot v_{m1} + F_2 \cdot v_{m2} \quad (8.14)$$

în care:

$$v_{m1} = \frac{v_1 + v}{2};$$

$$v_{m2} = \frac{v_2 + v}{2};$$

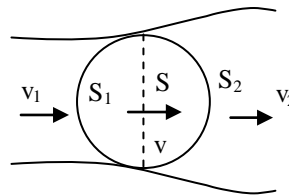


Fig. 8.2 Captatorul cu ax vertical în tubul de curent

Forțele se obțin ca variații ale impulsului maselor de aer în unitatea de timp.

$$F_1 = q \cdot (v_1 - v) = \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1 - v) \quad (8.15)$$

$$F_2 = q \cdot (v - v_2) = \rho \cdot S \cdot v \cdot (v - v_2) \quad (8.16)$$

Considerând, ca și în cazul precedent variația liniară a vitezei vântului la trecerea prin rotor.

$$\frac{v}{v_1} = \frac{v_2}{v} = x \quad (8.17)$$

se obține:

$$v_{m1} = \frac{v_1 \cdot (1+x)}{2}; \quad v_{m2} = \frac{v_1 \cdot x \cdot (1+x)}{2} \quad (8.18)$$

și:

$$F_1 = \rho \cdot S \cdot v_1^2 \cdot x \cdot (1-x); \quad F_2 = \rho \cdot S \cdot v_1^2 \cdot x^2 \cdot (1-x) \quad (8.19)$$

iar expresia puterii preluate devine:

$$P = \rho \cdot S \cdot \frac{v_1^3}{2} \cdot x \cdot (1-x^4) \quad (8.20)$$

Soluția ecuației $\frac{dP}{dx} = 0$ este: $x = \frac{1}{\sqrt[4]{5}}$, ceea ce conduce:

$$P_{\max} = 0,53 \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{v_1^3}{2} \quad (8.21)$$

Aceste valori globale ale limitei de putere sunt mai mari decât acelea obținute în cazurile practice. Determinarea mai precisă a acestei limite necesită modelarea matematică a echilibrului local al forțelor ce acționează asupra elementelor captatorului.

8.3 Parametrii energetici ai captatoarelor eoliene

Puterea preluată de un captator eolian de la curentul de aer care îl străbate se determină cu relația:

$$P = c_p \cdot P_v \quad (8.22)$$

în care P_v este puterea curentului de aer care traversează suprafața captatorului (8.4), iar c_p este coeficientul de putere al acestuia, care depinde de construcția rotorului și de regimul de turație al acestuia, exprimat prin parametrul:

$$\lambda = \frac{u}{v} \quad (8.23)$$

numit *rapiditate*. În expresia anterioară u este viteza liniară la periferia rotorului, iar v este viteza vântului. Funcția $c_p(\lambda)$ prezintă o variație neliniară incluzând un maxim, căruia îi corespunde puterea maximă preluată de captator.

Puterea nominală a captatorului eolian este puterea mecanică dezvoltată la axul rotorului, considerată a fi egală cu puterea generatorului electric sau a mașinii de lucru antrenate. Deoarece puterea preluată de la vânt crește neliniar (proporțional cu v^3), iar puterea maximă a mașinii antrenate este fixă, modul de variație a puterii furnizate de o instalație eoliană în funcție de viteza vântului are forma din fig. 8.3. Astfel:

- pentru viteze ale vântului cuprinse între v_{min} și v_{max} , puterea dezvoltată crește neliniar, conform cu relația (8.22).

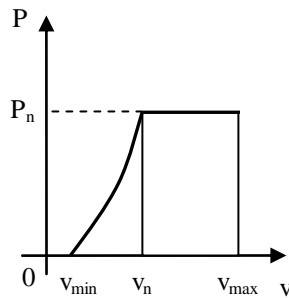


Fig. 8.3 Variația puterii dezvoltate în funcție de viteza vântului

- pentru viteze ale vântului cuprinse între v_n și v_{max} , puterea dezvoltată este limitată la valoarea nominală, folosind posibilitățile de reglare ale rotorului eolian (unghiul de atac al palelor, suprafața expusă la vânt, etc..) sau ale transmisiei mecanice intermediare (frânare, variația

raportului de transmisie);

- pentru viteze mai mari decât v_{max} funcționarea este întreruptă, fiind

depășite posibilitățile de limitare ale puterii preluate. În această situație, trebuie luate măsuri de protecție a rotorului împotriva distrugerii (așezarea palelor paralel cu direcția vântului, împiedicarea accesului vântului, etc.).

Puterea specifică a captatorului eolian se definește ca raportul dintre puterea nominală și suprafața descrisă de rotor în mișcare. Acest parametru este util mai ales pentru compararea diferitelor captatoare eoliene din punct de vedere al eficienței utilizării energiei vântului.

8.4 Clasificarea captatoarelor eoliene

După poziția axului captatorului în raport cu direcția vântului se deosebesc:

- captatoare cu ax orizontal, având axul de rotație paralel cu direcția vântului;
- captatoare cu ax vertical, având axul perpendicular pe direcția vântului.

Este posibil ca sensul comun al noțiunilor de vertical și orizontal să nu coincidă cu sensul din cadrul acestui criteriu.

8.5 Tipuri constructive de captatoare eoliene

8.5.1 Captatoare cu ax vertical

În fig. 8.4 sunt reprezentate câteva variante de rotoare eoliene acționate datorită rezistenței aerodinamice. Aceste tipuri se mai numesc *cu rezistență simplă*, întrucât forța motoare se obține ca efect al acțiunii vântului pe palele care se deplasează în direcția acestuia. Mișcarea rotorului este posibilă numai dacă o jumătate a circumferinței este ecranată (în varianta ,a') sau dacă palele sunt montate astfel încât preiau impulsul numai acelea care se deplasează în direcția vântului. În varianta c) este prezentată o altă soluție, cu pale articulate, care pe durata cursei active se sprijină pe suportii aflați pe butucul rotorului.

Asemenea complicații constructive se pot evita în cazul rotoarelor *cu diferență de rezistență* din fig. 8.5. În aceste cazuri forța motoare este rezultanta forțelor de rezistență exercitate pe palele care se deplasează în sensul vântului (concave) și pe acelea care se deplasează în sens contrar (convexe).

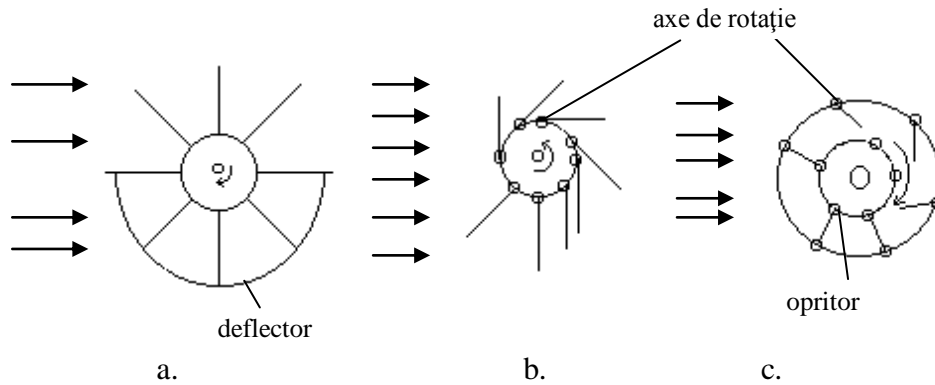


Fig. 8.4

O variantă interesantă este rotorul *Savonius* (fig. 8.5.b) format din doi semicilindri cu axele paralele și decalate astfel încât să permită intrarea curentului de aer între aceștia. În acest caz, forța motoare apare atât datorită diferenței de rezistență cât și datorită impulsului creat prin schimbarea direcției curentului de aer în interiorul rotorului. Ca urmare, acest tip de rotor necesită, pentru demaraj, cele mai coborâte viteze ale vântului, de ordinul a 3-5 m/s.

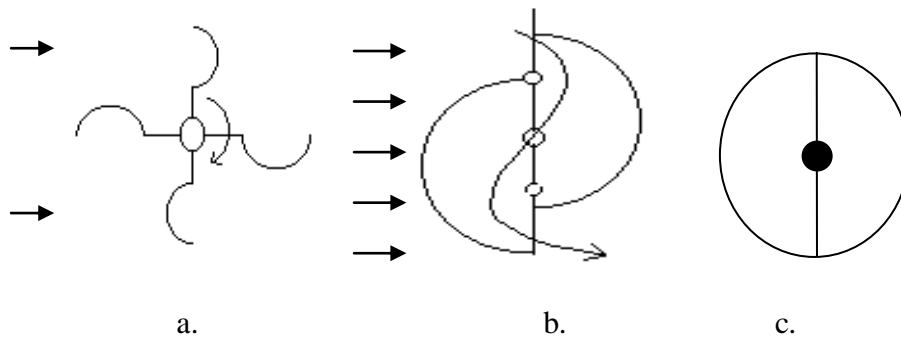


Fig. 8.5

Această soluție prezintă și o posibilitate simplă de reglare a puterii preluate de la curentul de aer prin modificarea distanței dintre axele celor doi semicilindri și deci a deschiderii rotorului. La depășirea vitezei admisibile a vântului, prin apropierea până la suprapunere a axelor semicilindrilor (fig. 8.5.c.), puterea preluată devine nulă și turbina nu se mai rotește.

Tipurile de turbine eoliene cu ax vertical care se pretează pentru puteri instalate mai mari sunt prezentate în fig. 8.6. Asemenea rotoare se mișcă mai ales sub efectul forței portante, motiv pentru care demarează greu (la viteze mari ale vântului). Adeseori pornirea se realizează prin lansare, folosind mașina electrică în regim de motor. Alteori lansarea se poate face cu un rotor auxiliar, care poate porni la viteze mici ale vântului (de ex. Savonius). Variantele din fig. 8.6.a și b, folosite la puteri mai reduse (de ordinul KW), prezintă dezavantajul că palele sunt supuse unor eforturi complexe de torsiune, încovoiere, întindere.

Varianta din fig. 8.6.c are palele flexibile, astfel că în mișcarea de rotație iau forma curbei „lănțișor”, predominând efortul de întindere, mult mai bine suportat de majoritatea materialelor utilizate pentru construcția lor. Acest tip de rotor denumit ”Darrieus” poate atinge puteri de ordinul MW și înălțimi până la 200 m.

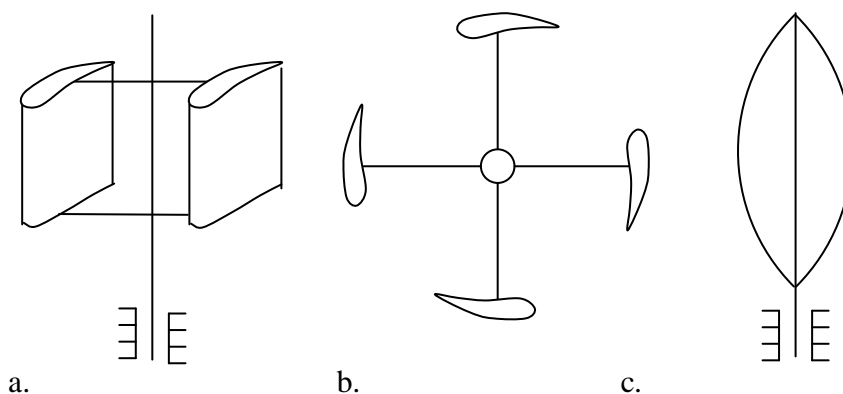


Fig. 8.6

8.5.2 Captatoare cu ax orizontal

Deși mai restrânsă în privința tipurilor constructive, această categorie cuprinde captatoarele cele mai performante din punct de vedere a coeficientului de putere, a posibilităților de reglare a puterii preluate și a puterii instalate maxime. În fig. 8.7 sunt prezentate câteva variante de rotoare cu ax orizontal și circulație staționară. În cazul variantelor a, b, c rotoarele cu 3,2 sau o pală având construcții asemănătoare cu elicea de avion, atât în privința profilului cât și a posibilității de rotire în jurul axului propriu (de modificare a unghiului de „atac”).

În cazul c echilibrarea dinamică se realizează cu o contragreutate.

În fig. 8.7.d, este redată o posibilitate de dublare a turației relative între rotorul și statorul mașinii electrice antrenate, folosind două elici contrarotative, fiecare punând în mișcare câte o parte a mașinii (stator, respectiv rotor). Aceste tipuri de rotoare eoliene ating în prezent cele mai mari dimensiuni și puteri unitare. Există astfel realizări până la puteri de 3 MW cu diametre de 80-100 m, cât și proiecte până la 15-20 MW cu diametre de cca. 180 m.

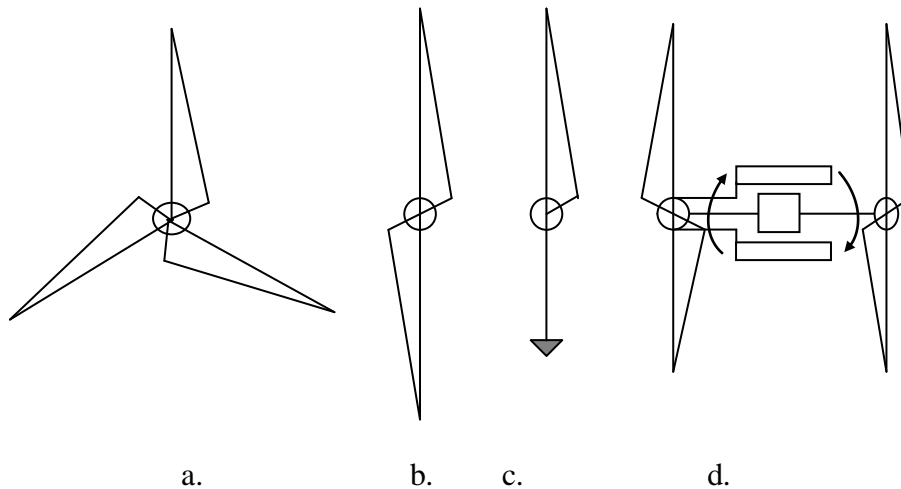


Figura 8.7

8.6 Conversia energiei eoliene în alte forme de energie

Principalele domenii de utilizare a energiei mecanice obținute la axul turbinei eoliene sunt următoarele:

- pomparea apei pentru irigații, alimentări cu apă, etc.. Prin acumularea apei pompate într-un bazin urmată de turbinare în raport cu un bazin inferior, se poate produce energie electrică într-o amenajare neconvențională, cu ajutorul căreia se poate compensa fluctuația energiei eoliene.
- comprimarea aerului pentru diferite întrebunțări, inclusiv pentru necesitățile unei turbine cu gaze, folosită în perioada de vârf de sarcină în sistemul energetic.

- producerea de căldură prin frecare, căldură care poate fi acumulată în materiale solide sau lichide și folosită la nevoie.

Practic, este de preferat frecarea într-un lichid vâscos, cu ajutorul unui agitator, a cărei uzură va fi mult mai redusă decât în cazul frecării între corpuri solide.

- producerea de energie electrică fie pentru stocare, fie pentru alimentarea directă a consumatorilor. Pentru marile captatoare eoliene, singurul mod de conversie a energiei avut în vedere este producerea de energie electrică. Schema bloc a unei asemenea instalații este dată în fig. 8.8.

Veriga intermediară de transmisie mecanică este prezentată uneori pentru adaptarea turației turbinei la cerințele mașinii electrice, prin modificarea raportului de transmisie.

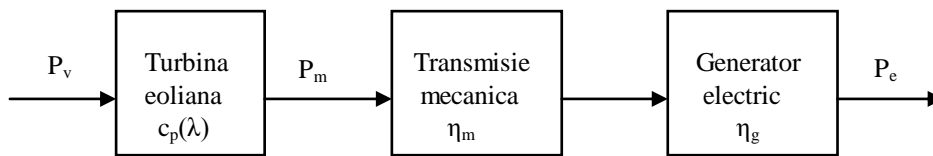


Fig. 8.8 Schema bloc a conversiei în energie electrică

De asemenea poate conține și un mecanism de frânare pentru limitarea puterii transmise generatorului electric. Puterea electrică se determină cu:

$$P_e = c_p(\lambda) \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot P_v \quad (8.24)$$

deoarece atât puterea vântului cât și coeficientul de putere sunt variabili în timp, energia produsă într-un interval t se determină prin integrare:

$$E = \eta_m \cdot \eta_g \cdot \int_0^t P_v(t) \cdot c_p(t) \cdot dt \quad (8.25)$$

Există mai multe posibilități de a realiza conversia în energie electrică.

a) *Producerea de curent continuu* cu ajutorul unui generator de curent continuu sau cu un alternator asociat cu un redresor. A doua variantă este

preferată, deoarece instalația este mai simplă în privința reglării parametrilor electrici, mai ușoară (greutatea alternatorului este de 2,5 ori mai mică decât a dinamului la aceeași putere), poate furniza puterea nominală pe o plajă mai largă de turație. Energia obținută poate fi stocată electrochimic și apoi distribuită la tensiune constantă. Acest sistem este totuși puțin utilizat deoarece consumatorii de curent continuu sunt puțin numeroși.

b) *Producerea de curent alternativ cu generatoare sincrone*

În acest caz, generatorul sincron poate funcționa fie la turație variabilă, fie la turație constantă. Varianta cu turație variabilă se poate alege atunci când energia produsă este debitată pe o rețea separată de sistemul energetic. Întrucât folosirea frecvenței aleator variabile este foarte dificilă, singura utilizare potrivită este încălzirea electrică. Varianta cu turație constantă implică necesitatea păstrării constante a turației generatorului, deci existența unor mijloace de reglare suficiente atât la turbina eoliană cât și la transmisia mecanică. Deși energia produsă ar putea fi livrată sistemului energetic, dificultatea asigurării turației fixe face ca acest procedeu să fie puțin utilizat.

c) *Producerea de curent alternativ cu generatoare asincrone*

Mașinile asincrone, antrenate cu o turație superioară turației de sincronism devin generatoare de energie electrică. Frecvența este impusă de către rețeaua la care se racordează, de la care se absoarbe energia reactivă necesară creării câmpului magnetic învârtitor. Puterea dezvoltată de generator depinde de turație. Această soluție este cea mai potrivită și este utilizată în majoritatea cazurilor, până la cele mai mari puteri instalate. Nu necesită reglare rigidă a turației, iar instalația electrică este simplă.

Capitolul 6

Biomasa

6.1 Elemente introductive

Din punct de vedere energetic, termenul “biomasă” se referă la materia organică ce poate fi convertită în energie. Principalele categorii de biomasă care pot fi utilizate în acest scop sunt materia lemnoasă, reziduurile vegetale din agricultură și reziduurile animale din zootehnie, precum și culturile și plantațiile dedicate valorificării energetice. Pe lângă acestea, se au în vedere și reziduurile municipale (resturi provenite de la toaletarea copacilor, întreținerea parcurilor etc.), gunoiul menajer sau unele reziduuri provenite din industria alimentară.

Fotosinteza este procesul prin care plantele transformă energia solară în energie chimică. Aceasta din urmă poate fi convertită ulterior în energie termică și/sau electrică pentru uz industrial sau rezidențial, precum și în combustibili pentru transport. Cele mai simple tehnologii de conversie presupun arderea biomasei lemnoase pentru a produce căldură ce poate fi utilizată direct. De asemenea, căldura generată poate vaporiza apa, vaporii antrenând o turbină cuplată la un generator electric. Conversia în biocombustibili pentru transport se poate face termic, chimic sau biologic, sau se pot aplica tehnologii care fac uz de toate cele trei metode.

Biomasa lemnoasă (denumită și biomasă lignocelulozică) este formată în principal din lignină (20-25%) și carbohidrați (60-80%). Cea mai mare parte a carbohidraților prezenți în biomasă sunt compuse ale poli/oligozaharidelor precum celuloza, hemiceluloza, amidonul și inulina (figura 6.1). În plus, pot fi întâlnite cantități mici de monozaharide precum glucoza și fructoza.

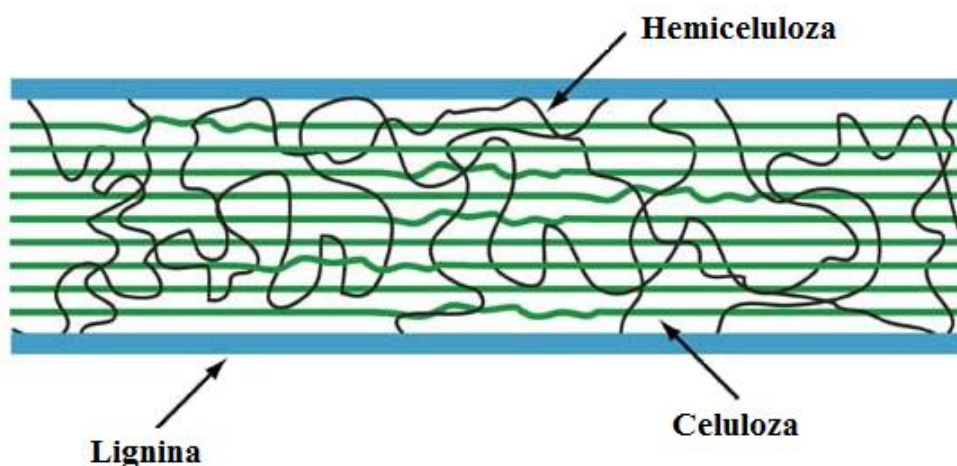


Fig. 6.1 – Structura biomasei lignocelulozice (model simplificat) [69]

6.2 Valorificarea energiei biomasei

Diagrama din figura 6.2 prezintă cele șase procese de bază care pot fi utilizate pentru valorificarea biomasei. Unele detalii precum și produșii principali ai proceselor menționate în diagramă sunt prezentate în continuare.

6.2.1 COMBUSTIA DIRECTĂ

Prin arderea directă a diferitelor tipuri de biomasă (lemn, diverse reziduuri, paie, biogaz etc.) se obțin gaze fierbinți care pot fi utilizate pentru a încălzi sau pentru a produce abur. Aburul poate antrena în continuare un sistem turbină – generator în vederea producerii de energie electrică. Arderea este cea mai simplă tehnologie și se poate dovedi economică dacă sursa de biomasă disponibilă se află în apropiere și este suficientă.

6.2.2 PIROLIZA

Piroliza constă în descompunerea termochimică a biomasei solide, proces care are loc la temperaturi de 300-800°C și în absența oxigenului. În urma acestui proces rezultă căldură, diferite gaze (hidrogen, metan, monoxid de carbon etc.), bio-ulei și cărbune. Gazele combustibile pot fi separate și captate, iar cărbunele rezultat, denumit și biochar, poate fi utilizat ca fertilizator și amendament agricol, utilizare care reprezintă și o modalitate eficientă și economică de sechestrare a carbonului.

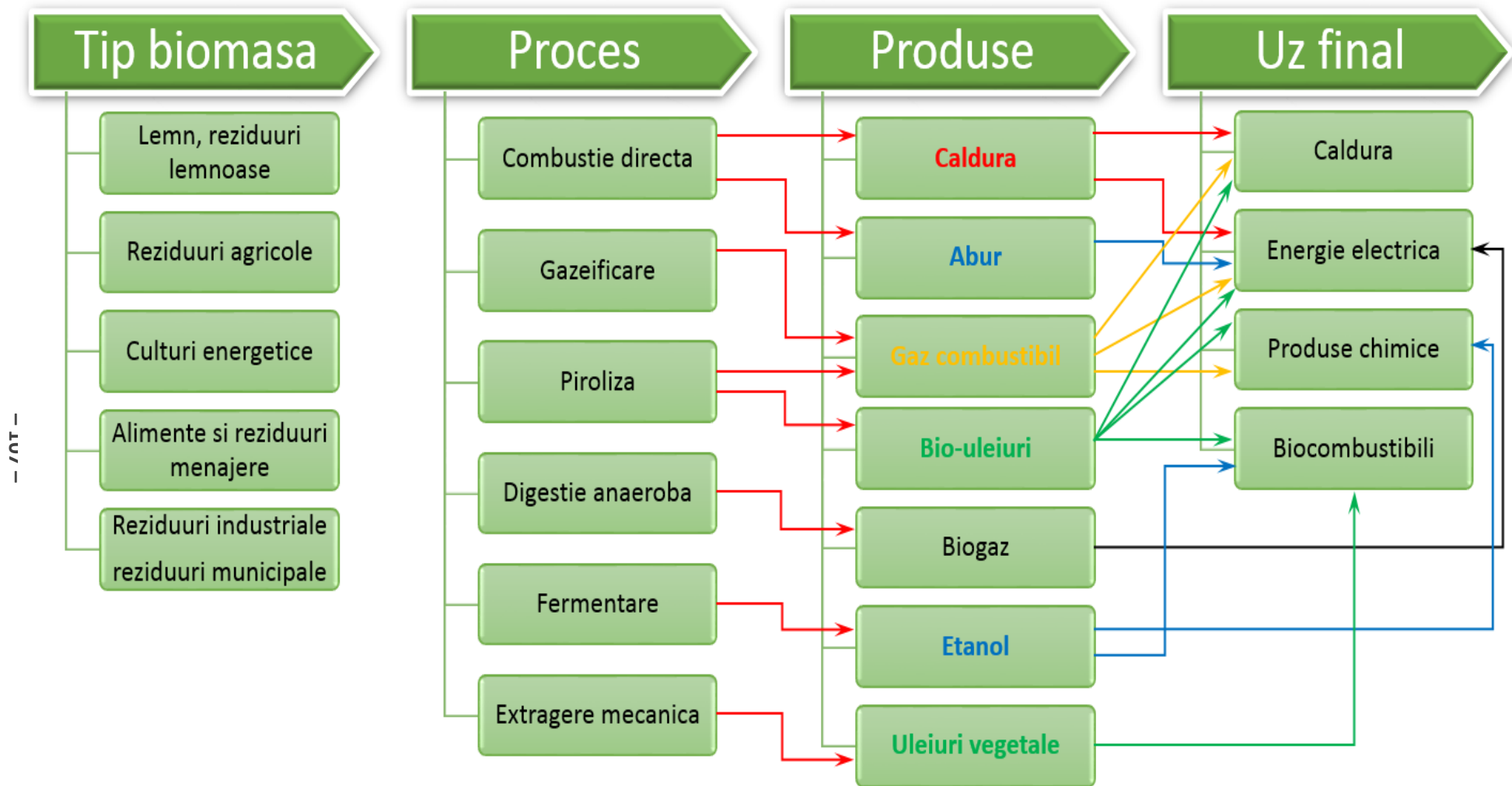


Fig. 6.2 – Metode primare de valorificare a biomasei

Pentru fiecare tip de biomasă și o presiune dată, există doi parametri care influențează produsele rezultate în urma pirolizei, respectiv temperatura reactorului și timpul (figura 6.3). Temperaturile înalte și perioada scurtă de expunere a biomasei favorizează reacțiile de gazeificare, în timp ce temperaturile mai scăzute favorizează formarea cărbunelui (biochar). Atunci când scopul principal îl constituie obținerea bio-uleiului, maximizarea cantității se poate face prin reglarea celor doi parametri. În cazul în care se urmărește obținerea unor cantități cât mai mari de biochar, temperaturile vor trebui menținute sub valoarea de 300°C, procesul fiind denumit torefiere.

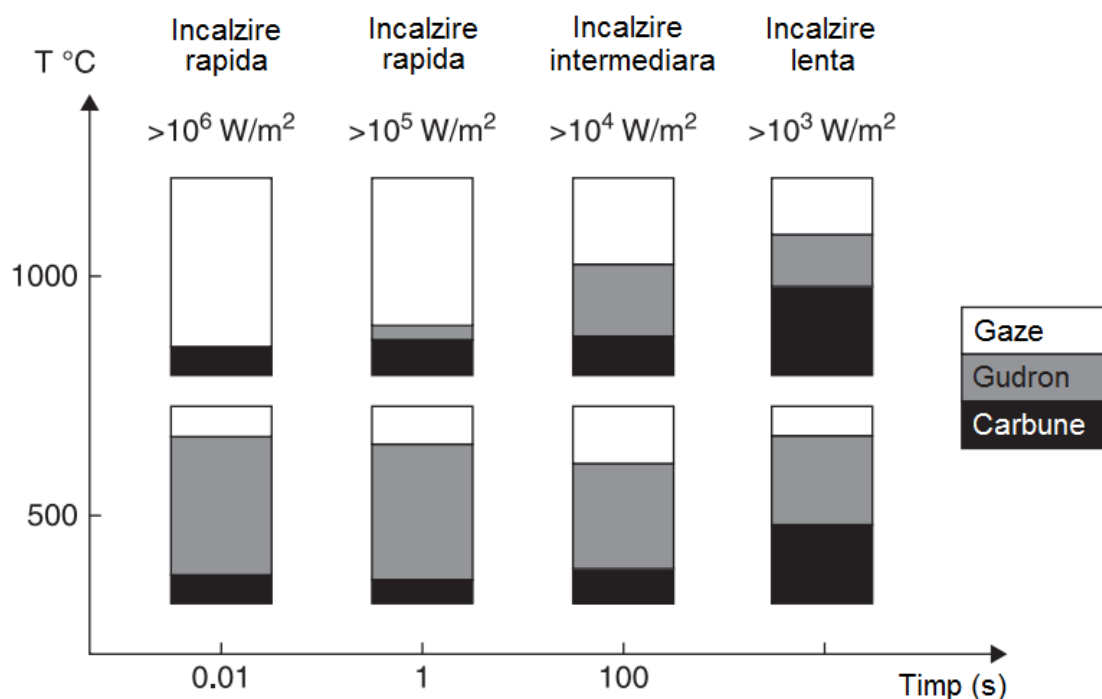


Fig. 6.3 – Variația produselor de piroliză cu temperatura și timpul de expunere [70]

Există numeroase variante tehnologice de piroliză a biomasei, toate caracterizându-se însă prin costuri relativ ridicate, la acestea contribuind și etapa inițială de pregătire a biomasei (stocare, uscare, mărunțire și alimentare). Transferul de căldură către biomasa solidă reprezintă de asemenea o provocare tehnologică, întrucât un transfer lent favorizează cocsificarea (v. figura 6.3). Piroliza în reactoare cu pat fluidizat este varianta tehnologică mai răspândită pentru producerea bio-uleiurilor, schema de principiu a acesteia fiind prezentată în figura 6.4. Un pat de nisip sau alt material stabil din punct de vedere termic la temperatura de lucru este menținut în stare “fluidă”, în suspensie, prin introducerea pe la partea inferioară a reactorului a unui flux de gaze fierbinți. Ulterior reactorul este alimentat cu biomasă mărunțită, în proporție foarte redusă, astfel încât transferul de căldură se realizează aproape instantaneu către particulele de biomasă.

Acest principiu stă la baza a numeroase tehnologii, diferențele dintre ele constând în abordarea problemelor ridicate de formarea cărbunelui și a cocsurilor în patul fluidizat, de acumularea de cenușă și de recuperarea căldurii.

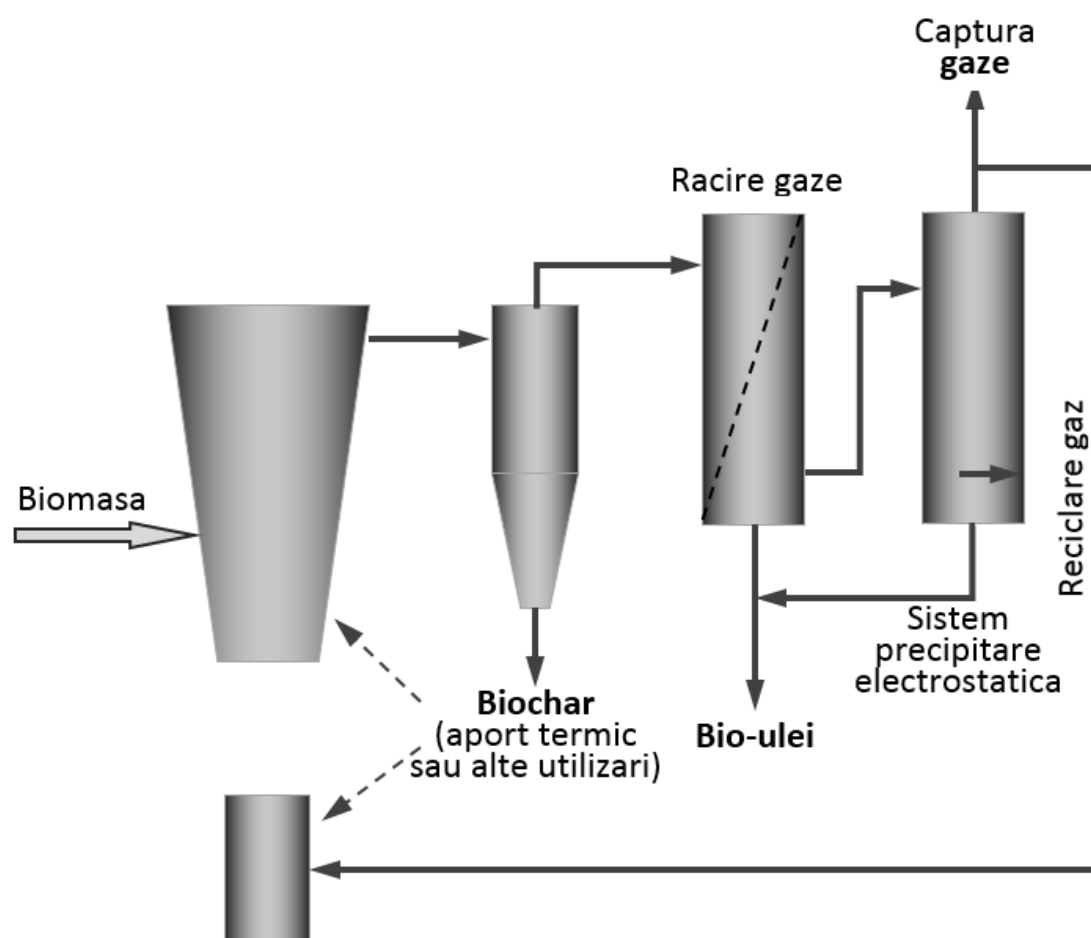


Fig. 6.4 – Piroliza biomasei in reactor cu pat fluidizat [21]

6.2.3 GAZEIFICAREA

Prin procesul termochimic de gazeificare biomasa solidă se transformă în gaz la temperaturi de 800-1300°C. Gazul obținut se numește gaz de sinteză sau singaz și este un amestec combustibil de hidrogen, monoxid de carbon, metan, azot, bioxid de carbon, sulf, compuși alcalini și gudroane (tabelul 6.1). Hidrogenul este vazut în prezent ca fiind combustibilul alternativ pentru vehiculele electrice cu pile de combustie.

În principiu, o cantitate limitată de oxigen sau aer este introdusă în reactor astfel încât, prin combustia unei fracții din biomasă, se generează bioxid de carbon și energie. Energia eliberată inițiază o a doua reacție care convertește biomasa în hidrogen și monoxid de carbon. Acesta din urmă reacționează cu moleculele de apă provenite din uscarea inițială a biomasei, rezultând metan și din nou bioxid de carbon.

Aceste procese și dispunerea straturilor de biomasă în care ele se manifestă într-un gazeificator de tipul “updraft”, sunt prezentate mai detaliat în figura 6.5.

Tabelul 6.1 – Constituenți ai gazului de sinteză [71]

Denumire compus	Formulă chimică	Gaz umed [vol.%]	Gaz uscat [vol.%]
Monoxid de carbon	CO	21,0	22,1
Bioxid de carbon	CO ₂	9,7	10,2
Hidrogen	H ₂	14,5	15,2
Vapori de apă	H ₂ O	4,8	-
Metan	CH ₄	1,6	1,7
Azot	N ₂	48,4	50,8
Alte informații			
Puterea calorică superioară (raportat la masa în stare umedă)		5506 kJ/Nm ³	
Puterea calorică superioară (raportat la masa în stare uscată)		5800 kJ/Nm ³	
Necesar aer pentru gazeificare		2,38 kg lemn/kg aer	
Necesar aer pentru combustie		1,15 kg lemn/kg aer	

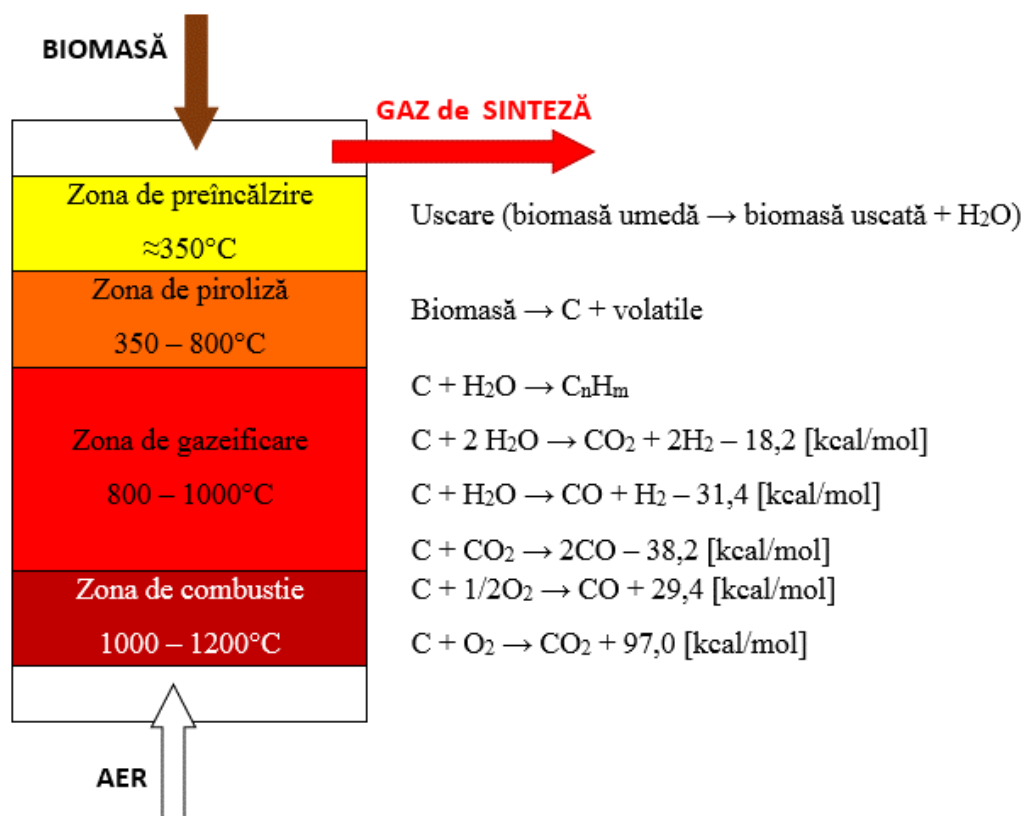


Fig. 6.5 – Procesele chimice produse într-un gazeificator de tip updraft

Gazeificatoarele se clasifică în funcție de tipul de combustibil utilizat, de modul în care aerul este introdus în masa de combustibil și de tipul patului de combustie.

Gazeificatoarele cu pat fix sunt construcții simple, formate dintr-un reactor cilindric în care se află biomasa, cu alimentare pe la partea superioară, în care gazul generat se deplasează pe verticală (în sus sau în jos). Sunt caracterizate de conținutul redus de cenușă și de viteza mică a gazului. Aerul poate pătrunde:

- pe la partea inferioară a reactorului, circulând prin stratul de biomasa către partea superioară (gazeificatoare updraft, sau în contracurent – figura 6.6 a);
- pe la partea superioară, circulând de sus în jos (gazeificatoare downdraft, sau în echicurent, v. figura 6.6 b);
- poate circula transversal față de masa de material (gazeificatoare crossdraft, sau transversale).

Gazeificatoarele cu pat fluidizat (v. piroliza) au avantajul unei distribuții uniforme a temperaturii în masa de material, în raport cu variantele cu pat fix. Se obține o cantitate relativ mare de produse gazoase. Reacțiile de gazeificare și de conversie a gudroanelor continuă și în faza gazoasă. Aceste sisteme sunt dotate de obicei cu propriul ciclon care are rolul de a reține într-o măsură cât mai mare particulele de cărbune.

Atunci când gazul combustibil urmează a fi utilizat pentru arderea în motoare cu combustie internă, se impune și o separare a particulelor de cenușă, operație care se efectuează în afara gazeificatorului.

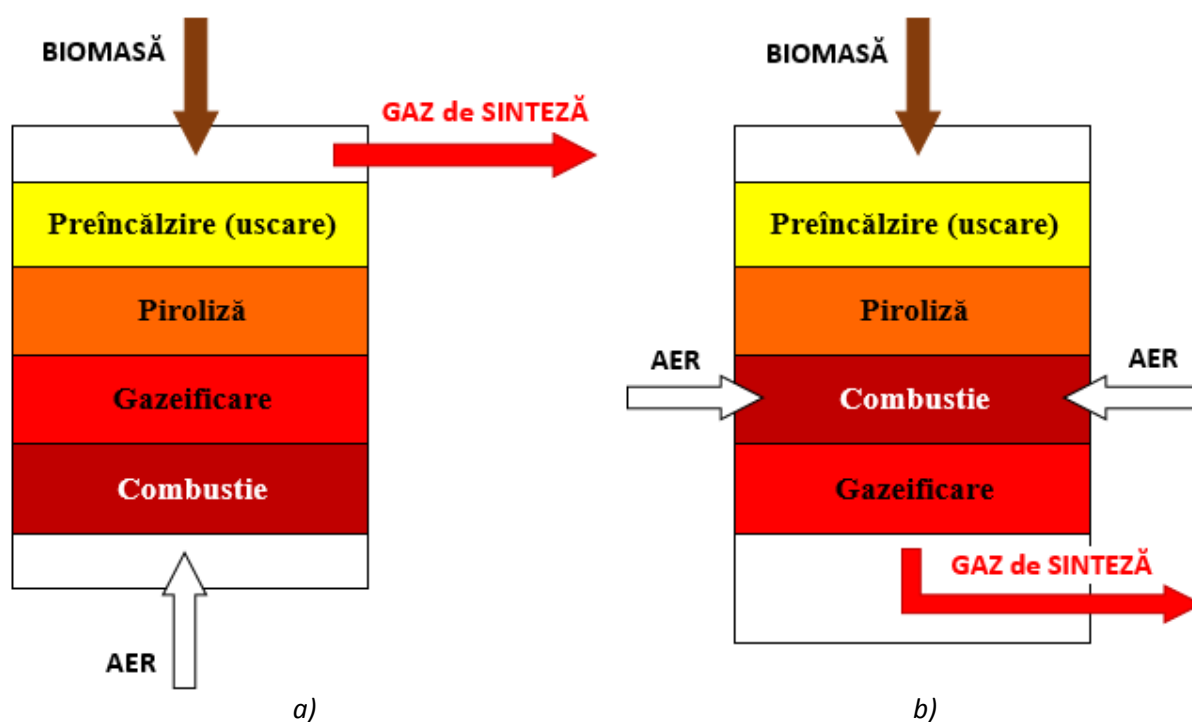


Fig. 6.6 – Tipuri de gazeificatoare cu pat fix: (a) updraft; (b) downdraft

Figura 6.7 prezintă un reactor avansat de gazeificare destinat procesării deșeurilor, realizat de compania KBI Group. Gama înaltă de temperaturi la care funcționează (1500-2500°C), superioară celor din gazeificatoarele obișnuite, se obține prin injectarea de oxigen tehnologic în reactor.

Datorită acestor temperaturi gazeificatorul poate prelucra cu randamente maxime o gamă foarte largă de deșeuri urbane și industriale de natură organică și anorganică, ca de exemplu: deșeuri toxice, lacuri și vopsele, cauciuc (inclusiv anvelope uzate), baterii și componente electronice, azbest, resturi metalice, deșeuri clinice, hârtie, materiale compozite, uleiuri reziduale etc. Spre deosebire de gazeificarea convențională, datorită reacțiilor care se produc la temperaturile înalte de funcționare nu rezultă cenușă sau gaze toxice de ardere.

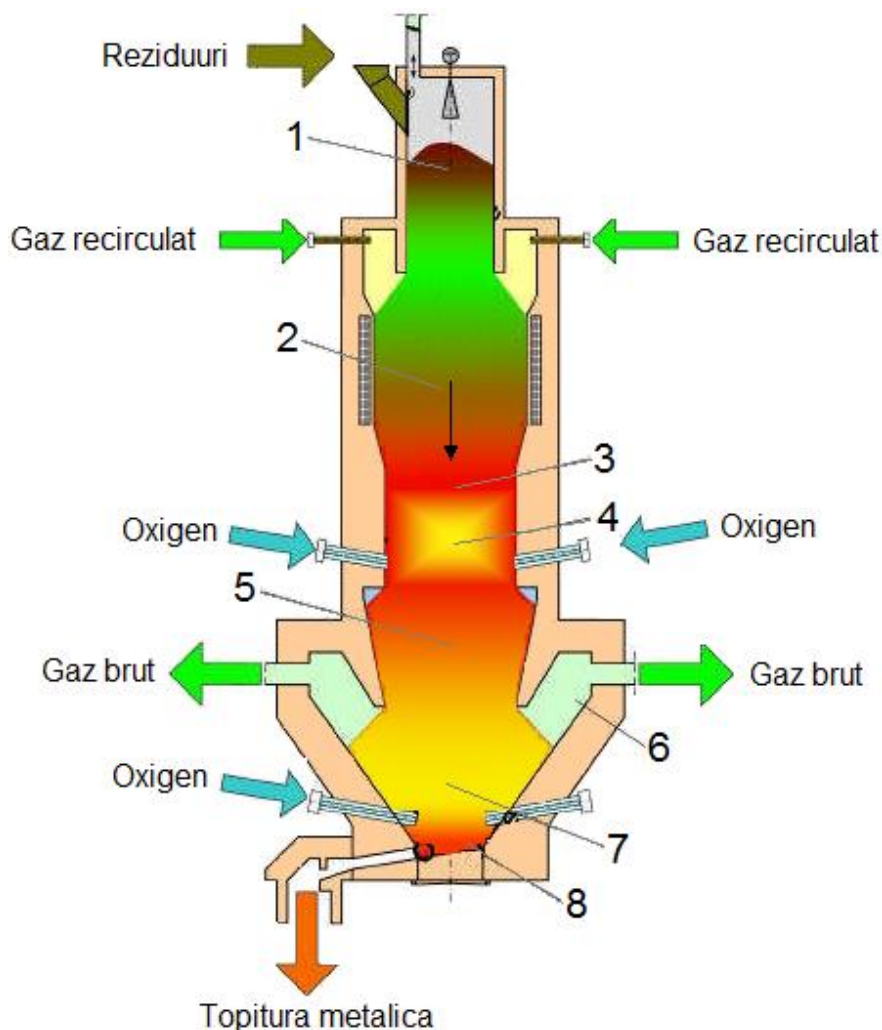


Fig. 6.7 – Tehnologia HTCW de gazeificare⁵³ [72]: 1 – uscare; 2 – piroliză; 3 – gazeificare; 4 – oxidare; 5 – reducere; 6 – evacuare gaze; 7 – oxidare; 8 – topire

Tabelul 6.2 prezintă mai detaliat procesele termochimice care se realizează în acest tip de gazeificator, în funcție de gama de temperaturi.

⁵³ Produs de KBI Group; desen adaptat (sursa: http://www.htcw.info/images/index_page/long_form.pdf)

Tabelul 6.2 – Procesele termochimice din reactorul HTCW

Temperatură	Proces termo-chimic
100-200 °C	Uscarea reziduurilor; eliminarea apei;
250 °C	Dezoxidare; desulfurare; eliminarea apei constituate și a bioxidului de carbon; depolimerizare;
340 °C	Cracarea legăturilor alifaticice; începe separarea metanului și a altor produși alifatici;
380 °C	Carbonizare;
400 °C	Ruperea legăturilor C-O și C-N; separarea heteroatomilor;
400-600 °C	Conversia bitumurilor în uleiuri și gudroane topite;
>600 °C	Cracarea bitumurilor în substanțe stabile termic (hidrocarburi gazoase); sinteza hidrocarburilor aromatice;
800-1200 °C	Gazeificare: sinteza de N_2/NH_3 și H_2S/COS ; halogenii sunt în stare de vapori (ca cloruri alcaline sau HCl); Sinteza fazelor de topire a mineralelor;
1200-2000 °C	Descompunerea completă a hidrocarburilor aromatice, HCN și a compușilor organici cu clor; Sinteza fazelor de topire a fierului;
2000-2700 °C	Începe disocierea moleculară; domeniul inferior al stării de plasmă.

6.2.4 FERMENTAREA ANAEROBĂ

Nămolurile rezultate din tratarea apelor uzate, gunoiul de grajd sau deșeurile alimentare, dar și produsele agricole, la o anumită umiditate sau în amestec cu apă (în funcție de tipul biomasei) sunt degradate bacterian într-o incintă închisă, în absența aerului. Astfel, prin fermentare anaerobă se obține un amestec format în principal din metan și bioxid de carbon. Aproximativ 90% din energia înmagazinată în biogazul obținut aparține metanului [73]. Tehnologia este matură și a devenit o modalitate de suplimentare a veniturilor fermelor agro-zootehnice moderne, care astfel produc atât energie cât și îngrășământ bogat în azot, fosfor, potasiu și micronutrienți, precum și a stațiilor de epurare a apelor uzate municipale. Potențialul energetic pentru diverse categorii de reziduuri care pot fi valorificate prin fermentare anaerobă este prezentat în tabelul 6.3 [74].

Pentru a crea condiții ideale pentru bacteriile care convertește materia organică în biogaz, digesterul trebuie să fie etanș la pătrunderea aerului și prevăzut cu posibilitatea de încălzire și de amestecare. Există două tipuri de fermentare anaerobă:

- Mezofilică: se desfășoară la temperaturi de 30-35°C; timpul de retenție este de 15-30 zile;
- Termofilică: are loc la temperaturi de aproximativ 55°C iar timpul de retenție a materiei organice în digester este de 12-14 zile;

- Psihrofilică: temperatura de procesare este mai mică de 20°C, iar timpul de retenție este de 70-80 zile.

Tabelul 6.3 – Potențialul energetic al unor categorii de reziduuri

Categorie reziduuri	Potențial energetic [MWe]
Produse alimentare și fructe	40
Deșeuri municipale solide	900
Deșeuri municipale lichide	100
Hârtie, produse celulozice, lactate, produse de tăbăcărie	140
Produse zaharoase	220
Reziduuri de la distilării	300

Digestoarele pentru biogaz pot fi metalice, din plastic, sau construite folosind materiale obișnuite de construcții (beton ori cărămidă). Pot fi orizontale sau verticale, iar amplasarea lor se poate face la suprafață sau pot fi îngropate. Constructiv, pot fi sub formă de bazin, siloz sau jgheab, iar volumul poate varia de la câțiva metri cubi până la câteva mii de metri cubi în cazul variantelor industriale. După fluxul de material, digestoarele pot fi cu funcționare continuă sau în șarje.

Tipul de digestor se alege în primul rând în funcție de tipul de fermentare, respectiv:

- Fermentarea umedă, proces care se produce când concentrația medie de materie uscată în substrat este mai mică de 15% (nămolurile provenite din tratarea apelor uzate, gunoi de grajd fluid);
- Fermentare uscată, care corespunde unei concentrații medii de materie uscată în substrat cuprinsă în intervalul 20-40% (reziduuri menajere, reziduuri organice municipale solide, gunoi de grajd solid cu conținut ridicat de paie, resturi de vegetație provenite din întreținerea parcurilor etc.).

Figura 6.8 prezintă schema de principiu a unei stații de producere a biogazului, precum și posibilele utilizări ale acestuia.

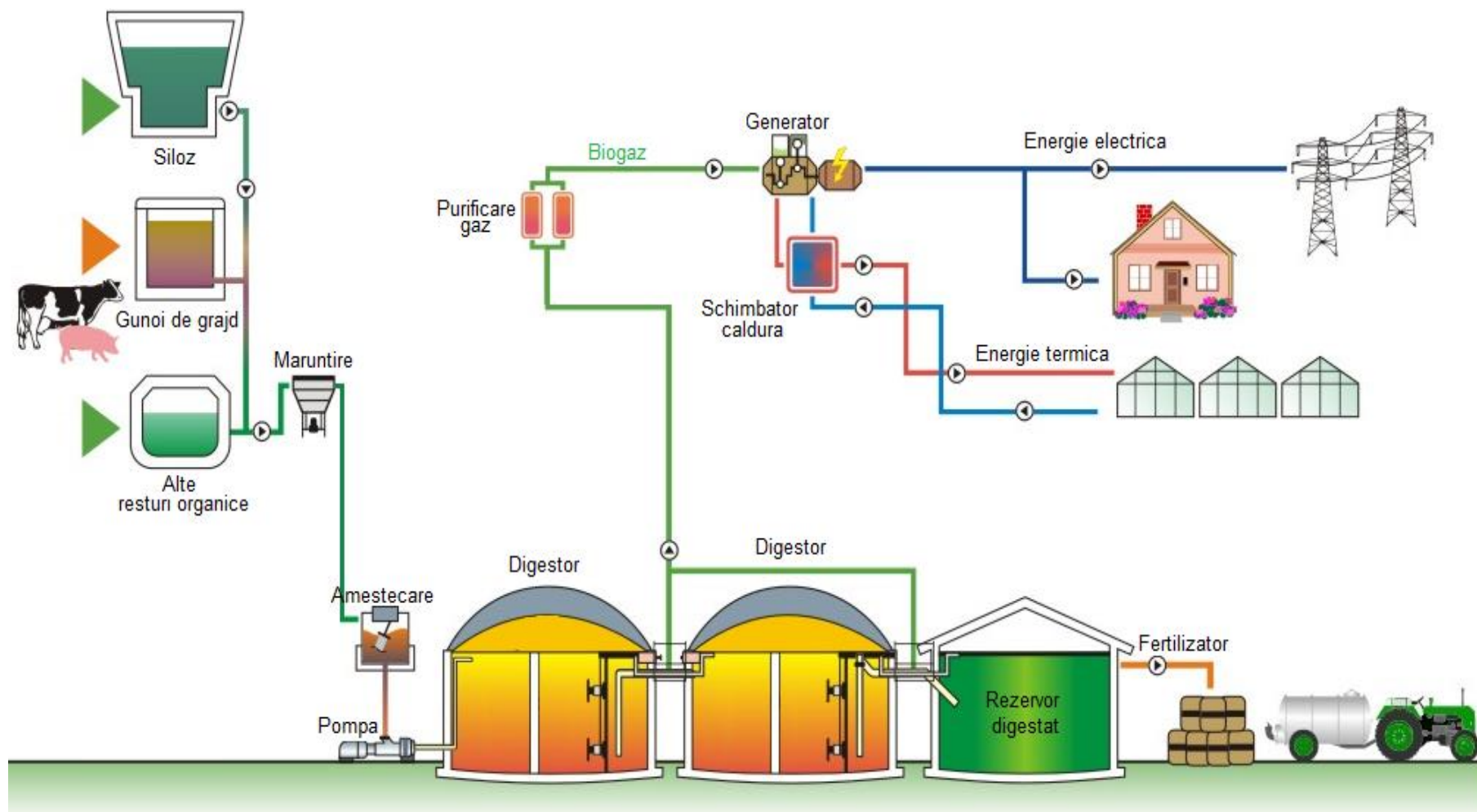


Fig. 6.8 – Schema de principiu a unei stații de producere a biogazului⁵⁴ [75]

6.2.5 GAZELE EMISE DE DEPOZITELE DE DEȘEURI

Depozitele de deșeuri reprezintă un caz aparte de fermentare anaerobă a reziduurilor organice prezente aici. Recuperarea emisiilor acestor depozite nu aduce doar beneficii economice ci și un aport pozitiv din punct de vedere al protecției mediului, având în vedere faptul că metanul are un potențial de 21 de ori mai ridicat decât bioxidul de carbon în ceea ce privește efectul de seră. Uzual, în compoziția acestor emisii se află 45-60% metan, 40-60% bioxid de carbon, vapori de apă și alți compuși (azot, oxigen, hidrogen sulfurat, diverși contaminanți cum ar fi benzenul, toluenul, cloroformul, tetraclorura de carbon, compuși halogenați etc.) în proporții mult mai mici. Tabelul 6.4 prezintă principalii componenți și unele caracteristici ale acestora.

De obicei gazul recuperat este curățat și utilizat pentru a produce energie electrică prin alimentarea unor motoare cu aprindere prin combustie cuplate la generatoare electrice. În același scop pot fi utilizate microturbine, turbine cu abur sau pile de combustie. Alte aplicații includ generarea de energie termică, sau recuperarea metanului și injectarea lui în rețelele de distribuție a gazelor naturale.

Descompunerea bacteriană a materialelor organice din depozitele de deșeuri se face în patru faze. Compoziția gazului produs diferă de la o fază la alta. Întrucât depozitele sunt alimentate pe perioade care pot atinge 20-30 ani, fazele pot fi diferite de la o zonă la alta a depozitului (în funcție de vechimea reziduurilor din zona respectivă).

În **prima fază** de descompunere, bacteriile aerobe consumă oxigen în procesul de rupere a lanțurilor moleculare ale carbohidraților complecși, proteinelor și lipidelor din compoziția reziduurilor organice. Reacțiile aerobe au loc până la consumarea întregii cantități de oxigen, putând dura de la câteva zile până la câteva luni, în funcție de cantitatea disponibilă de oxigen. La rândul ei, aceasta depinde de gradul de compactare al reziduurilor. Procesul de fermentare aerobă generează în special bioxid de carbon. Cantitatea de azot este mare la începutul fazei, însă scade apoi continuu.

Faza a doua de descompunere este un proces anaerob în care bacteriile convertesc compuși produși de microorganismele aerobe în acid lactic, acetic și formic, precum și în alcooli cum ar fi metanolul și etanolul. Apa în amestec cu acizii formează o soluție care dizolvă nutrienții prezenți în depozitul de deșeuri, astfel încât azotul și fosforul devin disponibile pentru speciile de bacterii prezente în depozitul de deșeuri. Gazele produse în această fază sunt bioxidul de carbon și hidrogenul. Orice perturbare a depozitului în faza a doua, care duce la pătrunderea oxigenului în masa de deșeuri, are ca efect reîntoarcerea la faza I.

Faza a III-a începe atunci când anumite specii de bacterii anaerobe consuma acizii organici produși în faza a II-a, formând acetat, un acid organic. Acest proces face ca depozitul de deșeuri să devină mai neutru, avantajând astfel activitatea bacteriilor producătoare de metan. Bacteriile producătoare de acizi și metan au o relație simbiotică, reciproc avantajoasă. Bacteriile

producătoare de acid creează compuși care pot fi consumați de bacteriile metanogene. La rândul lor, acestea consumă dioxidul de carbon și acetatul care, în proporție prea mare, ar deveni toxice pentru bacteriile producătoare de acid.

Etapa a IV-a de descompunere începe atunci când compoziția și debitul de gaz de depozit rămân aproximativ constante. În această fază gazul conține aproximativ 45-60% metan, 40-60% bioxid de carbon și 2-9% alte gaze cum ar fi sulfurile. Ritmul stabil de producere a gazului durează de obicei în jur de 20 de ani, însă emisiile vor continua pentru 50 sau mai mulți ani după ce deșeurile sunt descărcate în depozit. Producția de gaze poate dura mai mult, de exemplu în cazul în care sunt prezente cantități mai mari de deșeuri organice.

Tabelul 6.4 – Principalele componente ale gazului emanat de depozitele de deșeuri

Componenta	Procent volumic	Caracteristici
Metan	45-60	Este un gaz incolor și inodor, produs în depozitele de deșeuri prin descompunere bacteriană.
Bioxid de carbon	40-60	În atmosferă se găsește în proporție de 0,03%. Este incolor, inodor și ușor acid.
Azot	2-5	Se găsește în atmosferă în proporție de aproximativ 79%. Este inodor, insipid și incolor.
Oxigen	0,1-1	În atmosferă se află în proporție de aproximativ 21%. Este inodor, insipid și incolor.
Amoniac	0,1-1	Este un gaz incolor, cu un miros înțepător.
Alți compuși organici	0,01-0,6	Sunt compuși organici non-metanici, cum ar fi compușii care conțin carbon. Pot apărea în mod natural sau pot fi obținuți prin procese chimice sintetice. Printre compușii cel mai frecvent întâlniți în depozitele de deșeuri se află: acrilonitril, benzen, 1,1-diclorețan, 1,2-diclorețilenă, diclorometan, sulfura de carbonil, etil-benzen, hexan, metil etil cetonă, tetraclorēțilenă, toluen, triclorēțilenă, clorură de vinil, xileni.
Sulfuri	0-1	Sulfurile (hidrogenul sulfurat, sulfura de dimetil, mercaptanii etc.) sunt gaze care apar în mod natural, cu un miros neplăcut de ouă stricate, chiar la concentrații foarte mici.
Hidrogen	0-0,2	Este un gaz incolor și inodor.
Monoxid de carbon	0-0,2	Este un gaz incolor și inodor.

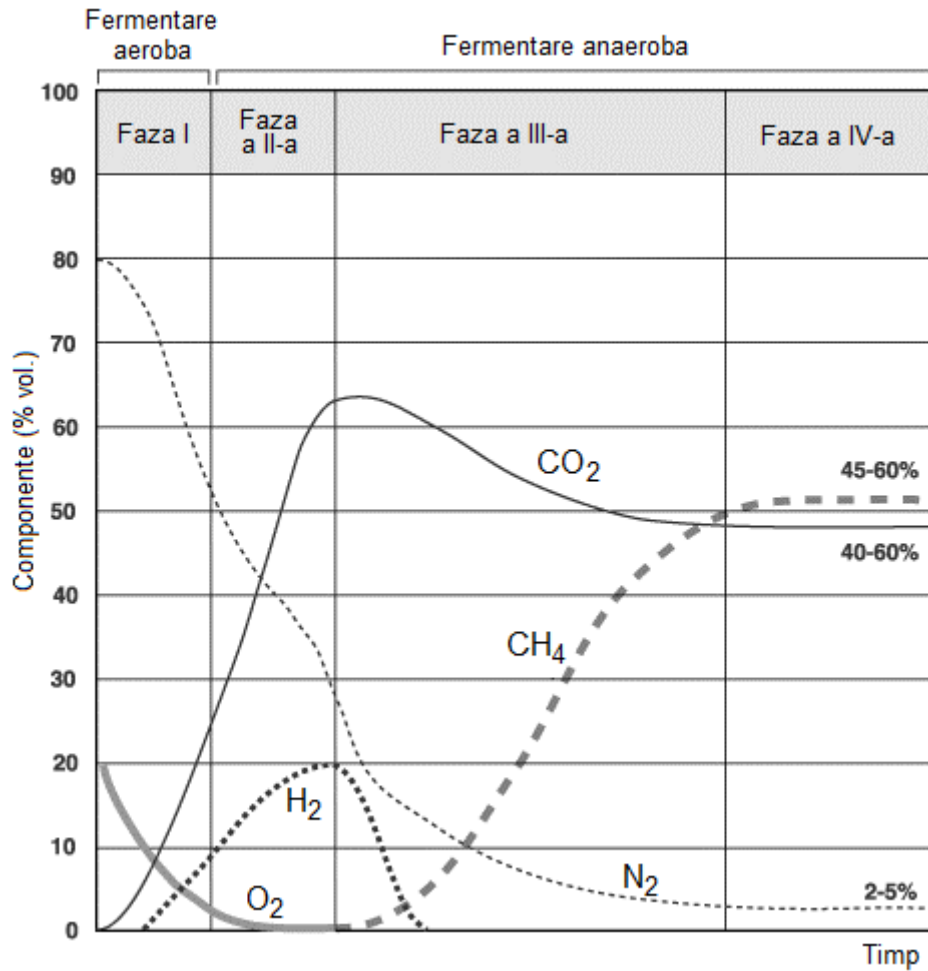


Fig. 6.9 – Variația cu timpul a compoziției gazului emanat de depozitele de deșeuri⁵⁵

Pilele de combustie constituie o variantă modernă și eficientă de valorificare a metanului din gazul emanat de depozitele de deșeuri. Diagrama unui sistem cu pile de combustie este prezentată în figura 6.10.

⁵⁵ Sursa: United States Environmental Protection Agency, 1993

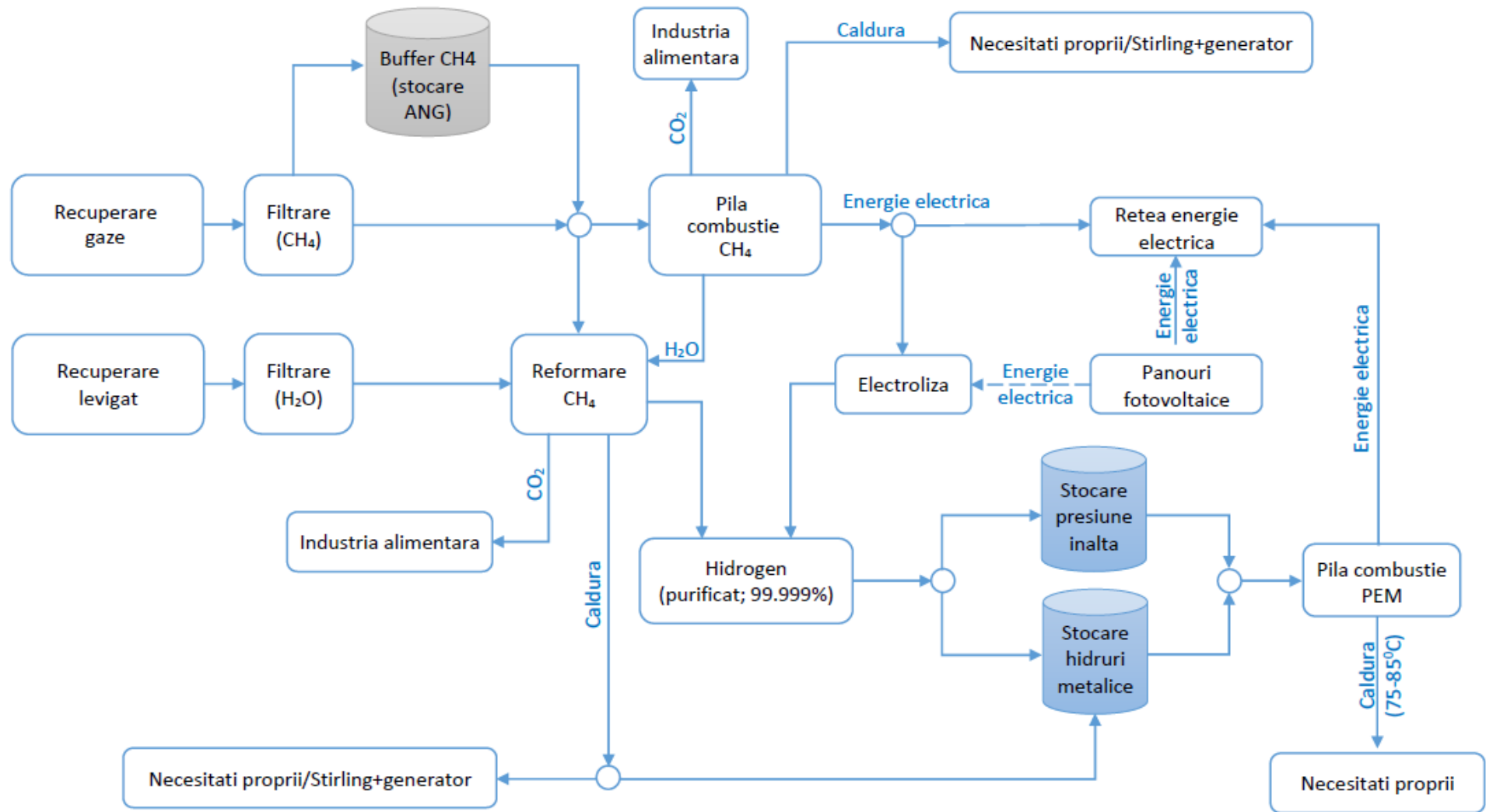


Fig. 6.10 – Diagrama unei stații de valorificare a gazului din depozitele de deșeuri (orig.)

6.2.6 FERMENTAȚIA ALCOOLICĂ

Cerealele, cartofii, paiele, hârtia reziduală și reziduurile lemnoase cum ar fi rumegușul conțin amidon, celuloză sau diferite zaharuri. Amidonul, celuloza și hemicelulozele pot fi convertite la rândul lor în zaharuri. Prin fermentarea zaharurilor cu diverse specii de drojdii se obține alcool. Etanolul poate fi utilizat în diverse procese industriale dar și ca substituent al benzinei sau în amestec cu aceasta în motoarele cu aprindere prin scânteie.

Bioetanolul de generația I se obține din biomasă bogată în zaharuri sau în amidon, cum ar fi sfecla de zahăr, trestia de zahăr, sorgul dulce, porumbul, cerealele păioase (grâu, orz, secară, ovăz, orez), cartofii și maniocul. Conversia zaharozei din produsele bogate în zaharuri este mai facilă întrucât se evită etapa de hidroliză enzimatică, necesară pentru conversia amidonului în cazul produselor bogate în amidon. Figura 6.11 prezintă schema de principiu a procesului de obținere a bioetanolului de generația I. În urma operației de distilare se obține alcool brut, cu o concentrație volumică de 80-85%. Pentru creșterea concentrației și înlăturarea impurităților alcoolul brut se rafinează după care, în cazul în care urmează a fi utilizat ca biocombustibil, se supune operației de anhidrare pentru eliminarea conținutului de apă în vederea obținerii concentrației conform standardelor în vigoare.

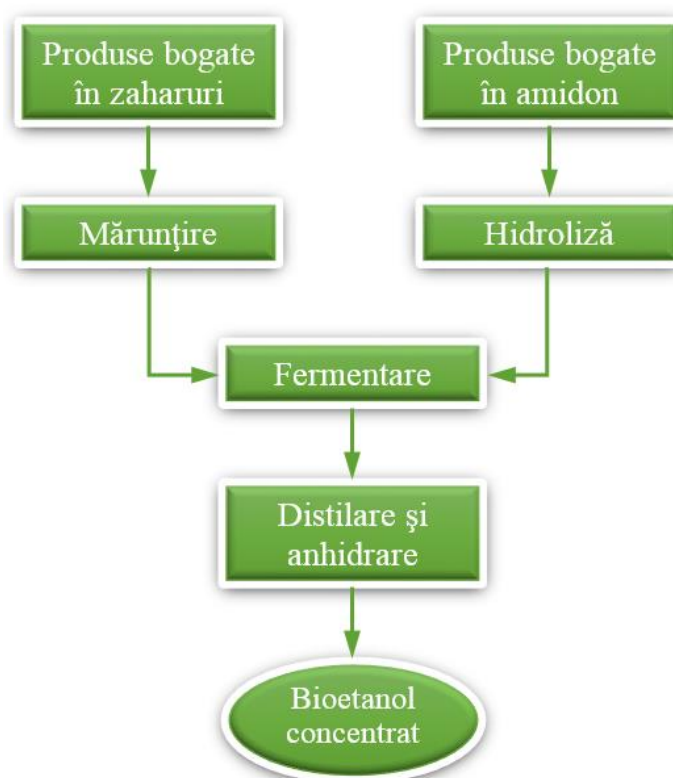


Fig. 6.11 – Schema de principiu a procesului de obținere a bioetanolului de generația I

În cazul biomasei lignocelulozice, structura complexă și rezistența acesteia la separarea pe componente simple impune introducerea unei etape suplimentare, de **pretratare a materialului** înaintea procesului de hidroliză enzimatică. Scopul pretratării constă în:

- îndepărtarea sau dizolvarea ligninei;
- descompunerea parțială sau totală a hemicelulozei în zaharuri simple fermentabile (pentoze și hexoze);
- reducerea cristalității celulozei pentru a o expune acțiunii enzimelor hidrolitice care o convertesc în zaharuri simple; degradarea parțială sau totală a celulozei în glucoză (în funcție de metoda de pretratare aleasă).

Procesul de descompunere a carbohidraților în zaharuri simple, majoritatea putând fi ulterior fermentate cu ușurință de microorganisme precum *Saccharomices cerevisiae*, se numește hidroliză și poate fi realizat prin pretratare (termo)chimică și/sau enzimatic. Pretratarea este o etapă costisitoare și determinantă pentru eficiența etapelor ulterioare din procesul tehnologic de obținere a bioetanolului. În timpul pretratării se pot forma și produși care pot inhiba procesele ulterioare de hidroliză enzimatică și/sau fermentare.

Figura 6.12 arată principalii produși care pot rezulta în urma acestei etape. Cantitățile și tipurile de compuși pot varia în funcție de categoria de biomasă lignocelulozică și de metoda de pretratare aplicată. Acidul formic, levulinic și acetic, furfuralul și hidroximetilfurfuralul (HMF) sunt o parte dintre inhibitorii menționați. Glucoza, xiloza, arabinoza, galactoza și manoză sunt o parte dintre zaharurile simple care trebuie obținute prin hidroliză în vederea fermentării. Pentru ca etapa de pretratare să fie eficientă, este necesar să se obțină un nivel ridicat de depolimerizare a celulozei, dizolvarea completă a hemicelulozei, să se prevină condensarea excesivă a ligninei, cantitatea de inhibitori să fie minimă, iar consumurile specifice de energie și apă să fie de asemenea minime.

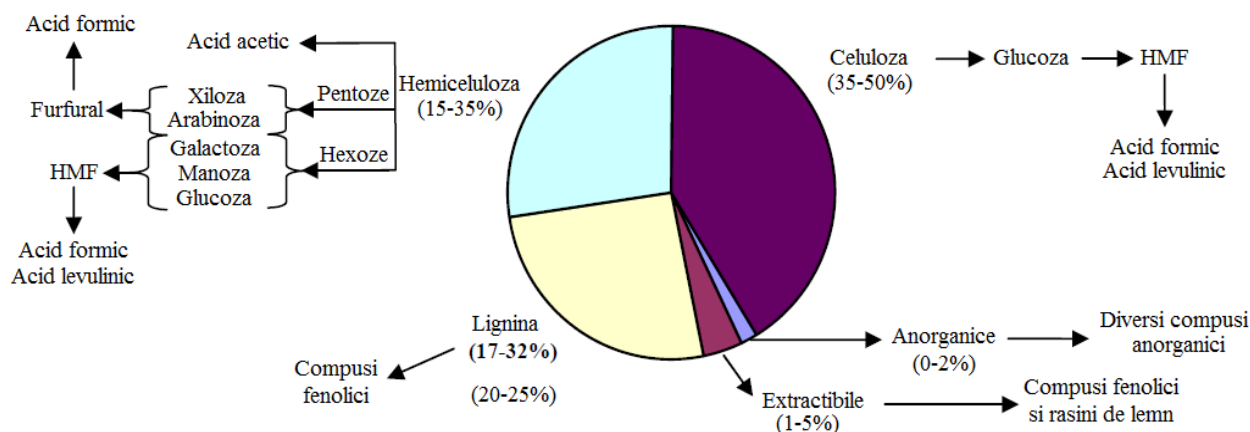


Fig. 6.12 – Principalii produși care pot fi obținuți în urma etapei de pretratare⁵⁶ [76]

Înainte de pretratare biomasa trebuie mărunțită, de obicei până la dimensiuni de 10-30 mm, sau la dimensiuni de maxim 2 mm, în funcție de metoda de pretratare (termo)chimică care urmează a fi aplicată. Cel mai adesea, pretratarea se face la temperaturi și presiuni înalte, eventual într-un mediu acid produs prin adăugarea de substanțe chimice, de unde și denumirea de pretratare

⁵⁶ Figură adaptată; sursa:

http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_02/BioRes_02_3_472_499_Taherzadeh_K_BioEthanol_Review.pdf

termochimică. Se vor trece în revistă în continuare câteva dintre cele mai populare metode de pretratare și principalele lor caracteristici [77].

Hidroliza cu soluție acidă diluată (DA – Dilute Acid):

- Tehnica este simplă și practică și nu necesită aport de energie termică;
- Hidrolizează efectiv hemiceluloza, cu randament ridicat de zaharuri;
- Produce inhibitori;
- Necesită tehnologie de recuperare a acidului sulfuric și a acidului clorhidric folosite în pretratare;

Pretratarea lichidă cu apă fierbinte (LHW):

- Dizolvă hemiceluloza în mare măsură;
- Nu produce inhibitori și nu există substanțe chimice reziduale;
- Nu este eficientă în cazul rășinoaselor;

Explozia cu amoniac a fibrelor (metoda AFEX):

- Eficientă în special în cazul reziduurilor agricole cum ar fi cocenii de porumb, fără formare de produși toxici;
- Nu este potrivită pentru biomasă cu conținut ridicat de lignină;
- Necesită tehnologie de recuperare a amoniacului;
- Tehnologia nu generează apă reziduală (caracteristică a altor metode de pretratare);

Explozia de aburi:

- Este eficientă în special în cazul biomasei reziduale din agricultură;
- Hidrolizează un procent important de hemiceluloze;
- Nu este foarte eficientă în cazul rășinoaselor;

Metoda Organosolv:

- Conversie foarte bună, cu randament ridicat de glucoză, datorită utilizării de acizi la temperaturi înalte;
- Eficiență bună atât pentru foioase cât și pentru rășinoase;
- Concentrație scăzută de zaharuri hemicelulozice;
- Formează inhibitori;
- Solventul organic utilizat necesită tehnologie de reciclare;
- Investiție inițială ridicată;

Ozonoliza:

- Eficientă în îndepărtarea ligninei pentru o gamă largă de material celulozic;
- Nu generează inhibitori;
- Costuri de operare ridicate;

Metoda SPORL⁵⁷:

- Eficientă în cazul biomasei cu conținut ridicat de lignină, atât pentru foioase cât și pentru rășinoase;
- Eficiență energetică ridicată;
- Formează inhibitori, dar în cantități foarte reduse;
- Versatilitate ridicată la tipurile de biomasă;
- În combinație cu explozia de aburi, devine foarte eficientă în cazul rășinoaselor;

Pretraterea alcalină umedă:

- Temperaturile ridicate și combinația de oxigen, apă și alcali reduce cantitatea de inhibitori;
- Randament ridicat în ceea ce privește delignificarea și solubilizarea celulozei;
- Eficiență redusă în hidroliza oligomerilor;

Pretraterea biologică (cu ciuperci sau putregaiuri albe sau maro):

- Este ecologică;
- Necesită cantități reduse de energie și substanțe chimice;
- Ritm foarte lent al bioconversiei.

Pentru conversia la glucoză a celulozei eliberate în timpul pretratării prin îndepărtarea ligninei și, eventual, parțial degradate, se aplică **hidroliza enzimatică**. În acest scop se utilizează celuloze și hemiceluloze - enzime care sunt capabile să degradeze carbohidrații în zaharuri fermentabile. Principalele condiții specifice de proces pentru o activitate enzimatică optimă sunt calitatea și gradul de diluție a substratului (concentrația de celuloză și hemiceluloză, precum și concentrația enzimelor în raport cu substratul), temperatura, care trebuie să se încadreze în intervalul 40-50°C, pH-ul (4-5), durata (de ordinul zilelor), și rata de amestecare [78]. În special temperatura și pH-ul depind de enzimele utilizate. Costurile acestei etape rămân ridicate datorită prețului enzimelor.

În urma pretratării și hidrolizei enzimatică se obțin glucide cu 5 și 6 atomi de carbon, în special glucoză, xiloză și arabinoză. Parametrii care influențează procesul de fermentare sunt pH-ul, temperatura, procentul de inhibitori, gradul de diluție, iar în ceea ce privește microorganismele implicate, procesul este influențat de rata de creștere, toleranța la alcool și cea osmotică, productivitate și de stabilitatea genetică a acestora.

Uzual, cele mai utilizate microorganisme pentru procesul de fermentare sunt *Saccharomices cerevisiae* și *Zymomonas mobilis*, acestea având capacitatea naturală de a fermenta glucoza însă nu și arabinoza sau xiloza. Această capacitate le-a fost indusă în diverse laboratoare de cercetare prin ameliorare genetică. Reacția de fermentare pentru glucoză, prin care se obține etanol și bioxid de carbon, este:



⁵⁷ Sulfite Pretreatment to Overcome Recalcitrance of Lignocelluloses

Procesul de fermentare se poate efectua discontinuu, semicontinuu sau continuu, cu avantaje și dezavantaje în fiecare caz. Deși în prezent cea mai comună tehnologie utilizată implică **separarea etapei de hidroliză de cea de fermentare** (SHF⁵⁸), aceasta prezintă unele dezavantaje între care cel mai important este legat de faptul că activitatea enzimelor este inhibată treptat de creșterea concentrației de zaharuri, fiind așadar necesară utilizarea unei concentrații mai mari de enzime. Eliminarea acestor neajunsuri constituie încă o temă de cercetare, fiind studiate în prezent și alte strategii de hidroliză și fermentare.

Zaharificarea⁵⁹ și fermentarea simultană (SSF⁶⁰) constă în realizarea simultană a celor două procese. Zaharurile produse pe cale enzimatică sunt fermentate imediat de tulpinile de drojii, menținând astfel concentrația de zaharuri la un nivel care nu inhibă activitatea enzimatică. Dezavantajul major constă în faptul că temperatura necesară pentru un proces optim de hidroliză (aproximativ 50°C) diferă de cea pentru fermentare (aproximativ 35°C).

Bioprosesarea consolidată (CBP⁶¹), cunoscută și sub denumirea de **conversie microbiană directă** (DMC⁶²), constă în efectuarea hidrolizei și a fermentării în același bioreactor de către o singură comunitate de microorganisme, capabile să fermenteze direct celuloza în etanol. Cercetările actuale au în vedere două strategii de atingere a acestui deziderat: ameliorarea genetică a unor microorganisme cu capacitate excelentă de fermentare astfel încât să producă eficient și celule, respectiv ameliorarea genetică a unor microorganisme cu capacitate foarte bună de producere a celulelor astfel încât să aibă și capacitatea de a produce etanol.

Figura 6.13 prezintă o tehnologie clasică de obținere a bioetanolului lignocelulozic, iar figura 6.14 arată operațiile tehnologice de bază atunci când se aplică metoda SPORL de pretratare, iar hidroliza și fermentarea se fac separat (SHF).

⁵⁸ Separate Hydrolysis and Fermentation;

⁵⁹ Sinonim al hidrolizei;

⁶⁰ Simultaneous Saccharification and Fermentation;

⁶¹ Consolidated Bioprocessing

⁶² Direct Microbial Conversion

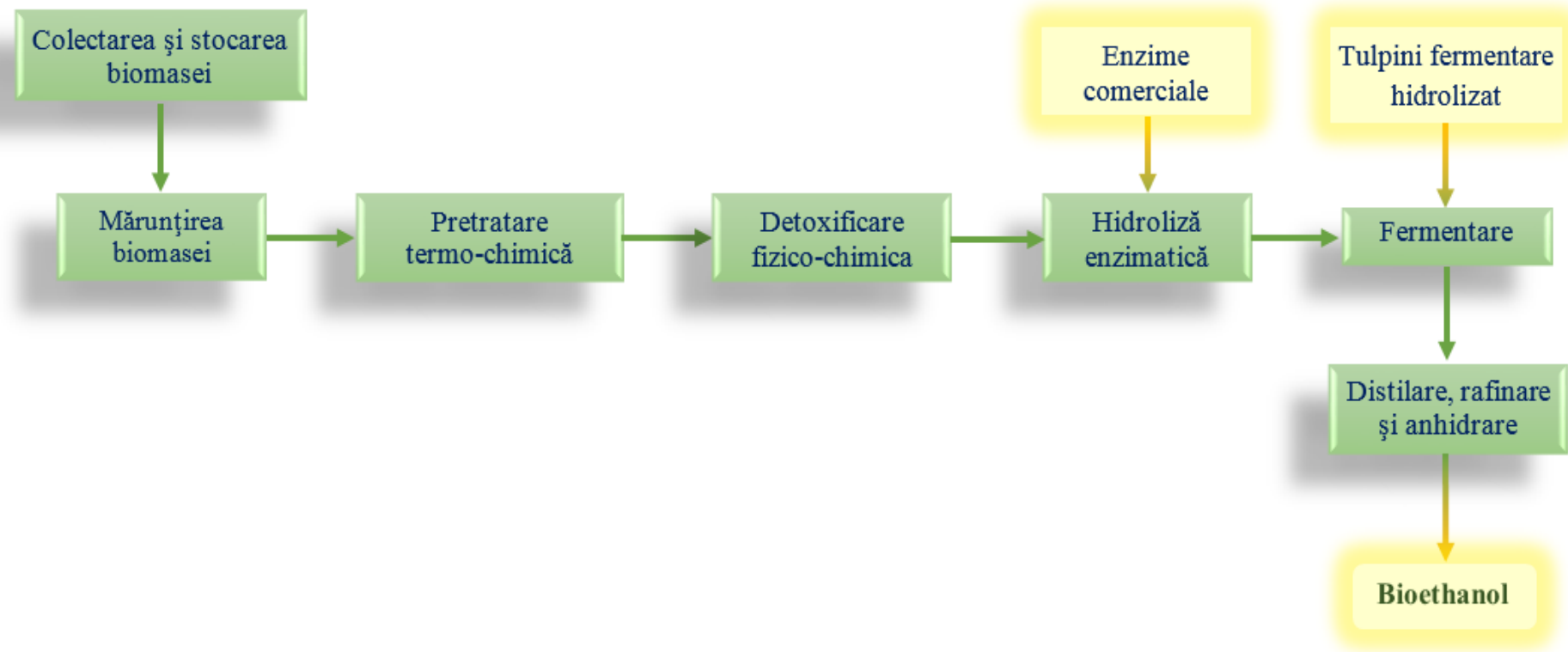


Fig. 6.13 – Tehnologie clasică de obținere a bioetanolului lignocelulozic (orig.)

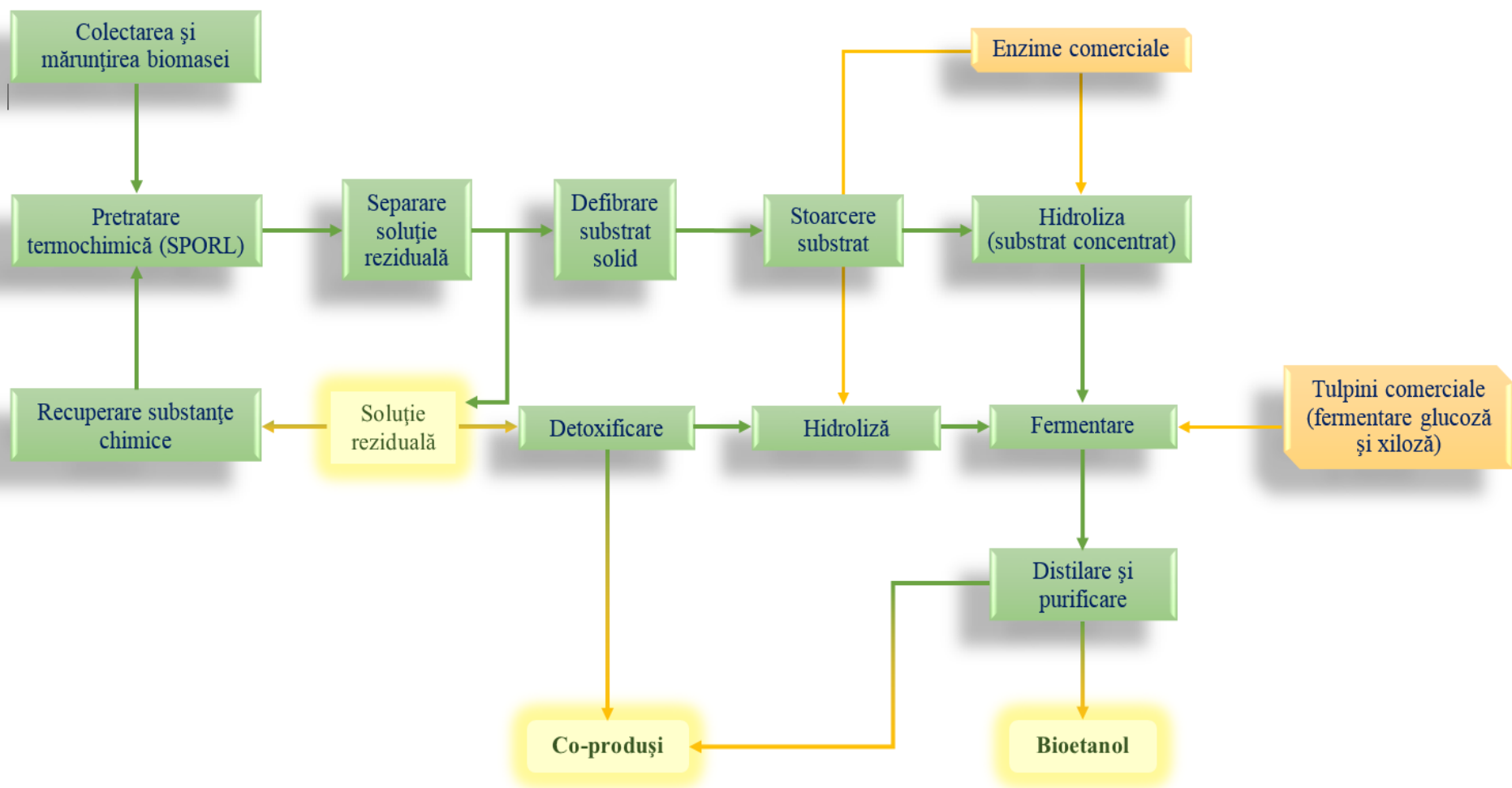


Fig. 6.14 – Tehnologie de obținere a bioetanolului lignocelulozic, cu utilizarea metodei SPORL de pretratare și etape separate de hidroliză și fermentare (SHF) (orig.)

6.2.7 BIODIESEL

Biodiesel-ul este un combustibil curat, biodegradabil și netoxic, care este produs prin transesterificare din ulei vegetal sau din grăsimi de origine animală. În acest scop se poate utiliza și materie primă folosită, cum ar fi de exemplu uleiurile reziduale rezultate de la restaurante. Biodieselul poate fi folosit în stare pură sau în amestec cu motorina pentru alimentarea motoarelor cu aprindere prin comprimare cu pompă de injecție. În ceea ce privește motoarele moderne cu rampă de injecție, la ora actuală fabricanții impun amestecuri de maxim 5% sau 20% (motorina B5 sau B20).

Pentru a obține biodiesel uleiurile sau grăsimile reacționează cu alcoolii în prezența unui catalizator dozat în funcție de nivelul de acizi grași liberi. Stimularea procesului de transesterificare se face și prin creșterea temperaturii. Cei mai utilizați catalizatori sunt soda caustică (NaOH) și hidroxidul de potasiu (KOH).

Principalele etape ale tehnologiei de producere a biodiesel-ului sunt următoarele:

- Uleiul este încălzit la o temperatură de 50-60°C.
- Se adaugă un alcool (uzual – metanol) și NaOH pentru inițierea procesului de transesterificare.
- Se ridică temperatura amestecului la 80°C, acesta fiind recirculat permanent cu o pompă de recirculare.
- Se obțin două fluxuri: cel principal, de obținere a biodiesel-ului și cel secundar, de obținere a glicerinei; se separă metil-esterii și glicerina.
- Metil-esterii se recuperează prin spălare, rezultând biodiesel. În paralel, din glicerină se separă alcoolul aflat în surplus pentru a fi reintrodus în fluxul tehnologic, iar glicerina va suferi un proces relativ complex de purificare.
- Se efectuează operații de filtrare a biodiesel-ului, până la obținerea purității standard.

Pe lângă avantajele evidente în ceea ce privește lipsa poluării și neutralitatea din punct de vedere al emisiilor de bioxid de carbon, biodiesel-ul prezintă însă și unele dezavantaje. Utilizarea lui directă și nu în amestec cu motorina va crea dificultăți la pornirea motoarelor pe vreme rece datorită vâscozității mai ridicate decât cea a motorinei. Garniturile și conductele de cauciuc sunt atacate, astfel încât se impune schimbarea lor în cazul în care acestea există pe circuitul de alimentare (în general la modele mai vechi de vehicule). Păstrarea pe o perioadă mai îndelungată provoacă oxidarea biodieselului, care este însoțită de fenomenul de îngroșare.

Capitolul 4

Energia geotermală

4.1 Noțiuni de bază

Energia geotermală este energia termică stocată în interiorul Pământului. Aceasta provine din două surse: energia primordială, datând din perioada formării planetei (aproximativ 20%) și energia generată prin descompunerea lentă a unor minerale radioactive (80%) precum uraniul, radiul, toriul și potasiul [52]. Intensitatea energiei termice crește cu adâncimea, gradientul mediu de temperatură în scoarța terestră fiind de aproximativ 17-30°C/km, iar miezul depășind 5000°C. Deși această resursă nu se reîmprospătează, este considerată sustenabilă datorită faptului că este nepoluantă iar energia se extrage în cantități nesemnificative în raport cu energia disponibilă [53].

Structura Pământului (figura 4.1) constă într-un nucleu solid de fier și nichel, un nucleu fluid extern acestuia cu temperaturi de circa 2900°C și un miez exterior acestuia din rocă topită numită magmă. Stratul următor poartă denumirea de manta, are o grosime de aproximativ 2900 km și este formată din magmă și rocă în stare solidă. Litosfera, sau scoarța terestră, reprezintă stratul exterior al Pământului și are o grosime care variază între 5 și 70 km, grosimile mai mici aflându-se în zonele oceanice (5 – 10 km).

Scoarța este divizată în plăci continentale care “plutesc” pe un strat vâscos de rocă semitopită, cu temperaturi cuprinse între 650°C și 1250°C. În zonele marginale ale acestor plăci, dar și în alte zone din interiorul plăcilor tectonice, magma se poate apropia de suprafața Pământului chiar și până la un km iar gradientul de temperatură poate atinge 100°C/km [54]. Roca și apa care pătrunde la aceste adâncimi prin fisurile din rocă, absorb căldura transmisă de magmă. În aceste condiții temperatura apei poate atinge 370°C [55], ulterior ea ajungând la suprafață sub formă de izvoare termale sau gheizere.

Se estimează că energia înmagazinată în primii 3 km ai scoarței este de $4,3 \times 10^7$ EJ³⁰ (aproximativ 12×10^9 TWh), ceea ce reprezintă de peste 10 000 ori consumul energetic global anual. Deși energia geotermală este mai mult decât suficientă pentru nevoile omenirii, doar o foarte mică parte este exploatabilă în condiții fezabile economic, datorită faptului că zonele accesibile în care magma se apropie de suprafața terestră sunt puține. În aceste locații procedura obișnuită de recuperare a energiei termice constă de obicei în efectuarea de foraje care ajung până la rezervoarele de apă fierbinte sau la vaporii din subteran, pomparea acestor resurse spre suprafață și utilizare lor pentru încălzire sau pentru a produce energie electrică.

Pentru o capacitate superioară de exploatare a acestei resurse nepoluante, sunt însă necesare foraje de mare adâncime, până la stratul de rocă fierbinte. Datorită costurilor foarte ridicate, acest mod de exploatare se află încă în fază experimentală. Un studiu publicat în 1999 estima că resursele geotermale descoperite până la acea dată aveau un potențial de producție a energiei electrice cuprins între 35 TW_e și 73 TW_e [56]. Consiliul Mondial al Energiei estimează că 8,3% din necesarul mondial de energie electrică ar putea fi produs exploitând resursele geotermale.

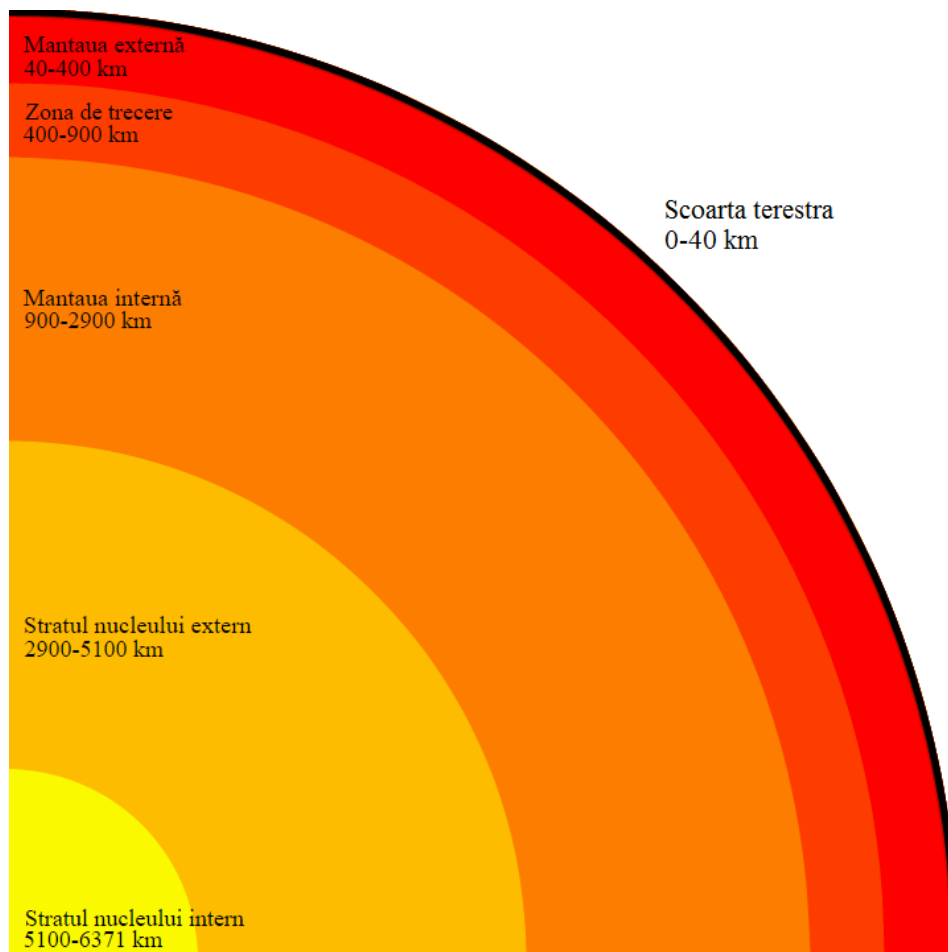


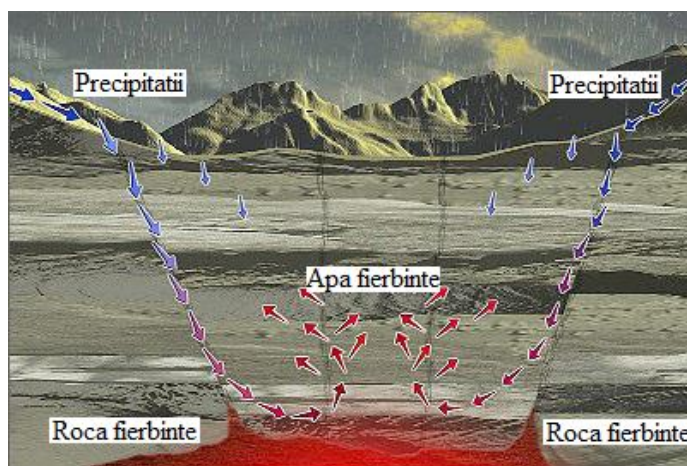
Fig. 4.1 – Structura Pământului³¹

³⁰ 1 EJ = 10^{18} J

³¹ Sursa: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Aufbau_der_erde_schematisch_ro.svg

4.2 Sisteme geotermale

Sistemele geologice de rocă și apă fierbinte poartă denumirea de sisteme geotermale. Cele mai simplu de exploatat sunt **sistemele hidrotermale** (figura alăturată³²), care reprezintă rezervoare subterane de apă fierbinte. Aceasta ajunge la suprafață pe cale naturală prin convecție, sau este blocată în subteran de straturi impermeabile de rocă, putând fi extrasă prin forarea de puțuri de acces.



Pentru ca un sistem hidrotermal să fie exploatabil comercial, este necesar ca temperatura pe care o livrează să fie suficient de ridicată, să conțină un volum suficient de apă fierbinte sau aburi și să poată asigura o productivitate adecvată din punct de vedere economic. În cazul majorității sistemelor, agentul termic este apa fierbinte. În condiții adecvate de presiune și temperatură apa poate coexista cu aburul. Sistemele sunt denumite “**cu dominanță de vapori**” și reprezintă varianta cea mai favorabilă pentru exploatare datorită faptului ca presiunea ridicată nu necesită energie pentru pomparea la suprafață a apei și/sau vaporilor (în cazuri rare câmpurile geotermale produc doar vapori). Rezervoarele aflate la peste 2 km adâncime produc apă cu temperaturi de 120-350°C, aceste valori făcându-le adecvate pentru producția de energie electrică.

O altă categorie constă în sisteme care conțin rezerve de apă cu temperaturi nu foarte ridicate (de cele mai multe ori sub 150°C), dar la presiuni ale căror valori depășesc presiunea hidrostatică corespunzătoare adâncimii la care se află rezervorul – de obicei în jur de 100 m. Datorită acestor presiuni apa poate conține metan dizolvat. Metodele de exploatare combină energia mecanică disponibilă datorită presiunii ridicate, energia termică a apei și energia chimică a metanului. Deși această resursă poate fi utilizată pentru producția de energie electrică, aplicația principală o constituie de obicei încălzirea.

Rezervoarele subterane conțin cantități limitate de apă și energie, iar o exploatare excesivă le poate secătui. În acest caz se vor constata scăderi ale presiunii și/sau temperaturii fluidului. Rata de extracție trebuie să fie mai mică decât rata de reîmprospătare a rezervorului și de refacere a energiei termice a acestuia. Puterea termică disponibilă la nivel subteran poate ajunge la 1000 MW, deși de cele mai multe ori ea are valori mai reduse.

În prezent există studii privind valorificarea căldurii din **sistemele magmatice**, care sunt asociate cu roca fluidă sau parțial fluidă, cu temperaturi între 600°C și 1400°C, unde apa este în cantitate

³² Sursa: http://www1.eere.energy.gov/tribalenergy/guide/geothermal_energy.html

insuficientă sau chiar lipsește, iar permeabilitatea rocilor este prea redusă pentru a permite suficientă productivitate. Aceste valori fac dificil procesul de forare și menținerea puțurilor de acces, iar zonele suficient de apropiate de suprafață pentru a permite forajul sunt foarte limitate. Cu toate acestea resursa este demnă de luat în considerare, având în vedere faptul că o singură zonă magmatică poate conține cantități impresionante de energie, respectiv 100 000-300 000 MWsecol [54]. Inițiative privind valorificarea temperaturilor foarte ridicate din zonele magmatice au fost întreprinse în Statele Unite și în Islanda.

În ultimii ani s-a avansat ideea de **sisteme geotermale îmbunătățite**³³ - zone aflate la limita inferioară a scoarței terestre, unde exploatarea se face prin forarea de puțuri până la stratul de rocă și injectarea de apă rece la o presiune suficientă pentru “deschide” fisurile existente în mod natural în roca fierbinte. Atunci când nu există fisuri, ele pot fi create prin injectarea apei la presiuni foarte mari. Apa este recuperată de unul sau mai multe puțuri de foraj și trimisă la suprafață unde cedează căldura pentru a genera energie electrică, după care este injectată din nou în stratul de adâncime. Figura 4.2 prezintă principiul care stă la baza exploatării acestei categorii de sisteme³⁴.

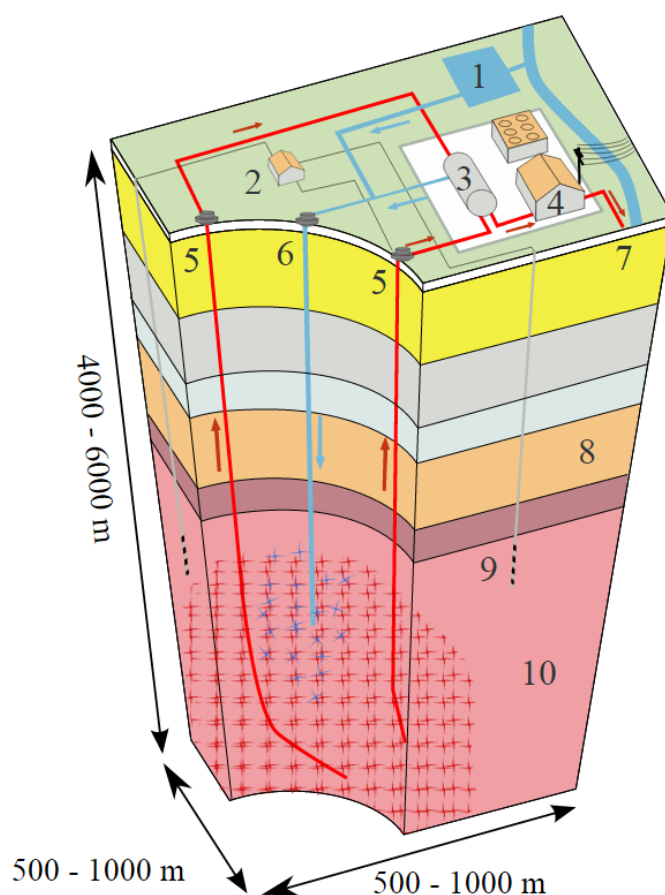


Fig. 4.2 – Sistem geotermal îmbunătățit: 1 – rezervor; 2 – incinta pompelor; 3 – schimbător de căldură; 4 – incintă turbine; 5 – puțuri recuperare apă fierbinte; 6 – puț injectare apă; 7 – apă caldă livrată comunității locale; 8 – strat de sedimente poroase; 9 – puț de supraveghere; 10 – roca de bază

³³ EGS – Enhanced Geothermal Systems

³⁴ Sursa: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c6/EGS_diagram.svg

State precum Franța, Japonia, Marea Britanie, Germania și Statele Unite au efectuat experimentări în vederea dezvoltării unei tehnologii comerciale bazate pe această metodă. În cadrul proiectului de cercetare *European Hot Dry Rock* (Franța) puțurile de acces au adâncimi de 5 km, obținându-se temperaturi de 201°C. În prezent centrala pilot are o capacitate de 1,5 MW_e. Studii recente arată că la nivel mondial există 587 de centrale electrice funcționând pe bază de resurse geotermale, cu o capacitate instalată de 15,5 GW_e. Tabelul 4.1 prezintă parțial capacitățile instalate pe țări.

Tabelul 4.1 – Centrale geotermale comerciale, la nivel mondial [57]

Țara	Număr centrale	Capacitate instalată [MW _e]
Statele Unite	253	2774,43
Filipine	48	1840,9
Indonezia	23	1134
Mexic	39	983,3
Italia	35	882,5
Noua Zeelandă	43	783,3
Islanda	31	715,4
Japonia	21	535,26
Costa Rica	8	205
El Salvador	7	204,3
Kenia	13	166,2
Turcia	8	94,98
Nicaragua	5	87,5
Rusia	12	79
Papua-Noua Guinee	6	56
Guatemala	9	44,6
Portugalia ³⁵	6	26
China	8	24
Franța ³⁶	2	14,7
Etiopia	1	8,5
Germania	4	6,75
Austria	3	1,45
Tailanda	1	0,3
Australia	1	0,15
TOTAL	587	10 668,52

³⁵ În insulele Azore

³⁶ În insulele Guadelupe;

Întrucât nu toate resursele geotermale furnizează temperaturi suficiente pentru producția de energie electrică, există și numeroase aplicații destinate valorificării energiei termice. Figura 4.3 arată distribuția utilizării energiei termice a acestor sisteme geotermale pe tipuri de aplicații, în baza datelor colectate la nivelul a 77 țări. S-a calculat o capacitate totală instalată de 50 583 MW_t și un factor de capacitate mediu de 27% [58].

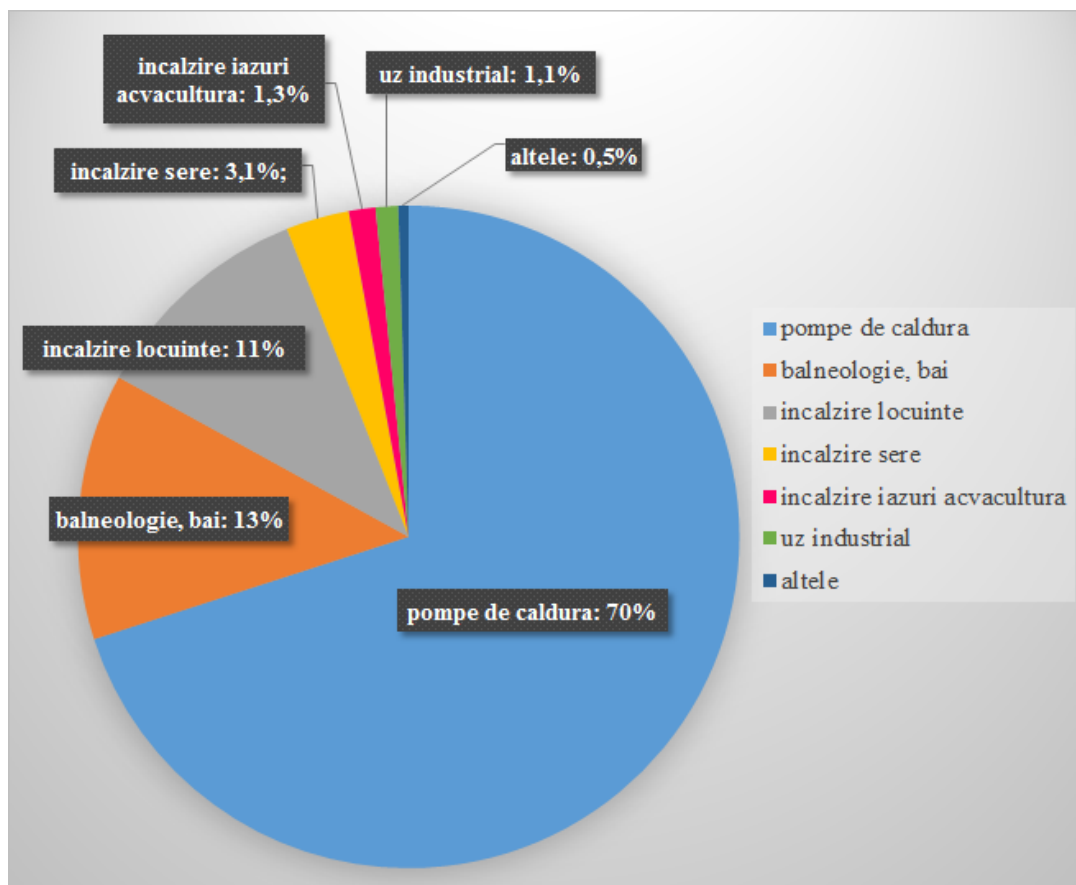


Fig. 4.3 – Ponderea utilizării energiei termice a surselor geotermale pe tipuri de aplicații, la nivel mondial

4.3 Conversia energiei geotermale

În prezent există trei tipuri de centrale electrice geotermale în exploatare: centrale “uscate”, centrale “flash” și centrale cu ciclu binar, depinzând de temperatura fluidului și de starea acestuia (vapori sau lichid). Emisiile de CO₂ ale unei astfel de centrale sunt în medie de 122 kg/MWh, reprezentând a opta parte din emisiile unei centrale convenționale pe bază de cărbune [59]. Factorii de capacitate ai centralelor geotermale sunt comparabili cu cei ai centralelor convenționale, putând avea valori cuprinse în intervalul 75-80%.

4.3.1 CENTRALE USCATE

Centralele uscate (figura 4.4) au fost printre primele tipuri utilizate pentru valorificarea energiei geotermale. Aburul la temperaturi în general de peste 235°C este extras din rezervorul geotermal prin mai multe puțuri, fiind dirijat de obicei către o singură turbină de capacitate mai mare (20-

120 MW) pentru a beneficia de un randament superior comparativ cu utilizarea mai multor turbine de capacități mai mici. Țevile de abur sunt prevăzute, înainte de turbină, cu filtre care rețin fragmentele de rocă și eventualul condens format pe parcurs. Pentru a proteja rezerva naturală de abur, o anumită fracție este reinjectată după utilizare în rezervorul geotermal sub formă de condens.

Această tehnologie este simplă, eficientă și economică, însă dezavantajul major constă în faptul că rezervoarele cu dominanță de vapori descoperite până în prezent sunt foarte rare. De asemenea, comparativ cu celelalte tehnologii, doar (15-20)% din fluidul extras este reinjectat în rezervorul geotermal. Eficiența centralelor uscate este de aproximativ 30%, în principal datorită temperaturii relativ scăzute a aburului și a utilizării turbinelor cu capacități de producție mai mici comparativ cu centralele clasice.

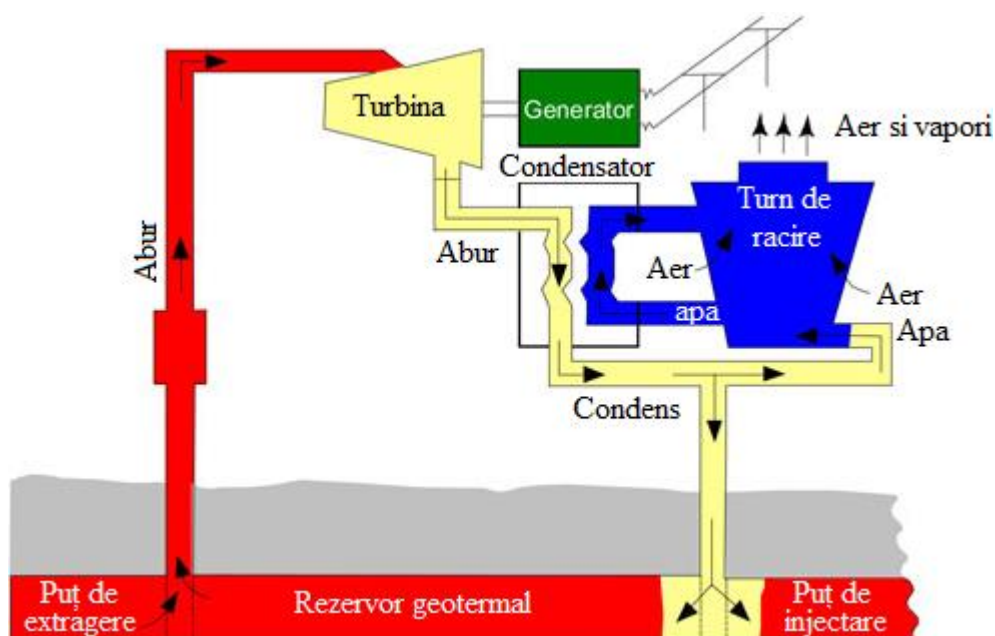


Fig. 4.4 – Principiul de funcționare al centralelor uscate³⁷

Vaporii proveniți din subteran conțin (2-10)% gaze nocive, cum ar fi CO₂ și hidrogen sulfurat [54]. În același timp, există și variante constructive în care aburul provenit de la turbină este eliberat în atmosferă. Pentru a evita poluarea, într-o primă etapă aburul va fi introdus într-un schimbator de căldură unde vaporii de apă condensează, după care faza gazoasă rămasă este tratată în vederea înlăturării poluanților.

Într-o etapă suplimentară, poluantul poate fi prelucrat în continuare și valorificat ca subprodus. De exemplu, din hidrogenul sulfurat se poate obține sulf care, prin vânzare, poate aduce venituri suplimentare. O altă sursă de venit suplimentar poate fi căldura recuperată în etapa de condensare a vaporilor de apă. Întrucât bioxidul de carbon constituie o sursă de poluare, acesta nefiind supus

³⁷ Imagine adaptată; sursa: <http://coloradogeologicalsurvey.org/energy-resources/renewables/geothermal/uses/electrical-generation/>

de obicei procesului de recuperare, se pune problema captării și injectării lui în subteran dacă se află într-un procent semnificativ în aburul provenit din rezervorul geotermal. Un studiu comparativ efectuat pentru Statele Unite arată însă că, în medie, emisiile de CO₂ ale unei centrale geotermale de acest tip sunt de aproximativ 90g/kWh iar cele ale unei centrale clasice funcționând pe bază de combustibili fosili sunt de (600-955)g/kWh [60]. Alternativ, bioxidul de carbon ar putea fi totuși captat și utilizat în industria alimentară pentru băuturile carbogazoase, sau ca accelerator de creștere a plantelor din sere.

4.3.2 CENTRALE “FLASH”

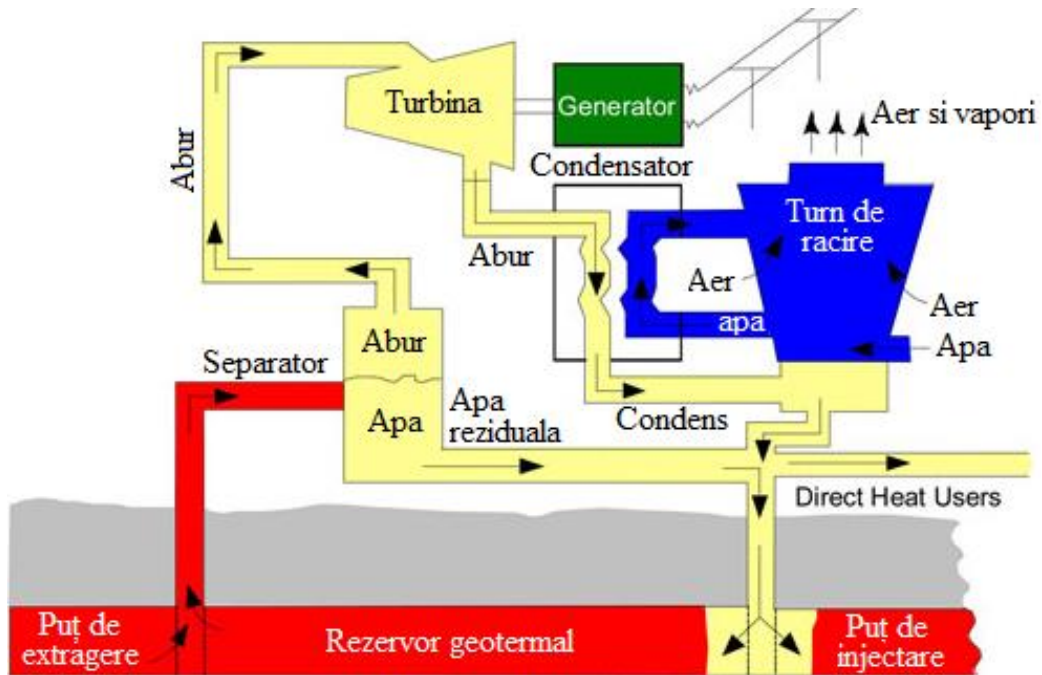
Majoritatea câmpurilor geotermale produc un amestec de gaze, apă și diverse minerale dizolvate, cu o corozivitate ridicată, la presiuni de până la 10 atmosfere. De aceea este de dorit evitarea contactului dintre echipamentele active ale centralei și apa provenită direct din subteran. **Centralele “flash”** reprezintă o soluție la această provocare. Procentul masic de vapori de apă din acest amestec este de (10-50)%. Pe măsură ce apa geotermală (cu temperaturi mai mari de 180°C) începe să urce la suprafață, suferă o cădere de presiune până când este atinsă presiunea de saturație. În acest moment este inițiat procesul de fierbere, care continuă și atunci când apa este adusă la suprafață și trimisă într-un rezervor de expansiune. Alternativ, presiunea din conductele puțului de extragere este menținută la un nivel la care nu are loc fierberea cu ajutorul unei valve amplasate la intrarea în vasul de expansiune. Scăderea bruscă a presiunii la pătrunderea în vasul de expansiune provoacă fierberea instantanee a fluidului geotermal și eliberarea vaporilor de apă. Aceștia sunt apoi utilizați pentru a antrena turbinele centralei (figura 4.5 a). Ca și în cazul centralelor uscate, condensul provenit din vaporii utilizați este reinjectat în subteran împreună cu apa din vasul de expansiune.

În unele cazuri este necesară inițierea fierberii. Una dintre metodele utilizate constă în introducerea unui tub în puțul de foraj, sub nivelul apei, prin care se pompează aer. Presiunea din coloana de aer și apă va scădea până la atingerea presiunii de saturație, moment în care se inițiază fierberea. În continuare, dacă amestecul de apă și vapori rezultați prin fierbere are o densitate suficient de redusă, fierberea și curgerea către suprafață a coloanei de apă se vor autoîntreține, fără a mai fi necesară pomparea aerului. Există posibilitatea ca procedura să fie repetată de câteva ori pentru a se obține efectul scontat.

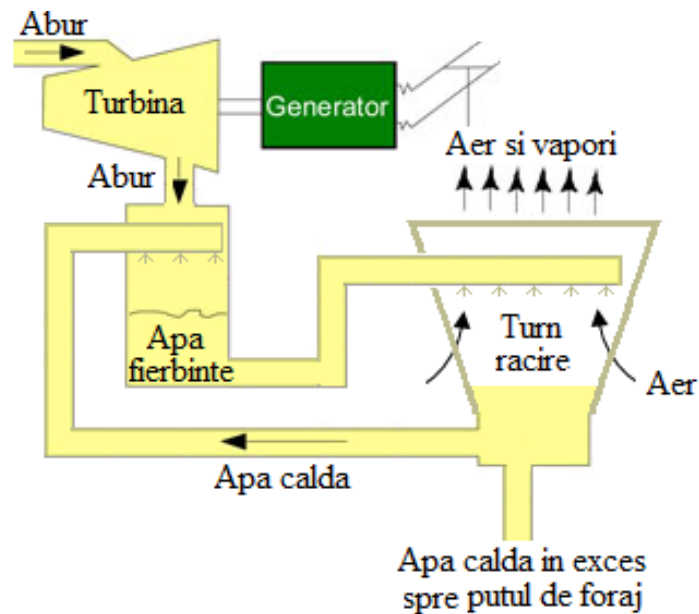
O alternativă constructivă a tehnologiei “flash” constă în implementarea unui al doilea vas de expansiune, unde ajunge lichidul din primul vas, la o presiune și mai scăzută. Se va obține o cantitate suplimentară de vapori care pot alimenta fie o turbină de presiune scăzută, fie o treaptă finală a turbinei inițiale. Această tehnologie poate aduce un spor de capacitate de până la 25% însă, premergător construcției, se impune o analiză a fezabilității ca urmare a costurilor mai ridicate cu investiția inițială.

O altă variantă constructivă este destinată zonelor în care nu există surse suplimentare de apă pentru turnul de răcire. În acest caz aburul evacuat de turbină pătrunde într-un condensator.

Condensul este răcit cu aer într-un turn de răcire iar o parte din apa caldă rezultată (15%-20%) este reutilizată în procesul de condensare a aburului (figura 4.5 b), restul fiind injectată în puțul de foraj. Un dezavantaj important al acestor sisteme constă în depozitarea mineralelor dizolvate în lichidul geotermal pe pereții rezervorului de expansiune și ai porțiunilor de conducte aflate în contact cu lichidul în stare de fierbere. Uzual centralele “flash” se construiesc cu puteri instalate de (10-55) MW.



a)



b)

Fig. 4.5 – (a) Principiul de funcționare al centralelor “flash”³⁷; (b) schema de principiu a segmentului tehnologic de recirculare a condensului

4.3.3 CENTRALE BINARE

Câmpurile geotermale care produc apă cu temperaturi scăzute (sub 150-170°C) sunt mult mai numeroase decât cele de înaltă temperatură. În aceste cazuri, transformarea energiei termice în energie electrică se face în **centrale cu sistem binar**, care pot valorifica temperaturi de 75-200°C [61]. Căldura geotermală este cedată într-un schimbător de căldură unui fluid a cărui temperatură de fierbere este mai redusă decât cea a apei (de exemplu pentafluorpropan, izopentan, izobutan, sau un amestec de apă și amoniac³⁸). Vaporii acestuia antrenează o turbină, după care sunt trimiși într-un condensator, iar condensul rezultat ajunge din nou în schimbătorul de căldură și ciclul se reia (figura 4.6).

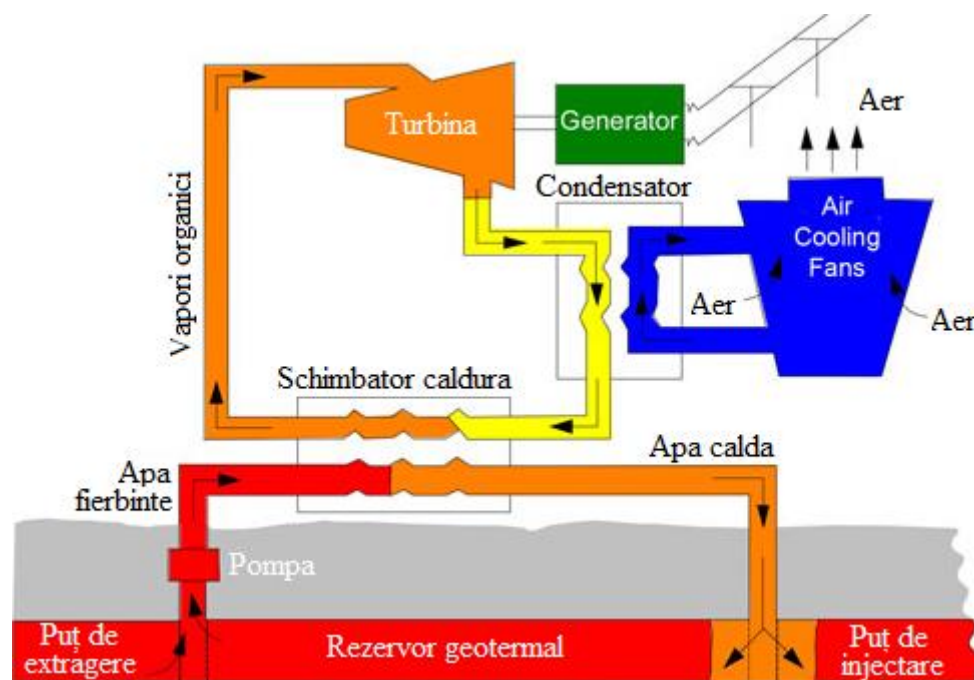


Fig. 4.6 – Schema de principiu a tehnologiei binare de valorificare a resurselor geotermale”³⁷

Această tehnologie are avantajul utilizării apei geotermale în ciclu închis, la o presiune care nu permite fierberea, respectiv eliberarea unui conținut de gaze nocive (CO₂, hidrogen sulfurat, bioxid de sulf etc.) în atmosferă. Din același motiv este redus în mare măsură procesul de depunere a mineralelor dizolvate în apă pe pereții componentelor aflate în contact cu apa geotermală. Un alt avantaj semnificativ al acestei tehnologii constă în faptul că întreaga cantitate de fluid geotermal este reinjectată în subsol, ceea ce permite conservarea acestuia acolo unde rezervoarele conțin cantități reduse de apă sau unde reîmprospătarea pe cale naturală a rezervei de apă este lentă.

Alternativ, tehnologia se poate utiliza în combinație cu centralele “flash”. Înainte de a fi reinjectat în subsol, fluidul din vasul de expansiune al unui modul “flash” poate ceda căldură fluidului de

³⁸ Se folosește pentru ciclurile Kalina (cicluri termodinamice optimizate pentru resurse termice cu temperaturi scăzute)

lucru dintr-un modul binar. Costurile inițiale vor fi mai ridicate, însă cantitatea de energie geotermală extrasă va suplimenta capacitatea de producție.

Un dezavantaj important al centralelor binare constă însă în faptul că tehnologia utilizată nu permite folosirea resursei geotermale pentru a produce condensarea fluidului de lucru, fiind necesară o sursă externă de răcire. Procesul este eficient atunci când agentul din turnul de răcire este apa, însă lipsa sau cantitățile insuficiente ale acestei resurse la locul de amplasare al centralei au avut ca rezultat implementarea tehnologiilor de răcire cu aer. Acestea însă generează variații semnificative ale producției centralei geotermale pe parcursul unui an (chiar și cu 50%), în funcție de variațiile temperaturii aerului de la un anotimp la altul.

Un alt dezavantaj rezidă în consumul ridicat de energie auxiliară în raport cu un nivel de producție mai redus comparabil cu centralele uscate și cu cele de tip flash datorită faptului că exploatează resurse geotermale de joasă entalpie. Cele mai mari consumuri proprii se înregistrează pentru operații precum pomparea apei geotermale în subsol, pomparea fluidului de lucru în circuitul închis, utilizarea ventilatoarelor de mare capacitate pentru sistemele de răcire cu aer sau a pompelor de apă pentru turnurile de răcire cu apă. Din punct de vedere al capacității, aceste centrale au module de producție cu puteri instalate de (1-3) MW, mult mai mici în raport cu modulele care echipează celelalte tipuri de centrale geotermale.

4.4 Utilizarea directă a căldurii geotermale

În industria geotermală, potențialul termic este considerat scăzut atunci temperatura furnizată este sub 150°C. Căldura provenită din resursele geotermale cu temperaturi scăzute (20 - 150°C) sau de la fluidul rezidual din centralele electrice geotermale (co-generare), poate fi utilizată în mod direct, pentru aplicații de încălzire rezidențială, comercială sau industrială la scară redusă (locuințe individuale, birouri, iazuri piscicole, sere) dar și pe scară largă (încălzirea cartierelor de locuințe sau localităților de mici dimensiuni, în industrie - pentru uscarea produselor alimentare, uscarea cherestelei, recuperarea mineralelor etc.) (v. și figura 4.3). Principalele avantaje constau în:

- frecvența ridicată a resurselor cu temperaturi scăzute; până în prezent acestea au fost identificate în 80 de țări, la adâncimi economice din punct de vedere al costurilor de foraj;
- posibilitatea utilizării echipamentelor de foraj pentru puțuri convenționale de apă;
- durata scăzută a implementării proiectelor de încălzire: majoritatea pot fi finalizate în decurs de până la un an;
- lipsa pierderilor de randament prin conversie;
- costuri pentru încălzire reduse cu până la 80% față de costurile de încălzire utilizând soluții pe bază de combustibili fosili;
- lipsa emisiilor sau emisii foarte reduse de gaze poluante;
- posibilitatea utilizării echipamentelor de încălzire sau răcire consacrate pe piață, în măsura în care sunt compatibile cu temperaturile și compoziția fluidului geotermal;

- posibilitatea utilizării directe a apei izvoarelor geotermale de suprafață (acolo unde acestea există), fără necesitatea forării puțurilor de foraj;
- adâncimea de exploatare mult mai mică decât în cazul surselor geotermale de înaltă temperatură.

Ca și în cazul centralelor electrice geotermale, atunci când lichidul geotermal are efecte corozive și poate genera depuneri de minerale pe pereții instalațiilor, este necesar să se ia măsuri pentru a preveni interacțiunea cu utilizatorii. Măsuri suplimentare în acest sens se iau atunci când fluidul conține bor, arsenic și/sau hidrogen sulfurat, aceste substanțe urmând a fi separate și înlăturate datorită pericolului potențial pe care-l prezintă pentru plante, animale și oameni. În plus, hidrogenul sulfurat interacționează cu elementele de cupru și atacă sudurile.

Componentele principale ale echipamentelor de valorificare directă a căldurii geotermale sunt puțul de foraj, pompe, schimbătoare de căldură, conducte de distribuție izolate termic, echipament de extragere a căldurii, sursă alternativă convențională de căldură pentru situații de urgență sau pentru a funcționa în paralel cu echipamentul geotermal reducând astfel numărul de puțuri de foraj, puțuri de reinjectare. Puțurile geotermale pot acoperi 80 - 90% din necesarul anual de energie termică, fiind de obicei dimensionate pentru 50% din sarcina maximă necesară [60].

Pentru maximizarea eficienței unei centrale, există abordări care presupun utilizarea în cascadă, în scopuri multiple, a resursei geotermale. Figura 4.7 exemplifică acest concept [60].

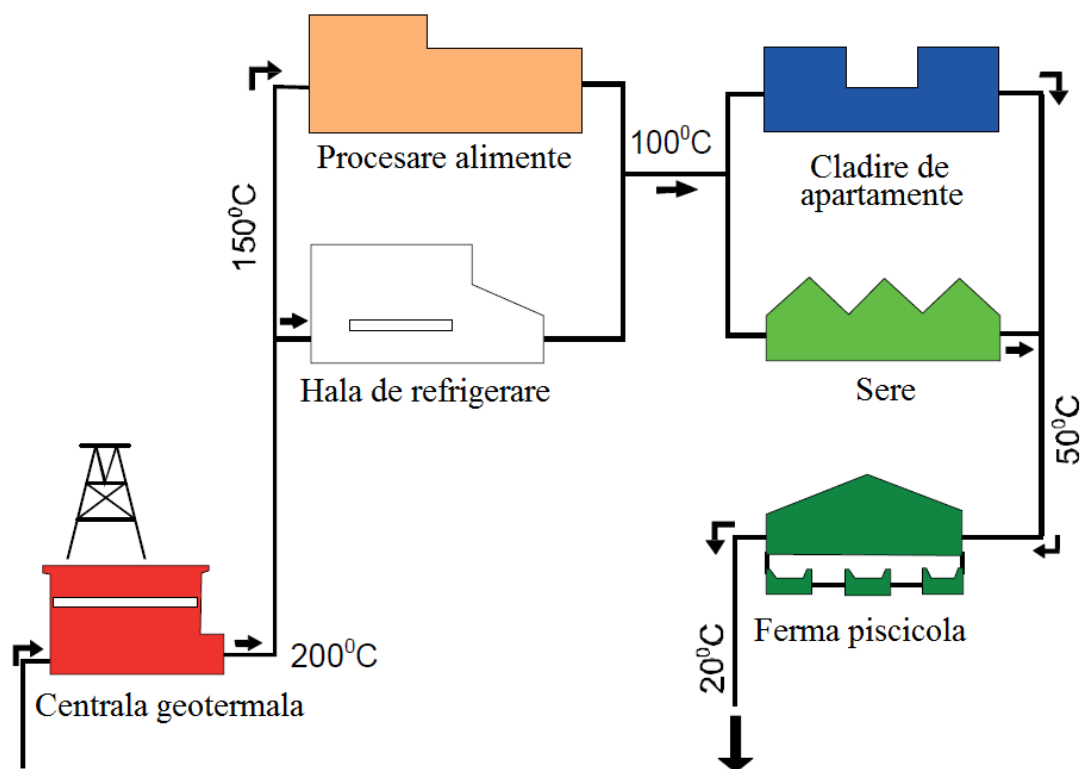
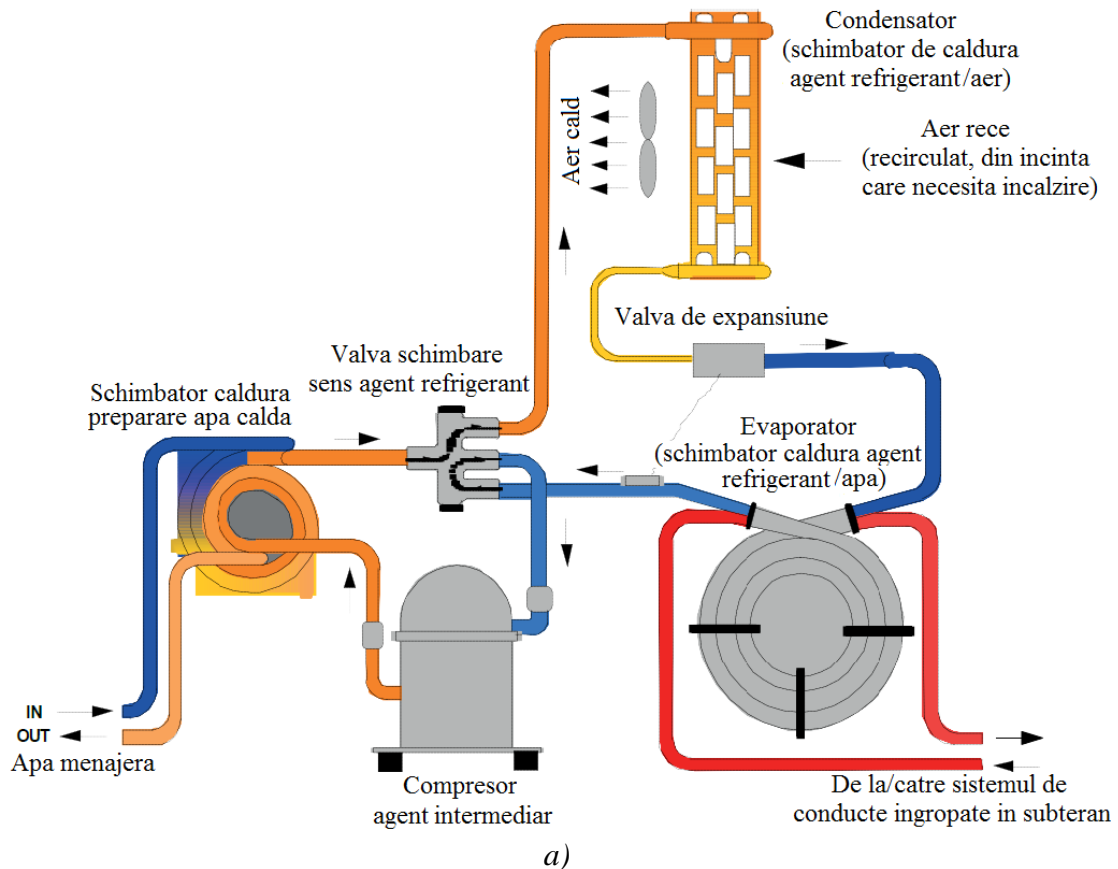


Fig. 4.7 – Exemplu de utilizare în cascadă a energiei provenite din resursa geotermală³⁹

³⁹ Figuri adaptate și utilizate cu permisiunea World Energy Council

4.5 Pompe de căldură

Pompele de căldură nu necesită surse de căldură cu temperaturi ridicate, funcționarea lor bazându-se pe temperatura relativ constantă a solului la adâncimi pornind de la mai puțin de doi metri și ajungând până la 100 m și, acolo unde legislația permite, ajungând până la 160 m. Spre suprafață, temperatura solului este de 10 - 16°C, fiind mai scăzută decât cea a aerului în timpul verii și mai ridicată în perioada de iarnă. Variațiile sezoniere ale temperaturii dispar la adâncimi cuprinse între 7 și 12 m datorită inerției termice a acestuia. Solul este folosit ca rezervor de căldură, astfel încât vara aceste sisteme pot evacua căldura din clădiri cedând-o solului, iar în timpul iernii căldura din sol este preluată, amplificată și “pompată” în clădiri. Agentul intermediar utilizat pentru transferul căldurii este apa în amestec cu un antigel, care circulă printr-un sistem de conducte cu rol de schimbător de căldură, îngropat de obicei la câțiva metri în sol. Antigelul poate fi propilen glicol sau alcool denaturat. Întrucât are cel mai redus efect poluant în cazul apariției unor scurgeri în sol, propilen glicolul este singurul acceptat pentru aceste aplicații într-un număr din ce în ce mai mare de țări europene. Utilizând același principiu de funcționare, pompele de căldură pot fi utilizate și pentru prepararea apei calde. Figura 4.8 arată modul de funcționare al pompelor de căldură în perioadele de iarnă și de vară, incluzând atât încălzirea/răcirea unei incinte cât și opțiunea de preparare a apei calde menajere [60].



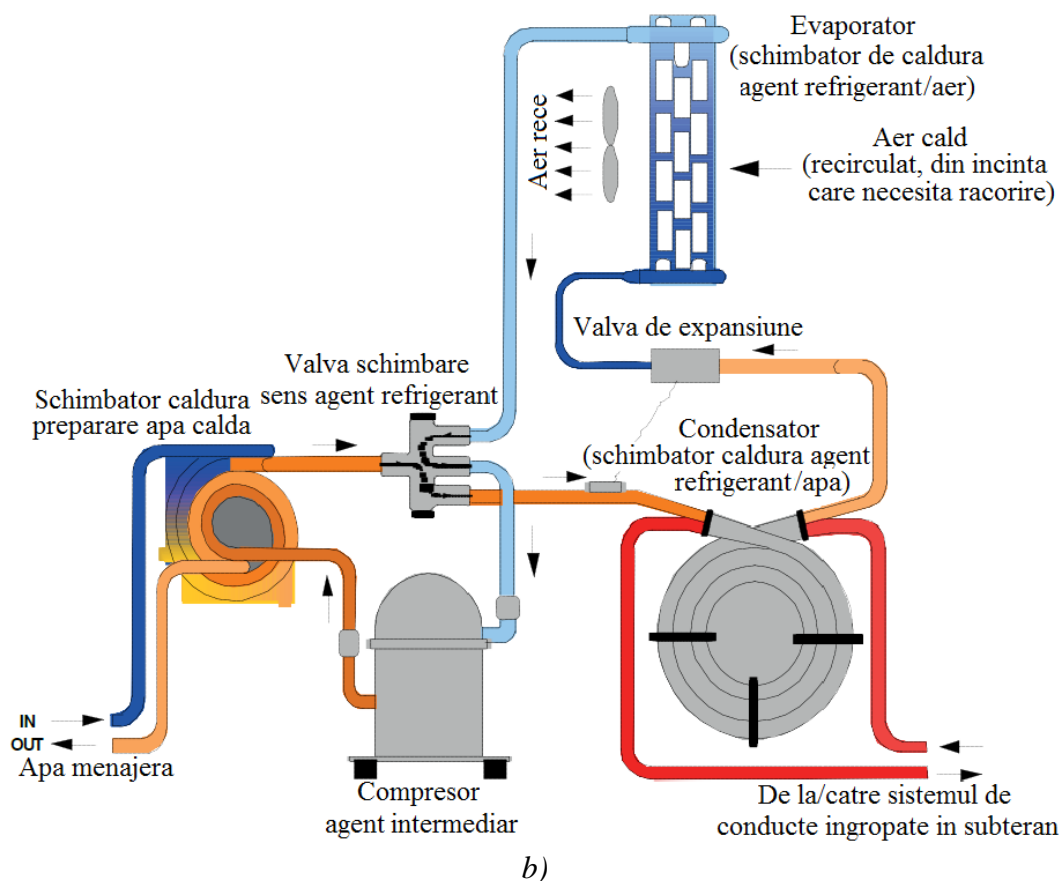


Fig. 4.8 – Funcționarea pompelor de căldură pentru producerea de apă caldă menajeră și încălzirea spațiilor de locuit în perioadele de iarnă (a) și răcirea acestora pe timp de vară (b)⁴⁰

Pompele de căldură pot fi proiectate să lucreze nu doar cu solul ci și cu apele freatice, apele de suprafață și cu aerul (pompe ce căldură atmosferice). În prezent există patru soluții constructive de bază pentru pompele de căldură (figura 4.9), dar și combinații ale acestora:

- **Cu buclă închisă orizontală**, unde conductele sunt amplasate la adâncimi de aproximativ 1,5 m. Conductele pot fi așezate în linii paralele, în serpentină sau, pentru a ocupa mai puțin spațiu, pot avea formă de bucle spiralate (figura alăturată și figura 4.9 a). Se poate excava întreaga suprafață de teren, sau se pot săpa doar șanțuri paralele



cu lățimi de 15 – 60 cm. De obicei, pentru fiecare 3,5 kW (12 000 BTU) capacitate a pompei de căldură, sunt necesari 120 – 180 m de conductă îngropată [62] (în funcție de caracteristicile țevii, de tipul și umiditatea solului). Adâncimea de amplasare influențează direct consumul de

⁴⁰ Figuri adaptate și utilizate cu permisiunea World Energy Council

energie al pompei. Conductele amplasate în apropierea suprafeței absorb, în mod indirect, mai multă căldură de la soare, ceea ce se dovedește a fi un avantaj în special atunci când solul este încă rece după o iarnă prelungită. Pe de altă parte însă, temperaturile la adâncimi mici scad relativ rapid odată cu răcirea vremii, conducând la scăderea eficienței sistemului în perioadele de iarnă, ceea ce se reflectă în creșterea costurilor de operare. Evitarea acestor dezavantaje se poate face prin creșterea adâncimii de amplasare și a lungimii conductei, însă cu prețul unei investiții inițiale mai costisitoare.

Sistemul cu buclă închisă orizontală are avantajul costurilor reduse cu excavarea solului în raport cu sistemul cu buclă închisă verticală însă, datorită suprafeței mari de teren necesar, utilizarea lor este limitată la zonele rurale și foarte puțin în zonele urbane (acolo unde spațiile libere largi permit). Este soluția cea mai potrivită pentru locuințe individuale datorită valorii mai mici a investiției inițiale.

- **Cu buclă închisă verticală**, unde conductele se montează vertical la adâncimi care pot depăși 100m, ceea ce necesită echipamente de forare. Spre deosebire de amplasarea orizontală, această variantă constructivă necesită suprafețe mici de teren, fapt care le face adecvate clădirilor de mari dimensiuni (școli, spații comerciale etc.), pentru care amplasarea orizontală ar necesita suprafețe prohibitive de teren. Costurile cu forarea sunt însă ridicate - aproximativ duble față de costurile cu excavarea la sistemele orizontale de aceeași capacitate. Găurile cu diametre de 10cm sunt forate la distanțe de 5 – 6 m, la adâncimi cuprinse între 30 și 100 m. În fiecare dintre aceste găuri se introduce o conductă în formă de U, cu cele două capete superioare conectate la conducta principală. Ulterior se toarnă un mortar pe bază de bentonită în scopul îmbunătățirii procesului de transfer de căldură prin asigurarea unei “conexiuni” termice între țevă și sol sau rocă. În cazul apariției unor scurgeri la sistemul de țevi, mortarul are și rolul de a evita contaminarea pânzelor freactice. Pentru fiecare 3,5 kW (12 000 BTU) capacitate a pompei de căldură, este necesar un foraj la o adâncime de 80 – 110 m [62].

- **Cu buclă închisă în ape de suprafață**, soluție similară variantei cu buclă închisă orizontală, cu deosebirea că amplasarea conductelor se face în apele de suprafață (râuri sau lacuri). Între locuință și sursa de apă conducta este îngropată. Adâncimea de amplasare trebuie să fie de cel puțin 2,5 m pentru a evita formarea gheții la nivelul conductelor. Este soluția cu cele mai scăzute costuri aferente investiției



inițiale. Figura alăturată prezintă procedura de scufundare a unui astfel de sistem⁴¹.

- **Cu buclă deschisă**, soluție care necesită efectuarea a două foraje până la nivelul apei freatice, la distanța de cel puțin 1,5 m unul față de celălalt. Această variantă constructivă este mai simplă întrucât fluidul care realizează schimbul de căldură este chiar apa freatică. Aceasta trebuie să curgă dinspre puțul de extragere către cel de evacuare. Alternativ, se poate foră doar puțul de extragere, apa fiind evacuată în ape de suprafață sau într-un șanț de irigații. Bucla deschisă poate fi utilizată și cu surse de apă de suprafață. Dezavantajul principal al sistemelor cu buclă deschisă constă în faptul că apa recirculată trebuie să îndeplinească anumite standarde privind puritatea și compoziția, astfel încât elementele chimice pe care le conține să nu fie corozive pentru pompă și pentru schimbătorul de căldură. Sărurile și mineralele dizolvate pot de asemenea să se depună pe pereții interiori ai sistemului, cu deosebire atunci când sistemul funcționează în regim de răcire, din acest motiv impunându-se tratamente anticalcar periodice. Deși aceste sisteme sunt superioare celor cu buclă închisă din punct de vedere al eficienței datorită transferului termic îmbunătățit, ele tind să fie interzise pe măsură ce se conștientizează importanța apei ca resursă naturală.

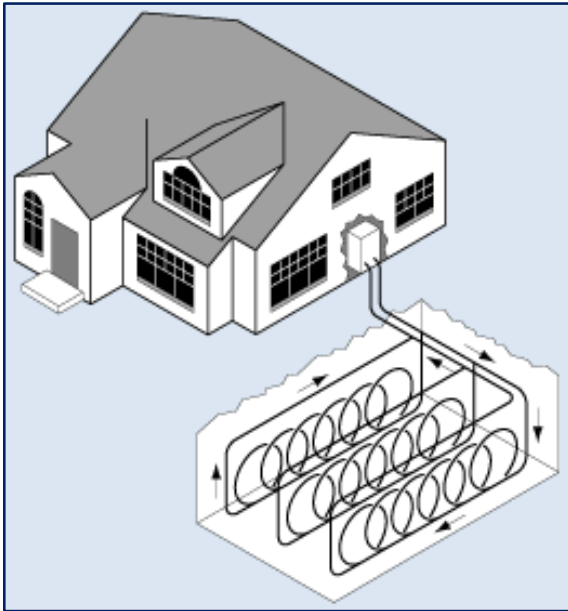
Întrucât solul are un caracter coroziv, conductele îngropate sunt realizate dintr-un material plastic (de obicei polietilenă de înaltă densitate), diametrul fiind suficient de mare pentru un schimb de căldură cât mai eficient. Suprafața de teren necesară pentru sistemele cu buclă închisă depinde de gradul de umiditate a solului și de tipul acestuia, eficiența fiind cu atât mai mare cu cât umiditatea este mai crescută. Pompele de căldură geotermale pot contribui la reducerea emisiilor de gaze de seră cu 23 – 44% comparativ cu pompele de căldură atmosferice (în funcție și de condițiile de climă) și cu 63 – 72% față sistemele clasice care utilizează doar energie electrică pentru încălzire sau răcire [63]. Deși aceste sisteme consumă energie electrică, eficiența lor energetică este cu 50 – 70% mai mare decât cea a sistemelor convenționale de încălzire și cu 20 – 40% mai bună decât a sistemelor clasice de răcire [64].

Ca variantă constructivă se utilizează și **pompele cu schimb direct de căldură**, la care agentul refrigerant circulă direct prin conducte de cupru îngropate în sol. Avantajele acestora sunt:

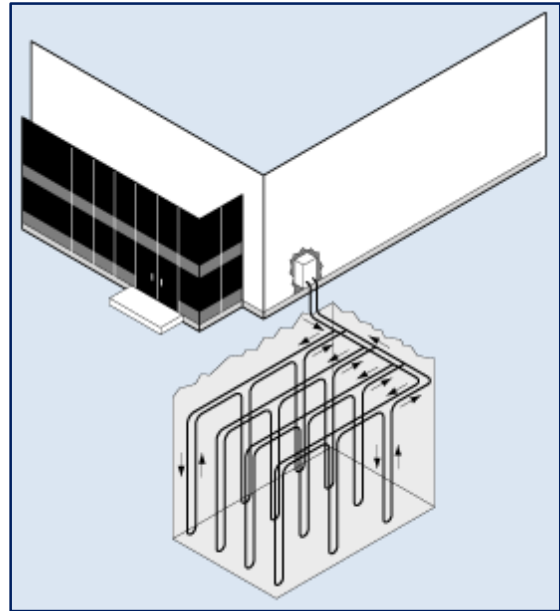
- Construcție mai simplă întrucât se elimină necesitatea existenței pompei de apă și a conductelor din material plastic, acestea fiind înlocuite de conducte de cupru mai scurte (15 – 30% din lungimea celor de plastic);
- În varianta amplasării verticale a țevelor în sol, diametrele găurilor de foraj sunt mai mici (jumătate din diametrele necesare pentru țevile de plastic), ceea ce se traduce prin costuri mai mici cu investiția inițială;
- Eficiență mai ridicată datorită:
 - reducerii consumului de energie electrică ca urmare a lipsei pompei de apă;

⁴¹ Fotografie realizată de Mark Johnson
(http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/81/Pond_Loop_Being_Sunk.jpg)

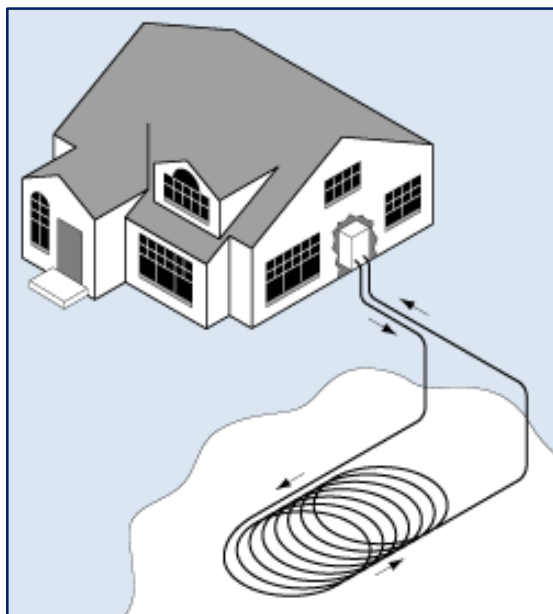
- reducerii pierderilor de căldură datorită eliminării schimbătorului de căldură agent refrigerant-apă;
- conductivității termice ridicate a cuprului în raport cu țevile de plastic; fluxul de căldură este însă limitat de conductivitatea termică a solului, motiv pentru care se recomandă ca sistemul de conducte să fie îngropat în soluri umede, în anumite cazuri fiind necesară irigarea.



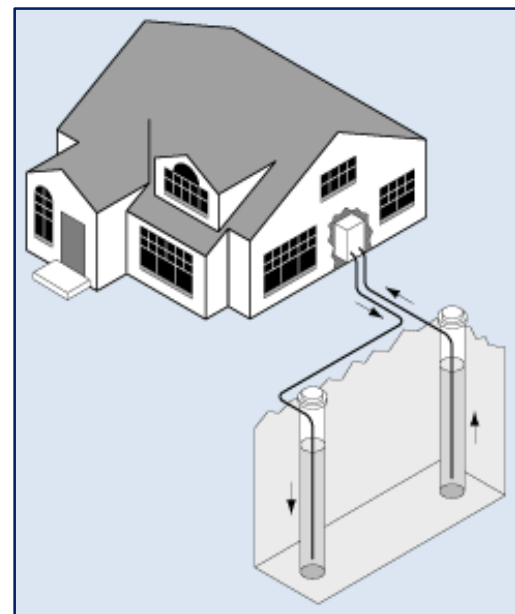
a)



b)



c)



d)

Fig. 4.9 – Soluții constructive de bază pentru pompele de căldură: cu buclă închisă orizontală (a), verticală (b) și în ape de suprafață (c); cu buclă deschisă (d)⁴²

⁴² Imagini realizate de U.S. Department of Energy

Aceste sisteme au și dezavantaje care au făcut ca utilizarea lor să fie sporadică:

- Sistemul necesită un compresor de dimensiuni mai mari precum și o cantitate semnificativ mai mare de agent frigorific;
- Apar probleme de fiabilitate datorită faptului că agentul frigorific în stare gazoasă se poate scurge prin imperfecțiuni mult mai mici decât cele prin care se scurge apa;
- Țevile de cupru trebuie protejate de acțiunea corozivă a solului prin utilizarea unui anod de sacrificiu sau a altor măsuri de protecție catodică.

4.6 Impactul centralelor geotermale asupra mediului

Deși funcționarea centralelor electrice geotermale este însoțită de emisii de bioxid de carbon și, în unele cazuri, de hidrogen sulfurat, bioxid de sulf, amoniac sau metan, toate acestea aflate în amestec cu aburul și/sau cu apa geotermală, aceste centrale reprezintă una dintre cele mai curate forme de exploatare a unei energii regenerabile disponibilă în cantități comerciale. Atunci când în boilerele centralei se produce separarea fazei gazoase, peste 90% din masa gazelor altele decât vaporii de apă este CO₂ și maxim 2% este hidrogen sulfurat (H₂S). Aceste gaze nu reprezintă însă mai mult de 5% în greutate din întreaga fază gazoasă [57]. Emisiile de CO₂ ale centralelor de tip “flash” reprezintă 5% din emisiile centralelor funcționând pe bază de gaze naturale.

În ceea ce privește hidrogenul sulfurat, procedura uzuală constă în captarea acestuia și reinjectarea în subsol sau transformarea lui în sulf ori acid sulfuric. Limita sub care trebuie menținut în gazele emise pentru a nu fi sesizabil este de o parte pe miliard. În funcție de particularitățile resursei exploatare, anumite centrale prezintă emisii vagi de metale nocive cum ar fi arsenicul, mercurul și antimoniul. În alte cazuri apar depuneri de săruri pe pereții interiori ai conductelor și ai altor echipamente. Înlăturarea lor nu trebuie să presupună depozitarea necorespunzătoare, întrucât se pot infiltra în stare dizolvată și pot afecta pânza freatică. Sarea și orice alte elemente poluante trebuie dizolvate/reintroduse în soluția reziduală a centralei înainte ca aceasta să fie reinjectată în subsol. Reinjectarea apei sau condensului provenit din aburul utilizat în subsol se impune atât din considerente de mediu cât și de asigurare a duratei de funcționare a centralei. În caz contrar rezerva naturală se poate diminua afectând atât capacitatea de producție a centralei cât și alți utilizatori potențiali. Centralele binare, cu circulația fluidului geotermal în buclă închisă, reprezintă soluția optimă din punct de vedere al impactului de mediu, întrucât sunt evitate emisiile de gaze și epuizarea resursei geotermale.

Gradul de exploatare a terenului în cazul centralelor geotermale (forarea puțurilor, amplasarea conductelor de suprafață, amplasarea construcției în sine) este mic în comparație cu gradul de exploatare aferent producției de energie din resurse clasice, considerând aici și terenul ocupat și afectat major de procedurile de extragerea a petrolului, cărbunelui, gazelor naturale sau minereului nuclear. De asemenea acesta este mai mic și decât în cazul centralelor hidroelectrice, ale căror lacuri de acumulare ocupă suprafețe vaste, mult mai mari decât orice centrală geotermală (calculat ca suprafață/MW capacitate de producție).

Capitolul 5

Energia valurilor

5.1 Elemente introductive

Potențialul energetic al mărilor și oceanelor constă în energia termică pe care o înmagazinează straturile de apă de suprafață sub influența radiației solare, precum și în energia mecanică furnizată de valuri, de curenții marini și de maree.

Din punct de vedere al cauzalității valurile pot fi clasificate ca fiind:

- Valuri de vânt, care se formează ca urmare a interacțiunii dintre masele de aer în mișcare și straturile de apă de suprafață. Lungimea și înălțimea unui val cresc cu creșterea distanței pe care are loc această interacțiune și cu durata și intensitatea acesteia.
- Valuri gravitaționale, care au lungime mare și sunt uniforme, simetrice, cu frecvență relativ constantă. Ele se formează în larg, după încetarea unei interacțiuni de lungă durată, intensificată, a vântului cu suprafața liberă a apei, fiind cunoscute sub denumirea de valuri de hulă. Valurile de hulă înmagazinează deci energia eoliană din zona de formare și o transportă pe distanțe mari, către zone în care vântul are intensitate scăzută sau chiar zero. În zonele de țarm de mică adâncime aceste valuri cresc semnificativ în înălțime și se deformează, producând brizanți.
- Valuri staționare, care se produc în mările închise sau parțial închise și reprezintă de fapt o pendulare a apei între țărmurile opuse.
- Valuri seismice, produse de mișcări seismice sau de lunecări de teren submarine, fiind o categorie rar întâlnită. Au lungimi foarte mari, de peste 500 km și se propagă cu viteze mari, de peste 500 km/h în larg, în toate direcțiile în raport cu zona în care au fost produse. În apropierea țărmului înălțimea lor crește pe măsură ce adâncimea apei scade, putând fi deosebit de violente.

- Valuri de navă, produse de deplasarea navelor; sunt oblice față de corpul navei iar caracteristicile lor depind de viteza și profilul navei.

Cercetările la nivel mondial se concentrează pe transformarea și valorificarea energiei valurilor de vânt, incluzând aici și valurile de hulă. Puterea medie pe care valurile o dezvoltă pe coasta de vest a Europei este de 50 kW pe fiecare metru de lungime a țărmului, însă aceste valori sunt mult mai mari în condiții de furtună, putând atinge și 1000 kW/m. S-a determinat că puterea medie specifică pe care o dezvoltă valurile oceanice este de 10...100 kW/m, în funcție de zonă [65]. Tabelul 5.1 prezintă corelația dintre viteza vântului și caracteristicile valurilor.

Tabelul 5.1 – Corelația dintre viteza vântului și caracteristicile valurilor⁴³

Viteza vântului [m/s]	Înălțime val [m]	Lungime val [m]	Perioada de apariție [s]
2 – 3	0,25	Maxim 10	2 – 3
10	2,5	40	5
16	5	85	7,5
25	11	1280	13
27 și peste	Peste 12	1400	16

5.2 Caracteristicile valurilor

Figura 5.1 prezintă principalele caracteristici dimensionale ale valurilor, presupunând că sunt valuri monocromatice, deci uniforme din punct de vedere dimensional și periodic. Adâncimea apei se măsoară față de înălțimea medie a valului. **Lungimea valului**, sau **lungimea frontului de val**, reprezintă distanța dintre două valuri consecutive iar, **perioada** este dată de timpul în care un val parcurge o distanță egală cu lungimea acestuia. **Amplitudinea** este calculată ca fiind distanța dintre suprafața apei în stare neperturbată și creasta valului, deci jumătate din înălțimea acestuia.

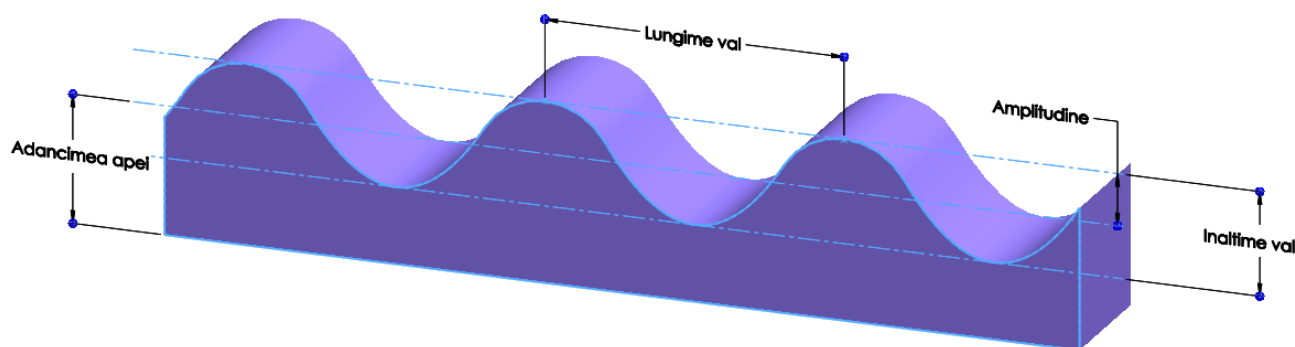


Fig. 5.1 – Caracteristicile dimensionale ale valurilor

⁴³ Sursa: Administrația Națională de Meteorologie (<http://vremea.meteoromania.ro/node/66>)

Trebuie menționat că moleculele de apă nu sunt transportate de val ci se mișcă în plan local, pe traiectorii circulare sau eliptice (figura 5.2), fiecare dintre ele în jurul unei poziții fixe. Valurile transportă însă energie, care începe să se disipeze în zonele de țărm cu adâncime mică.

Presupunând că profilul valului are o formă sinusoidală, perioada acestuia se poate calcula cu relația:

$$T = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \rho \lambda}{g}} \quad (5.1.1)$$

unde:

T reprezintă perioada valului, în secunde;

g este accelerația gravitațională, în m/s^2 ;

ρ este densitatea apei, în kg/m^3 ;

λ reprezintă lungimea valului, în m;

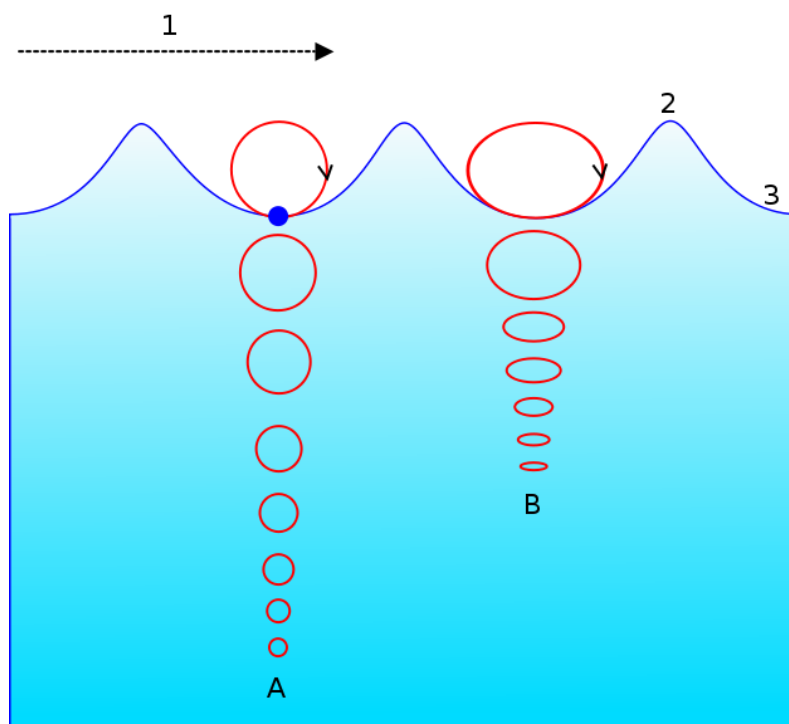


Fig. 5.2 – Traiectoriile moleculelor de apă sub influența valurilor; 1 – direcția de deplasare; 2 – creasta valului; 3 – baza valului⁴⁴

Viteza de propagare c a valului se mai numește și celeritate și se calculează ca fiind raportul dintre lungimea, respectiv perioada valului:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{g \cdot T}{2\pi} \quad (5.1.2)$$

⁴⁴ Imagine din domeniul public; sursa:

http://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power#mediaviewer/File:Wave_motion-i18n-mod.svg

Dacă A este amplitudinea valului, atunci energia potențială E pe unitatea de suprafață se calculează cu relația 5.1.3:

$$E = 0,5 \cdot \rho g A^2 \quad (5.1.3)$$

Puterea specifică P pe care o poate furniza valul se exprimă pe unitatea de lățime a acestuia (kW/m), lățimea fiind măsurată de-a lungul crestei valului, perpendicular pe direcția de propagare:

$$P = \frac{\rho g^2 A^2 T}{8\pi} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} = K \cdot H^2 \cdot T \quad (5.1.4)$$

unde H este înălțimea valului iar K este:

$$K = \frac{\rho g^2}{32\pi} \quad (5.1.5)$$

Densitatea apelor oceanice și marine variază cu adâncimea, latitudinea și temperatura, fiind cuprinsă în intervalul 1022...1027,5 kg/m³ în oceane, respectiv în intervalul 1004...1028 kg/m³ în mări. De exemplu, pentru o densitate a apelor de suprafață din Marea Neagră de 1018 kg/m³ coeficientul are valoarea $K = 0,975$, deci puterea specifică va fi:

$$P = 0,975 \cdot H^2 \cdot T \quad (5.1.6)$$

Aceste relații de calcul sunt valabile în condițiile în care înălțimea valurilor este mică în comparație cu lungimea frontului de val. Pentru valori mari ale înălțimii ecuațiile se vor corecta astfel încât să includă și termenii de neliniaritate, această teorie neconstituind însă un scop al prezentului capitol.

În condiții reale valurile sunt pancromatice (înălțimea și periodicitatea sunt variabile), astfel încât este necesar să fie definite anumite mărimi cu ajutorul cărora să poată fi caracterizată starea lor la un moment dat. Una dintre aceste mărimi este **înălțimea semnificativă** (H_s). Pentru a o calcula, se selectează o treime dintre cele mai mari valori ale înălțimilor măsurate și se face media lor.

O altă mărime este **perioada energetică** (T_e), care este definită ca fiind perioada unui val energetic monocromatic cu aceeași energie ca a valurilor pancromatice studiate și cu înălțimea egală cu înălțimea semnificativă. Relația 5.1.7 este determinată statistic și poate fi utilizată pentru a calcula puterea disponibilă în condiții de valuri pancromatice.

$$P = (0,3 \dots 0,5) \cdot H_s^2 \cdot T_e \quad (5.1.7)$$

unde se poate utiliza cu o bună aproximare valoarea 0,4 pentru multiplicator.

Figura 5.3 prezintă distribuția puterii specifice medii a valurilor la nivel mondial.

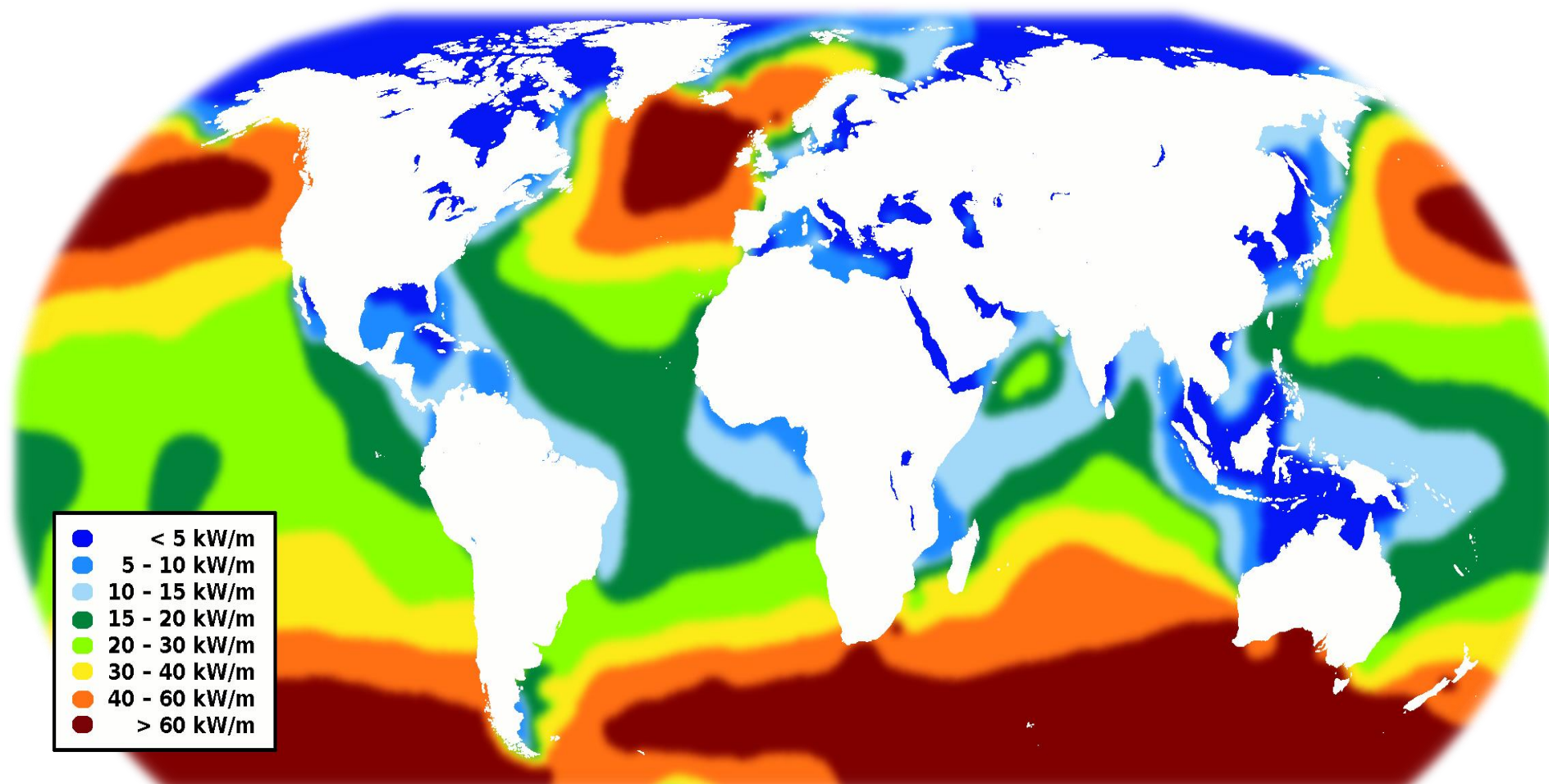


Fig. 5.3 – Distribuția resursei energetice a valurilor la nivel mondial (modelare realizată de Ingvald Straume)

5.3 Echipamente de conversie a energiei valurilor

Scopul acestor echipamente constă în captarea energiei valurilor și conversia ei în energie electrică. Versiunile constructive existente se împart în două categorii principale: cu captarea energiei la suprafața apei și cu captarea energiei pe baza fluctuațiilor de presiune la mică adâncime. Convertoarele de energie a valurilor pot fi flotante sau submersate în întregime imediat sub suprafața apei. De asemenea, pot fi amplasate pe țărm sau pe fundul mării în ape de adâncime mică. În rândurile următoare vor fi trecute în revistă principalele tipuri de echipamente care au potențial din punct de vedere al fezabilității tehnico-economice.

Captatoarele oscilante flotante, numite și atenuatoare, sunt formate din mai multe segmente flotante articulate, așezate perpendicular pe direcția de deplasare a valului. Șirul de segmente se “mulează” pe suprafața apei, luând forma valurilor. În zona articulațiilor se află elementele care preiau energia mecanică a valurilor. Cel mai cunoscut sistem de acest tip este Pelamis (figura 5.4). Pistoanele din zona articulațiilor (figura 5.5) pompează ulei către motoarele hidraulice amplasate în interiorul fiecărui segment care, la rândul lor, antrenează generatoare electrice. Energia electrică este transportată la țărm prin cabluri submersate.

Lungimea mare a fiecărui segment este calculată astfel încât să minimizeze forțele hidrodinamice care, în cazul valurilor înalte, pot da naștere unor solicitări mecanice semnificative în articulații. Prin urmare echipamentul va răspunde curburii valurilor și nu înălțimii acestora, generând în același timp deplasări suficiente de mari în articulații chiar și atunci când valurile au înălțime mică. Firma germană E.ON în colaborare cu firma scoțiană Scottish Power au în plan dezvoltarea unui parc de 66 instalații Pelamis în largul coastelor scoțiene, cu o capacitate totală de 50 MW [66].



Fig. 5.4 – Sistem Pelamis în funcțiune, cu 3 segmente articulate⁴⁵

⁴⁵ Sursa: http://en.wikipedia.org/wiki/Pelamis_Wave_Energy_Converter#mediaviewer/File:Pelamis_at_EMEC.jpg

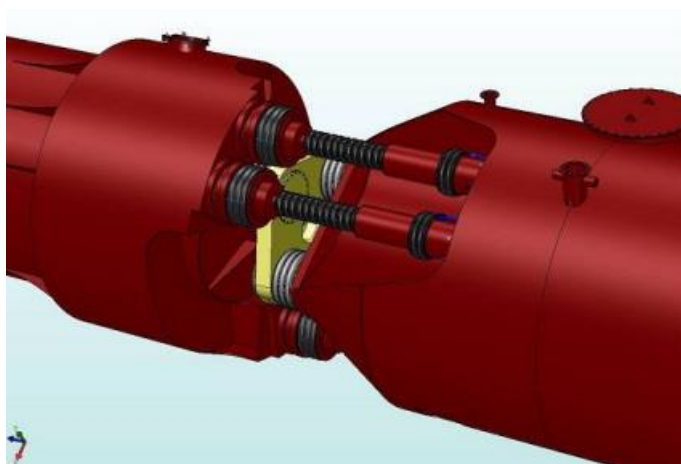


Fig. 5.5 – Articulația dintre două segmente ale sistemului Pelamis⁴⁶

Din aceeași categorie face parte și sistemul Salter Duck, care valorifică mișcarea de ruluu a unor elemente flotante ancorate de fundul mării (figura 5.6). La trecerea valurilor, fiecare element va avea o mișcare oscilatorie de rotație în jurul unei axe longitudinale, care poate fi utilizată pentru antrenarea unui generator electric. S-a calculat că sistemul poate capta în jur de 90% din energia valurilor.

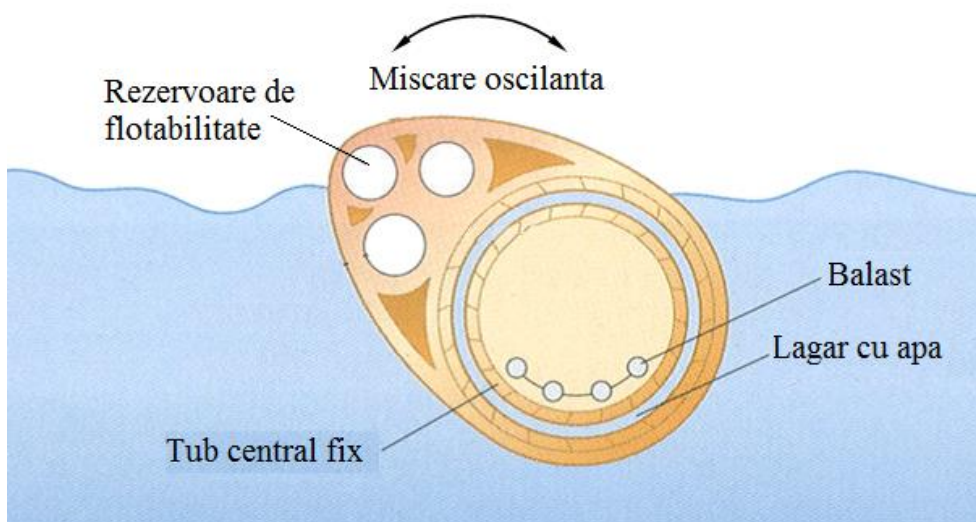


Fig. 5.6 – Sistemul “Salter Duck” de conversie a energiei valurilor⁴⁷

Echipamentele din această categorie au totuși unele limitări din punct de vedere al energiei pe care o pot produce, întrucât aceasta nu poate depăși energia potențială a valurilor. Energia disponibilă este maximă la suprafață și scade cu adâncimea. De aceea, cu cât un element flotant este scufundat mai mult, cu atât energia pe care o poate extrage este mai mică. Un alt aspect important care trebuie luat în considerare este lungimea elementului flotant în raport cu lungimea

⁴⁶ Sursa: <http://www.ghidelectric.ro/stire-1620-Pelamis-sistemul-care-transforma-puterea-valurilor-in-energie-electrica.html>

⁴⁷ Imagine adaptată; sursa: <http://people.bath.ac.uk/mh391/WavePower/saltersduck.html>

frontului de val. Dacă lungimea acestuia depășește un sfert din lungimea frontului de val, elementul se va roti în jurul centrului de masă, ceea ce va avea ca efect reducerea eficienței. De asemenea, dacă lungimea este mai mare decât lungimea frontului de val, mișcarea oscilatorie va înceta ca urmare a faptului că elementul flotant se va afla simultan pe crestele a cel puțin două valuri.

Punctele de absorbție axial-simetrice sunt elemente flotante ancorate de fundul mării, cu dimensiuni mici în raport cu lungimea valului, ceea ce le permite să absoarbă energia valurilor indiferent de direcția lor de deplasare (figura 5.7). Mișcarea relativă dintre elementul fixat pe fundul mării și cel flotant este folosită pentru a antrena un generator electric, transmiterea mișcării făcându-se de obicei hidraulic.

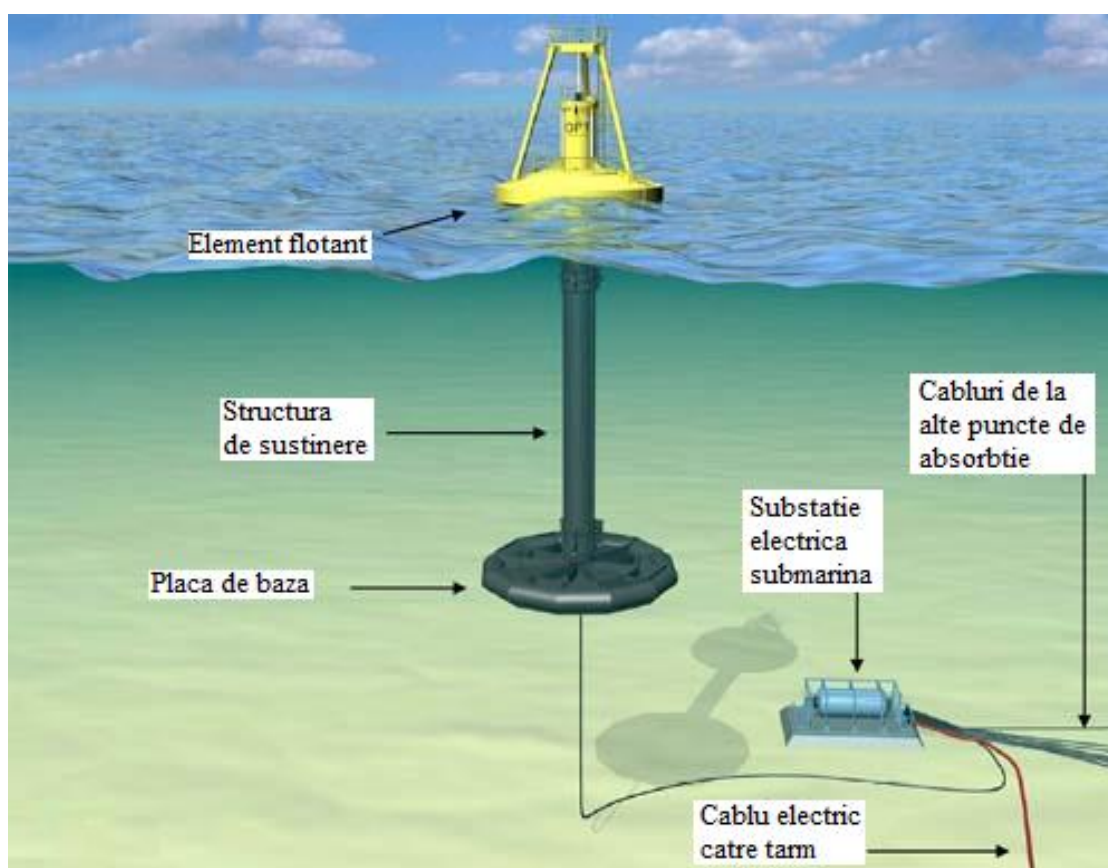


Fig. 5.7 – Punct de absorbție axial-simetric proiectat de Ocean Power Technology⁴⁸

Convertoarele oscilației de nivel al valului au în componență panouri flotante, amplasate imediat sub suprafață (figura 5.8) sau la suprafață, fixate de un suport amplasat pe fundul mării prin intermediul unui braț pivotant. Mișcarea moleculelor de apă antrenează panourile într-o mișcare oscilatorie pe direcția de deplasare a valului. Pistoanele cuplate la panouri generează presiune într-un circuit hidraulic, antrenând un generator electric prin intermediul unui motor hidraulic.

⁴⁸ Imagine adaptată; sursa: <http://oceanenergy.wikidot.com/pointabsorbers>



Fig. 5.8 – Principiul de funcționare al convertoarelor oscilante imersate⁴⁹

Cele mai cunoscute aplicații în acest domeniu sunt echipamentele Oyster, realizate de firma Aquamarine Power și convertorul Waveroller produs de firma finlandeză AW Energy.

Captatorul pneumatic al energiei valurilor, denumit și **piston lichid** sau **coloana oscilantă de apă**, transferă energia generată de mișcarea oscilantă verticală a valurilor către aerul dintr-o incintă construită pe țărm sau în larg. Figura 5.9 prezintă principiul de funcționare al acestor sisteme. Aerul este pompat, respectiv aspirat în mod alternativ în incintă, antrenând o turbină cuplată la un generator electric. În cele mai multe cazuri se utilizează turbine bidirecționale Wells datorită faptului că profilul simetric al paletelor turbinei permit rotirea acesteia în același sens indiferent de direcția deplasării curentului de aer. Turbina Hanna reprezintă o variantă mai eficientă, cu două rotoare cu palete asimetrice și unghi de atac mic, dispuse în oglindă.

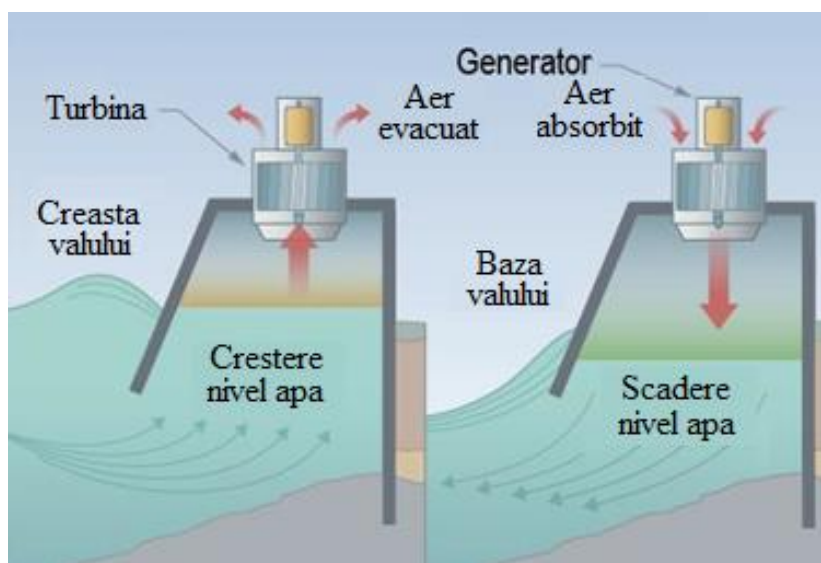


Fig. 5.9 – Principiul de funcționare al captatoarelor pneumatice⁵⁰

⁴⁹ Sursa: <http://www.ison21.es/wp-content/uploads/2009/11/wave-energy-oyster-aquamarine-power.jpg>

⁵⁰ Figura modificată (<http://en.openei.org/wiki/File:OscillatingWaterColumn.jpg>)

Instalațiile cu plan înclinat sunt structuri care utilizează ascensiunea apei pe o pantă artificială (datorită vitezei de deplasare a valului) pentru a umple un bazin până la un nivel aflat deasupra nivelului mediu al mării. Apa din bazin se scurge în mare printr-unul sau mai multe spații în care sunt amplasate turbine cuplate la generatoare electrice. Aceste instalații pot fi construite pe țărm, unde valurile pot escalada un plan înclinat pentru a umple rezervorul, sau pot fi flotante. Figura 5.10 prezintă o structură flotantă care funcționează pe acest principiu.

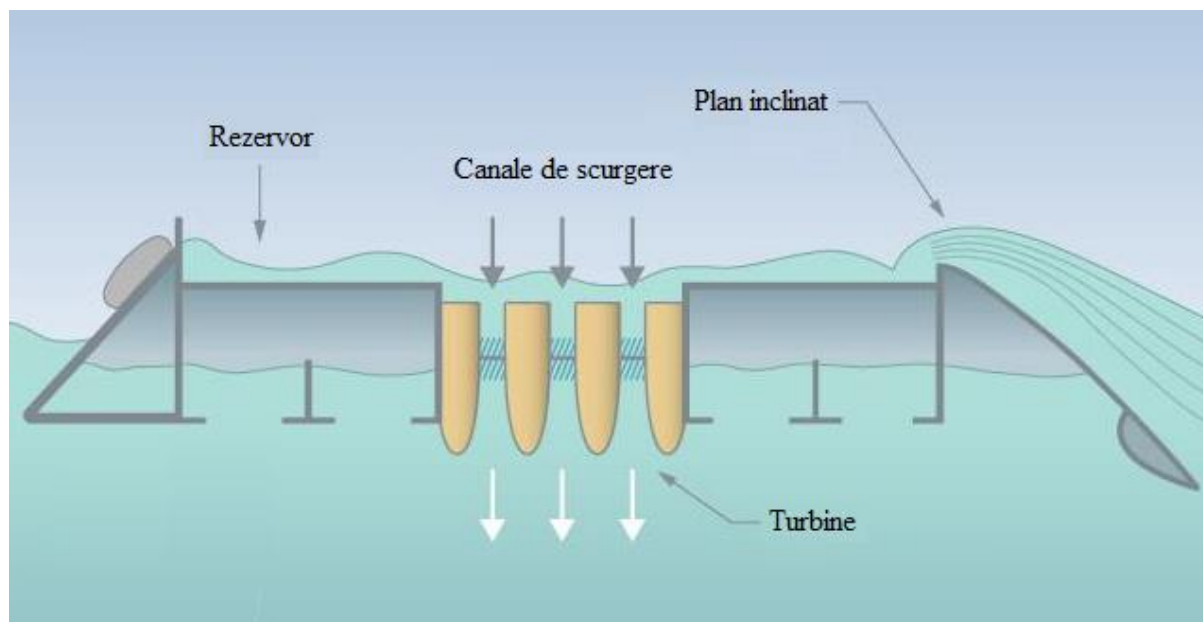


Fig. 5.10 – Principiul de funcționare al unei structuri flotante cu plan înclinat și rezervor⁵¹

Tapchan este un sistem aparte din această categorie (figura 5.11). Distanța dintre pereții canalului de aducțiune scade progresiv, ceea ce are ca efect creșterea amplitudinii valului. În cele din urmă acesta se va revărsa peste pereții rezervorului aflat deasupra nivelului mării. Energia cinetică a valului devine energie potențială a apei stocate în rezervor. Aceasta se va scurge în mare printr-o turbină Kaplan. Pentru a fi fezabil, sistemul se pretează zonelor de coastă în care energia valurilor este peste media anuală și cu adâncimi relativ mari lângă țărm.

5.4 Impactul asupra mediului

Unul dintre efectele pozitive documentate în baza informațiilor colectate până în prezent, constă în creșterea biodiversității în zonă datorită faptului că diverse specii de midii, scoici și alge se fixează pe elementele structurale și pe cablurile de fixare și de transport al energiei electrice către țărm. De exemplu, în perioada 2005-2006 s-a constatat că aproximativ 150 kg de organisme marine s-au fixat pe un singur generator flotant cu diametrul de trei metri [67]. Rezultatele modelării pe calculator arată că această “ancrasare” biologică nu afectează performanțele sistemului în cauză. Fundațiile de beton de pe fundul mării (acolo unde sunt necesare) acționează ca recife artificiale, fiind atractive pentru organismele marine.

⁵¹ Figură adaptată; sursa: <http://en.openei.org/wiki/File:WaveOvertoppingReservoir.jpg>

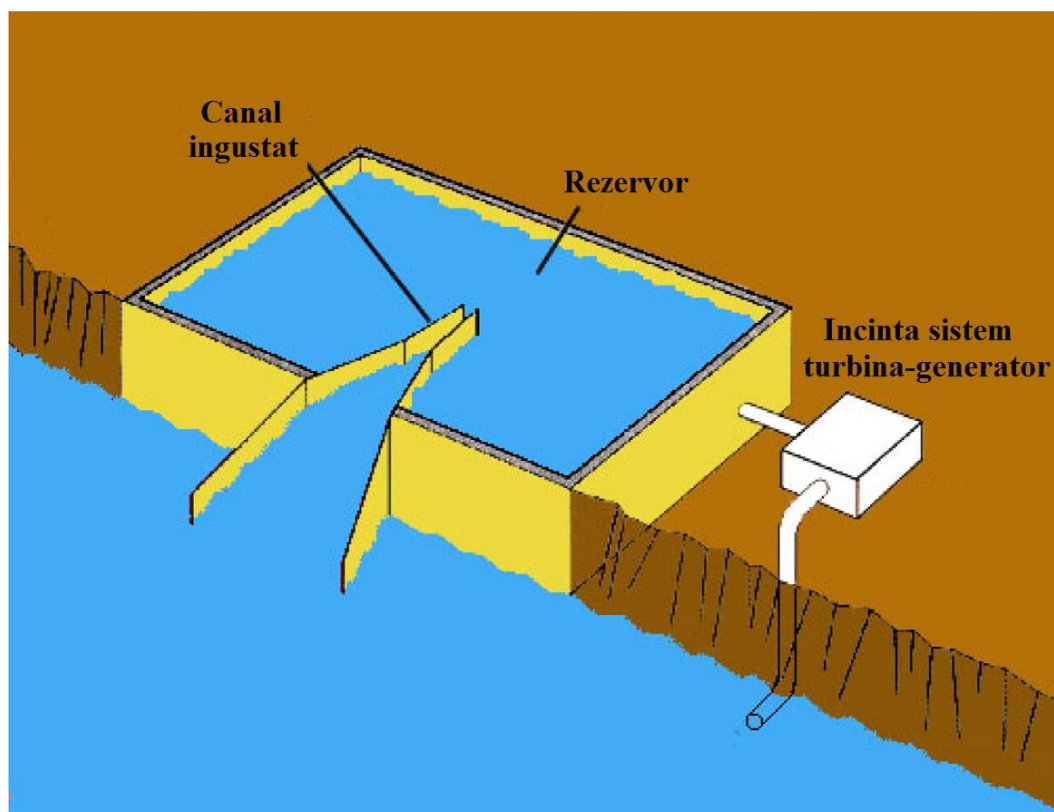


Fig. 5.11 – Principiul de funcționare al sistemului TAPCHAN [68]

Instalarea parcurilor de mari dimensiuni de generatoare marine poate afecta negativ activitatea piscicolă în zonă. Pe de altă parte acest aspect are și o latură pozitivă, ca urmare a faptului că, din acest motiv, regiunile respective pot deveni arii protejate în care va crește densitatea și diversitatea diferitelor specii de pești.

Deși sunt puține informații legate de efectele zgomotului subacvatic produs pe parcursul construirii și funcționării sistemelor de valorificare a energiei valurilor, există semnale conform cărora sunt afectate speciile care folosesc sisteme biologice de ecolocație pentru orientare, comunicare, vânat și detectarea altor prădători (unele specii de pești, delfini, balene și foci).

De asemenea, există cercetări în derulare pentru a identifica efectele câmpurilor electromagnetice produse de cablurile electrice subacvatice asupra organismelor marine migratoare care utilizează câmpul electromagnetic terestru pentru a se orienta.

Cele mai noi și mai detaliate informații și publicații legate de efectele acestor sisteme asupra ecosistemului marin sunt disponibile pe platforma online Tethys⁵².

⁵² <http://tethys.pnnl.gov/>