

## Ciclul Rankine cu abur (SRC) - aplicație

(Adaptare după o aplicație la cursul “*Fundamentals of Advanced Energy Conversion*” al universității M.I.T. - 2004)

<http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-60-fundamentals-of-advanced-energy-conversion-spring-2004/assignments/>

Pentru dezvoltarea rapidă a unei regiuni din Uniunea Europeană, a fost prevăzută construirea unei centrale termoelectrice funcționând după un ciclu Rankine cu abur (SRC), cu puterea electrică instalată de 1000 MW.

Să se determine consumul de resurse necesar pentru funcționarea instalației, în următoarele variante de alimentare cu căldură:

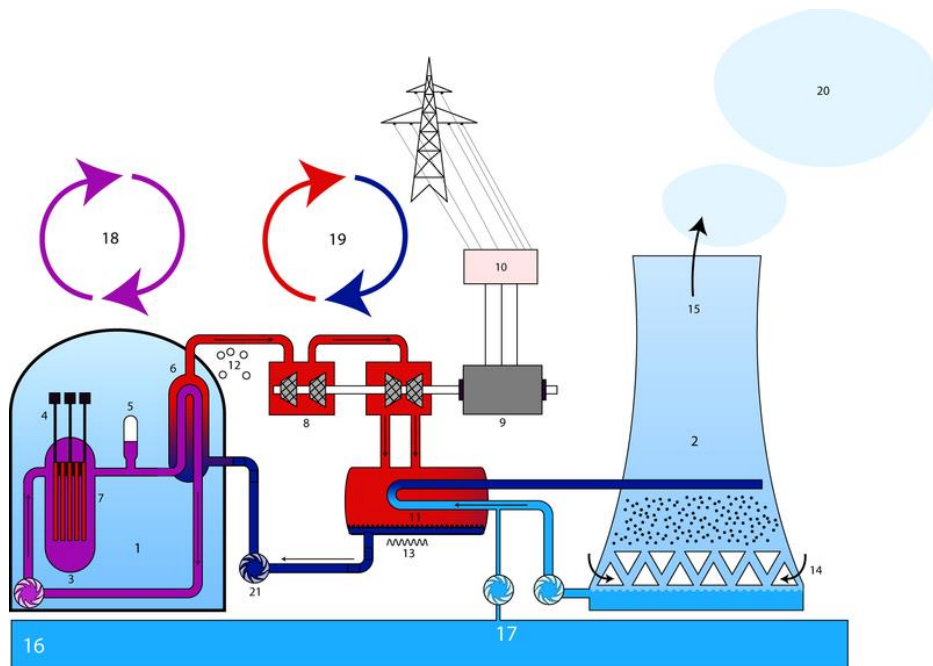
1. Provenită din fisiune nucleară
2. Provenită din arderea cărbunelui
3. Provenită din arderea gazului metan
4. Provenită din arderea păcurii
5. Provenită din energie solară (cu concentratori parabolici)
6. Provenită din energie solară (cu turn solar)

Se consideră că instalația funcționează 90% din durata unui an.

Se consideră că randamentul termic al instalației termoelectrice care funcționează după ciclul Rankine este de 35%.

### Varianta 1. Instalație SRC alimentată cu căldură provenită din fisiune nucleară

În figura alăturată este prezentată schema de principiu a unei instalații nucleare electrice.



Schema de principiu a unei centrale nucleare electrice

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuclear\\_power\\_plant-pressurized\\_water\\_reactor-PWR.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nuclear_power_plant-pressurized_water_reactor-PWR.png)

1 - Blocul reactorului; 2 - Turnul de răcire; 3 - Reactor; 4 - Bare de control (cu rol de inhibare a fisiunii);

5 - Rezervor presurizat pt. agentul primar de răcire

(presiunea ridicată de lucru împiedică fierberea / vaporizarea agentului de răcire);

6 - Generatorul de abur; 7 - Bare combustibile; 8 - Turbine; 9 - Generator electric;

10 - Transformator de înaltă tensiune; 11 - Condensator; 12 - Abur; 13 - Condens (lichid); 14 - Aer de răcire;

15 - Aer cald cu umiditate ridicată; 16 - Sursă de apă (râu, fluviu); 17 - Priză de apă de răcire;

18 - Circuitul primar (apă grea  $D_2O$  în cazul utilizării uraniului natural / neîmbogățit ca și combustibil);

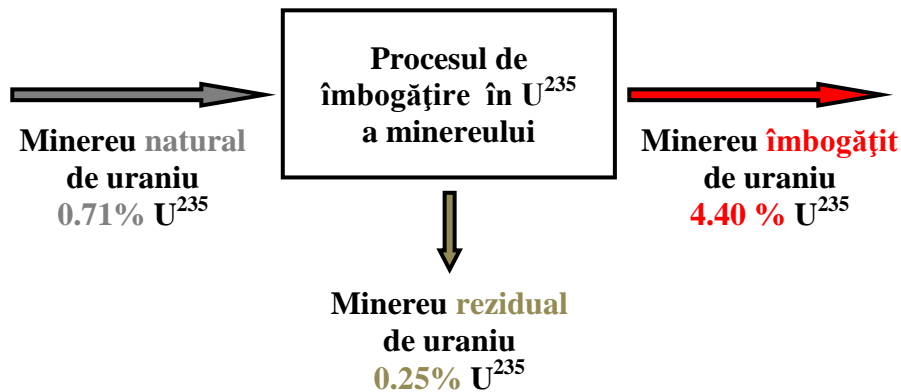
19 - Circuitul secundar (apă  $H_2O$ ); 20 - Vapori de apă evacuați în aer; 21 - Pompă de recirculare

Se consideră că instalația de fisiune nucleară utilizează ca și combustibil  $U^{235}$ .

Se consideră că minereul natural de  $U^{235}$  are o concentrație masică de 0.71%.

În vederea utilizării în reactorul nuclear, minereul natural de uraniu este supus unui proces de îmbogățire, până la concentrația masică a  $U^{235}$  de 4.4%. În urma acestui proces rezultă minereu rezidual în care concentrația de  $U^{235}$  este de 0.25%.

Schema de principiu a procesului de îmbogățire în  $U^{235}$  a minereului, este prezentată în figura alăturată.



Schema de principiu a procesului de îmbogățire în  $U^{235}$  a minereului

Ecuția de bilanț masic pentru minereul de uraniu, în procesul de îmbogățire se poate scrie:

$$m_{UN} = m_{UI} + m_{UR}$$

unde:

$m_{UN}$  [kg] este cantitatea (masa) de minereu de uraniu natural care participă la îmbogățire;  
 $m_{UI}$  [kg] este cantitatea (masa) de minereu de uraniu îmbogățit care rezultă din îmbogățire;  
 $m_{UR}$  [kg] este cantitatea (masa) de minereu de uraniu rezidual care rezultă din îmbogățire.

Se consideră că toate cantitățile din ecuația de bilanț masic pentru minereul de uraniu, în procesul de îmbogățire, sunt considerate pentru o durată de 1 an (365 zile).

Ecuția de bilanț masic pentru  $U^{235}$  din minereul de uraniu, în procesul de îmbogățire se poate scrie:

$$m_{U^{235}UN} = m_{U^{235}UI} + m_{U^{235}UR}$$

unde:

$m_{U^{235}UN}$  [kg] este cantitatea (masa) de  $U^{235}$  din minereul natural;  
 $m_{U^{235}UI}$  [kg] este cantitatea (masa) de  $U^{235}$  din minereul îmbogățit;  
 $m_{U^{235}UR}$  [kg] este cantitatea (masa) de  $U^{235}$  din minereul rezidual.

Cantitățile (masele) de  $U^{235}$  din cele trei tipuri de minereu, pot fi determinate cu relațiile:

$$\begin{aligned} m_{U^{235}UN} &= c_{U^{235}UN} \cdot m_{UN} \\ m_{U^{235}UI} &= c_{U^{235}UI} \cdot m_{UI} \\ m_{U^{235}UR} &= c_{U^{235}UR} \cdot m_{UR} \end{aligned}$$

unde:

$c_{U^{235}UN} = 0.71\%$  este concentrația masică a  $U^{235}$  din minereul de uraniu natural;  
 $c_{U^{235}UI} = 4.40\%$  este concentrația masică a  $U^{235}$  din minereul de uraniu îmbogățit;  
 $c_{U^{235}UR} = 0.25\%$  este concentrația masică a  $U^{235}$  din minereul de uraniu rezidual.

Cu aceste notații ecuația de bilanț masic pentru  $U^{235}$  din minereul de uraniu, în procesul de îmbogățire se poate scrie sub forma:

$$c_{U^{235}}^{UN} \cdot m_{UN} = c_{U^{235}}^{UI} \cdot m_{UI} + c_{U^{235}}^{UR} \cdot m_{UR}$$

Din ecuația de bilanț masic pentru minerul de uraniu se obține:

$$m_{UR} = m_{UN} - m_{UI}$$

Înlocuind în ecuația de bilanț masic pentru  $U^{235}$  se obține:

$$\begin{aligned} c_{U^{235}}^{UN} \cdot m_{UN} &= c_{U^{235}}^{UI} \cdot m_{UI} + c_{U^{235}}^{UR} \cdot (m_{UN} - m_{UI}) \\ &=> \\ (c_{U^{235}}^{UN} - c_{U^{235}}^{UR}) \cdot m_{UN} &= (c_{U^{235}}^{UI} - c_{U^{235}}^{UR}) \cdot m_{UI} \\ &=> \\ m_{UI} &= (c_{U^{235}}^{UN} - c_{U^{235}}^{UR}) / (c_{U^{235}}^{UI} - c_{U^{235}}^{UR}) \cdot m_{UN} \end{aligned}$$

În aceasta relație se notează:  $(c_{U^{235}}^{UN} - c_{U^{235}}^{UR}) / (c_{U^{235}}^{UI} - c_{U^{235}}^{UR}) = p_{UI-UN}$ , iar această mărime reprezintă ponderea de conversie a minereului natural de uraniu în minereu îmbogățit de uraniu.

Cu notația definită anterior se obține:

$$m_{UI} = p_{UI-UN} \cdot m_{UN}$$

Pentru exemplul considerat se obține:  $p_{UI-UN} = 0.11084$  (11.084%), respectiv:

$$m_{UI} = 0.11084 \cdot m_{UN}$$

Acest rezultat are semnificația că *numai* cca. 10% (11.08%) din cantitatea (masa) de minereu natural de uraniu, rezultă din procesul de îmbogățire sub formă de minereu de uraniu îmbogățit și aproape 90% (88.92%) din minereul natural de uraniu, se transformă în procesul de îmbogățire în minereu rezidual de uraniu.

Cantitatea (masa) de  $U^{235}$  din minereul îmbogățit (care participă efectiv la reacția de fisiune), se determină cu relația care a fost prezentată anterior:

$$m_{U^{235}}^{UI} = c_{U^{235}}^{UI} \cdot m_{UI} = c_{U^{235}}^{UI} \cdot p_{UI-UN} \cdot m_{UN} = p_{U^{235}-UN} \cdot m_{UN}$$

Pentru exemplul considerat se obține  $p_{U^{235}-UN} = 0.004877$  (0.48777%), respectiv:

$$m_{U^{235}}^{UI} = 0.004877 \cdot m_{UN}$$

Notația  $p_{U^{235}-UN}$  are semnificația ponderii  $U^{235}$  care participă la reacția de fisiune, în minereul natural de uraniu.

Acest rezultat are semnificația că *numai* cca. 0.4877% din minereul de uraniu natural, este efectiv utilizat în procesul de fisiune.

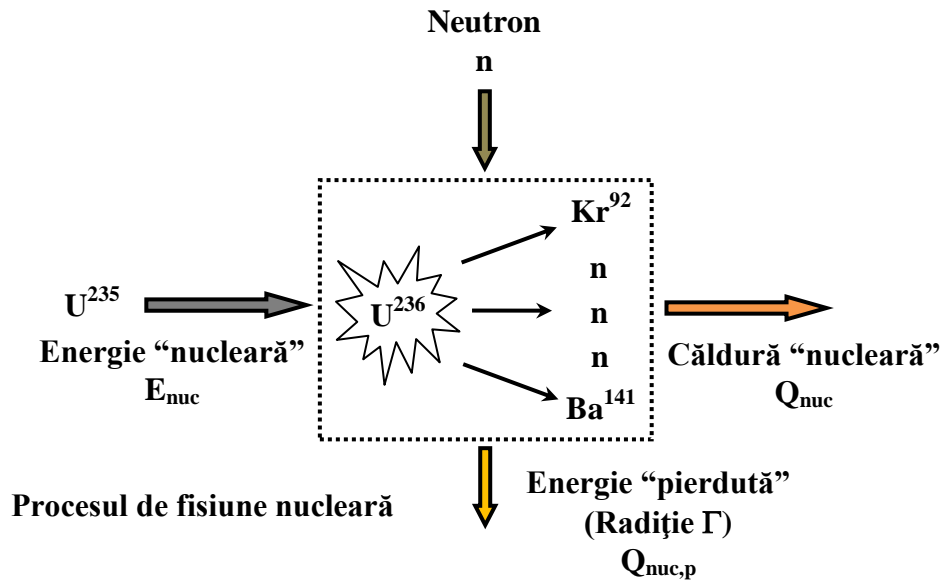
Cantitatea de energie “nucleară” conținută de o cantitate de 1 g de  $U^{235}$  care participă la reacția de fisiune este de 1 MW zi = 24 MWh:

$$E_{nuc,1g} = 1 \text{ MW zi} = 24 \text{ MWh}$$

Energia “nucleară” se consideră că este energia conținută în nucleele de  $U^{235}$  din minereul îmbogățit, care participă la reacția de fisiune.

Se consideră că randamentul de conversie a energiei “nucleare” în căldură, prin fisiune nucleară, este de 95%.

Schema de principiu a procesului de conversie prin fisiune a energiei nucleare în căldură este prezentată în figura alăturată.



Schema de principiu a procesului de conversie prin fisiune a energiei nucleare în căldură

$U^{235}$  – Izotop de uraniu, conținut de minereul îmbogățit de uraniu;  $n$  – neutron(i);

$U^{236}$  – Izotop de uraniu care înglobează neutronul participant la fisiune (instabil);

$Kr^{92}$  – Izotop de kripton;  $Ba^{141}$  – Izotop de bariu;

În urma procesului de fisiune rezultă căldură (nucleară) și radiație  $\Gamma$ , care reprezintă energie pierdută

Cantitatea de energie nucleară care participă la procesul de fisiune ( $E_{nuc}$ ) (respectiv cantitatea de energie nucleară conținută de cantitatea de  $U_{235}$  care participă la procesul de fisiune) se determină cu relația:

$$E_{nuc} = m_{U^{235}} \cdot E_{nuc,1g} = p_{U^{235}} \cdot m_{UN} \cdot E_{nuc,1g} = p_{U^{235}} \cdot E_{nuc,1g} \cdot m_{UN}$$

$m_{UN}$  este cantitatea de minereu de uraniu natural, exprimată în [g] participantă la reacția de fisiune într-un an (365 zile).

În exemplul considerat:

$$p_{U^{235}} = 0.004877 \text{ (0.4877\%)} \\ E_{nuc} = 0.004877 \cdot 1 \cdot m_{UN} \text{ [MW zi]} = 0.004877 \cdot m_{UN} \text{ [MW zi]}$$

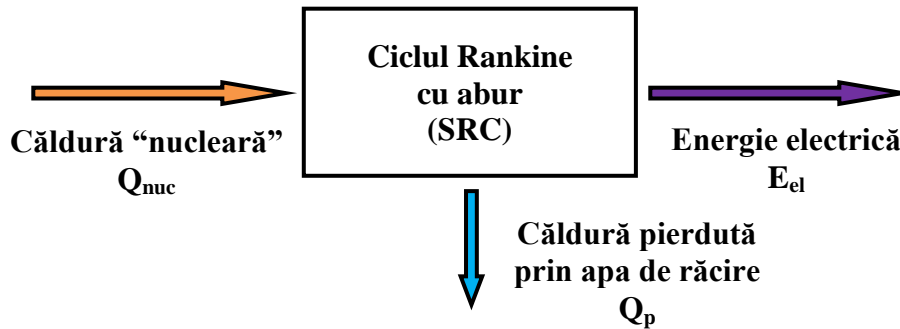
Randamentul de conversie a energiei nucleare în căldură, prin fisiune nucleară ( $\eta_{nuc}$ ), se definește prin relația:

$$\eta_{nuc} = \frac{Q_{nuc}}{E_{nuc}} \Rightarrow Q_{nuc} = \eta_{nuc} \cdot E_{nuc} \\ Q_{nuc} = \eta_{nuc} \cdot p_{U^{235}} \cdot E_{nuc,1g} \cdot m_{UN}$$

În exemplul considerat:

$$\eta_{nuc} = 95\%; Q_{nuc} = 0.95 \cdot 0.004877 \cdot 1 \cdot m_{UN} \text{ [MW zi]} = 0.00463 \cdot m_{UN} \text{ [MW zi]}$$

Căldura “nucleară” obținută în procesul de fisiune ( $Q_{nuc}$ ), reprezintă căldura care se transformă în energie electrică prin intermediul ciclului Rankine cu abur (SRC). Schema energetică de principiu a procesului de conversie a căldurii în electricitate, este prezentată în figura alăturată.



Schema energetică de principiu a procesului de conversie a căldurii “nucleare” în electricitate

Randamentul termic al ciclului Rankine ( $\eta_t$ ) se definește prin relația:

$$\eta_t = \frac{E_{el}}{Q_{nuc}} \Rightarrow E_{el} = \eta_t \cdot Q_{nuc}$$

Se consideră că randamentul termic al instalației termoelectrice care funcționează după ciclul Rankine este de 35%.

$$\eta_t = 35\%$$

Instalația analizată funcționează 90% din durata unui an. Se poate considera că instalația prezintă un randament de funcționare ( $\eta_f$ ), care se definește prin raportul dintre numărul de zile din an în care instalația funcționează ( $n_f$ ) și numărul total de zile din an ( $n_a = 365$ ):

$$\eta_f = \frac{n_f}{n_a} \Rightarrow n_f = \eta_f \cdot n_a$$

În exemplul considerat:

$$\eta_f = 90\%; n_f = 0.9 \cdot 365 = 328.5 \text{ zile / an}$$

Numărul de zile din an în care instalația funcționează ( $n_f$ ), reprezintă tocmai durata anuală de funcționare a instalației.

Energia electrică totală produsă anual ( $E_{el}$ ), poate fi calculată în funcție de puterea electrică instalată ( $P_{el}$ ) și de durata anuală de funcționare a instalației, cu relația.

$$E_{el} = P_{el} \cdot n_f = P_{el} \cdot \eta_f \cdot n_a$$

Înlocuind în această relație, energia electrică totală produsă anual ( $E_{el}$ ), cu expresia de calcul a aceleiași mărimi, în funcție de randamentul termic al ciclului Rankine ( $\eta_t$ ) se obține:

$$P_{el} \cdot \eta_f \cdot n_a = E_{el} = \eta_t \cdot Q_{nuc}$$

Înlocuind în această relație, expresia de calcul a căldurii “nucleare” obținute în procesul de fisiune ( $Q_{nuc}$ ), în funcție de parametrii procesului de îmbogățire a minereului de uraniu și în funcție de randamentul procesului de fisiune, se obține:

$$P_{el} \cdot \eta_f \cdot n_a = \eta_t \cdot \eta_{nuc} \cdot p_{U-235-UN} \cdot E_{nuc,1g} \cdot m_{UN}$$

Această relație permite calculul cantității de minereu natural de uraniu, necesară pentru funcționarea instalației timp de 1 an, cu relația:

$$m_{UN} = \frac{P_{el} \cdot \eta_f \cdot n_a}{\eta_t \cdot \eta_{nuc} \cdot p_{U^{235}_{-UN}} \cdot E_{nuc,1g}}$$

Cantitatea de minereu natural de uraniu necesară pentru funcționarea instalației timp de 1 an ( $m_{UN}$ ), este exprimată în [g/an].

În exemplul considerat:

$$m_{UN} = \frac{1000 \cdot 0.9 \cdot 365}{0.35 \cdot 0.95 \cdot 0.004877 \cdot 1} = 2025728848 \text{ g/an} = 202.57 \text{ t/an} = 0.55 \text{ t/zi}$$

În consecință, *cantitatea de minereu natural de uraniu, necesară pentru funcționarea instalației Rankine cu abur (SRC), alimentată cu căldură provenită din fisiune nucleară, este de cca. 0.55 t/zi.*

## Varianta 2. Instalație SRC alimentată cu căldură provenită din arderea cărbunelui

Combustibilul utilizat este lignitul autohton, cu o căldură de ardere (putere calorică) de (5800...7500) kJ/kg, extras din bazinul carbonifer Oltenia.

Se consideră căldura inferioară de ardere (puterea calorică inferioară) a cărbunelui ( $H_i$ ) la valoarea medie de 6650 kJ/kg.

$$H_i = 6650 \text{ kJ/kg}$$

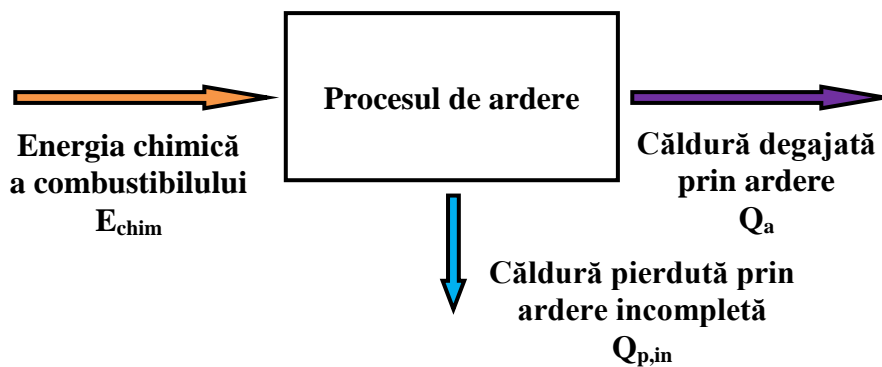
Căldura inferioară de ardere (puterea calorică inferioară) a combustibilului ( $H_i$ ), reprezintă energia chimică pe care o conține combustibilul ( $E_{chim}$ ) și care poate fi transformată în căldură prin ardere.

Energia chimică pe care o conține combustibilul ( $E_{chim}$ ), depinde de cantitatea (masa) de combustibil ( $m_{cb}$ ) care participă la procesul de ardere și se determină cu relația:

$$E_{chim} = m_{cb} \cdot H_i$$

Având în vedere imperfecțiunile procesului de ardere, numai o parte din energia chimică pe care o conține combustibilul ( $E_{chim}$ ) se va transforma prin ardere în căldură ( $Q_a$ ), iar o altă parte reprezintă căldură pierdută prin ardere incompletă ( $Q_{p,in}$ ).

Schema energetică a procesului de ardere a combustibilului, este prezentată în figura alăturată.



Schema energetică de principiu a procesului de ardere a combustibililor

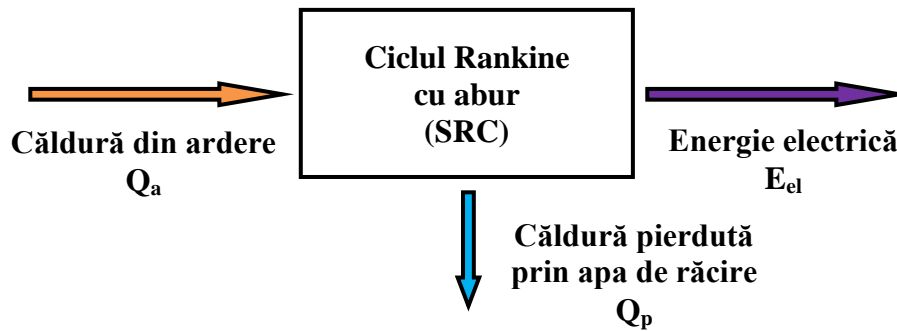
Randamentul procesului de ardere ( $\eta_a$ ) se definește cu relația:

$$\eta_a = \frac{Q_a}{E_{chim}} \Rightarrow Q_a = \eta_a \cdot E_{chim} = \eta_a \cdot m_{cb} \cdot H_i$$

În cazul arderii cărbunelui se consideră că randamentul arderii are valoarea:

$$\eta_a = 85\%$$

Schema energetică de principiu a procesului de conversie a căldurii provenite din arderea combustibililor în electricitate, este prezentată în figura alăturată.



Schema energetică de principiu a procesului de conversie a căldurii din ardere în electricitate

Randamentul termic al ciclului Rankine ( $\eta_t$ ) se definește prin relația:

$$\eta_t = \frac{E_{el}}{Q_a} \Rightarrow E_{el} = \eta_t \cdot Q_a$$

În conformitate cu cele menționate în cazul aplicației anterioare, energia electrică totală produsă anual ( $E_{el}$ ), poate fi calculată în funcție de puterea electrică instalată ( $P_{el}$ ) și de durata anuală de funcționare a instalației ( $\tau_a$ ), cu relația.

$$E_{el} = P_{el} \cdot \tau_a = P_{el} \cdot \eta_f \cdot \tau_a$$

$\tau_a$  [s] reprezintă durata unui an (exprimată în secunde), având în vedere că și puterea electrică este exprimată în kW [kJ/s].

Înlocuind expresia energiei electrice totale produsă anual ( $E_{el}$ ), în relația anterioară, se obține:

$$P_{el} \cdot \eta_f \cdot \tau_a = \eta_t \cdot Q_a$$

Înlocuind în această relație expresia căldurii de ardere, în funcție de randamentul arderii ( $\eta_a$ ), de cantitatea de combustibil ( $m_{cb}$ ) și căldura inferioară de ardere (puterea calorică inferioară) a cărbunelui ( $H_i$ ), se obține:

$$P_{el} \cdot \eta_f \cdot \tau_a = \eta_t \cdot \eta_a \cdot m_{cb} \cdot H_i$$

Din această relație se poate obține cantitatea anuală de combustibil necesar pentru funcționarea instalației ( $m_{cb}$ ).

$$m_{cb} = \frac{P_{el} \cdot \eta_f \cdot \tau_a}{\eta_t \cdot \eta_a \cdot H_i}$$

Cantitatea anuală de combustibil necesar pentru funcționarea instalației ( $m_{cb}$ ) este exprimată în kg/an.

În exemplul considerat:

$$m_{cb} = \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 0.9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600}{0.35 \cdot 0.85 \cdot 6650} = 1434631958.5 \text{ kg/an} = 39304.99 \text{ t/zi} \approx 39305 \text{ t/zi}$$



Dacă instalația ar funcționa cu cărbune de calitate superioară, având căldura inferioară de ardere (puterea calorică inferioară) ridicată ( $H_i = 25000 \text{ kJ/kg}$ ), cantitatea zilnică necesară de combustibil devine:

$$m_{cb} = 10455 \text{ t/zi}$$

În consecință, *cantitatea de cărbune, necesară pentru funcționarea instalației Rankine cu abur (SRC), alimentată cu căldură provenită din arderea cărbunelui, este de cca. 39305 t/zi cărbune de calitate inferioară, respectiv de cca. 10455 t/zi cărbune de calitate superioară.*

### **Varianta 3. Instalație SRC alimentată cu căldură provenită din arderea gazului metan**

Combustibilul utilizat este gazul metan, cu o căldură de ardere (putere calorică)  $H_i = 35583 \text{ kJ/m}^3\text{N}$ .

În acest caz, se determină volumul de combustibil necesar funcționării instalației, exprimat în  $\text{m}^3\text{N}$ , adică volumul de combustibil raportat la condițiile normale fizice:

- Temperatura de  $0^\circ\text{C}$ ;
- Presiunea de  $1.01325 \text{ bar}$ .

Calculule se efectuează la fel ca și în cazul variantei anterioare, corespunzătoare alimentării cu căldură provenită din arderea cărbunelui.

Volumul de combustibil necesar funcționării anuale a instalației, exprimat în  $\text{m}^3\text{N}/\text{an}$  se determină cu relația:

$$V_{cb} = \frac{P_{el} \cdot \eta_f \cdot \tau_a}{\eta_t \cdot \eta_a \cdot H_i}$$

Se consideră că randamentul arderii în cazul gazului metan este:  $\eta_a = 93\%$

$$V_{cb} = \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 0.9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600}{0.35 \cdot 0.93 \cdot 35583 \cdot 365} = 6714000 \text{ m}^3\text{N}/\text{zi}$$

În consecință, *cantitatea de gaz metan, necesară pentru funcționarea instalației Rankine cu abur (SRC), alimentată cu căldură provenită din arderea gazului, este de cca.  $6714000 \text{ m}^3\text{N}/\text{zi}$ .*

### **Varianta 4. Instalație SRC alimentată cu căldură provenită din arderea păcurii**

Combustibilul utilizat este păcură, cu o căldură de ardere (putere calorică)  $H_i = 41800 \text{ kJ/l}$ .

Calculule se efectuează la fel ca și în cazul variantelor anterioare, corespunzătoare alimentării cu căldură provenită din arderea cărbunelui, respectiv gazului metan.

Volumul de combustibil necesar funcționării anuale a instalației, exprimat în  $\text{l}/\text{an}$  se determină cu relația:

$$V_{cb} = \frac{P_{el} \cdot \eta_f \cdot \tau_a}{\eta_t \cdot \eta_a \cdot H_i}$$

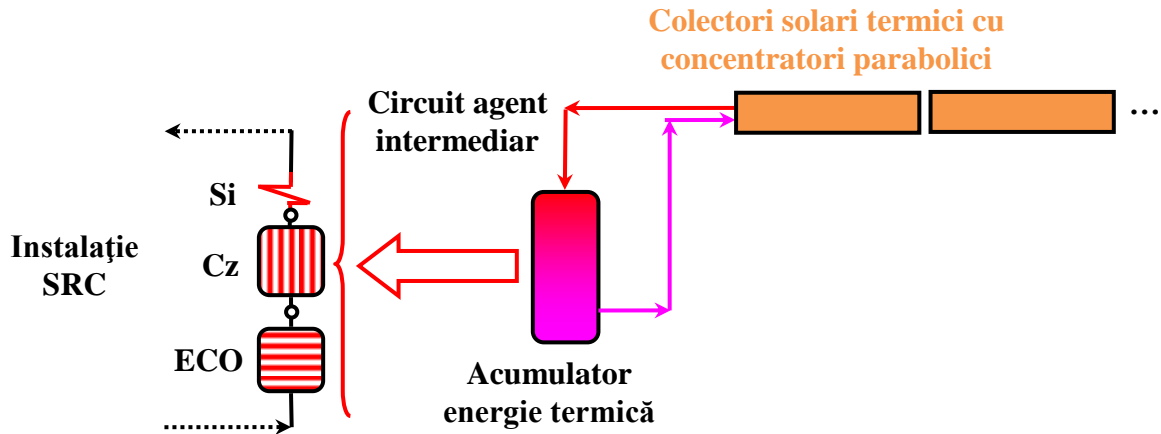
Se consideră că randamentul arderii în cazul gazului metan este:  $\eta_a = 93\%$

$$V_{cb} = \frac{1000 \cdot 1000 \cdot 0.9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600}{0.35 \cdot 0.93 \cdot 41800 \cdot 365} = 5715000 \text{ l}/\text{zi}$$

În consecință, *cantitatea de păcură, necesară pentru funcționarea instalației Rankine cu abur (SRC), alimentată cu căldură provenită din arderea păcurii, este de cca.  $5715000 \text{ l}/\text{zi}$ .*

**Varianta 5. Instalație SRC alimentată cu căldură provenită din energie solară (cu concentratori parabolici)**

Schema de principiu a funcționării unei instalații cu ciclu Rankine cu abur (SRC) alimentată cu energie solară, este prezentată în figura alăturată.



Schema de principiu a unei instalații cu ciclu SRC cu energie solară, cu concentratori parabolici

Agentul termic din circuitul intermediar atinge temperaturi de  $(150...350)^{\circ}\text{C}$ , astfel încât agentul termic este reprezentat de uleiuri diaterme sau săruri topite.

În figura alăturată este prezentată o instalație ergetică solară termică cu concentratori parabolici.



Instalație ergetică solară termică cu concentratori parabolici

În figurile alăturate sunt prezentate colectoare solare termice cu concentratori parabolici.



Colector solari termici cu concentratori parabolici (Harper Lake, California, USA)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Parabolic\\_trough\\_at\\_Harper\\_Lake\\_in\\_California.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Parabolic_trough_at_Harper_Lake_in_California.jpg)



Colector solari termici cu concentratori parabolici  
[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar\\_Array.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar_Array.jpg)

Se consideră că intensitatea medie a radiației solare în timpul anului, în locația aleasă pentru amplasarea instalației SRC solare termice globale (cu valoare ridicată a intensității radiației solare), este  $I_g = 400 \text{ W/m}^2$  în plan orizontal, respectiv în planul înclinat optim al oglinzilor care concentrează radiația solară în vârful turnului solar,  $I_{gi} = 500 \text{ W/m}^2$ .

Se consideră că durata medie de disponibilitate a radiației solare directe este:

$$\tau = 8 \text{ h/zi}$$

Căldura medie disponibilă zilnic din radiația solară, în planul înclinat optim al oglinzilor care concentrează radiația solară ( $Q_{sol,i}$ ) este:

$$Q_{sol,i} = I_{gi} \cdot \tau$$

$$Q_{sol,i} = 500 \cdot 8 \text{ Wh/m}^2/\text{zi} = 4000 \text{ Wh/m}^2/\text{zi} = 4 \text{ kWh/m}^2/\text{zi}$$

Se consideră că randamentul mediu de conversie a radiației solare în căldură transferată în agentul intermediar este  $\eta_q = 50\%$ .

Relația de definiție a randamentul mediu de conversie a radiației solare în căldură ( $\eta_q$ ) este:

$$\eta_q = \frac{Q}{Q_{sol,i}} \Rightarrow Q = \eta_q \cdot Q_{sol,i}$$

În exemplul considerat:

$$Q = 0.5 \cdot 4 = 2 \text{ kWh/m}^2/\text{zi}$$

Se va considera pentru această aplicație o instalație cu puterea electrică instalată de 100 MW (de 10 ori mai mică decât cea considerată în exemplele anterioare).

Conform aplicațiilor anterioare, se poate calcula energia electrică produsă de  $1 \text{ m}^2$  de colectori cu concentratori ( $E_{el,1}$ ), dacă se consideră randamentul ciclului Rankine (SRC) ( $\eta_t$ ):

$$\eta_t = \frac{E_{el,1}}{Q} \Rightarrow E_{el,1} = \eta_t \cdot Q$$

$$E_{el,1} = \eta_t \cdot \eta_q \cdot I_{gi} \cdot \tau$$

Energia electrică produsă de toți colectorii ( $E_{el}$ ), având suprafața totală ( $S$ ), se determină cu relația evidentă:

$$E_{el} = S \cdot E_{el,1} = \eta_t \cdot \eta_q \cdot I_{gi} \cdot \tau \cdot S$$

Energia electrică produsă de instalație se poate determina în funcție de putere ( $P_{el}$ ) și timpul zilnic de funcționare ( $\tau$ ):

$$E_{el} = P_{el} \cdot \tau$$

Egalând cele două expresii ale energiei electrice se obține:

$$P_{el} \cdot \tau = \eta_t \cdot \eta_q \cdot I_{gi} \cdot \tau \cdot S$$

Din această relație se poate determina suprafața necesară de colectori (S):

$$S = \frac{P_{el}}{\eta_t \cdot \eta_q \cdot I_{gi}}$$

În exemplul considerat:

$$S = \frac{100 \cdot 10^6}{0.35 \cdot 0.5 \cdot 500} = 1142800 \text{ m}^2 = 1142.8 \text{ km}^2$$

Se consideră că randamentul de dispunere a colectoarelor pe sol este  $\eta_s = 50\%$  astfel încât colectoarele să nu se umbrească reciproc este nevoie pentru amplasarea colectoarelor de o suprafață de sol ( $S_{sol}$ ) egală cu dublul suprafeței totale a acestora:

$$S_{sol} = S / \eta_s$$

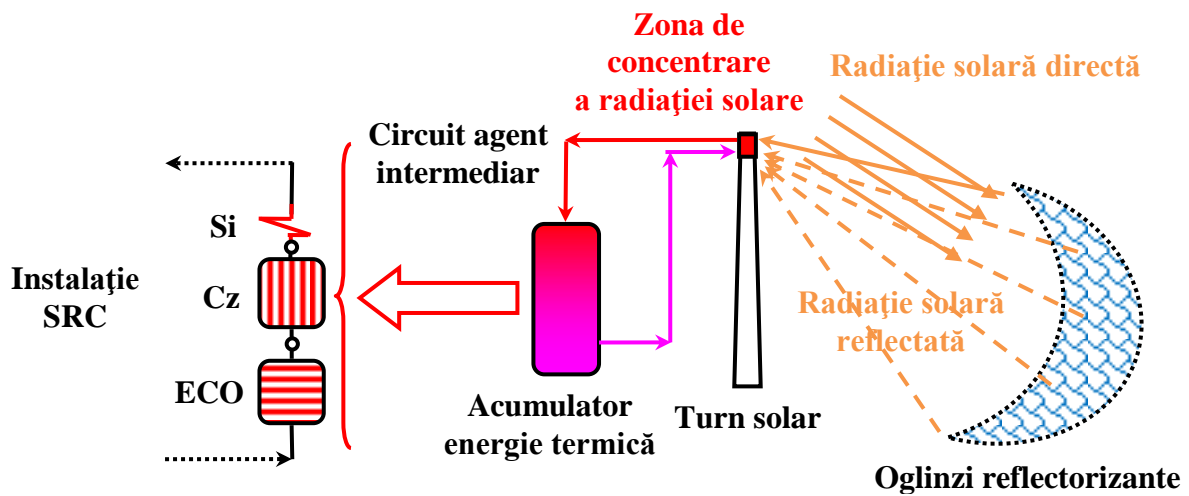
În exemplul considerat:

$$S_{sol} = 1142.8 / 0.5 = 2285.6 \text{ km}^2 = 228.56 \text{ ha}$$

Pentru funcționarea instalației este nevoie de o suprafață de  $\approx 2300 \text{ km}^2$  (230 ha) pentru dispunerea colectoarelor solari termici cu concentratori parabolici.

### Varianta 6. Instalație SRC alimentată cu căldură provenită din energie solară (cu turn solar)

Schema de principiu a funcționării unei instalații cu ciclu Rankine cu abur (SRC) alimentată cu energie solară, cu turn solar, este prezentată în figura alăturată.



Schema de principiu a unei instalații cu ciclu SRC cu energie solară, cu turn solar

Agentul intermediar este reprezentat de săruri topite sau ulei diatermic, iar acumulatorul de căldură și “câmpul” de oglinzi reflectorizante trebuie dimensionat astfel încât să permită pe timpul zilei acumularea unei cantități suficiente de energie termică, astfel încât să fie asigurată funcționarea instalației și în absența radiației solare (pe timpul nopții). Circuitul intermediar este prevăzut cu arzătoare pe gaz metan (nerepresentate pe schemă), care să permită funcționarea instalației în perioadele fără radiație solară.

Agentul termic din circuitul intermediar atinge temperaturi de (500...1000)°C, astfel încât agentul termic este reprezentat de săruri topite (40% nitrat de potasiu -  $\text{KNO}_3$ , 60% nitrat de sodiu -  $\text{NaNO}_3$ ) sau sodiu (Na) lichid.

În figurile alăturate sunt prezentate câteva instalații termoergetice cu turn solar.



Instalație termoergetică cu turn solar (Los Angeles, USA – 110 MW)



Instalație termoergetică cu turnuri solare lângă Sevilla, Spania  
Planta Solar 10 (PS10 – 11 MW) și Planta Solar 20 (PS20 – 20 MW)  
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:PS20andPS10.jpg>  
PS 10 a fost prima instalație termoenergetică cu turn solar din lume (2007)



Cea mai mare instalație termoergetică cu turnuri solare  
Ivanpah Solar Power Facility, USA (San Bernardino County, California – 392 MW)



Se consideră că intensitatea medie a radiației solare în timpul anului, în locația aleasă pentru amplasarea instalației SRC solare termice globale (cu valoare ridicată a intensității radiației solare), este  $I_g = 400 \text{ W/m}^2$  în plan orizontal, respectiv în planul înclinat optim al oglinzilor care concentrează radiația solară în vârful turnului solar,  $I_{gi} = 500 \text{ W/m}^2$ .

Se consideră că durata medie de disponibilitate a radiației solare directe este:

$$\tau = 8 \text{ h/zi}$$

Căldura medie disponibilă zilnic din radiația solară, în planul înclinat optim al oglinzilor care concentrează radiația solară ( $Q_{sol,i}$ ) este:

$$Q_{sol,i} = I_{gi} \cdot \tau$$

$$Q_{sol,i} = 500 \cdot 8 \text{ Wh/m}^2/\text{zi} = 4000 \text{ Wh/m}^2/\text{zi} = 4 \text{ kWh/m}^2/\text{zi}$$

Se consideră că randamentul mediu de conversie a căldurii disponibile zilnic din radiația solară ( $\eta_q$ ), în căldură transferată în agentul intermediar este  $\eta_q = 50\%$ .

Relația de definiție a randamentul mediu de conversie a căldurii disponibile zilnic din radiația solară ( $\eta_q$ ) este:

$$\eta_q = \frac{Q}{Q_{sol,i}} \Rightarrow Q = \eta_q \cdot Q_{sol,i}$$

În exemplul considerat:

$$Q = 0.5 \cdot 4 = 2 \text{ kWh/m}^2/\text{zi}$$

Se va considera pentru această aplicație o instalație cu puterea electrică instalată de 100 MW (de 10 ori mai mică decât cea considerată în exemplele anterioare).

Cea mai mare instalație de acest tip are o putere electrică instalată de 392 MW.

Conform aplicațiilor anterioare, se poate calcula energia electrică produsă de  $1 \text{ m}^2$  de oglinzi reflectorizante ( $E_{el,1}$ ), dacă se consideră randamentul ciclului Rankine (SRC) ( $\eta_t$ ):

$$\eta_t = \frac{E_{el,1}}{Q} \Rightarrow E_{el,1} = \eta_t \cdot Q$$

$$E_{el,1} = \eta_t \cdot \eta_q \cdot I_{gi} \cdot \tau$$

Energia electrică produsă de toate oglinzile reflectorizante ( $E_{el}$ ), având suprafața totală ( $S$ ), se determină cu relația evidentă:

$$E_{el} = S \cdot E_{el,1} = \eta_t \cdot \eta_q \cdot I_{gi} \cdot \tau \cdot S$$

Energia electrică produsă de instalație se poate determina în funcție de putere ( $P_{el}$ ) și timpul zilnic de funcționare ( $\tau$ ):

$$E_{el} = P_{el} \cdot \tau$$

Egalând cele două expresii ale energiei electrice se obține:

$$P_{el} \cdot \tau = \eta_t \cdot \eta_q \cdot I_{gi} \cdot \tau \cdot S$$

Din această relație se poate determina suprafața necesară de oglinzi reflectorizante (S):

$$S = \frac{P_{el}}{\eta_t \cdot \eta_q \cdot I_{gi}}$$

În exemplul considerat:

$$S = \frac{100 \cdot 10^6}{0.35 \cdot 0.5 \cdot 500} = 1142800 \text{m}^2 = 1142.8 \text{km}^2$$

Se consideră că randamentul de dispunere a oglinzilor reflectorizante pe sol este  $\eta_s = 50\%$  astfel încât pentru ca oglinzile să nu se umbrească reciproc este nevoie pentru amplasarea oglinzilor de o suprafață de sol ( $S_{sol}$ ) egală cu dublul suprafeței totale a acestora:

$$S_{sol} = S / \eta_s$$

În exemplul considerat:

$$S_{sol} = 1142.8 / 0.5 = 2285.6 \text{ km}^2 = 228.56 \text{ ha}$$

Pentru funcționarea instalației este nevoie de o suprafață de  $\approx 2300 \text{ km}^2$  (230 ha) pentru dispunerea oglinzilor reflectorizante.

O listă cu instalații termoenergetice solare operaționale, în construcție și în stadiu de proiect (anunțate), este disponibilă la adresa de internet:

[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_thermal\\_power\\_stations](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations)

Link-uri utile:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_thermal\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_energy)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated\\_solar\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Concentrated_solar_power)

[http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals2/index\\_e.php](http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals2/index_e.php)