

# Conversia căldurii în energie electrică prin ciclul Rankine

## Ciclul Rankine cu abur (*Steam Rankine Cycle - SRC*)

### Principiul de funcționare

Conversia căldurii în electricitate, cu ajutorul ciclului Rankine, reprezintă un răspuns adecvat la cererea de energie electrică în creștere. Căldura care este transformată în energie electrică, prin intermediul acestui ciclu, poate să provină din diverse surse:

- Arderea combustibililor fosili (cărbuni, păcură, gaze naturale, etc.);
- Energie nucleară provenită din fisiune (de regulă se utilizează ca și combustibil  $U^{235}$ ).
- Energie solară (prin utilizarea concentratorilor de radiație solară).
- Energie geotermală de potențial ridicat având temperatura peste  $(500...1000)^{\circ}C$ .

Agentul termodinamic de lucru din instalațiile care funcționează după aceste cicluri este apa, respectiv aburul supraîncălzit.

Instalațiile de conversie a căldurii în electricitate, care funcționează după ciclul Rankine, sunt denumite și instalații termoelectrice sau centrale termoelectrice.

Acest ciclu termodinamic este utilizat frecvent în tehnică pentru producerea de energie electrică la puteri medii (10...100) kW, la puteri mari (100...1000) kW și mai ales la puteri foarte mari, peste (10...100) MW.

William John Macquorn Rankine (1820-1872), a fost inginer mecanic dar și inginer civil, ca și fizician și matematician scoțian.



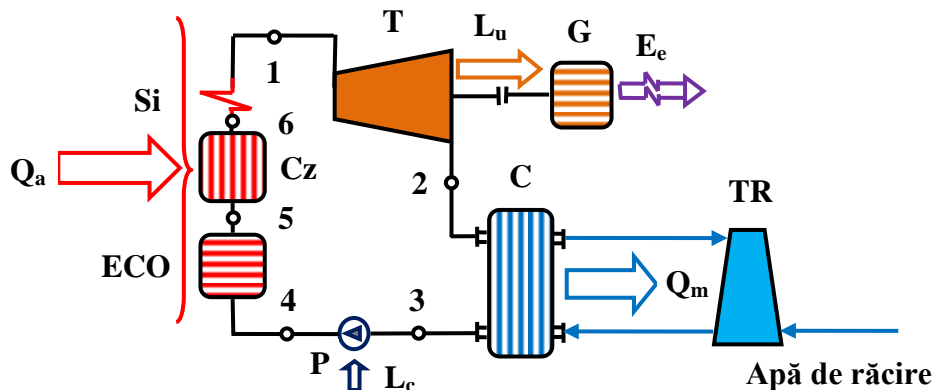
William John Macquorn Rankine (1820-1872)

[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Rankine\\_William\\_signature.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Rankine_William_signature.jpg)

Este considerat unul dintre fondatorii termodinamicii. A elaborat o teorie completă a motoarelor cu abur și a tuturor tipurilor de motoare termice.

- În anul 1849 a găsit relația de legătură dintre temperatura și presiunea vaporilor saturați.
- În anul 1852 a calculat randamentul motoarelor termice și a dedus că randamentul maxim al oricărui motor termic, depinde numai de cele două temperaturi între care funcționează.
- În 1855 a fundamentat știința energeticii, bazată pe energie și transformările acesteia mai degrabă decât pe forță și mișcare.

Schema de principiu a instalațiilor de conversie a căldurii în electricitate, care funcționează după ciclul Rankine (instalații termoelectrice sau centrale termoelectrice), este prezentată în figura alăturată.



Schema de principiu a unei instalații termoelectrice pentru producerea energiei electrice

Cz – Cazan; Si – Supraîncălzitor, ECO – Economizor; T – Turbină cu abur;

G – Generator electric; C – Condensator; P – Pompă alimentară cazan; TR – Turn de răcire a apei.

1 – Vaporii supraîncălziți de presiune ridicată; 2 – Vaporii supraîncălziți de presiune scăzută;

3 – Lichid de presiune scăzută; 4 – Lichid de presiune ridicată;

5 – Lichid saturat de presiune ridicată; 6 – Vaporii saturați de presiune ridicată.

În cazanul Cz, căldura provenită de la o sursă de căldură oarecare ( $Q_a$ ), este absorbită de apa aflată la saturație în starea 5, care vaporizează la presiune ridicată și ajunge în starea de vaporii saturați 6.

După vaporizarea propriu-zisă, vaporii sunt supraîncălziți în supraîncălzitorul Si, până în starea 1, utilizând fie o parte din căldura conținută de gazele de ardere (în cazul utilizării combustibililor clasici) fie o parte din căldura provenită de la sursa de energie utilizată (energie nucleară, energie solară, energie geotermală de potențial termic ridicat, etc.).

Vaporii supraîncălziți, cu starea 1, se destind în turbina cu aburi T, unde se produce lucrul mecanic util ( $L_u$ ), care este transformat în energie electrică ( $E_e$ ) în generatorul electric G. Din turbină rezultă vaporii saturați sau ușor supraîncălziți, la presiune scăzută, cu starea 2. Uneori la ieșirea din turbină rezultă vaporii umezi, dar cu un conținut foarte redus de umiditate, deoarece picăturile de apă din abur (dacă nu sunt în cantitate nesemnificativă) pot produce deteriorarea paletelor turbinei, având o comportare apropiată de cea a unor alicie.

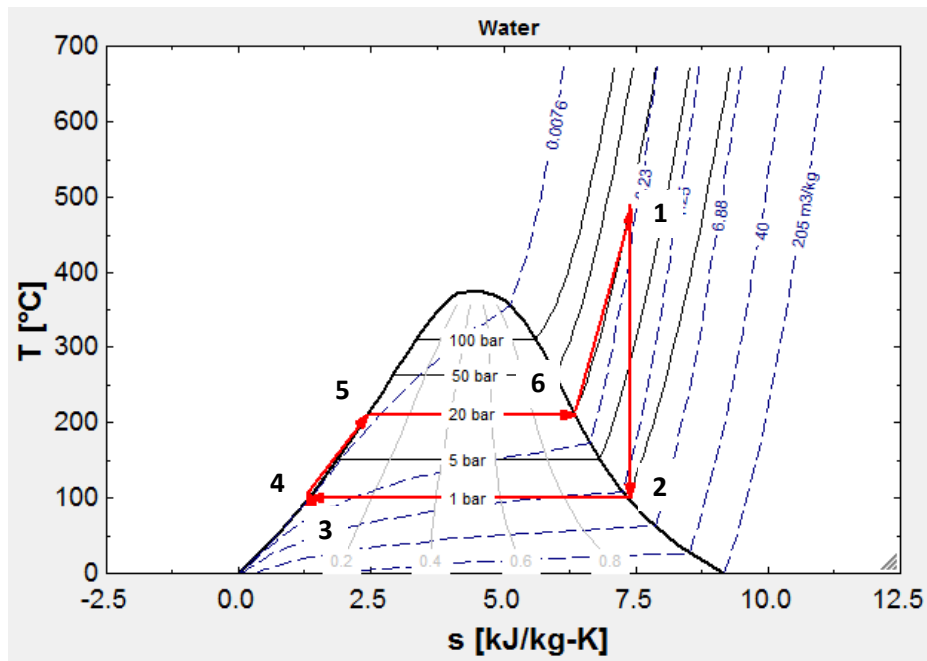
Vaporii saturați cu starea 2, condensează în condensatorul C și cedează căldură mediului ambiant ( $Q_m$ ) prin agentul de răcire al condensatorului, care poate să fie apă sau uneori aer (numai în cazul instalațiilor de puteri reduse). Apa de răcire a condensatorului preia căldura de condensare și este răcită la rândul ei în turnul de răcire TR, unde căldura preluată anterior de apă în condensator, este transferată aerului ambiant, iar apa este răcită până la temperatura termometrului umed.

Condensul rezultat, aflat la presiune scăzută, cu starea 3, este aspirat de pompa de alimentare a cazanului P, în care presiunea lichidului, respectiv energia potențială de presiune a acestuia, crește până la presiunea ridicată din cazanul Cz. Pentru acest proces se consumă lucrul mecanic ( $L_c$ ).

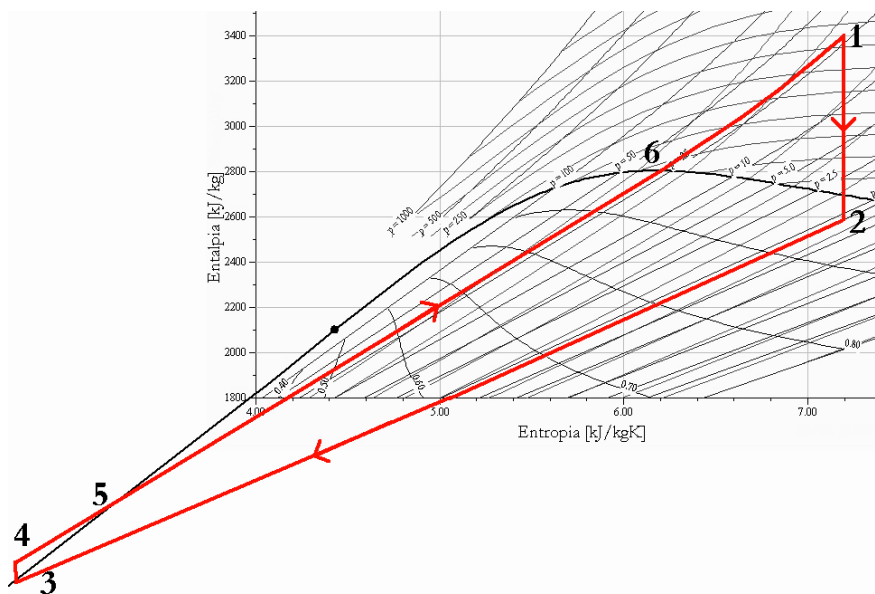
Lichidul ieșit din pompă cu starea 4, aflat la presiune ridicată, este preîncălzit într-un schimbător de căldură, denumit economizor ECO, până la saturație în starea 5. Sursa de energie a economizorului este reprezentată în cazul utilizării combustibililor clasici de o parte din căldura conținută în gazele de ardere evacuate din supraîncălzitorul Si. În cazul utilizării altor surse de energie (nucleară, solară, geotermală etc.), o parte din această energie (sub formă de căldură) se utilizează pentru

alimentarea cu căldură a economizorului ECO. Astfel, căldura utilizată pentru funcționarea instalației se distribuie între cazanul Cz, economizorul ECO și supraîncălzitorul Si.

Procesele termodinamice care alcătuiesc ciclul Rankine, după care funcționează instalația, este prezentat în diagramele temperatură-entropie și entalpie-entropie în figurile alăturate.



Reprezentarea proceselor de lucru care alcătuiesc ciclul Rankine, în diagrama temperatură-entropie



Reprezentarea proceselor de lucru care alcătuiesc ciclul Rankine, în diagrama entalpie-entropie

Ciclul de funcționare a instalației prezentate, poartă și denumirea în limba engleză *Steam Rankine Cycle (SRC)*.

Randamentul termic al ciclului Rankine ( $\eta_t$ ), se definește prin raportul dintre energia (sau puterea electrică) produsă ( $E_e/P_e$ ) și căldura (sau puterea termică) utilizată ( $Q_a/\dot{Q}_a$ ).

$$\eta_t = \frac{E_e}{Q_a} = \frac{P_e}{\dot{Q}_a}$$

Valorile uzuale ale randamentului termic al ciclului Rankine se situează în intervalul (30...35)%.

O soluție eficientă pentru creșterea randamentului termic al ciclului, este reprezentată de modificarea regimului termic al apei de răcire a condensatorului, astfel încât aceasta să poată fi utilizată ca agent termic în procese de încălzire industrială (tehnologică) sau rezidențială. În acest caz instalația produce simultan energie electrică și termică, procesul fiind denumit cogenerare.

Cele mai mari centrale termoelectrice din lume:

- Kashiwazaki-Kariwa (Japonia), a fost cea mai mare centrală nucleară electrică din lume, având o putere electrică instalată de 7965 MW. A fost scoasă din funcțiune în 2011;
- Bruce (Canada), este actualmente cea mai mare centrală nucleară electrică din lume, având o putere electrică instalată de 6300 MW;
- Shoaiba (Arabia Saudită), este cea mai mare centrală termoelectrică (și de desalinizarea apei de mare) din lume, pe păcură, având o putere electrică instalată de 5600 MW;
- Surgut-2 (Rusia), este cea mai mare centrală termoelectrică din lume, pe gaz natural, având o putere electrică instalată de 5970 MW;
- Taichung (China – Taiwan), este cea mai mare centrală termoelectrică din lume pe cărbune, având o putere electrică instalată de 5500 MW (10 turbine a câte 550 MW fiecare).

Lista celor mai mari centrale electrice din lume, este disponibilă pe internet, la adresa:

[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_largest\\_power\\_stations\\_in\\_the\\_world](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_largest_power_stations_in_the_world)

### **Observație.**

*Cele mai mari puteri electrice instalate din lume, se întâlnesc în hidrocentrale, iar cea mai mare este hidrocentrala Three Gorges Dam din China, cu o putere electrică instalată de 22500 MW.*

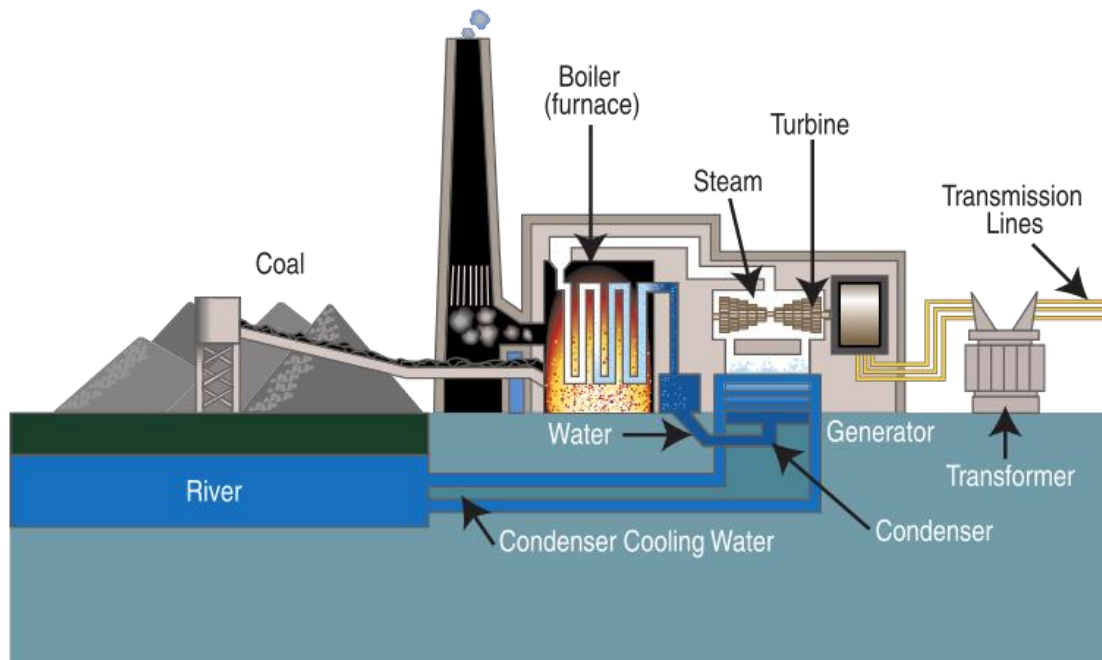
Centrale termoelectrice din România:

- Prima centrală termoelectrică din România (actualmente CET Grozăvești - București) a fost pusă în funcțiune în anul 1892 și era echipată cu 3 alternatoare pentru curent alternativ, cu puterea de 70 kW fiecare.
- Complexul energetic Turceni este cea mai mare termocentrală din România cu o putere electrică instalată totală de 2310 MW (7 turbine a câte 330 MW fiecare). Combustibilul utilizat este lignitul autohton, cu o căldură de ardere (putere calorică) relativ redusă, de (5800...7500) kJ/kg, extras din bazinul carbonifer Oltenia și transportat pe calea ferată de la o distanță de cca. 35 km. Apa de răcire este preluată din râul Jiu. Pe traseul apei de răcire a fost construită și o microhidrocentrală cu puterea electrică instalată de 10 MW.

## Utilizarea combustibililor fosili ca sursă de energie

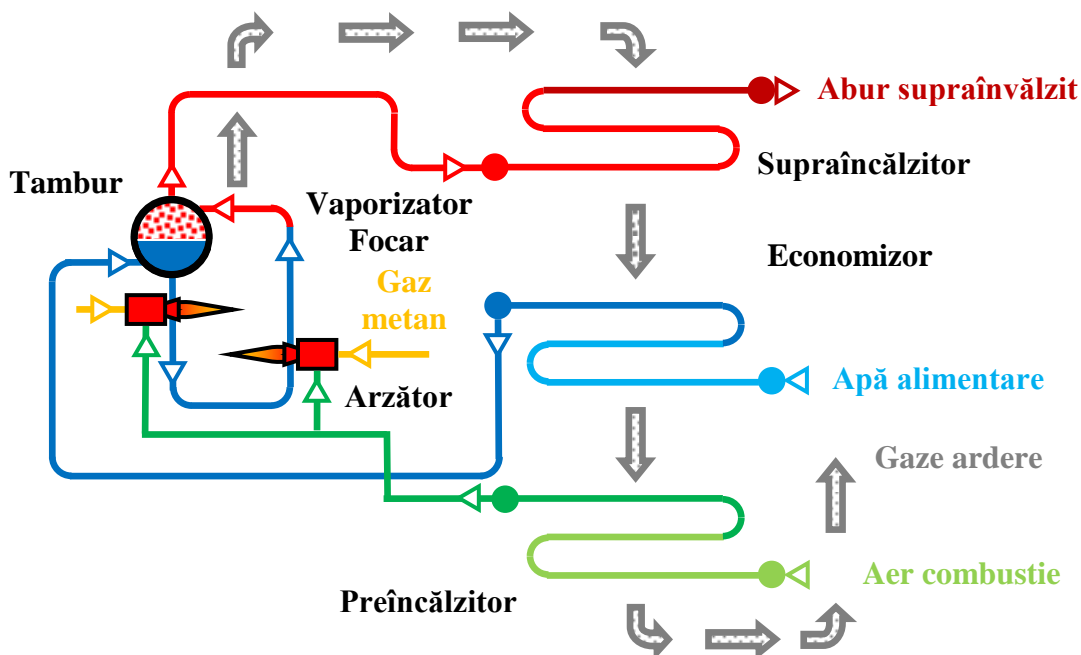
În cazul utilizării combustibililor fosili în instalațiile care funcționează după ciclul Rankine, energia chimică legată în compoziția acestora este transformată în căldură, prin procese de ardere. Energia radiantă a flăcării rezultate și energia termică a gazelor de ardere, sunt transferate apei care este întâi preîncălzită, apoi vaporizează, iar în final vaporii sunt supraîncălziți pentru a fi utilizați în turbine.

Schema de principiu a unei instalații termoelectrice cu funcționare pe cărbune, este prezentată în imaginea alăturată.



Schema de principiu a unei instalații termoelectrice cu funcționare pe cărbune  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Coal\\_fired\\_power\\_plant\\_diagram.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Coal_fired_power_plant_diagram.svg)

Schema de principiu a procesului de preîncălzire, vaporizare și supraîncălzire a apei (aburului) este prezentată în figura alăturată.



Schema de principiu a procesului de preîncălzire, vaporizare și supraîncălzire a apei (aburului)

Pe schemă sunt reprezentate și arzătoarele cu funcționare pe gaz metan. Focarul cazanului este reprezentat de sistemul vaporizator, care este realizat din țevi în care vaporizează apa.

Toate cazanele energetice au în construcție un tambur în care se realizează separarea celor două faze: apa aflată în stare de lichid saturat și aburul saturat uscat.

Se observă că pe traseul gazelor de ardere este amplasat întâi supraîncălzitorul, în zona cu temperatura cea mai ridicată a gazelor de ardere, apoi economizorul care realizează preîncălzirea apei de alimentare a cazanului și apoi preîncălzitorul de aer, în zona cu temperatura cea mai scăzută a gazelor de ardere.

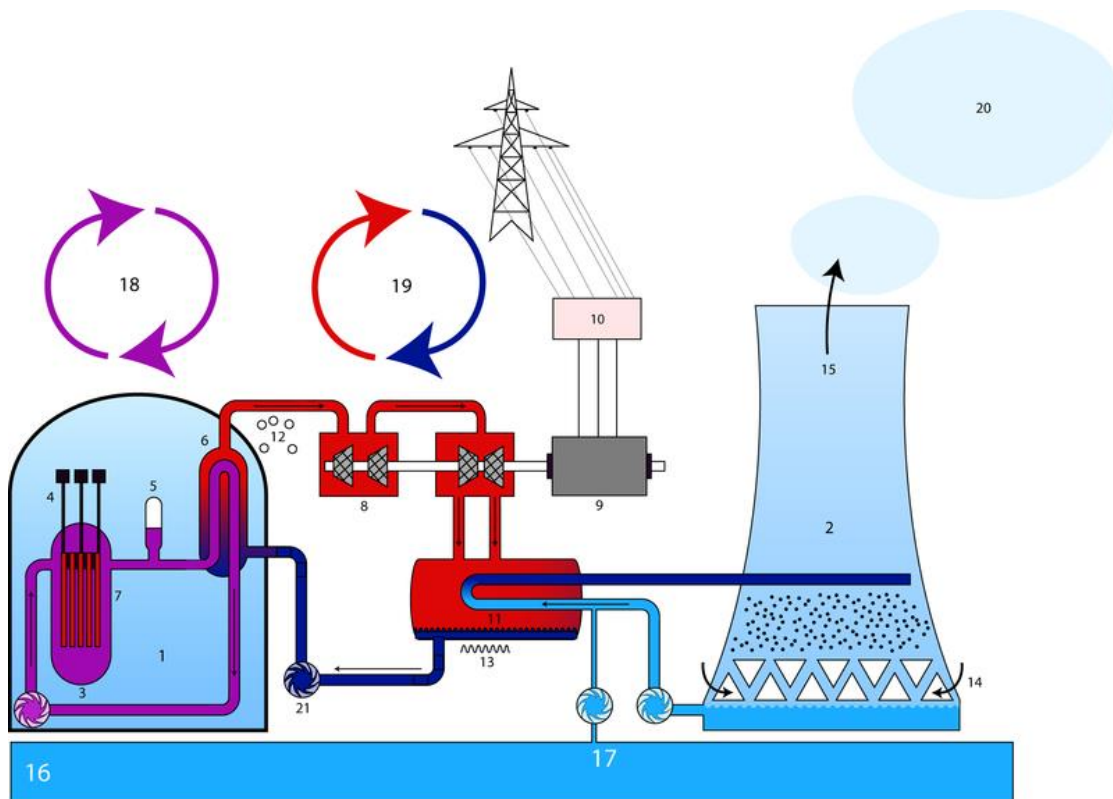
Principiul de funcționare a cazanelor de abur, este același și pentru alte tipuri de combustibili fosili (lichizi sau gazoși), ceea ce diferă este construcția sistemelor de ardere și a focarelor.

## Utilizarea reacției de fisiune ca sursă de energie

În cazul acestor instalații, căldura necesară ca sursă de energie pentru ciclul Rankine, este obținută prin fisiunea nucleelor grele. Cel mai adesea se utilizează ca și combustibil, uraniul.

Agentul de răcire al reactorului nuclear, respectiv apa grea ( $D_2O$ ) este presurizat și se încălzește în reactor, iar căldura rezultată în urma reacției de fisiune este transferată prin intermediul acestui agent, apei (respectiv aburului) din circuitul ciclului Rankine cu abur.

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)

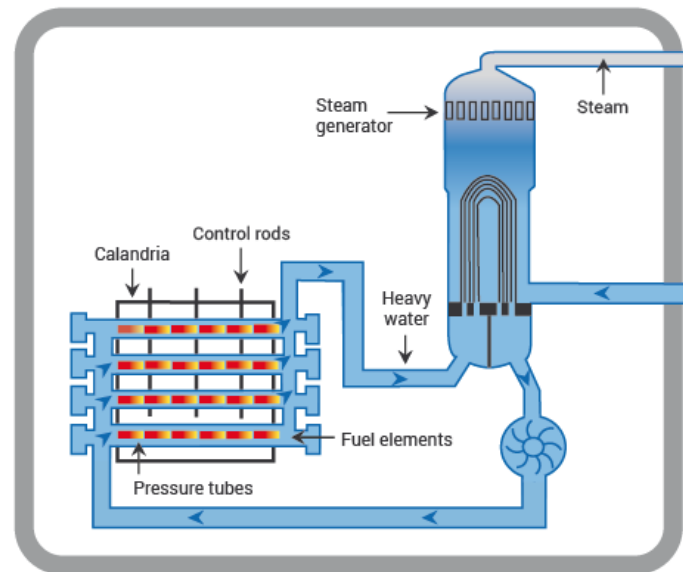
- 1 - Blocul reactorului; 2 - Turnul de răcire; 3 - Reactor; 4 - Bare de control (cu rol de inhibare a fisiunii);
- 5 - Rezervor presurizat pt. agentul primar de răcire  
(presiunea ridicată de lucru împiedică fierberea / vaporizarea agentului de răcire);
- 6 - Generatorul de abur; 7 - Bare combustibil; 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 - Vaporii de apă evacuați în aer; 21 - Pompă de recirculare

În circuitul primar, agentul de răcire al reactorului poate să fie apă distilată sau apă grea, în funcție de tipul combustibilului utilizat:

- Agentul de răcire este apa grea ( $D_2O$ ) în cazul utilizării uraniului natural ca și combustibil;
- Agentul de răcire este apa distilată în cazul utilizării uraniului îmbogățit ca și combustibil.

În figura alăturată este prezentată schema de principiu a unui reactor răcit cu apă grea în circuit presurizat.

**A Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR/Candu)**



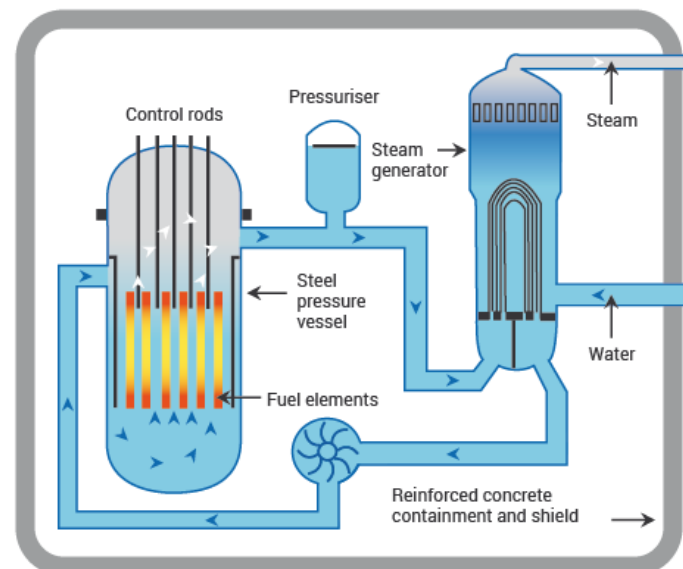
Schema de principiu a unui reactor răcit cu apă grea în circuit presurizat

<http://world-nuclear.org/getmedia/70380a5a-8377-4d35-b684-c91c0a9c54fb/pressurized-heavy-water-reactor-phwr.png.aspx>

În aceste tipuri de reactoare, apa grea din circuitul de răcire ajunge la temperaturi de până la cca. 290°C, la o presiune de cca. 100 bar.

În figura alăturată este prezentată schema de principiu a unui reactor răcit cu apă în circuit presurizat.

**A Pressurized Water Reactor (PWR)**



Schema de principiu a unui reactor răcit cu apă în circuit presurizat

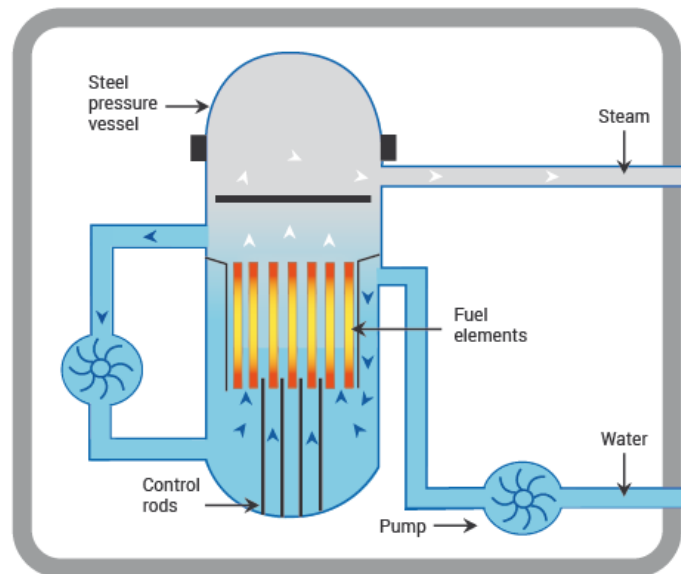
<http://world-nuclear.org/getmedia/de70ab05-7c99-4f3e-a139-fba8ad6dc786/pressurized-water-reactor-pwr.png.aspx>

În aceste tipuri de reactoare, apa din circuitul de răcire al reactorului, ajunge la temperaturi de până la 350°C. Pentru a împiedica vaporizarea apei de răcire a reactorului (din circuitul primar), presiunea de lucru depășește 170 bar.



În figura alăturată este prezentată schema de principiu a unui reactor cu fierberea agentului de răcire (boiling water reactor) (BWR).

A Boiling Water Reactor (BWR)



Reactor cu fierberea agentului de răcire (boiling water reactor) (BWR)

<http://world-nuclear.org/getmedia/10b78f7b-0895-4837-9adc-f83d60d52963/boiling-water-reactor-bwr.png.aspx>

În acest tip de reactoare agentul de răcire este apa, iar temperatura aburului sturat produs direct în reactor atinge temperaturi maxime de cca. 285°C, căreia îi corespunde o presiune de cca. 70 bar.

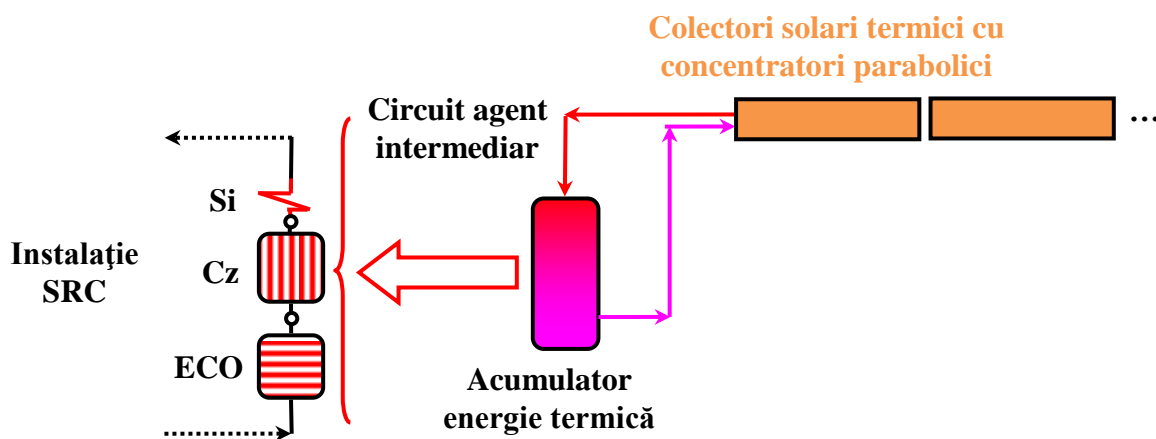
## Utilizarea energiei solare

Instalațiile solare care funcționează după un ciclul Rankine cu abur, se bazează pe concentrarea radiației solare, în vederea creșterii cantității de energie disponibile pe suprafața absorbantă.

Pentru asigurarea energiei termice necesare funcționării ciclului Rankine cu abur, pot fi utilizate următoarele tipuri de colectori cu concentratori:

- Colectori cu concentratori parabolici;
- Colectori cu concentratori liniari;
- Turn solar și oglinzi heliostate.

Schema de principiu a funcționării unei instalații după ciclul Rankine cu abur (**SRC**) alimentată cu energie solară prin intermediul concentratorilor parabolici, este prezentată în figura alăturată.



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

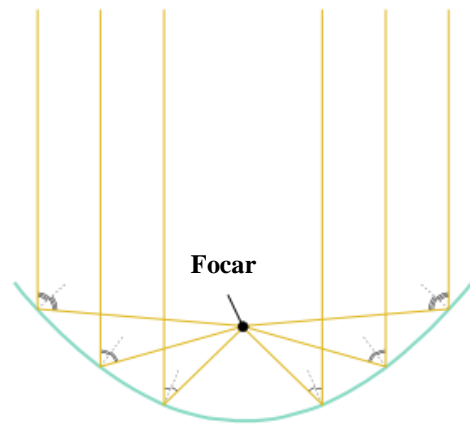
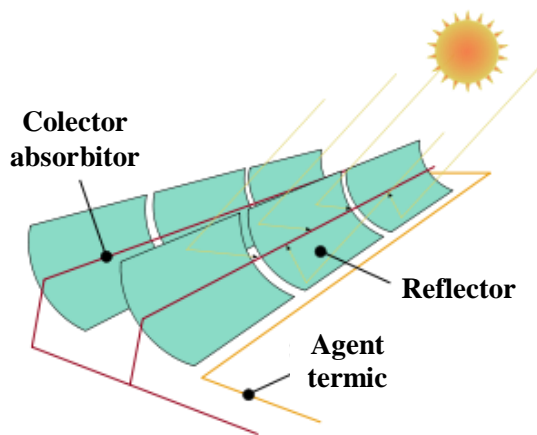
Agentul termic din circuitul intermediar atinge temperaturi de  $(150...350)^{\circ}\text{C}$ , astfel încât acest agent este reprezentat de uleiuri diaterme sau săruri topite.

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



Instalație termoenergetică solară cu concentratori parabolici  
<http://yes2renewables.files.wordpress.com/2012/08/solar-trough-farm.jpg>

Principiul de funcționare a colectoarelor cu concentratori parabolici, este prezentat în figurile alăturate.



Principalele părți componente ale unui sistem solar termic cu concentratori parabolici

Principiul de funcționare a colectoarelor cu concentratori parabolici

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Parabolic\\_trough.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Parabolic_trough.svg)

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)

Schema de principiu a funcționării unei instalații cu ciclu Rankine cu abur (SRC) alimentată cu energie solară prin intermediul concentratorilor liniari, este identică cu cea deservită de concentratori parabolici, singura deosebire fiind reprezentată de tipul concentratorilor de radiație solară.

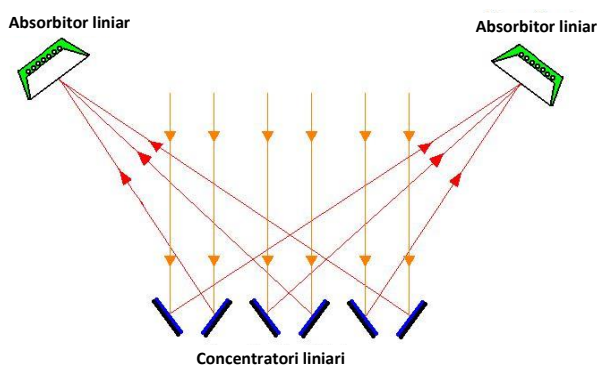
În figura alăturată este prezentată o imagine a celei mai mari instalații termoenergetice solare cu concentratori liniari (Fresnel), amplasată lângă localitatea Puerto Errado din provincia Murcia, din Spania, având puterea electrică instalată de 1.4 MW.



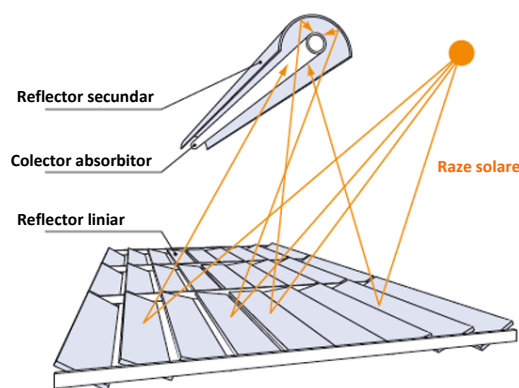
Instalația termoenergetică solară cu concentratori liniari, de lângă localitatea Puerto Errado (Spania)  
[http://www.csp-world.com/sites/default/files/image/novatec\\_solar\\_puerto\\_errado\\_2\\_aerial\\_view\\_website.jpeg](http://www.csp-world.com/sites/default/files/image/novatec_solar_puerto_errado_2_aerial_view_website.jpeg)

Instalația din imagine, a fost prima cu acest tip de concentratori, conectată la o rețeaua electrică națională, în 2009.

Principiul de funcționare a colectoarelor cu concentratori liniari de tip lentile Fresnel, este prezentat în figurile alăturate.



[http://en.wikipedia.org/wiki/File:CLFR\\_Alternating\\_Inclination.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:CLFR_Alternating_Inclination.JPG)



[http://www.renewables-made-in-germany.com/fileadmin/user\\_upload/2011/branchenreport/S.143.gif](http://www.renewables-made-in-germany.com/fileadmin/user_upload/2011/branchenreport/S.143.gif)

Din punct de vedere constructiv, concentratorii liniari sunt reprezentați de oglinzi plane.

Principalul avantaj al colectoarelor solari termici cu concentratori liniari de tip lentile Fresnel, este că permite încălzirea agentului termic până la temperaturi de (160...300)°C, fără a fi nevoie de construcții parabolice, mai complexe.



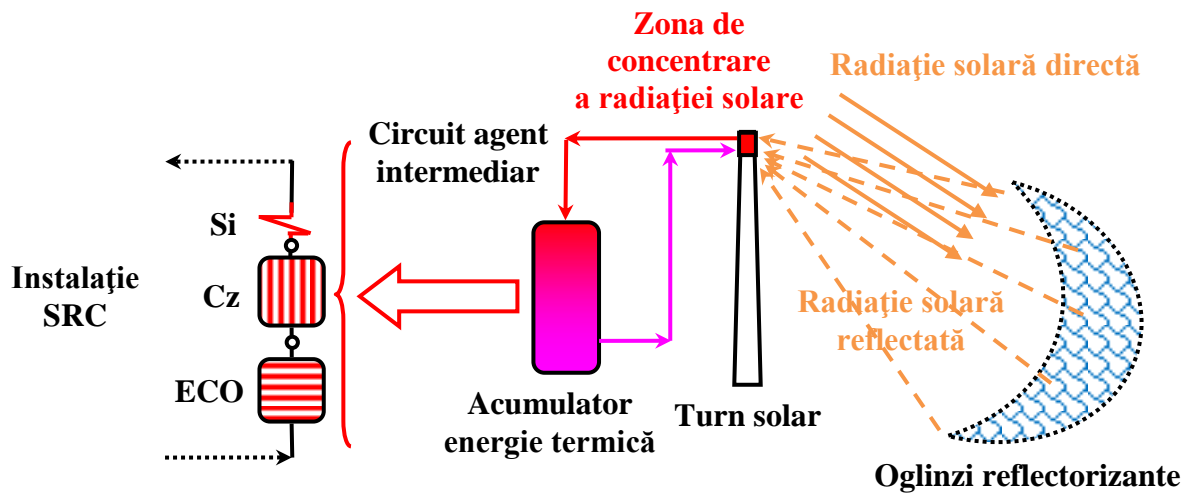
Agentul termic poate să fie: apa, aburul, uleiul diatermic sau săruri topite.

În imagine este prezentat un colector solar cu concentratori liniari.



Colector solar cu concentratori liniari  
<http://www.psa.es/en/instalaciones/images/fresdemo.jpg>

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



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

Acumulatorul de căldură și “câmpul” de oglinzi reflectorizante heliostate, trebuie dimensionate astfel încât să permită pe timpul zilei acumularea unei cantități suficiente de energie termică, pentru a asigura funcționarea instalației și în absența radiației solare (pe timpul nopții). Unele instalații au circuitul intermediar prevăzut și cu arzătoare pe gaz metan (nereprezentate pe schemă), care să permită funcționarea instalației în perioadele fără radiație solară.

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



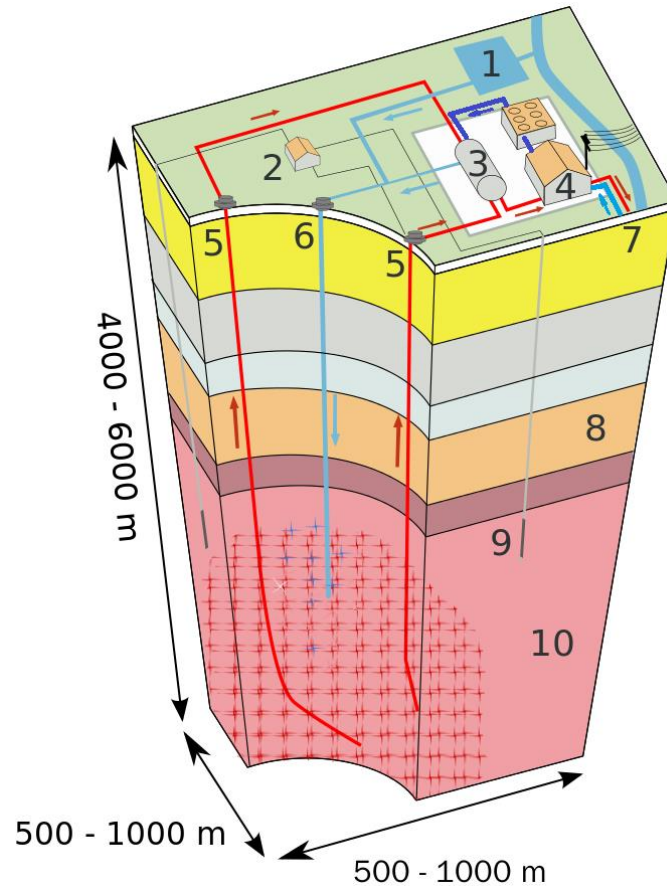
Cea mai mare instalație termoergetică cu turnuri solare  
Ivanpah Solar Power Facility, USA (San Bernardino County, California – 392 MW)  
[http://www.iflscience.com/sites/www.iflscience.com/files/styles/ifls\\_large/public/blog/%5Bnid%5D/80\\_630\\_225\\_stillings1.jpg?itok=xTGJSu3i](http://www.iflscience.com/sites/www.iflscience.com/files/styles/ifls_large/public/blog/%5Bnid%5D/80_630_225_stillings1.jpg?itok=xTGJSu3i)

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)

## Utilizarea energiei geotermale

Energia geotermală, utilizabilă în instalațiile care funcționează după ciclul Rankine cu abur (SRC), este disponibilă la adâncime și este caracterizată prin nivelul ridicat al temperaturilor, care permit conversia în energie electrică. În figurile alăturate este prezentată o schemă de principiu a unei centrale termoelectrice geotermale.



[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c6/EGS\\_diagram.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c6/EGS_diagram.svg) (modificată)

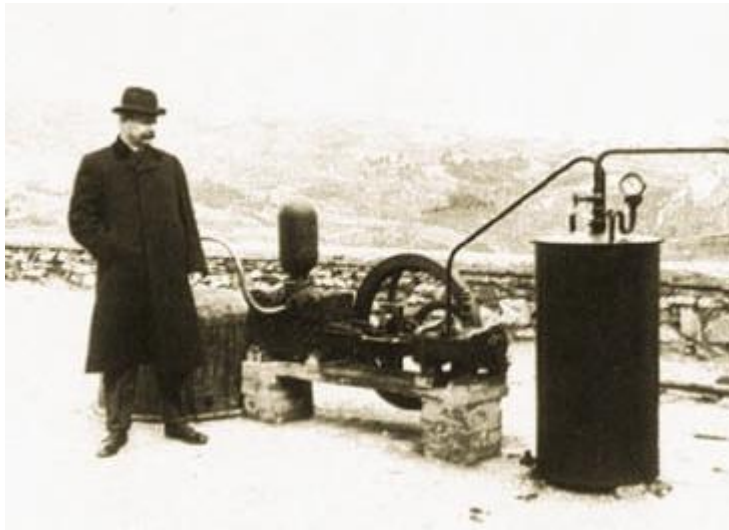
- 1 – Rezervor (bazin) de apă; 2 – Stație de pompare; 3 – Schimbător de căldură;
- 4 – Clădirea turbinelor și generatorului electric cu racordul de alimentare cu energie electrică (lângă clădirea turbinelor sunt amplasate turnurile de răcire ale condensatoarelor);
- 5 – Foraje de producție (prin care este colectat agentul geotermal);
- 6 – Foraj pentru injecția apei (sau agentului geotermal);
- 7 – Racord alimentare cu agent termic a rețelei de încălzire; 8 Roci (sedimente poroase);
- 9 – Sistem de monitorizare (seismică); 10 – Roci de bază (cristaline) fierbinți

Energia geotermală este utilizată pentru producerea energiei electrice în 24 de țări și pentru încălzire în 70 de țări (Wikipedia, 2016).

Energia electrică se obține în prezent în centrale termoelectrice geotermale având puteri electrice de (20...50) MW, în țări ca: Filipine, Kenia, Costa Rica, Islanda, SUA, Rusia, etc.



Prima instalație termoelectrică geotermală a fost testată în 1904 de Piero Ginori Conti (Prințul de Trevignano), în localitatea Larderello din Italia. Instalația este încă funcțională și este prezentată în imaginea alăturată.



Prima instalație termoelectrică geotermală din lume (1904 - Larderello, Italia).  
[http://www.unionegeotermica.it/images/What\\_is\\_geothermal\\_en\\_html\\_3316a7eb.jpg](http://www.unionegeotermica.it/images/What_is_geothermal_en_html_3316a7eb.jpg)

Există mai multe tipuri de instalații termoelectrice geotermale:

- Cu abur “uscat”, sau supraîncălzit (de regulă din geizere), utilizat direct în turbine;
- Cu abur “umed”, la temperaturi de peste 360°C este colectat din subteran la presiune ridicată fără a fi nevoie de un sistem de pompare și este laminat înainte de a fi utilizat în turbine, sau este condensat în schimbătorul de căldură care produce vapori supraîncălziti pentru alimentarea turbinei (ca în schema prezentată);
- Cu apă fierbinte (100...180)°C, care asigură energia termică pentru un ciclul Rankine cu agenți de lucru organici.

În figura alăturată este prezentată o centrală termoelectrică geotermală



Centrală termoelectrică geotermală (Salton Sea, USA)

<http://mms.businesswire.com/bwapps/mediaserver/ViewMedia?mgid=324747&vid=5&download=1>

## Ciclul Rankine organic (*Organic Rankine Cycle - ORC*)

### Principiul de funcționare

Conversia în energie electrică a căldurii provenite din surse regenerabile sau a căldurii reziduale provenite din diverse procese, reprezintă o soluție de valorificare eficientă a unor forme de energie disponibile în cantități mari și cu puține alte utilizări practice.

Dacă energia regenerabilă sau reziduală prezintă un potențial suficient de ridicat din punct de vedere al temperaturii, dar și al puterii termice, respectiv dacă energia termică este disponibilă la temperaturi suficient de ridicate și la puteri mari, o soluție posibilă de conversie a căldurii în energie electrică este utilizarea unui ciclu Rankine clasic cu abur, pentru producerea de energie electrică.

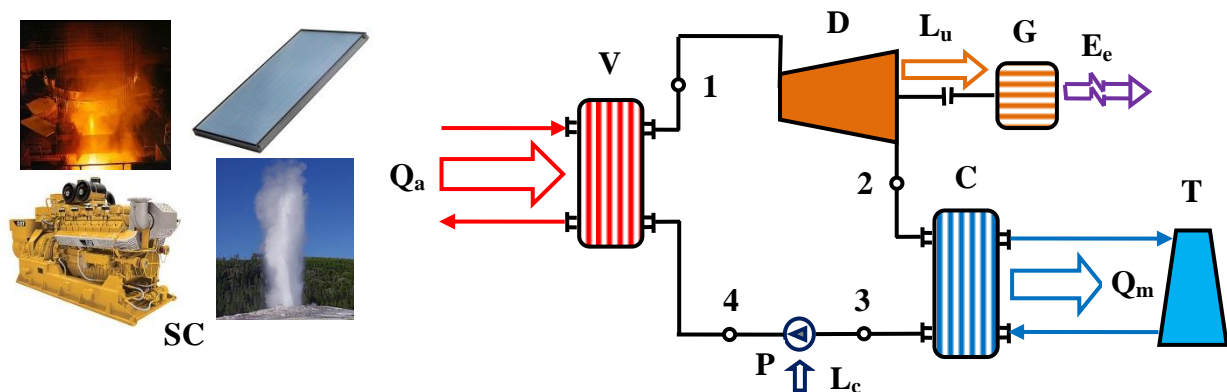
Dacă temperatura sursei regenerabile sau reziduale de energie este redusă, se poate utiliza eficient un ciclu Rankine cu fluide organice ca agenți de lucru, acest ciclu fiind denumit și ciclul Rankine organic. Acest ciclu poate fi utilizat pentru un domeniu foarte larg de puteri: mici, medii și mari.

În instalațiile care funcționează după ciclul Rankine, se pot utiliza ca fluide organice siloxani, (substanțe cu legături chimice Si–O–Si), hidrocarburi sau agenți frigorifici.

Ciclul Rankine a fost propus de inginerul, fizicianul și matematicianul scoțian William John Macquorn Rankine (1820-1872), unul dintre fondatorii termodinamicii. Agentul termodinamic al acestui ciclu a fost apa. Ulterior au fost utilizați și alți agenți termodinamici, astfel Frank Ofeldt a realizat în anul 1883 o instalație de propulsie pentru bărci, cu naftalină, compus petrolier care are punctul de fierbere mai coborât decât al apei între (30...90)°C, pentru naftalina ușoară și între (90...200)°C pentru naftalina grea (<http://www.turboden.eu/en/rankine/rankine-history.php>).

Ciclurile Rankine pot să funcționeze cu apă / abur (*Steam Rankine Cycle*) (SRC) sau cu fluide organice (*Organic Rankine Cycle*) (ORC).

Schema de principiu a unui instalații cu funcționare după ciclul ORC pentru producerea energiei electrice, este prezentată în figura alăturată.



Schema de principiu a unui echipament ORC pentru producerea energiei electrice

SC – Sursa de căldură; V – Vaporizator; D – Detentor; G – Generator electric;

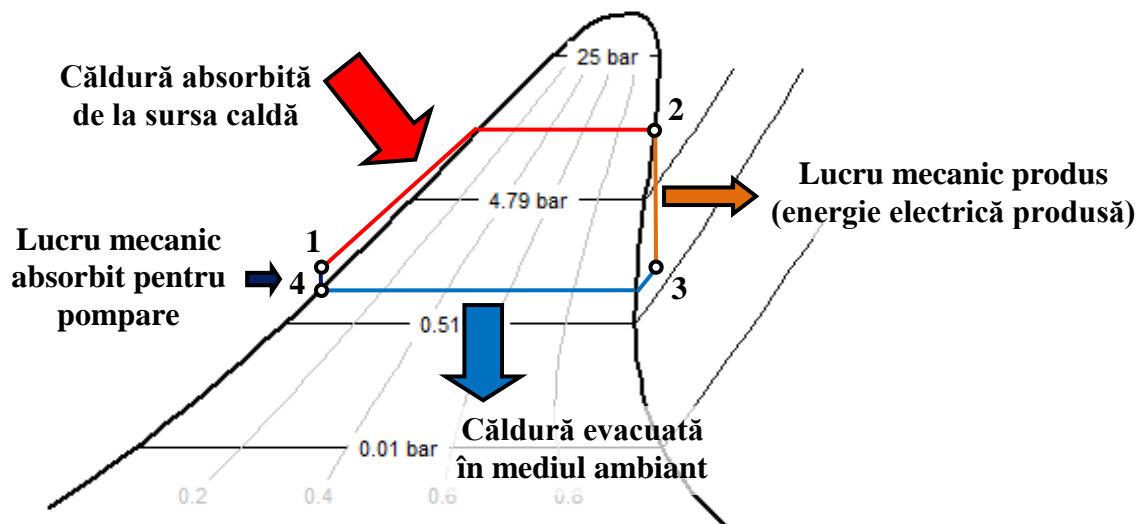
C – Condensator; P – Pompă; T – Turn de răcire

1 – Vaporii saturați de presiune ridicată; 2 – Vaporii supraîncălziți de presiune scăzută;

3 – Lichid de presiune scăzută; 4 – Lichid de presiune ridicată

În vaporizatorul V, căldura provenită de la o sursă regenerabilă sau recuperată dintr-un proces oarecare ( $Q_a$ ), este absorbită de agentul de lucru care vaporizează la temperatură și presiune relativ scăzute. Vaporii saturați sau ușor supraîncălziți, cu starea 1 se destind în detentorul D, unde se produce lucrul mecanic util ( $L_u$ ), care este transformat în energie electrică ( $E_e$ ) în generatorul electric G. Din detentor rezultă vpori supraîncălziți la presiune scăzută cu starea 2. În condensatorul C, vaporii condesează și cedează căldură mediului ambiant ( $Q_m$ ) prin agentul de răcire al condensatorului, care poate să fie apă sau aer. În cazul răcirii cu apă a condensatorului, aceasta este răcită în turnul de răcire T, unde căldura preluată de apă în condensator, este transferată aerului ambiant, iar apa este răcită până la temperatura termometrului umed. Condensul aflat la presiune scăzută, cu starea 3 este aspirat de pompa P în care presiunea lichidului, respectiv energia potențială de presiune a acestuia, crește până la presiunea ridicată din vaporizator V. Pentru acest proces se consumă lucrul mecanic ( $L_c$ ). Lichidul cu starea 4, aflat la presiune ridicată, este introdus în vaporizator, denumit uneori și generator de vapori, după care ciclul de funcționare se reia.

Ciclul teoretic de lucru a instalației care funcționează după ciclul ORC este prezentat în figura alăturată, în diagrama T-s.



Reprezentarea ciclului ORC teoretic în diagrama T-s

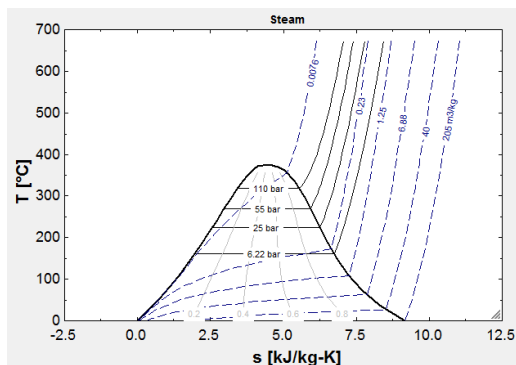
## Considerații privind agenții de lucru

Agenții de lucru din instalațiile care funcționează după ciclul Rankine, prezintă proprietăți termodinamice diferite, care influențează atât condițiile de lucru, în principal presiuni și temperaturi, cât și performanțele energetice, în special *randamentul termodinamic* (sau termic, sau mecanic) ( $\eta_m$ ) definit prin raportul dintre energia mecanică produsă sau lucrul mecanic util produs ( $L_u$ ) și căldura consumată ( $Q_a$ ), respectiv *randamentul electric* (sau global) ( $\eta_e$ ) definit prin raportul dintre energia electrică produsă ( $E_e$ ) și căldura consumată ( $Q_a$ ) (Angelino et. all, 1984).

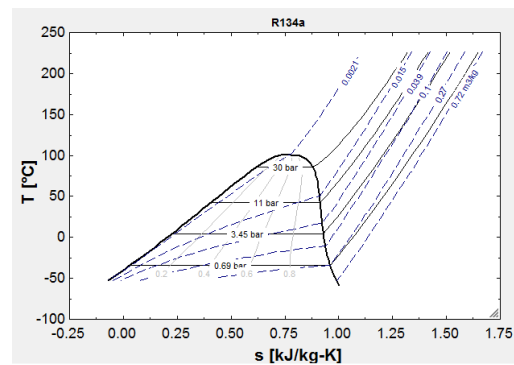
Relațiile matematice de definiție a celor două randamente sunt:

$$\eta_m = \frac{L_u}{Q_a}; \quad \eta_e = \frac{E_e}{Q_a}$$

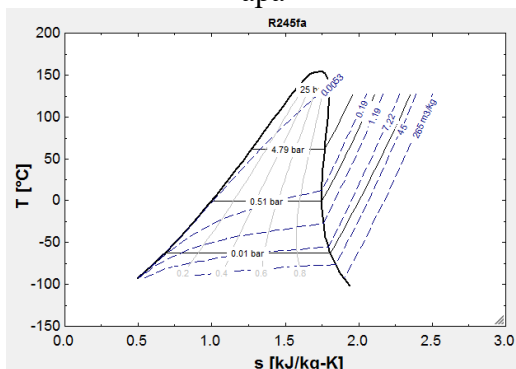
În figurile alăturate sunt prezentate diagramele termodinamice temperatură (T) – entropie (s), pentru apă, pentru freonii R134a și R245fa, respectiv pentru siloxanul MDM. Diagramele au fost realizate cu ajutorul mediului de programare Engineering Equation Solver (EES), pentru care Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca deține licență academică (Klein, 2011).



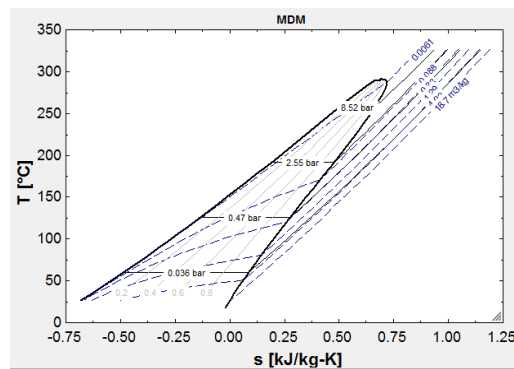
apă



R134a



R245fa



MDM

Diagrame T-s pentru apă și câteva fluide organice

Procesul termodinamic prin care se produce lucru mecanic respectiv energie electrică, este destinderea teoretic adiabatică a vaporilor. Acest proces se reprezintă în diagramele T-s prin drepte verticale. Procesul de destindere trebuie să se desfășoare în domeniul vaporilor supraîncălziți și nu este admisă apariția lichidului în timpul procesului, deoarece acesta interacționează cu organele de mașini aflate în mișcare ale detentoarelor și determină distrugerea acestora.

Datorită proprietăților termodinamice și chimice diferite, fluidele organice și apa prezintă diverse avantaje și dezavantaje. În tabelul alăturat sunt prezentate avantajele ciclurilor Rankine cu fluide organice (ORC), respectiv ale ciclurilor Rankine cu apă / abur (ORS).

#### Avantajele ORC și SRC

| Avantajele ORC                                     | Avantajele SRC                                    |
|--|---|
| Temperatură scăzută a sursei calde                 | Randament ridicat                                 |
| Temperatură de vaporizare scăzută                  | Cost redus al agentului de lucru                  |
| Presiune de vaporizare redusă                      | Agentul de lucru este ecologic                    |
| Nu necesită supraîncălzire                         | Agentul de lucru nu este toxic și nici inflamabil |
| Construcție simplă a vaporizatorului               | Stabilitate chimică ridicată a agentului de lucru |
| Temperatură redusă a vaporilor în turbină          | Consum redus de energie în pompă                  |
| Presiune de condensare ridicată                    |   |
| Compactitate ridicată (densitate mare a agentului) |   |
| Nu necesită tratarea apei și nici degazarea        |   |
| Design relativ simplu al detentoarelor             |   |

În instalațiile care funcționează cu ciclu ORC, pot fi utilizate surse de căldură foarte variate de la energia geotermală de potențial redus și energie solară, până la gaze de ardere cu temperaturi peste (250...300)°C (Siva Reddy et al., 2013), (Badr et. all, 1984), (Badr et. all, 1990).

Una dintre instalațiile cu ciclu ORC, ce utilizează energie termică de potențial foarte scăzut, este amplasată în Chena Hot Springs, Alaska, SUA și funcționează cu apă geotermală cu 73°C la intrare și 54°C la ieșirea din echipament (Brasz et. all, 2005), (Erkan et. all, 2007), (Lund, 2006), (Cogswell, 2006).

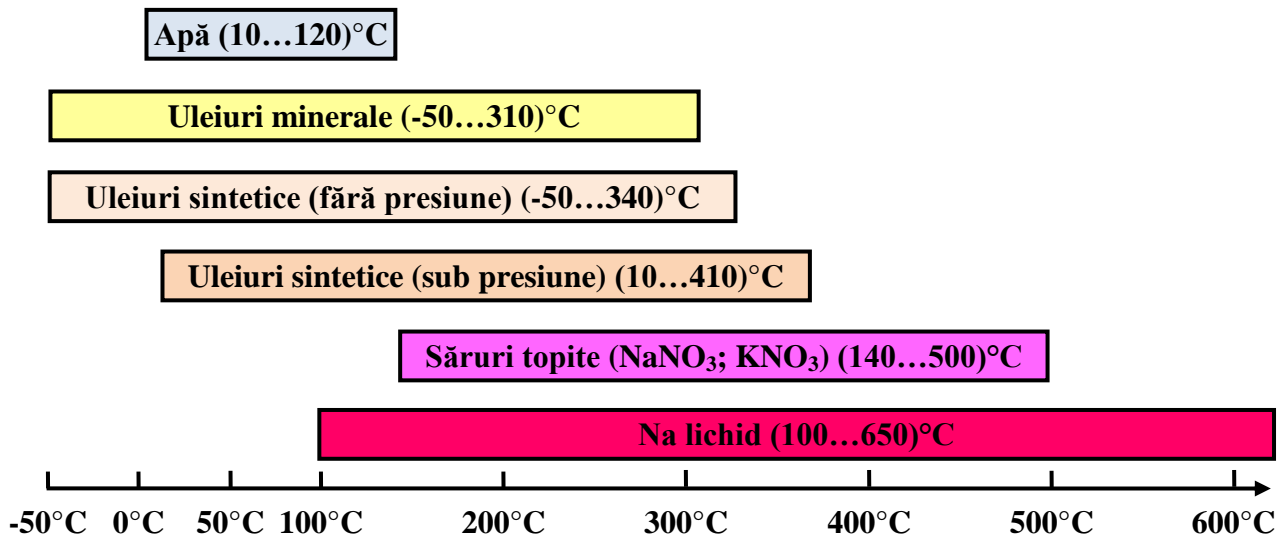
[http://www.akenergyauthority.org/Reports%20and%20Presentations/FinalProjectReport\\_ChenaPowerGeothermalPlant.pdf](http://www.akenergyauthority.org/Reports%20and%20Presentations/FinalProjectReport_ChenaPowerGeothermalPlant.pdf)

<http://chsr.squarespace.com/storage/documents/Experience%20Gained.pdf>

Randamentul detentoarelor cu fluide organice este de cca. (65...95)%, iar randamentul global al instalației se situează în intervalul (18...24)% sau mai mult, fiind cu atât mai ridicat cu cât temperatura sursei de căldură este mai ridicată. Pe de altă parte, dacă temperaturile sursei de căldură scad sub 100°C, randamentul global scade la cca. (7...8)%, sau chiar mai puțin (Badr et. all, 1984), (Badr et. all, 1990), (Nusiaputra et al., 2014).



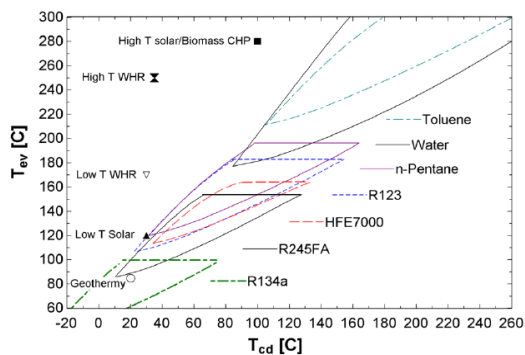
În figura alăturată este prezentat domeniul de utilizare a agenților termici pentru transportul căldurii de la sursa de căldură la instalația ORC, în funcție de temperaturile de lucru.



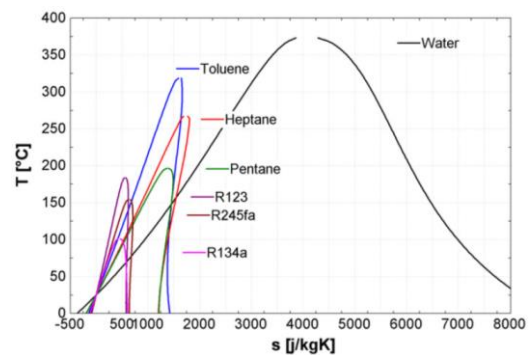
Domeniul de utilizare a agenților termici în funcție de temperaturile de lucru

(Adaptată și completată după: Northern Innovation Ltd, Technical Investigation into Thermal Oil Technology, Project no. 1555, 2010) (<http://secure.investni.com/static/library/invest-ni/documents/thermal-oil-technology-technical-investigation-report-sd-march-2010.pdf>)

Agentul de lucru se alege în funcție de nivelul de temperatură al sursei calde, în funcție de recomandările din literatura de specialitate. Pentru exemplificare, se prezintă recomandările din (Lermort et al, 2013) și (Quoilin et al, 2013).



Domeniul de lucru pentru compresoarele Scroll (Lermort et al, 2013)



Diagramele T-s pentru apă și agenți organici (Quoilin et al, 2013)

Pentru temperatura sursei calde de (80...110)°C, se recomandă utilizarea ageților R134a și R245fa. R134a este recomandat pentru funcționarea cu energie geotermală, pentru temperatura sursei calde de maxim 100°C dar determină randamente scăzute ale instalațiilor, iar R245fa este recomandat pentru funcționarea cu energie solară, pentru temperatura sursei calde de minim 80°C și permite atingerea unor valori mai ridicate ale randamentelor.

Influența agentului de lucru asupra performanțelor instalațiilor care funcționează după acest ciclu, se poate studia prin modelare matematică, realizată cu ajutorul programului EES.

## Referințe

Angelino M., Gaia M., Macchi E., - *A review of Italian activity in the field of Organic Rankine Cycles*, Proceedings of the international VDI-Seminar, Zürich, 10-12 September, 465-482, (1984).  
[http://www.turboden.eu/en/public/downloads/ORC\\_fluid\\_selection.pdf](http://www.turboden.eu/en/public/downloads/ORC_fluid_selection.pdf)

Badr O., O'Callaghan P W., Probert S.D. - *Performances of Rankine-Cycle Engines as Functions of their Expanders' Efficiencies*, Applied Energy 18, 15-27, (1984).  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0306261984900424>

Badr O., O'Callaghan P W., Probert S.D. - *Rankine-Cycle Systems for Harnessing Power from Low-Grade Energy Sources*, Applied Energy 36, 263-292, (1990).  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030626199090002U>

Brasz J.J., Biederman J.J., Holdmann G. - *Power Production from a Moderate -Temperature Geothermal Resource*, GRC Annual Meeting, Reno, Sep. 25-28, 2005.  
<http://greeningrig.com/wp-content/uploads/2009/04/power-production-from-a-moderate-temperature-geothermal-resource1.pdf>

Cogswell F.J. - *An ORC Power Plant Operating on a Low-Temperature (165°F) Geothermal Source*, GRC Transactions, 30, 729-732, 2006.  
<http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1025120.pdf>

Erkan K., Holdmann G., Blackwell D., Benoit W. - *Thermal characteristics of the Chena Hot Springs Alaska geothermal system*, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, January 22-24, 2007.  
<https://geo.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2007/erkan.pdf>

Georges E., Declaye S., Dumont O., Quoilin S., Lemort V. - *Design of a small-scale organic Rankine cycle engine used in a solar power plant*, International Journal of Low-Carbon Technologies, 8, i34-i41, (2013).  
<http://ijlct.oxfordjournals.org/content/early/2013/05/11/ijlct.ctt030.abstract>

Harada K.J. - *Development of a Small Scale Scroll Expander*, PhD. Thesis, (2010).  
<http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/handle/1957/18837>

Jradi M, Jinxing Li, Liu H., Riffat S. - *Micro-scale ORC-based combined heat and power system using a novel scroll expander*, International Journal of Low-Carbon Technologies, 9, 9-99, (2014).  
<http://ijlct.oxfordjournals.org/content/early/2014/02/19/ijlct.ctu012.full>

Klein S.A. - *Engineering equation solver*, F-Chart software, (2011).

[http://www.fchart.com/assets/downloads/ees\\_manual.pdf](http://www.fchart.com/assets/downloads/ees_manual.pdf)

Lemort V., Declaye S., Quoilin S. - Experimental characterization of a hermetic scroll expander for use in a micro-scale Rankine cycle, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer: Part A: Journal of Power and Energy, 126-136, (2011).

<http://pia.sagepub.com/content/early/2011/11/09/0957650911413840.full.pdf>

Lemort V., Guillaume L., Legros A., Declaye S., Quoilin S. - *A comparison of piston, screw and scroll expanders for small scale Rankine cycle systems*, Proceedings of the 3rd International Conference on Microgeneration and Related Technologies, (2013).

<http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/147369>

Lund J.W. - *Chena Hot Springs*, GHC Bulletin, Sep, 2-4, 2006.

<http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull27-3/art2.pdf>

Meyer D., Wong C., Engel F., Krumdieck S. - *Design And Build Of A 1 Kilowatt Organic Rankine Cycle Power Generator*, Proceedings of 35th New Zealand Geothermal Workshop, Rotura, New Zealand, 17-20 November, (2013).

[http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/NZGW/2013/Meyer\\_Final.pdf](http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/NZGW/2013/Meyer_Final.pdf)

Nusiaputra Y.N., Wiemer H.J., Kuhn D. - Thermal-Economic Modularization of Small, Organic Rankine Cycle Power Plants for Mid-Enthalpy Geothermal Fields, *Energies* 7, 4221-4240, (2014).

<http://www.mdpi.com/1996-1073/7/7/4221>

Orosz M., Mueller A., Quoilin S., Hemond, H.F. - *Small Scale Solar ORC system for distributed power*, Proc. of the Solar Paces Conference, (2009).

<http://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/24847/1/12156-Orosz.pdf>

Orosz M., Mueller A., Dechesne B.J., Hemond, H.F. - Geometric Design of Scroll Expanders Optimized for Small Organic Rankine Cycles, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 135, (2013).

[http://web.mit.edu/hemond/www/docs/geometric\\_design.pdf](http://web.mit.edu/hemond/www/docs/geometric_design.pdf)

Quoilin S., Lemort V., Lebrun J. - *Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander*, *Applied Energy* 87, 1260–1268, (2010).

<http://libra.msra.cn/Publication/26457555/experimental-study-and-modeling-of-an-organic-rankine-cycle-using-scroll-expander>

Quoilin S., VanDenBroek M., Declaye S., Dewallef P., Lemort V. - *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22, 168–186, (2013).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>

Siva Reddy V., Kaushik S.C., Ranjan K.R., Tyagi S.K. - State-of-the-art of solar thermal power plants-A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 258–273, (2013).

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004140>

Zanelli R., Favrat D. - *Experimental Investigation of a Hermetic Scroll Expander-Generator*, International Compressor Engineering Conference, Paper 1021, (1994).

<http://docs.lib.purdue.edu/iccc/1021>