

I MOTORI A FLUIDO ORGANICO NELLA CONVERSIONE TERMODINAMICA DELL'ENERGIA SOLARE

Costante Mario Invernizzi

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale (DIMI)

Università degli Studi di Brescia

Via Branze, 38 – 25123 Brescia

<http://www.costanteinvernizzi.it> - Tel. +39 339 1351915 – costante.invernizzi@unibs.it

Sommario

I motori con fluidi di lavoro diversi dal vapore d'acqua, tipo quelli utilizzati nell'industria frigorifera e organici, ben si prestano all'impiego per la generazione di potenza meccanica da sorgenti di calore a temperature medio-basse (da 100 a 400 °C). Si tratta di motori che bene si adattano alla generazione distribuita di energia meccanica/elettrica e allo sfruttamento delle energie rinnovabili (solare, biomassa, geotermia) eventualmente pure in cogenerazione. Anche la storia dello sviluppo dei sistemi ORC (Organic Rankine Cycle) testimonia l'inventiva e l'audacia degli inventori: W.J.M. Rankine sviluppò la sua completa teoria sui cicli a vapore d'acqua nel 1859, quando già nel 1825-1826 T. Howard realizzò un motore ad "etere". Inventiva ed audacia che si sono poi via via concretizzate in consapevolezza e competenza tecnologica. Oggi i motori a fluido organico rappresentano una concreta realtà e hanno raggiunto (almeno nelle versioni più tradizionali) ottima affidabilità e costi competitivi. Di grande interesse anche la storia dei sistemi ORC in Italia. Tra gli studiosi e inventori del primo Novecento T. Romagnoli, G. Andri, D. Gasperini, F. Grassi, M. Dornig, L. D'Amelio. Nella seconda metà del Novecento un contributo significativo al settore è stato dato a partire dal 1960 da G. Angelino, M. Gaia e E. Macchi, al Politecnico di Milano.

1. Introduzione

I sistemi di conversione della energia solare in energia meccanica naturalmente dovrebbero operare in aree remote e talvolta inospitali, con difficoltà e sfide tecnologiche impegnative. I sistemi "dinamici" per la conversione termodinamica dell'energia solare in energia meccanica sono per lo più sempre stati proposti per irrigazione e, in generale, l'interesse, le ricerche e gli studi nel settore dei piccoli impianti (decine di kW elettrici) dinamici solari è andato crescendo negli ultimi decenni.

Per conversione termodinamica dell'energia solare si intende: (i) la raccolta dell'energia solare su una superficie con elevato coefficiente di assorbimento sotto forma di calore, generalmente alla più elevata temperatura possibile e (ii) il successivo trasferimento del calore ad un ciclo termodinamico motore che produce lavoro meccanico.

Le prime realizzazioni di motori termodinamici solari con ciclo Rankine utilizzavano il vapore d'acqua. Per esempio, il motore di Mouchot che, costruito nel 1866 (con varie versioni realizzate fra il 1872 e il 1875) utilizzava un riflettore conico per l'evaporazione

Gruppo per la storia dell'energia solare (GSES, www.gses.it)

Incontro presso l'Archivio Centrale dello Stato

Piazzale degli Archivi 27, 00144 Roma

"Storia dell'uso dell'energia solare in Italia"

lunedì 8 luglio 2013

dell'acqua. Fra il 1868 e il 1870 Ericsson usò collettori parabolici con motori termici sempre a vapore d'acqua. Nel 1876 W. Adams costruì un grande collettore solare utilizzando numerosi piccoli specchi piani, approssimando una porzione di superficie sferica, e un motore da 1.8 kW. Altri prototipi, sempre con macchine a vapore, furono realizzati sino al 1878.

Il primo sperimentatore ad utilizzare un fluido basso-bollente fu Schultz, nel 1881. Nella breve rassegna che segue, dopo una rapida introduzione sul funzionamento di un motore a ciclo Rankine con fluido organico, si passano in rassegna alcune significative realizzazioni nello specifico settore della conversione termodinamica dell'energia solare, con una sintetica discussione finale della situazione attuale.

2. Il motore Rankine a fluido organico

Il motore Rankine a fluido organico (comunemente identificato dall'acronimo ORC, Organic Rankine Cycle) è un motore termico che trasforma energia termica in energia meccanica. La trasformazione avviene, in accordo con i principi della termodinamica, facendo percorrere a un opportuno fluido di lavoro (differente dal tradizionale vapore d'acqua) un ciclo termodinamico costituito da una serie di trasformazioni: evaporazione a pressione relativamente alta, espansione del vapore in una macchina (tipicamente una turbina) che genera lavoro meccanico, condensazione alla pressione minima (che si raggiunge allo scarico dell'espansore), ricomprensione mediante una pompa per ricominciare il ciclo.

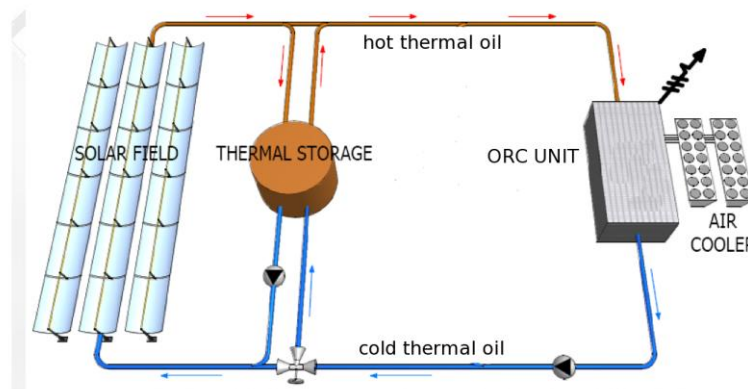


Fig. 1 - Schema di un impianto solare con motore a ciclo Rankine a fluido organico. Può talvolta risultare utile prevedere anche una integrazione di calore mediante una caldaia (<http://www.turboden.eu/>)

Il calore per l'evaporazione del fluido di lavoro deve provenire dall'esterno e, nel caso si utilizzi energia termica di origine solare, esso di solito è fornito da un olio, un fluido adatto allo scambio termico, che, attraversando il campo solare, si riscalda per poi raffreddarsi nell'evaporatore del motore. La Fig. 1 rappresenta lo schema semplificato di

un impianto solare con una unità ORC. In Figura è rappresentato anche l'accumulatore del calore e il condensatore (che tipicamente utilizza aria ambiente) dell'unità ORC. I

fluidi di lavoro di lavoro oggi utilizzati nel motore sono per lo più fluidi refrigeranti, idrocarburi, perfluoro-carburi, fluidi a base siliconica (i silossani).



Fig. 2 – Collettori solari parabolici per un motore ORC progettato per fornire calore, elettricità ed acqua calda a comunità isolate. Lo specifico progetto è della STG International (<http://www.stginternational.org/>)

3. Le prime realizzazioni e le moderne unità

Il primo sperimentatore ad utilizzare un fluido “basso-bollente” per realizzare un ciclo termodinamico solare fu Schultz, nel 1881, che impiegò diossido di zolfo (temperatura di ebollizione di $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). In verità il diossido di zolfo, in circuito chiuso con, probabilmente, collettori piani, provvedeva alla evaporazione di acqua che costituiva essa il vero fluido motore. Diossido di zolfo, eteri e ammoniaca vennero a più riprese utilizzati fra il 1902 e il 1908 da Willsie and Boyle e, nelle ultime versioni del loro motore, era presente anche un accumulatore di calore ad acqua calda per garantire il funzionamento del sistema anche in assenza di insolazione.

UNITED STATES PATENT OFFICE.

HENRY E. WILLSIE, OF CRANFORD, NEW JERSEY.

APPARATUS FOR UTILIZING SOLAR HEAT.

1,130,870.

Specification of Letters Patent.

Patented Mar. 9, 1915.

Application filed June 19, 1903. Serial No. 162,169.

To all whom it may concern:

Be it known that I, HENRY E. WILLSIE, a citizen of the United States, residing at Cranford, New Jersey, have invented new and useful Improvements in Apparatus for Utilizing Solar Heat, of which the following is a specification.

My invention relates to improvements in solar apparatus in which a vapor pressure generated by heat is used in a suitable engine to do useful work.

The objects of my invention are, to provide means for collecting and storing solar heat, for producing a vapor pressure from the stored heat, and for utilizing the vapor pressure to generate power. I attain these objects by the devices shown in the accompanying drawing, in which:

evident that sheets of other transparent substances, as insoluble gelatin, celluloid, paper, etc., may be used in the place of glass.

Upon the inclined bed of sand lie the planks, 21, 21. The sheet iron, 22, which rests upon these planks is bent and connected so as to form the trough, 23, at the head of the incline, the trough, 24, at the foot of the incline, and the connecting inclined troughs, 25, 25. The sheets of iron forming the inclined troughs are bent up at the side edges and joined together at the head and foot of the incline by being riveted to castings as shown in Figs. 9 and 10, in which 22^a is the casting.

A centrifugal pump, 26, takes water through the pipe 26^a from the storage reservoir and discharges it through the pipe 26^b

Fig. 3 – Un estratto del brevetto di H. E. Willsie, depositato nel 1903. Vi si legge: “L’invenzione ha come scopo il miglioramento di un apparato solare nel quale la pressione generata da calore viene utilizzata in un opportuno motore per produrre lavoro utile”

Gruppo per la storia dell’energia solare (GSES, www.gses.it)

Incontro presso l’Archivio Centrale dello Stato

Piazzale degli Archivi 27, 00144 Roma

“Storia dell’uso dell’energia solare in Italia”

lunedì 8 luglio 2013

Furono di volta in volta utilizzati sia collettori piani che a concentrazione, a seconda della potenza del motore e, in generale, i collettori piani risultarono privilegiati dai ricercatori che volevano evitare eccessive sofisticazioni tecnologiche. I collettori piani costavano meno di quelli con concentrazione e permettevano la realizzazione di cicli termodinamici con fluidi di lavoro a pressioni relativamente elevate anche a modeste temperature (inferiori anche a 100 °C).

Fra il 1960 e il 1962, Lucien Bronicki e Harry Zvi Tabor costruirono vari motori solari con monocloro-benzene a temperature massime di 140-150 °C e con potenze da 2 a 20 kW.

Numerosi unità per irrigazione, di varia potenza, costituite da un motore ORC alimentato da energia solare collegato con una pompa per il sollevamento dell'acqua, vennero realizzati negli anni 1970-1980. Ricordiamo l'impianto di Coolidge (Arizona), da 150 kW del 1979; il motore solare di Gila Bend del 1977, progettato dal Battelle Memorial Institute, da 37 kW, in grado di sollevare acqua da circa 4 m; la pompa solare a Willard (New Mexico) del 1979, da 19 kW, del Sandia National Laboratory; i motori della francese SOFRETES, che, a partire dal 1968, costruì venticinque esemplari da 1 kW funzionanti a bassa temperatura (70 °C) in Africa e in America Latina; la pompa solare di Bakel, nella regione del Sahel, Senegal, da 32 kW e il motore da 3 kW realizzato nel 1983 nel centro CNEN di Trisaia.

I fluidi di lavoro impiegati sono stati, di volta in volta, acetone, ammoniaca, n-butano, toluene (per le unità ad alta temperatura, 300-350 °C, con concentratori parabolici), vari Freon (11, 12, 22, 113 e 114), il tetracloro-etilene.

Da ricordare anche l'impianto solare di Borj Cedria (1982) in Tunisia (a bassa temperatura, di progetto e realizzazione italiane), da 12 kW, e un motore da circa 40 kW (1980), pure interamente progettato e realizzato da aziende e istituti universitari italiani, ad elevata temperatura (300-340 °C) costruito in Australia, con un perfluoro-carburo quale fluido di lavoro (con turbina assiale a quattro stadi e con un impegnativo scambiatore recuperatore di calore).

3. I motori realizzati in Italia e la scuola italiana nel campo dei motori ORC

L'Italia ha una lunga tradizione nello sviluppo dei motori termici con ciclo Rankine a fluido organico. Fra il 1923 e il 1931 Tito Romagnoli, usando acqua calda a 55 °C e cloroetano quale fluido di lavoro (temperatura di ebollizione normale di 12.3 °C) realizzò un motore da circa 1.5 kW. Probabilmente utilizzando collettori piani di semplice progettazione, senza concentrazione.

Il prof. Mario Dorning (professore all'Istituto di Fisica Tecnica del Politecnico di Milano) fra gli anni 1918-1922 e il professor Luigi d'Amelio (dell'allora Regio Istituto Superiore d'Ingegneria di Napoli) furono fra i primi a proporre l'uso di particolari fluidi di lavoro per realizzare motori solari di piccola potenza. Il prof. d'Amelio, per esempio, nel 1935 effettuò dettagliati studi per il progetto di un motore solare a turbina da 4.5 kW

con cloruro di etilene, con lo scopo di realizzare pompe solari da impiegare in Libia. Con temperatura di evaporazione di 40 °C e con condensazione a 23 °C. Un prototipo venne realizzato sull'isola di Ischia nel 1940 (che utilizzava però calore di origine geotermica).

Una pompa trascinata da un motore solare con diossido di zolfo (allora impiegato nelle macchine frigorifere) venne costruito da Daniele Gasperini che, in collaborazione con Ferruccio Grassi, tentò la commercializzazione della motopompa SOMOR, dal nome della società appositamente fondata (Società Motori Recupero del calore solare e del calore perduto), presentata nel 1955 anche alla fiera della energia solare a Phoenix (Arizona).

Nel 1951, il giornale "The Deseret News" nel numero del 15 Novembre (il più antico quotidiano dello stato dell'Utha, pubblicato a Salt Lake City) pubblicò la seguente nota:

<<The Sun Could Supply Electricity, by A. De Montmorency New York, November 14 – A new Italian invention will permit each house to generate its own electricity without any expense of fuel, simply by using the sun's energy. A dispatch from Milan to informations of Madrid reported that Prof. Mario Dorning of that Lombardian city had built with the help of Daniel Gasperini, an engineer, a solar engine capable of producing 10 kilowatt-hours daily. Three such machines have been sent to Egypt for a tryout.>>

Il primo brevetto del motore del Gasperini (brevetto a nome congiunto Andri/Gasperini) è del 1936 e tratta di un "motore funzionante a spese dell'energia termica dei raggi solari principalmente, ma il cui funzionamento può avvenire anche con combustibili poveri e con cascami agricoli". Il primo motore fu esposto a Torino nel 1935 e nel mese di luglio del 1936 alla Fiera di Tripoli. In Fig. 4 è riportato uno schema di massima del motore e della pompa ad esso collegata. Certamente (si veda il ref. [5]) quindici pompe furono vendute e sperimentate sino alla fine degli anni 1960, in Italia, negli Stati Uniti, in alcuni Paesi africani e in Costa Rica.

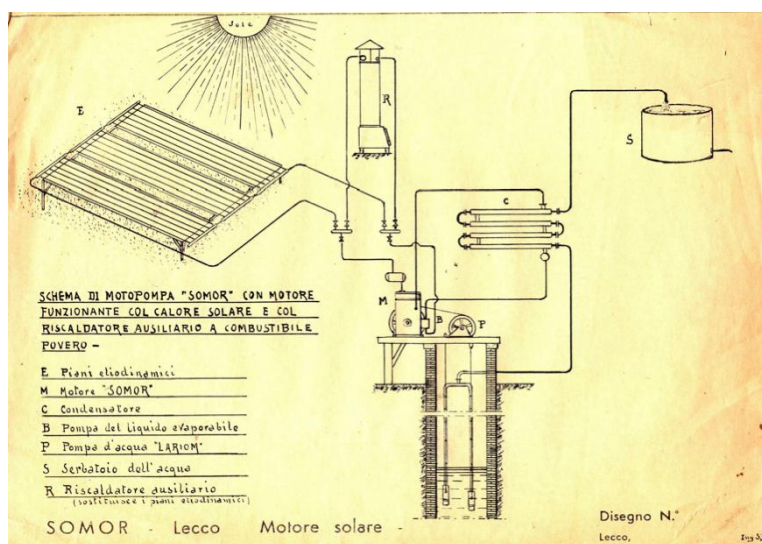


Fig. 4 – Schema del motore solare SOMOR (dal rif. [3] e per cortesia di Gildo Gasparini)

La vera “scuola italiana” dei motori Rankine a fluido organico, che in misura significativa e sistematica studiò e sviluppò numerosi motori, nacque nella seconda metà degli anni 1960 al Politecnico di Milano. Il suo fondatore fu il professore Gianfranco Angelino (1938-2010), con il prof. Mario Gaia e il prof. Ennio Macchi, prima suoi allievi e, poi, suoi colleghi e amici. Fra il 1967 e il 1984 il gruppo del Politecnico progettò e contribuì alla realizzazione di 14 motori a fluido organico con potenze da 3 a 500 kW, per applicazioni solari, per lo sfruttamento di sorgenti di calore geotermiche e per il recupero di calore da processi industriali.



Fig. 5 – Un’immagine del motore solare ORC installato a Perth (Australia) nel 1984. Potenza elettrica 35 kW (dal ref. [5])



Fig. 5 – Un modulo ORC pronto per l’installazione (<http://www.turboden.eu>)

In Fig. 4 è raffigurato il motore solare realizzato da Turboden (35 kW elettrici) nel 1984, con un perfluoro-carburo quale fluido di lavoro e olio diatermico nel campo solare, temperatura massima di 300 °C e rendimento termodinamico di 0.236. In Fig. 5 è rappresentata una moderna unità di motore ORC. Ben evidente sulla destra il rigeneratore e a sinistra l’evaporatore con il caratteristico duomo.

3. Conclusioni

Il motore a fluido organico, basato sul ciclo Rankine, grazie alla sua versatilità e alla sua buona qualità termodinamica anche a basse temperature, ben si presta (e, come visto, si è prestato in passato) al razionale sfruttamento della energia solare mediante conversione termodinamica. In particolare risulta molto attraente per taglie di potenza medio-piccole e per la generazione cosiddetta “diffusa” della energia meccanica/elettrica. La sua capacità di convertire calore di qualsivoglia natura in energia meccanica lo rende utile anche per lo sfruttamento di altre forme di energia “rinnovabile” (non solo radiazione solare, ma anche biomassa ed energia geotermica) ed anche per il recupero di cascami termici.

Nello specifico settore delle basse temperature, causa le necessariamente modeste efficienze di conversione (sia pure associate ad una ottima qualità termodinamica) il motore ORC ha oggi come forte competitore i sistemi fotovoltaici tradizionali (di efficienza comparabile, di analogo costo). La concentrazione e le elevate temperature permetterebbero invece il raggiungimento di rendimenti di conversione ragionevolmente elevati e più interessanti. Il motore ORC può naturalmente anche operare in configurazione cogenerativa.

Il mantenimento nel tempo di buone caratteristiche riflettenti per i concentratori, magari associati anche all’inseguimento, costituiscono tuttora aspetti impegnativi.

L’affidabilità del motore è già ottima anche se ulteriori sforzi in ricerca e sviluppo sarebbero auspicabili nel settore dei fluidi di lavoro (costi e disponibilità, aspetti ambientali e di sicurezza) e nello sviluppo di scambiatori di calore ed espansori, soprattutto per motori di piccola potenza.

Bibliografia

[1] Silvi Cesare, *Storia del vapore e della elettricità dal calore del sole con specchi piani o quasi piani: possibilità esplorate dagli scienziati italiani sin dall’Ottocento*, Energia, Ambiente/Innovazione, 2/2010, 34-47.

[2] Invernizzi Costante, *Closed Power Cycles*, Springer-Verlag London, 2013.

[3] Silvi Cesare, *Storia della pompa solare SOMOR e dei suoi inventori*, pubblicato su www.gses.it, in occasione della mostra GSES e CONASES, Fiera del Sole, Osnago (Lecco), 24-26 settembre, 2010.

[4] Silvi Cesare, *La pompa solare SOMOR: riscoperta di un’invenzione italiana del primo Novecento e sue attuali prospettive*, pubblicato su www.gses.it, dicembre 2009.

[5] Gaia Mario, *Thirty years of organic Rankine developing*. In: First International Seminar on ORC power systems. Delft TU-Technical University, The Netherlands, September 22-23, 2011 (Key-note presentation).