



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BRESCIA



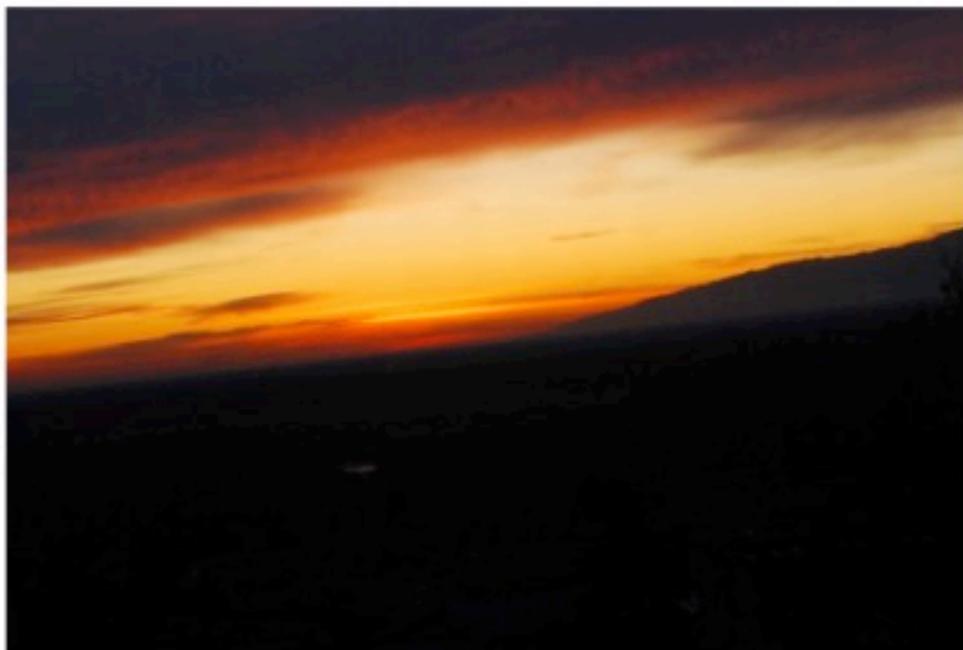
Supercritical CARbon dioxide/Alternative fluids Blends for Efficiency Upgrade of Solar power plant

Program H2020-EU 3.3.2: Low-cost low-carbon energy supply
Developing solutions to reduce the cost and increase performance of renewable technologies

Paolo Iora, Costante Invernizzi, Gioele Di Marcoberardino
paolo.iora@unibs.it

Secure, Clean and
Efficient Energy– Roma 1st July 2019

Energia dal SOLE

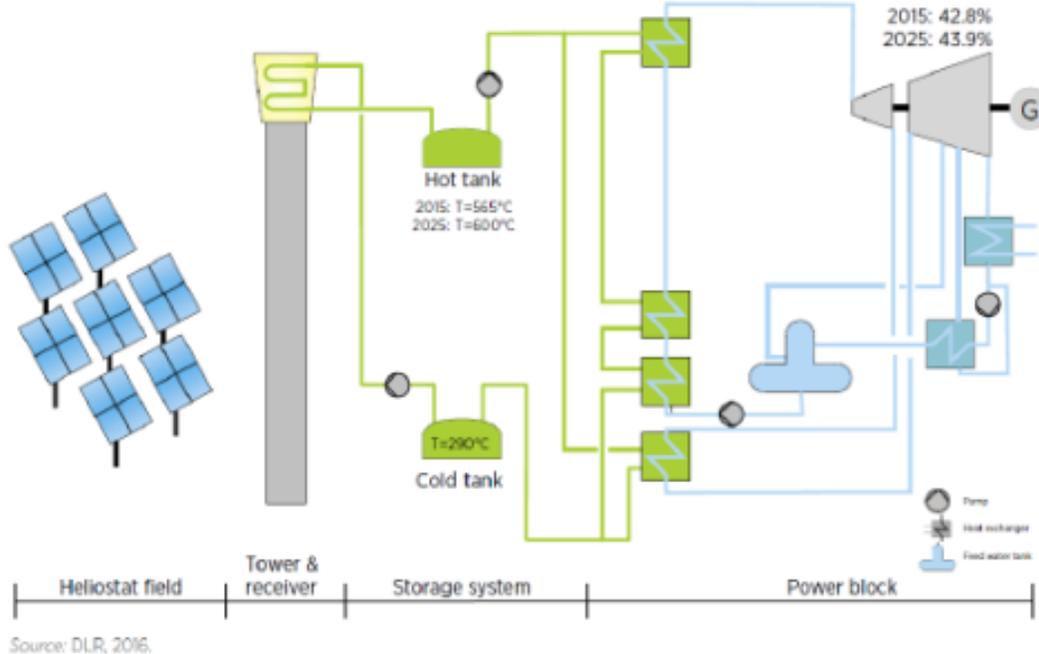


Il calore prodotto dalle reazioni nucleari, determina una elevatissima temperatura del «core» (diversi milioni di gradi). Questo sostiene le reazioni di fusione e produce energia che viene trasferita sulla superficie e irradiata nello spazio esterno

Per un osservatore terrestre il Sole appare come:

- Distanza media dalla Terra $150 \times 10^6 \text{ km}$
- Diametro del sole $1.5 \times 10^4 \text{ km}$
- Diametro della terra $1.3 \times 10^4 \text{ km}$
- Costante solare 1367 W/m^2
- Un corpo nero con T di circa $6000 \text{ }^\circ\text{C}$
- La disponibilità termodinamica è circa 0.93
- Per convertire in elettricità l'energia solare sono molto diffusi i pannelli fotovoltaici, ma non è il sistema più efficiente...

Il solare termodinamico



Un elevato rapporto di concentrazione comporta:

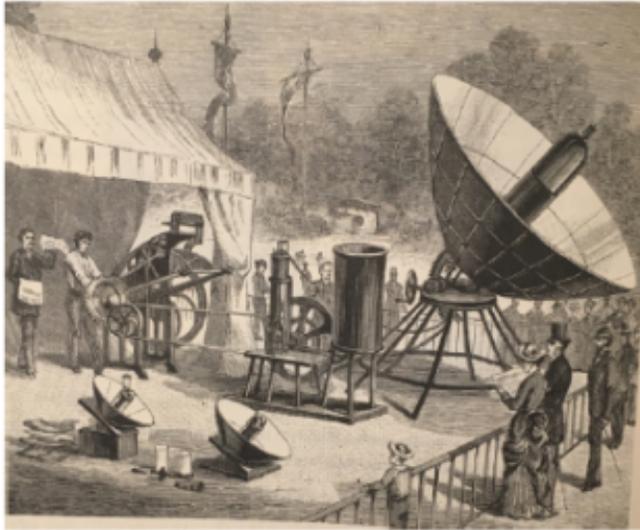
- Temperatura elevata
- Elevata efficienza di conversione
- Riduzione dei costi dell'energia elettrica generata

La conversione termodinamica dell'energia solare in energia elettrica consiste nel:

- Concentrare l'energia solare su superfici con elevato coefficiente di assorbimento, alla più alta temperatura possibile
- Trasferire il calore ad alta temperatura così accumulato ad un pozzo freddo (generalmente l'ambiente) attraverso un ciclo termodinamico che produce energia meccanica, successivamente convertita in elettricità da un alternatore.

The first HT solar engines – in Europe

Augustin Mouchot (7 April 1825 – 4 October 1912): 1860 - << ... coal will undoubtedly be used up. What will industry do then? ... Reap the rays of the Sun! >>



The solar powered printing press of Abel Pifre, August 6th 1882. While exhibiting it at the Gardens of the Tuileries, he printed five hundred copies of the *Le Journal de Soleil* (a journal specially composed for the occasion).

Abel Pifre (1852 - 1928) an engineer, an assistant and a collaborator to Mouchot.

LA CHALEUR SOLAIRE

ET SES

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

PAR

A. MOUCHOT

35 Gravures intercalées dans le texte

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DE L'ÉCOLE IMPÉRIALE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES
35, Quai des Augustins, 36

1869

The first HT air solar engines – in America

THE SUN MOTOR.

INDIA, South America, and other countries interested in the employment of sun power for mechanical purposes, have watched with great attention the result of recent experiments in France, conducted by M. Tellier, whose plan of actuating motive engines by the *direct* application of solar heat has been supposed to be more advantageous than the plan adopted by the writer of increasing the intensity of the solar rays by a series of reflecting mirrors. The published statements that "the heat-absorbing surface" of the French apparatus presents an area of 215 square feet to the action of the sun's rays, and that "the work done has been only 43,360 foot-pounds per hour," furnish data proving that Tellier's invention possesses no practical value.

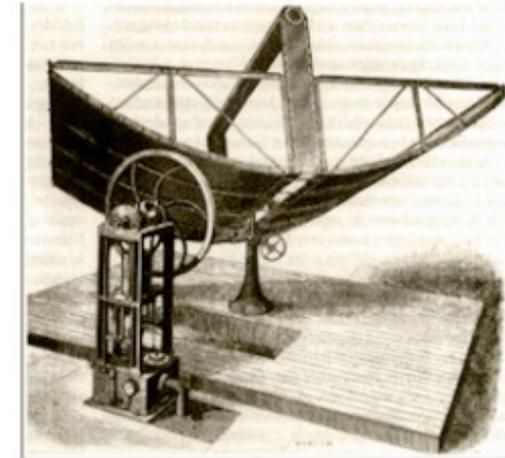
The results of protracted experiments with my sun motors, provided with reflecting mirrors as stated, have established the fact that a surface of 100 square feet presented at right angles to the sun, at noon, in the latitude of New York, during summer, develops a mechanical energy reaching 1,850,000 foot-pounds per hour. The advocates of the French system of dispensing with the "cumbrous mirrors" will do well to compare the said amount with the insignificant mechanical energy represented by 43,360 foot-pounds per hour developed by 215 square feet of surface exposed to the sun by Tellier, during his experiments in Paris referred to.

The following brief description will give a clear idea of the nature and arrangement of the reflecting mirrors adopted by the writer for increasing the intensity of the solar heat which imparts expansive force to the medium propelling the working piston of the motive engine. Fig. 1 represents a perspective view of a cylindrical heater, and a frame supporting a series of reflecting mirrors composed of narrow strips of window-glass coated with

John Ericsson (July 31, 1803 – March 8, 1889)



1872 – rappresentazione del - primo - motore ad aria con concentratore puntuale



1884 – concentratore parabolico

Ericsson felt he could not << *recommend the erection of solar engines in places where there is not steady sunshine until means shall have been devised for storing up the radiant energy in such a manner that regular power may be obtained from irregular solar radiation* >>. From J. Perlin, *Let it Shine*, New World Library, 2013, p. 106

The LT "solar thermodynamic" in Italy 1920-1960

- Tito Romagnoli – between 1923 and 1930 – built a series of engines (of small power, 2 HP (≈ 1.5 kW), and low efficiency).
- Luigi d'Amelio (1893-1967), in 1935, designed a **turbine** solar engine.
- Daniele Gasperini (1865 - 1960) e Ferruccio Parri (1897 – 1980) in 1955, at the fair of the Solar Energy in Phoenix (USA), presented their "solar pump SOMOR".

Ing. Prof. LUIGI D'AMELIO
 Istituto dell'Impiego di Motores termico e idraulico
 nel E. Istituto Superiore d'Ingegneria di Napoli

234

LO SFRUTTAMENTO DELLE ENERGIE NATURALI IN LIBIA PER FORZA MOTTRICE

L'IMPIEGO DI VAPORI AD ALTO PESO MOLECOLARE
 IN PICCOLE TURBINE

E L'UTILIZZAZIONE DEL CALORE SOLARE PER ENERGIA MOTTRICE



UNIVERSITA' DI PADOVA
 Dip. Ingegneria Meccanica



DIM000003646



I. N. A. G.
 Industrie Napoletane Arti Grafiche
 NAPOLI

COLLOCAZIONE	
N. 112	
DATI SBN	
NO. N°	
NO. S°	
NO. N°	
SEZ. D. I. M.	
CLAS. 333.773	
CLASS.	
NOTE	
UNIVERSITA' DI PADOVA	

Patented Dec. 16, 1930

1,785,651

UNITED STATES PATENT OFFICE

TITO ROMAGNOLI, OF INDOANA, ITALY

Application filed May 27, 1924, Serial No. 274,000, and in Italy May 27, 1925.

The present invention relates to installations intended to recover sun heat and to convert it into motive force by the intermedium of an operating medium which is alternately in liquid state and in vapour state and whose pressure is exhausted in an engine.

This invention comprises a set of this kind in which the engine is enclosed within a sealed chamber where the operating medium is stored in liquid state and a fluid which has absorbed sun heat is caused to impart its heat to said operating medium.

This invention provides means for sealing the chamber where the operating medium is in vapour state by means of a lubricant which fills the bottom of said chamber and which the packing gland of the engine, while means are provided for the recovery of said lubricant.

This invention comprises further features directed to secure a satisfactory operation of the set.

Fig. 1 which comprises in cooperation with receiver 4 an intermediate similar space 1'. In casing 2 is located a drum 3 which in operation with casing 2 provides a further similar space 6 in which opens the top open end of said drum 3.

In space 6 are located tubes 8 which at their ends extend through top wall 9 of casing 2 having a flange 10 which provides in operation with casing 2 a further similar space 6 in which opens the top open end of said drum 3.

In space 8 are located tubes 8 which at their ends extend through top wall 9 of casing 2 having a flange 10 which provides in operation with casing 2 a further similar space 6 in which opens the top open end of said drum 3.

A tube 11 leads from top portion of chamber 1' to the suction side of a rotary pump 12 whose pressure side is connected with pipe 13; the said pump 12 is driven by sun-heat rays as hereinafter described and causes the heat absorbing fluid to circulate through absorber 1, tube 2, chamber 3, tube 4, space 5, pipe 11, pump 12, tube 8 and again by heat absorber as shown by arrows.

Under receiver 4 is located a crank case 13 which is connected to the bottom and



The LT "solar thermodynamic" in Italy 1970-1980

- **Facchini U.**, *Motori solari per l'agricoltura*, La Termotecnica, No. 5 (1979), 292-295.
- **Angelino G.**, Facchini U., **Gaia M.**, **Macchi E.**, **Sassi G.** *Motore solare della potenza di 3 kW per il pompaggio di acqua – Programma e stato dei lavori*, Condizionamento dell'aria, Riscaldamento, Refrigerazione, No 11 (1977), 884-887.
- Gaia M., Macchi E., *A comparison between Sun and Wind as Energy Sources in Irrigation Plants*. In: Proceedings of International Solar Energy Society (ISES) Congress, Delhi (India), January 1978. Vol I, 265-272.
 - **Macciò C.**, **Tomei G.**, Angelino G., Gaia M., Macchi E. *Operational Experience of a 3.0 kW Solar Powered Water Pump*. In: 1979 Silver Jubilee International Congress of the International Solar Energy Society (ISES), May 28 – June 1, Atlanta, Georgia (USA): Sun II, Vol 2, pp 1501-1505, Pergamon Press.
 - Gaia M., Angelino G., Macchi E., **De Heering D.**, **Fabry J. P.** Risultati sperimentali del motore a fluido organico sviluppato per l'impianto solare di Borj Cedria. energie alternative HTE anno 6 no 27, gennaio-febbraio 1984, 31-34.
 - Angelino G., Gaia M., Macchi E., **Barutti A.**, Macciò C., Tomei G. *Test Results of a Medium Temperature Solar Engine*, International Journal of Ambient Energy, July 1982, Vol. 3, No. 3, pp. 115-126.

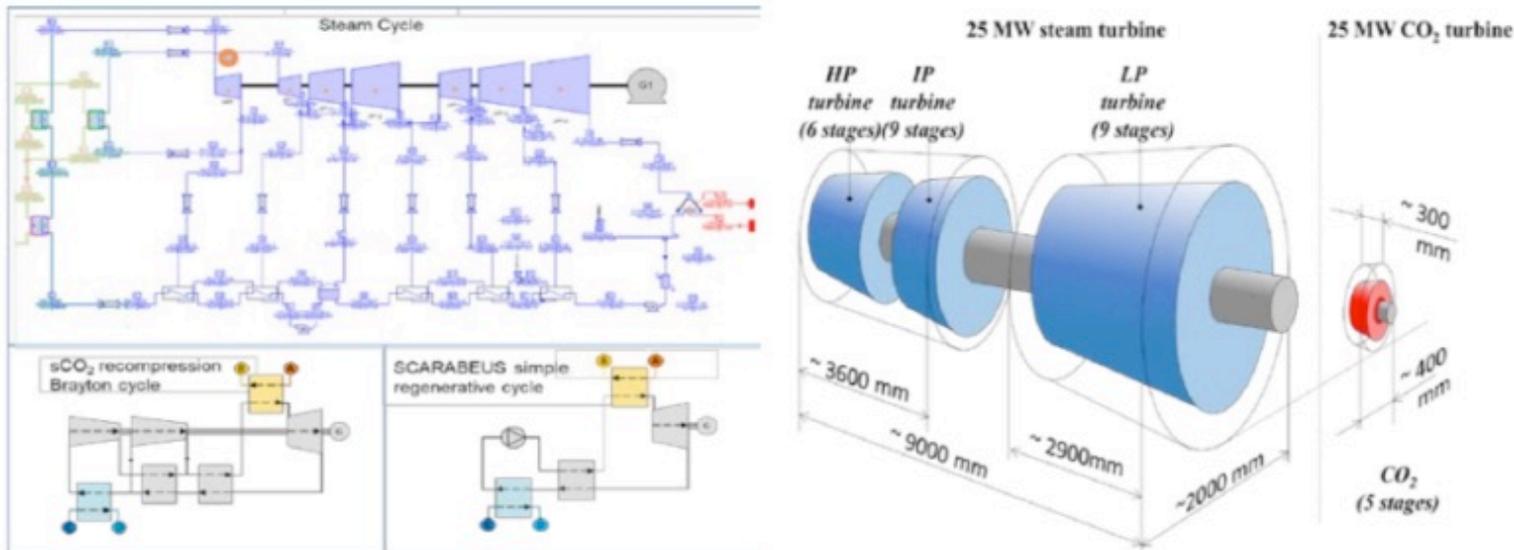
Gli impianti più recenti

Power plants	Installed maximum capacity *(MW)	Yearly total energy production (GWh)	Country	Developer/Owner	Completed
Ivanpah Solar Power Facility	392 (U/C)	650	United States	BrightSource Energy	2013
Ashalim Power Station	121 (U/C)	320	Israel ^[7]	Megalim Solar Power<	2018
Crescent Dunes Solar Energy Project	110 (U/C)	500	United States	SolarReserve	2015
PS20 solar power tower	20 ^[8]	44	Spain	Abengoa	2009
Gemasolar ^[9]	17	100	Spain	Sener	2011
PS10 solar power tower	11 ^[10]	24	Spain	Abengoa	2006
Sierra SunTower	5 ^[11]		United States	eSolar	2009
Jülich Solar Tower	1.5 ^{[12][13]}		Germany		2008
Greenway CSP Mersin Solar Tower Plant	5 ^[14]		Turkey	Greenway CSP	2013
National Solar Thermal Test Facility	1 (5 - 6 MWt)		United States	U.S. Department of Energy	1978



- Gli impianti a concentrazione basati su cicli a vapor d'acqua hanno costi dell'elettricità prodotta di circa 150 €/MWh, ancora lontani dal target di 100 €/MWh con cui risulterebbeo competitivi nel mercato di generazione elettrica
- Un modo per ridurre i costi è utilizzare CO₂ in condizioni supercritiche (sCO₂) come fluido di lavoro al psoto del vapor d'acqua nel power-block

Il progetto «SCARABEUS»



H₂O vs. CO₂ : confronto «power block» e dimensioni della turbina

L'obiettivo del progetto è sviluppare **un ciclo termodinamico innovativo basato su miscele di CO₂** in grado di migliorare l'efficienza di conversione e ridurre il costo d'investimento sia rispetto allo stato dell'arte dei cicli a vapore che rispetto agli impianti con CO₂ supercritica

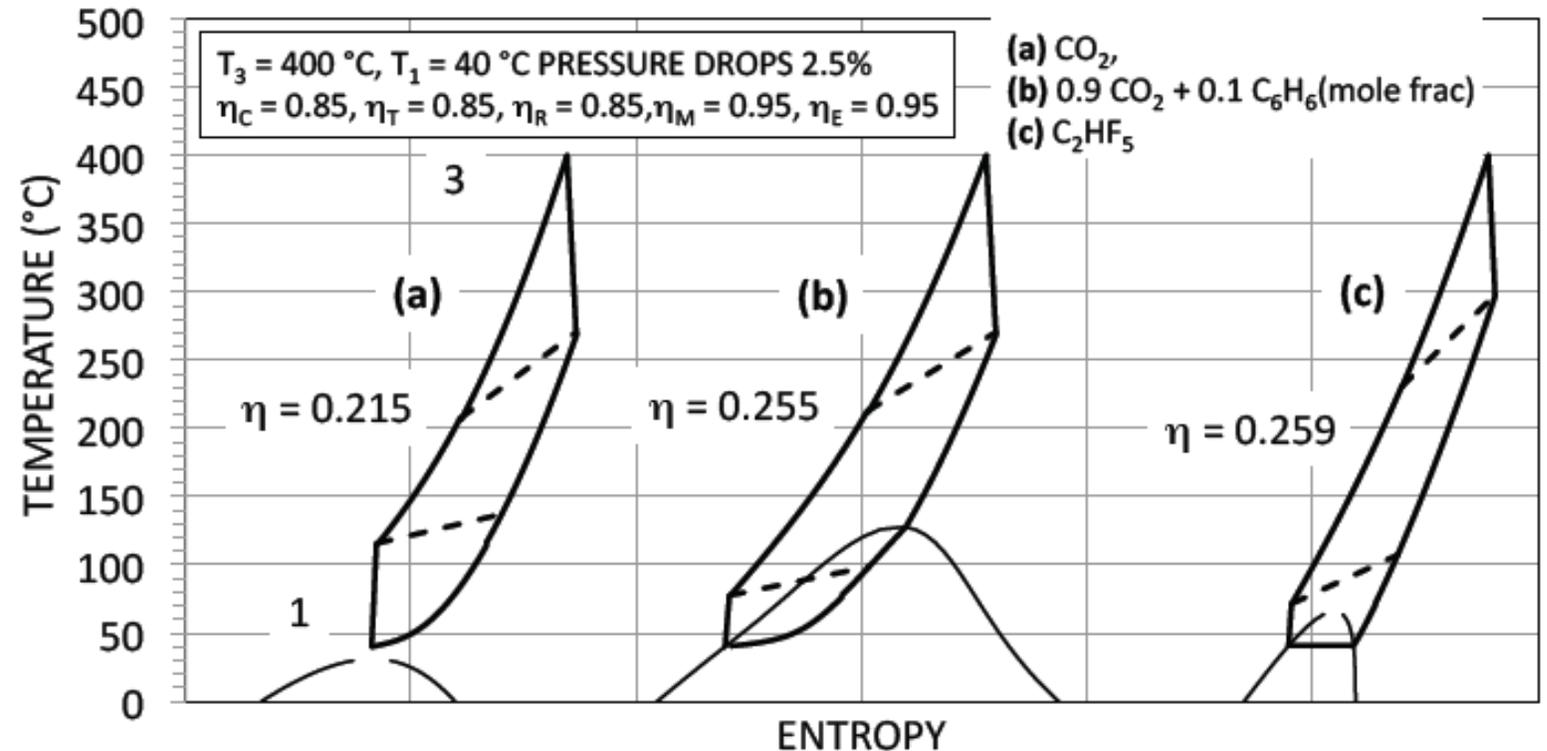
CO₂-blend

- Improved Performance
- Smaller Turbomachinery
- Fewer equipment
- Air-cooled condenser with enhanced finned tube

CAPEX 3500 €/kW
OPEX 12 €/MWh
LCOE < 96 €/MWh

Perché le miscele di CO₂?

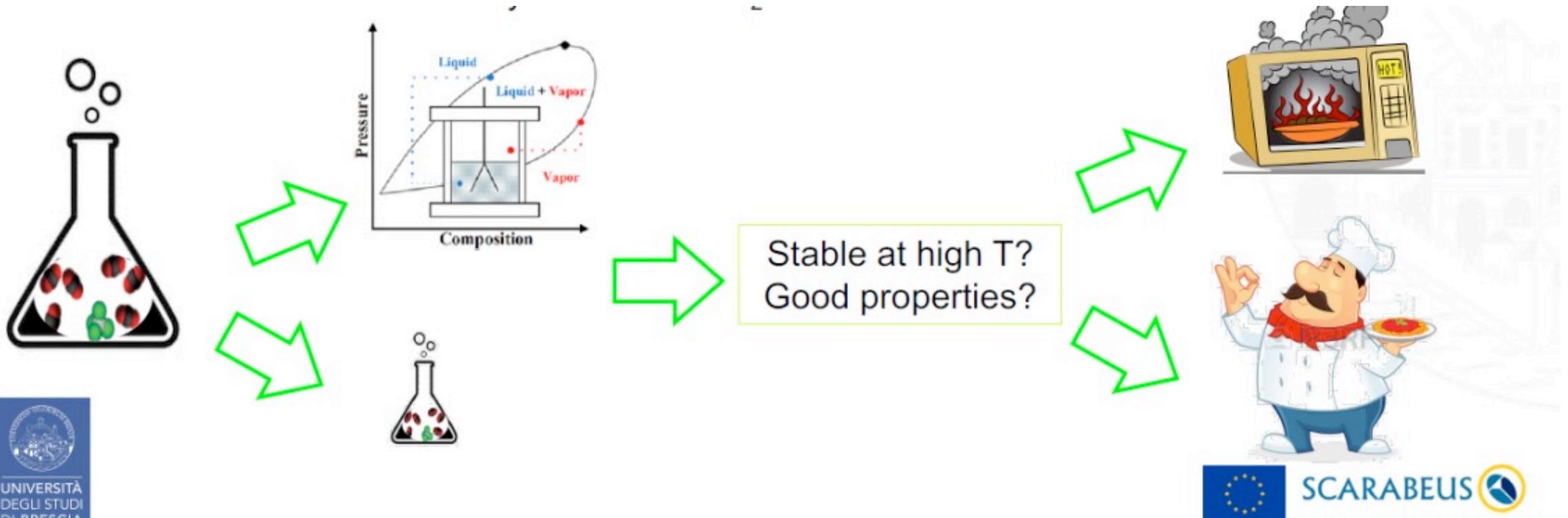
Il principale svantaggio della CO₂ come fluido di lavoro è la temperatura critica relativamente bassa (31°C): nel caso di impianti solari situati in aree desertiche non consente di sfruttare i vantaggi dei cicli condensativi



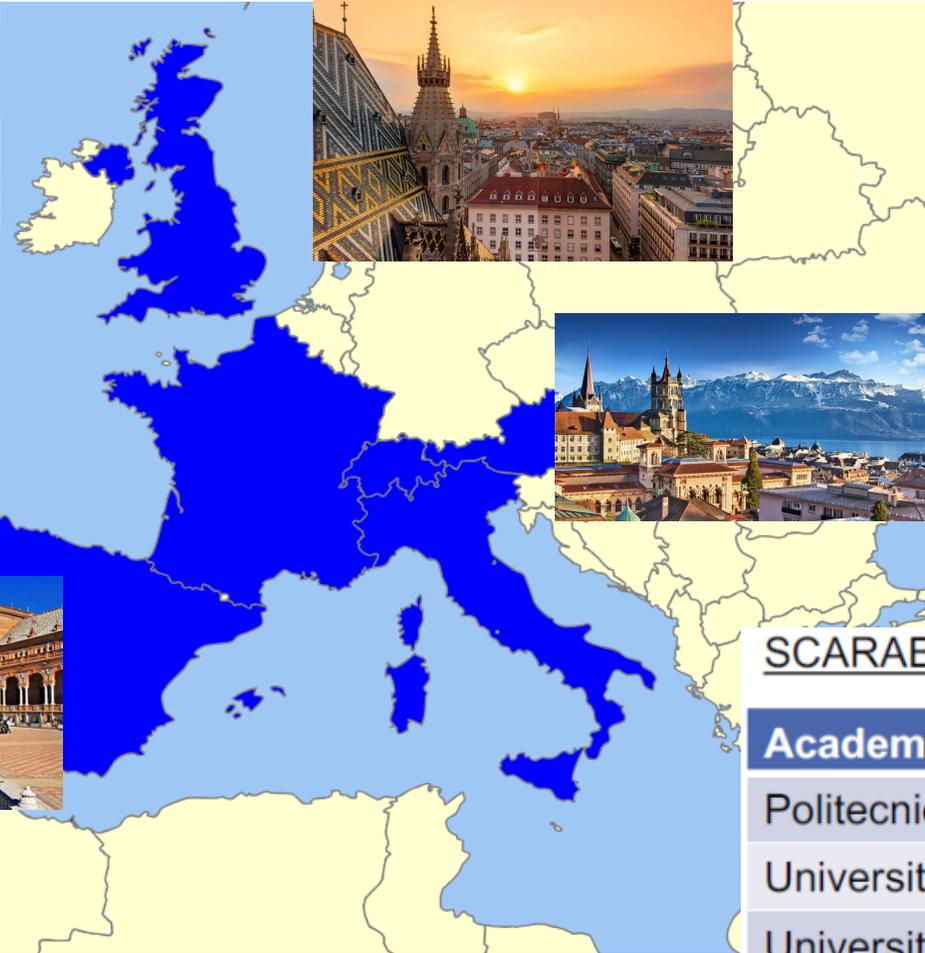
Un modo per superare questo limite consiste nel modificare la temperatura critica della CO₂ aggiungendo in miscela delle piccole quantità di altri fluidi con temperatura critica più elevata.

Le scelta del fluido in miscela con CO2

- Valutazione dei possibili candidati per la miscela con CO2 considerando diverse categorie di fluidi
- Sviluppo di modelli termodinamici per determinare le proprietà delle miscele
- Verifica sperimentale della stabilità termica fino a 700 °C delle miscele individuate



Il team «SCARABEUS»



- Coordinatore: Politecnico di Milano
- Coinvolte 5 Università e 4 aziende
- Finanziato da European Union's Horizon 2020 research and innovation programme - grant agreement n. 814985.
- Periodo: 2019- 2023 (48 mesi)
- Budget: 5M€

SCARABEUS Partners:

Academia and R&D	Industry
Politecnico di Milano (IT)	Exergy (IT)
Università di Brescia(*) (IT)	Kelvion (FR)
University of Seville (ES)	Abengoa (ES)
City University of London (UK)	Quantis (CH)
Vienna University of Technology (AT)	

Conclusioni: alcuni suggerimenti per una proposta competitiva

Il buon esito di una proposta, in particolare nell'ambito dei progetti finanziati dall'Unione Europea dipende da molteplici aspetti:

- La validità dell'idea e la sua coerenza con le richieste della «call»
- Individuare l'appropriato TRL per evidenziare il miglioramento rispetto allo stato dell'arte (N.B. l'idea non deve necessariamente essere inedita: utile se uno o più partner sono già attivi sui temi del progetto)
- Obiettivi ambiziosi ma ragionevolmente realizzabili: è utile (e doveroso) puntare in alto, ma senza compromettere la credibilità della proposta
- Ruolo ben definito del team di enti di ricerca e industrie. Ciascun partner deve risultare indispensabile alla riuscita del progetto

Conclusioni: alcuni suggerimenti per una proposta competitiva (2)

Il ruolo del **coordinatore** nel curare i seguenti aspetti cruciali:

- Programmazione delle attività con una precisa definizione dei diagrammi GANTT (sequenza temporale delle attività dei diversi WP) e PERT (interazione tra i partner)
- Equilibrata distribuzione del budget, da definirsi in funzione delle attività e su base geografica
- Individuazione di rischi/criticità e di contromisure (mitigation actions) ben ponderate

Il ruolo dei **partner** (caso di gruppi di ricerca medio-piccoli): alto grado di specializzazione in attività chiave del progetto, acquisito negli anni e quantificabile con con pubblicazioni, finanziamenti precedenti, contratti di ricerca ecc...

Non arrendersi di fronte a una bocciatura: se il progetto è valido, vale la pena riprovare con opportuni aggiustamenti che tengano in considerazione i giudizi dei revisori

Acknowledgements

The SCARABEUS project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement N° 814985



Supercritical CARbon dioxide/Alternative fluids Blends for Efficiency Upgrade of Solar power plant