

Energie rinnovabili: la ricerca del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF)

Francesco Balduzzi, Alessandro Bianchini, Maurizio De Lucia, Giovanni Ferrara, Daniele Fiaschi, Giampaolo Manfrida, Francesco Papi, Francesco Taddei, Pietro Ungar, Claudio Zuffi

Questa sezione descrive le attività di ricerca e sviluppo svolte nei laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF) nel settore delle energie rinnovabili. In particolare, vengono presentati i principali gruppi di ricerca attivi e le loro linee di indagine, che spaziano dalle tecnologie solari a concentrazione, allo sviluppo di soluzioni innovative per l'energia eolica, fino alle applicazioni geotermiche a basso impatto ambientale. Ciascuna sezione illustra l'evoluzione storica, i progetti di riferimento e i risultati conseguiti, mettendo in evidenza il ruolo di Unifi e delle sue collaborazioni nazionali e internazionali nello sviluppo di sistemi energetici sostenibili.

Gruppo TIES – Sviluppo di tecnologie solari a concentrazione¹

Già dal 1978 presso l'allora Istituto di Energetica si svolgevano le prime ricerche innovative sul solare termodinamico, con la realizzazione nel laboratorio – sotto la guida del Prof. Alessandro Bosio – di uno dei primi simulatori solari (con potenza di 20 kW) sul quale venivano svolte prove di prestazioni in ambiente controllato di collettori solari termici. Successivamente, dal 1985 al 1995 sul terrazzo dell'edificio di S.

¹ Questo paragrafo è stato scritto da Maurizio De Lucia e Francesco Taddei.

Francesco Balduzzi, University of Florence, Italy, francesco.balduzzi@unifi.it, 0000-0003-3333-945X
Alessandro Bianchini, University of Florence, Italy, alessandro.bianchini@unifi.it, 0000-0002-8042-5863
Maurizio De Lucia, University of Florence, Italy, maurizio.delucia@unifi.it, 0000-0003-2000-1927
Giovanni Ferrara, University of Florence, Italy, giovanni.ferrara@unifi.it, 0009-0004-8713-1958
Daniele Fiaschi, University of Florence, Italy, daniele.fiaschi@unifi.it, 0000-0002-9704-3191
Giampaolo Manfrida, University of Florence, Italy, giampaolo.manfrida@unifi.it, 0000-0003-3371-3173
Francesco Papi, University of Florence, Italy, francesco.papi@unifi.it, 0000-0002-5723-7805
Francesco Taddei, University of Florence, Italy, francesco.taddei@unifi.it, 0000-0001-6341-6490
Pietro Ungar, University of Florence, Italy, pietero.ungar@unifi.it,
Claudio Zuffi, University of Florence, Italy, claudio.zuffi@unifi.it, 0000-0001-8703-0576

Referee List (DOI 10.36253/fup_referee_list)

FUP Best Practice in Scholarly Publishing (DOI 10.36253/fup_best_practice)

Francesco Balduzzi, Alessandro Bianchini, Maurizio De Lucia, Giovanni Ferrara, Daniele Fiaschi, Giampaolo Manfrida, Francesco Papi, Francesco Taddei, Pietro Ungar, Claudio Zuffi, *Energie rinnovabili: la ricerca del Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF)*, © Author(s), CC BY 4.0, DOI 10.36253/979-12-215-0972-4.23, in Bruno Facchini, Giovanni Ferrara, Rocco Furferi (edited by), *Ingegneria Industriale & Ingegneria dell'Informazione per il territorio fiorentino – 1. Ingegneria Industriale*, pp. 163-172, 2026, published by Firenze University Press, ISBN 979-12-215-0972-4, DOI 10.36253/979-12-215-0972-4

Marta fu installato dal Prof. Giampaolo Manfrida un banco prova per collettori a tubi evacuati, sul quale si raggiungevano temperature fino a 120°C per sperimentare il controllo del sistema a massima exergia ai fini del possibile accoppiamento a cicli ORC (solare termodinamico).



Figura 115 – Banco prova collettori solari evacuati sul terrazzo della sede di S. Marta.

Nel 2004 il Prof. Francesco Martelli formalizzò la costituzione di un centro interdipartimentale, denominato CREAR, per condurre le attività di ricerca interdisciplinari nel campo delle energie rinnovabili. In questo centro furono condotte le prime ricerche sullo sfruttamento delle biomasse a cui poi si sono aggiunte quelle sui biofuel (Prof. Charamonti) e le attività sul solare a concentrazione per mano del Prof. De Lucia. La collaborazione con altri dipartimenti dell'Ateneo di area Agraria, Chimica ed Elettronica e Scienza della Terra risultò fondamentale per sviluppare progetti ambiziosi a livello EU (BIO-MGT, REACT, ALONE etc) piuttosto che progetti nazionali. Sempre su iniziativa del gruppo di ricerca ormai ingrandito ed affermatosi anche internazionalmente, nel 2010 è stato poi costituito il Consorzio Ricerca RE-Cord (Renewable Energy Consortium for Research and Demonstration») che, ampliando le attività del CREAR, mette a sistema le competenze e le risorse (laboratori ed impianti) dei diversi soggetti, anche non accademici. Tutto sotto l'egida di Unifi. Le ricerche sui biofuel sono state finalizzate dal consorzio RECORD che attualmente è diventata una realtà di riferimento a livello EU.

L'energia solare ha una storia molto diversa. Infatti, questo filone di ricerca nasce dalla collaborazione europea di un gruppo del dipartimento, che aveva messo a punto sistemi di Inlet Air Cooling, diventato uno standard nelle centrali elettriche basate sui gruppi combinati, e la German Aerospace Research (DLR). Inizialmente il gruppo di ricerca di Unifi si occupava dell'ottimizzazione dei sistemi ad assorbimento sviluppati in ambito IAC per la realizzazione di impianti di Solar Heating&Cooling, con collettori PTC della DLR ma ben presto furono avviate ricerche in Unifi per ottimizzare questi ultimi.

Fin dagli albori della ricerca in Unifi puntarono subito ad andare oltre lo stato dell'arte dell'epoca che per diversi anni è stato costituito dai risultati del progetto ARCHIMEDE. Programma di interesse nazionale che aveva riportato in auge il solare termodinamico (CSP) proponendo l'Italia al vertice della ricerca nel settore (2001).

Presso Unifi si puntò da subito allo sviluppo di sistemi di media taglia e temperatura sempre a concentrazione lineare ma per applicazioni industriali (2005 progetto SALTO). La presenza in Firenze del CNR-INO (Istituto Nazionale di Ottica) ha poi consentito la creazione di un secondo polo nazionale, dopo ENEA, spostando il baricentro della concentrazione solare per applicazioni non solo in ambito CSP. Sono state tante e molteplici le soluzioni proposte, le iniziative e i progetti per lo sfruttamento ed uso di energia solare sia per applicazioni termiche che CPV.



Figura 116 – Prototipo di sistema Fotovoltaico a concentrazione con recupero termico (CPV-T).

Contemporaneamente, a seguito dell'abbattimento dei costi del PV (2010), Unifi ha studiato e sviluppato una soluzione di micro-concentratore concepito con un'ottica utilizzo simile agli impianti PV. La proposta mirava a superare il concetto dei grandi concentratori parabolici concepiti in ambito del progetto «Archimede» per sviluppare sistemi modulari di piccola taglia (denominati m-PTC) completamente autonomi proprio come i moduli PV. Questa soluzione è stata recentemente (2023-25) inserita tra i progetti strategici nazionali. I sistemi m-PTC sono inseriti tra i progetti PTR. Si tratta del programma nazionale, «la Ricerca di Sistema», concepito per promuovere l'innovazione tecnologica, sperimentando e implementando nuove soluzioni atte a rendere il sistema energetico nazionale più flessibile, efficiente e resiliente nonché a contribuire alla transizione verso un sistema energetico più sostenibile.



Figura 117 – varie soluzioni di PTC sviluppate da Unifi.



Figura 118 – Versione Finale di PTC Industrial Process.



Figura 119 – Impianto PILOT di PTC per Positive Energy District (PED).

Gruppo ARES – Sviluppo di tecnologie eoliche²

Le ultime arrivate fra le turbomacchine del DIEF sono le turbine eoliche. Le macchine rotanti più grandi della Terra sono diverse da ogni altra turbomacchina, elaborando enormi portate, con salti di pressione di pochi Pascal e bassissime velocità di rotazione. Tuttavia, l'esperienza nell'aerodinamica dei profili, soprattutto da un punto di vista computazionale, del DIEF ha fatto sì che questo settore iniziasse nel 2008 per merito del Prof. Carnevale, il quale colse l'opportunità di un progetto finanziato per lo sviluppo di piccoli rotori ad asse verticale per generazione distribuita insieme alla ditta Pramac (Figura 120).

Dopo quell'esperienza, il gruppo di lavoro, che all'epoca comprendeva il Prof. Ferrara, l'Ing. Ferrari ed un dottorando, il Dr. Bianchini, ha continuato a lavorare su temi di aerodinamica instazionaria e di design aerodinamico, espandendo i temi di ricerca anche alle assi orizzontali. Crescendo di anno in anno, il gruppo, oggi coordinato dal dottorando di allora divenuto nel 2024 professore al DIEF, ha portato il settore eolico ad essere uno dei fiori all'occhiello nella ricerca internazionale, con – al tempo della redazione di questo libro – due progetti europei attivi, tre nazionali, e decine di collaborazioni internazionali.



Figura 120 – Rotore ad asse verticale per generazione distribuita.

Il DIEF, inoltre, proprio tramite il Prof. Bianchini, rappresenta dal 2017 l'Università di Firenze nel board della European Academy of Wind Energy (EAWE), unica università italiana insieme al Politecnico di Milano. Nel 2024, Firenze è stata inoltre la sede di TORQUE, la più importante conferenza internazionale sull'energia eolica, con più di 700 partecipanti da tutto il mondo. La ricerca sull'eolico al DIEF spazia dal design aero-servo-elastico delle turbine, al siting in terreni complessi, fino all'argomento di punta della ricerca odierna, rappresentato dall'eolico offshore galleggiante, per il quale il DIEF è uno dei protagonisti. Grazie ai progetti europei FLOATECH prima e FLO-ATFARM oggi, il DIEF sta contribuendo a sviluppare la nuova generazione di rotori galleggianti, molto più grandi dei precedenti (con diametri fino a 300 m – Figura 121) pensati anche per applicazioni a più bassa ventosità come quelle del Mediterraneo. Per supportare questo design, sono in corso di perfezionamento approcci numerici multi-fidelity, che spaziano da quelli ingegneristici necessari per la certificazione delle macchine, fino a modelli high-fidelity come analisi LES di turbine galleggianti (Figura 122).

² Questo paragrafo è stato scritto da Alessandro Bianchini, Francesco Balduzzi, Francesco Papi e Giovanni Ferrara.

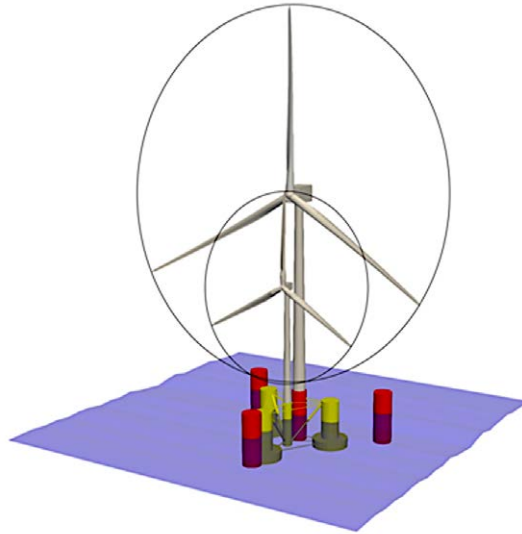


Figura 121 – Esempio di modellazione di rotore galleggiante.

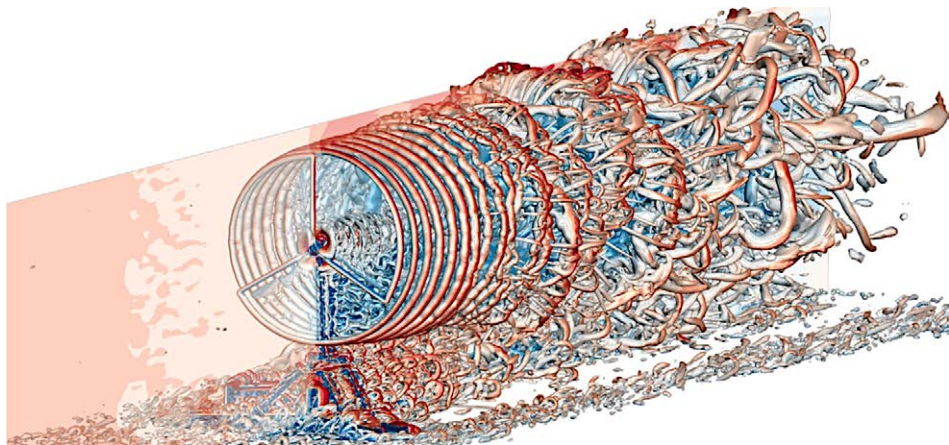


Figura 122 – Analisi LES di turbine galleggianti.

Gruppo SERG (Sustainable Energy Group) – Sviluppo di tecnologie geotermiche³

La ricerca in campo geotermico presso il DIEF si è sviluppata dal 2010, nell'ambito del Progetto regionale BTGeo (Prof. Giampaolo Manfrida e Dr. Daniele Fiaschi), che proponeva piccoli sistemi ibridi a ciclo binario per l'utilizzo di risorse geotermiche a bassa entalpia (90 – 100 °C) con impianti solari termici a tubi evacuati (ETC), in modo da innalzare la temperatura a 150 °C per la conversione termoelettrica mediante cicli Rankine a fluido organico (ORC), Figura 123.

³ Questo paragrafo è stato scritto da Daniele Fiaschi, Giampaolo Manfrida, Pietro Ungar e Claudio Zuffi.

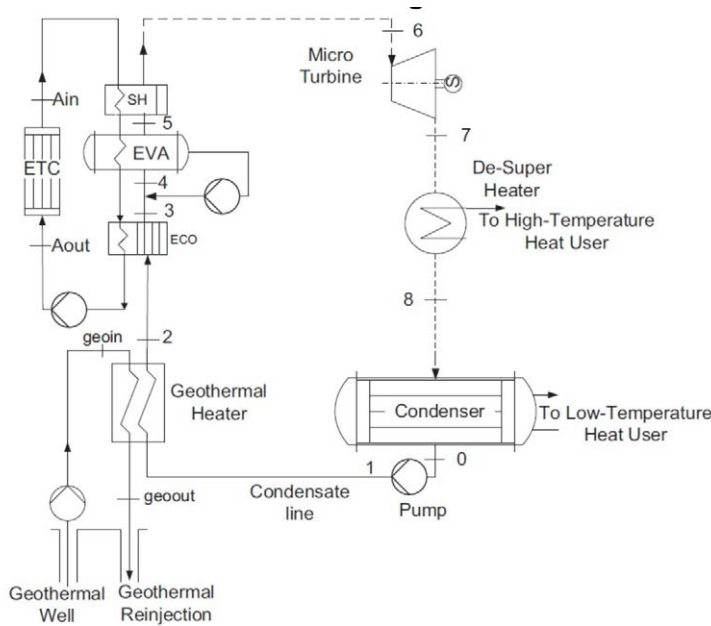


Figura 123 – Esempio di ciclo binario ORC cogenerativo geotermico/solare (Tempesti, Fiaschi 2013).

Negli anni successivi grazie anche al significativo supporto del Dr. Lorenzo Taluri, la ricerca in campo geotermico si è allargata ai sistemi binari a totale reiniezione senza emissioni inquinanti in atmosfera di gas incondensabili (NCG – CO_2 e acido solfidrico). Le tecniche per garantire la stabilità in bifase dei gas incondensabili nella brina geotermica reiniettata ed attuare la Carbon Sequestration hanno costituito la base del Progetto H2020 GECO (Geothermal Emission Control, 2018-22 (Figura 124).



Figura 124 – Caso studio islandese del progetto GECO.

In parallelo, il coinvolgimento dei Proff. Fiaschi e Manfreda nel progetto H2020 GEOENVI (2018 – 2021) ha consentito di sviluppare metodologie di Life Cycle Assessment (LCA) armonizzate per risorse, ubicazione geografica e tecnologie per la valutazione dell'impatto ambientale e la sostenibilità di impianti geotermici profondi per la produzione di energia elettrica e calore. Nell'ambito del progetto sono state sviluppate le Linee Guida per la LCA dei sistemi geotermici, che sono l'attuale punto di riferimento europeo ed internazionale. Tali metodologie hanno consentito la comparazione armonica degli impatti ambientali di differenti impianti geotermici, da quelli idrotermali standard a quelli a totale reiniezione. Il confronto è poi efficacemente estendibile ad altre energie rinnovabili, sulla base dell'unità funzionale (kWh utile, Figura 125).

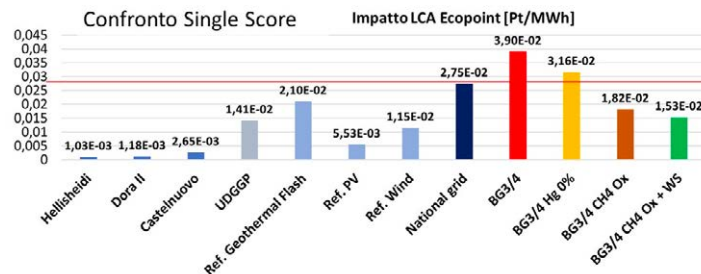


Figura 125 – Confronto impatti LCA di tecnologie rinnovabili con metodologia armonizzata.

Negli anni successivi, il DIEF è diventato un importante riferimento internazionale nell'ambito della geotermia a basso impatto ambientale, consolidando una rete di relazioni interdisciplinari che hanno portato allo sviluppo di consolidati partenariati con istituzioni pubbliche e private. Dal 2018 il DIEF è membro del consiglio direttivo di EERA JPGE (Joint Programme Geothermal).

L'utilizzo delle risorse geotermiche in tutte le loro potenzialità produttive (energia elettrica, calore, freddo) è stato affrontato nel Progetto H2020 LEAP-RE (2020 – 2025) di cui DIEF ha coordinato il WP Geothermal Atlas for Africa, con lo scopo di realizzare la mappa delle risorse geotermiche, i possibili utilizzi tecnologici e potenzialità, i relativi costi e impatti ambientali all'interno del continente africano. Le mappe interattive (Figura 126) sono disponibili sul portale dell'Africa Knowledge Platform⁴ del JRC.

⁴ https://africa-knowledge-platform.ec.europa.eu/explore_maps

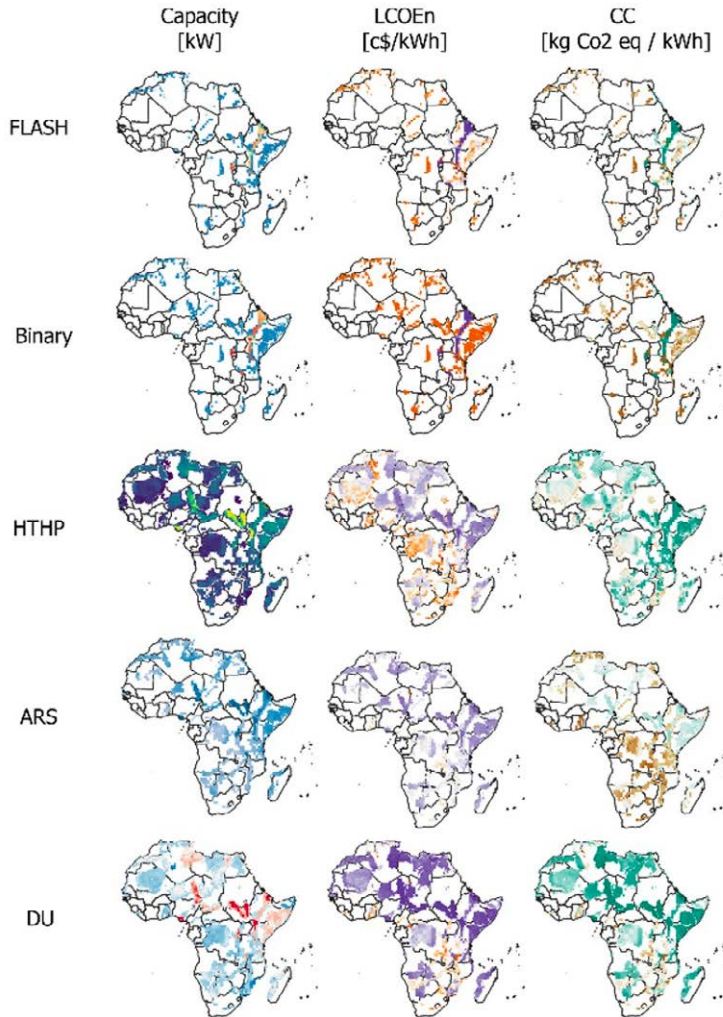


Figura 126 – GAA: mappe di potenzialità, costi e impatti di risorse geotermiche in Africa.

In questo ambito, di rilievo è la capacità acquisita da DIEF nello sviluppo di meta-modelli simulativi in ambiente Python per l'ottimizzazione termodinamica, economica e ambientale di impianti per lo sfruttamento di risorse geotermiche note.

Nell'ambito delle tecnologie geotermiche a basso impatto ambientale, DIEF ha sviluppato rilevanti competenze modellistiche e sperimentali sui sistemi di profondità a circuito chiuso (Closed Loop Geothermal, CLG) per l'utilizzo di risorse ad ampio spettro, anche non idrotermali, con fluidi termovettori alternativi a base di CO_2 e sue miscele per l'estrazione del calore. Questi consentono di sfruttare l'effetto esaltato di pressurizzazione naturale rispetto all'acqua, utile nella generazione di potenza elettrica combinata a quella termica. Ciò rende la tecnologia attraente in particolare nelle applicazioni trigenerative distrettuali. Le miscele a base di CO_2 consentono, con opportuni componenti e dosaggi, di adattarne le proprietà alle caratteristiche delle risorse geologiche locali e alle esigenze delle utilities di superficie, in una configurazione distrettuale a circuito chiuso. In questo contesto, il progetto Horizon HOOCLOOP ha consentito la realizzazione del CO_2 Hub (Figura 127), un banco prova sperimenta-

le disponibile presso i laboratori della sede di S. Marta. È costituito da una pompa di calore a CO₂ opportunamente modificata per generare CO₂ nelle condizioni richieste dalla sezione test geotermica, un circuito chiuso riscaldato in basso e raffreddato in alto che simulano, in scala ridotta, la risorsa geotermica e il suo utilizzo di superficie, consentendo la misura della pressurizzazione naturale e delle caratteristiche di scambio termico della CO₂ e di sue possibili miscele in condizioni trans e supercritiche. La pompa di calore che alimenta il CO₂ Hub è dotata di opportune uscite che consentono anche di effettuare test su micro-espansori, eiettori e sistemi di raffreddamento di parti calde di turbomacchine. È un'attrezzatura che rende DIEF tra i pochi attori nazionali ed europei in grado di realizzare test su una rilevante categoria di sistemi energetici e componenti innovativi operanti con CO₂ e sue miscele in condizioni trans e supercritiche.

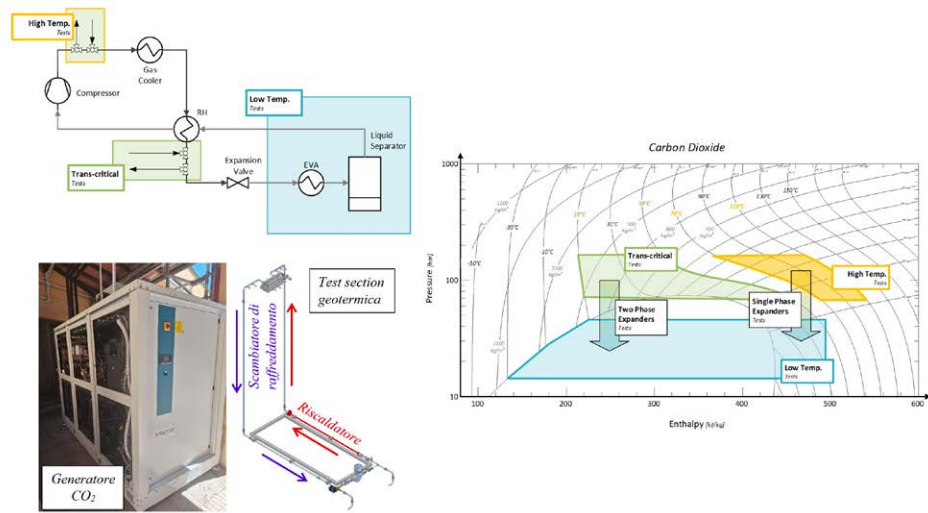


Figura 127 – GAA: mappe di potenzialità, costi e impatti di risorse geotermiche in Africa.

Riferimenti bibliografici

Tempesti, D., e D. Fiaschi. 2013. "Thermo-economic assessment of a micro CHP system fuelled by geothermal and solar energy." *Energy* 58: 45-51.