

Sistemi energetici: la ricerca del Dipartimento di Ingegneria Industriale

*Francesco Balduzzi, Alessandro Bianchini, Carlo Carcasci,
Maurizio De Lucia, Giovanni Ferrara, Daniele Fiaschi,
Giampaolo Manfrida, Luca Romani*

Il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF) dell'Università di Firenze affonda le sue radici anche nel precedente Dipartimento di Ingegneria Energetica (DE), che ha rappresentato per decenni un centro di eccellenza nella ricerca applicata ai sistemi energetici. Fin dagli anni '80 e '90, il dipartimento si è distinto per le sue competenze avanzate nella simulazione di impianti di produzione di energia, in particolare quelli basati su turbine a gas e impianti combinati.

Uno dei contributi più significativi è stato lo sviluppo del software GATCO, un programma pionieristico per la simulazione termo-fluidodinamica di impianti a ciclo combinato con turbina a gas (CCGT). Questo strumento ha permesso di analizzare in dettaglio le prestazioni degli impianti in condizioni reali e ha aperto la strada a studi più sofisticati su cicli avanzati.

Negli anni successivi, il dipartimento ha ampliato il proprio raggio d'azione includendo la simulazione di cicli innovativi come il ciclo HAT (Humid Air Turbine) e il ciclo CHAT (Cascade Humidified Advanced Turbine), entrambi orientati all'aumento dell'efficienza energetica e alla riduzione delle emissioni. Questi studi hanno posizionato il DIEF tra i primi in Europa a esplorare le potenzialità di questi sistemi.

Parallelamente, il dipartimento ha sviluppato competenze avanzate nella simulazione in condizioni di off-design e nello studio del raffreddamento delle turbine a gas, tematiche cruciali per la progettazione e l'ottimizzazione degli impianti moderni.

Le analisi exergetiche hanno rappresentato un importante strumento di ricerca per il DIEF, permettendo di valutare in modo approfondito l'efficienza reale dei sistemi energetici. A differenza delle tradizionali analisi energetiche, l'approccio exergetico consente di indi-

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
Carlo Carcasci, University of Florence, Italy, carlo.carcasci@unifi.it, 0000-0003-1293-0814
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
Luca Romani, University of Florence, Italy, luca.romani@unifi.it, 0000-0002-9482-7804

Referee List (DOI 10.36253/fup_referee_list)

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

Francesco Balduzzi, Alessandro Bianchini, Carlo Carcasci, Maurizio De Lucia, Giovanni Ferrara, Daniele Fiaschi, Giampaolo Manfrida, Luca Romani, *Sistemi energetici: la ricerca del Dipartimento di Ingegneria Industriale*, © Author(s), CC BY 4.0, DOI 10.36253/979-12-215-0972-4.24, in Bruno Facchini, Giovanni Ferrara, Rocco Furferi (edited by), *Ingegneria Industriale & Ingegneria dell'Informazione per il territorio fiorentino – 1. Ingegneria Industriale*, pp. 173-183, 2026, published by Firenze University Press, ISBN 979-12-215-0972-4, DOI 10.36253/979-12-215-0972-4

viduare con precisione le fonti di irreversibilità nei processi termodinamici, guidando così l'ottimizzazione dei cicli e la progettazione di impianti più sostenibili e performanti. Questa metodologia è stata applicata con successo a impianti a ciclo combinato, cicli innovativi e sistemi di cogenerazione. La modellistica termodinamica ed exergetica è sempre associata a una modellistica previsionale delle prestazioni dei componenti (es. turbine, espansori, scambiatori, condensatori, torri di raffreddamento) in modo da garantire una buona capacità di aderenza alle reali condizioni operative, come ad esempio la variazione delle condizioni ambientali: tipico l'esempio dell'energia solare e della sua conversione termodinamica.

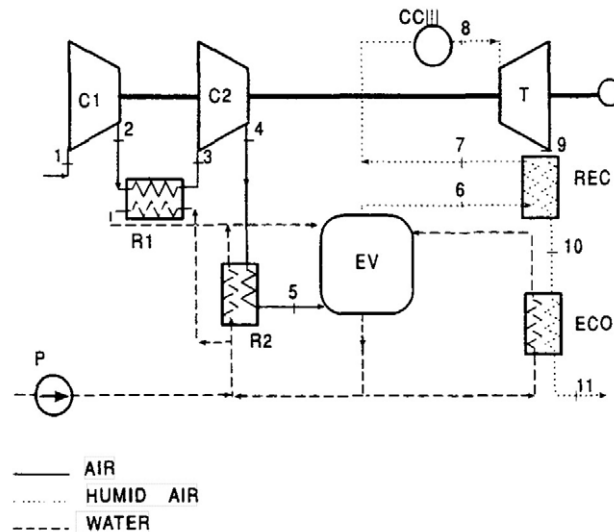


Figura 128 – Schema ciclo HAT studiato nell'anno 1993.

Un altro filone di ricerca importante è stato quello della cogenerazione, con studi su impianti capaci di produrre simultaneamente energia elettrica e calore utile, particolarmente rilevanti per applicazioni industriali e civili. Queste ricerche hanno contribuito alla diffusione di soluzioni energetiche più efficienti e sostenibili sul territorio e nell'accompagnare aziende nelle prime esperienze.

Tra le iniziative più prestigiose promosse dal Dipartimento di Ingegneria Energetica dell'Università di Firenze si annoverano i Florence World Energy Research Symposium (FLOWERS), tenutosi nel 1990, 1994 e 1997. Questi simposi internazionali hanno rappresentato un punto di riferimento per la comunità scientifica impegnata nello studio dei sistemi energetici avanzati, attirando esperti da università e centri di ricerca di tutto il mondo.

A partire dagli anni 2000, il dipartimento ha iniziato a integrare le competenze maturate nel settore termico con lo studio delle energie rinnovabili, dall'energia solare all'energia geotermica fino all'energia eolica. Questo passaggio ha segnato un'evoluzione verso una visione più ampia e sostenibile dell'ingegneria energetica.

Tra le innovazioni più rilevanti introdotte in questo periodo vi è lo studio delle pompe di calore ad assorbimento e dei cicli ORC (Organic Rankine Cycle), particolarmente adatti al recupero di calore da sorgenti a medie e bassa temperatura. Il DIEF ha esplorato l'applicazione di questi cicli in ambiti industriali, geotermici e solari, contribuendo alla loro diffusione e ottimizzazione. Con la sua storia anche relativa a queste attività di ricerca, il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF) dell'Università di Firenze si conferma dunque

un'istituzione di riferimento a livello europeo per la ricerca, l'innovazione e la formazione avanzata sull'energia e la transizione energetica. Grazie a un approccio multidisciplinare, il DIEF è impegnato in numerosi progetti all'avanguardia sia in ambito nazionale che internazionale, con particolare attenzione alle energie rinnovabili, all'idrogeno, alla geotermia, alle reti energetiche, alla modellazione degli scenari energetici, alle comunità energetiche e alle tecnologie emergenti, dal sector coupling allo stoccaggio energetico avanzato.

Di seguito si riporta un'analisi dettagliata delle principali attività di ricerca e innovazione per il settore relativo ai sistemi energetici.

Gruppo ARES – Sviluppo di tecnologie per l'idrogeno¹

Il settore dell'idrogeno rappresenta un asse strategico della transizione energetica europea e uno dei pilastri della ricerca DIEF, in linea con le direttrici del piano REPowerEU e delle Hydrogen Valleys identificate a livello continentale.

Nel laboratorio LINEA situato a Calenzano è presente un banco prova in Italia per la sperimentazione di tecnologie di elettrolisi su scala industriale, con l'obiettivo di ottimizzare il funzionamento degli elettrolizzatori e valutarne le performance e la sicurezza. Il DIEF mette a disposizione la propria competenza per l'analisi scientifica, la simulazione avanzata e la validazione sperimentale delle tecnologie.

Una delle tematiche più recenti introdotte nel DIEF riguarda lo studio avanzato delle tecnologie per la produzione di idrogeno verde. Dal 2020 è attiva una collaborazione con l'azienda multinazionale McPhy, focalizzata sull'analisi e lo sviluppo termofluidodinamico di elettrolizzatori alcalini. In una prima fase, supportata anche da un dottorato cofinanziato dall'azienda, la ricerca si è concentrata sull'elaborazione di modelli di simulazione tridimensionale ad alta fedeltà (CFD multifase e multi-physics), finalizzati allo studio elettrochimico e termo-fluidodinamico delle reazioni all'interno delle celle di stack reali. Con i modelli CFD sono state anche portate avanti alcune ottimizzazioni della geometria interna dell'elettrolizzatore (Figura X), che hanno portato a un brevetto internazionale. A fine 2024, è stato inoltre istituito un laboratorio congiunto tra l'azienda e il DIEF, con la realizzazione di un banco prova per il testing sperimentale di stack di grande scala, unico nel suo genere a livello nazionale (Figura Y). Al momento della scrittura di questo libro, sono in corso contatti con importanti player nazionali ed internazionali per attività di testing avanzato degli elettrolizzatori, che ne caratterizzino la performance e l'usura nel tempo.

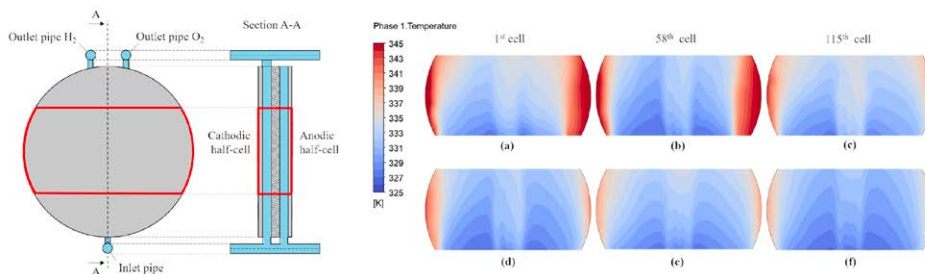


Figura 129 – Distribuzione di temperatura superficiale anodica e catodica di tre celle elettrolitiche lungo lo stack (prima, intermedia e ultima).

¹ Questo paragrafo è stato scritto da Francesco Balduzzi, Alessandro Bianchini, Luca Romani e Giovanni Ferrara.

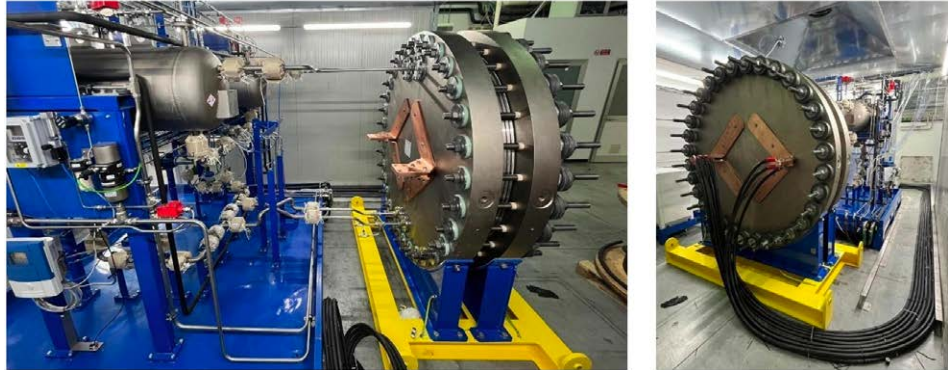


Figura 130 – Banco prova per l'analisi sperimentale di elettrolizzatori alcalini di grossa taglia.

L'impegno del DIEF si estende anche alla progettazione di unità di elettrolisi integrabili in sistemi power-to-gas e all'analisi della loro gestione in scenari di surplus da fonti rinnovabili (eolico e fotovoltaico, in particolare) in linea con le dinamiche di flessibilità energetica necessarie nei nuovi sistemi integrati.

Trasporto dell'idrogeno in pipeline e blending idrogeno-gas naturale²

Il DIEF è attualmente coinvolto a livello scientifico in diversi progetti dedicati al trasporto sicuro ed efficiente dell'idrogeno tramite pipeline, sia in condotte dedicate sia attraverso la conversione delle reti gas esistenti (approccio «hydrogen ready»). La ricerca si concentra sulla simulazione avanzata del trasporto di idrogeno puro e miscele H₂/Metano, testando le condizioni di efficienza, sicurezza e compatibilità della rete attuale con i nuovi vettori energetici.

Il DIEF si impegna nello studio, nella simulazione e nell'ottimizzazione delle reti di trasporto e distribuzione del gas naturale, con un focus crescente sulla decarbonizzazione progressiva e la transizione a una configurazione «hydrogen ready». Il ricorso a modelli di simulazione avanzata (ad esempio tramite il Multi Energy System Simulator – MESS del gruppo MEVS) consente al DIEF di esaminare:

- l'efficienza di esercizio e le strategie di upgrade delle infrastrutture esistenti per l'immissione di nuovi vettori energetici come il biometano, l'idrogeno o i gas sintetici,
- l'implementazione di sistemi digitali avanzati per la sorveglianza H24 delle reti urbane, la previsione della domanda, la riduzione delle perdite, la gestione degli scenari di crisi energetica e la resilienza infrastrutturale.

Alle attività di ricerca DIEF è associato anche lo sviluppo e la sperimentazione di blending units avanzate IoT, sistemi di controllo e sensoristica evoluta, in grado di monitorare la composizione della miscela, la qualità del gas e la sicurezza d'esercizio a ogni nodo della rete. La ricerca interessa anche l'ottimizzazione dell'integrazione tra elettrolizzatori e blending unit, per favorire lo sfruttamento dei surplus rinnovabili secondo le logiche power-to-gas e la creazione di filiere di idrogeno locale (atti-

² Questo paragrafo è stato scritto da Carlo Carcasci.

vità direttamente collegate anche al settore delle comunità energetiche e dei distretti industriali verdi).

La miscelazione controllata di idrogeno in percentuali crescenti nelle reti di gas naturale esistenti è attualmente oggetto di sperimentazione avanzata anche per il DIEF, attraverso studi di simulazione, caratterizzazione dei materiali, testing industriale e collaborazione con utility e istituzioni come Estra, Centria ed Enea. Il progetto pilota sviluppato con il campo prove Centria ad Arezzo prevede immissioni progressive di idrogeno (dal 2% al 10%) per caratterizzare la miscela ed evidenziare eventuali criticità – nessuna evidenziata finora, né a livello di materiali delle condotte né di sicurezza per gli utenti finali.

Gruppo di ricerca Multi Energy Vector System (MEVS) Group. Scenari energetici e modellazione³

Il DIEF è fortemente impegnato nello sviluppo di modelli integrati per lo studio e l'attuazione delle soluzioni di sector coupling – il collegamento funzionale tra i diversi vettori e settori energetici (elettricità, gas, calore, trasporti, industria). Il focus è su:

- power-to-gas (P2G), power-to-hydrogen (P2H) e power-to-Ammonia (P2A): Valutazione dell'interazione tra surplus rinnovabili e la produzione di idrogeno attraverso l'elettrolisi, il suo stoccaggio e successivo utilizzo come vettore energetico alternativo o per la riconversione in energia elettrica (gas-to-power – G2P),
- gestione integrata domanda-offerta con modelli che ottimizzano il flusso energetico tra reti elettriche, del gas e del «calore distribuito», abilitando smart grid e smart district heating,
- integrazione di fonti non programmabili (rinnovabili), sistemi di accumulo e flexibility services nel sistema energetico multi-vettore, anche tramite supporto digitale e intelligenza artificiale applicata ai flussi energetici.

Queste attività sono strategiche nella prospettiva di decarbonizzare i cosiddetti «settori hard-to-abate», aumentare la resilienza del sistema energetico e ridurre la dipendenza da forniture extra-UE.

Il DIEF è un punto di riferimento per l'elaborazione e la simulazione di scenari energetici a diverse scale: dal quartiere alla regione, dal distretto industriale allo scenario nazionale. L'attività è supportata tanto dalle competenze del MEVS Group (Multi Energy Vector Systems Group) quanto dagli input dei principali rapporti di scenario.

Le attività più rilevanti includono:

- sviluppo e utilizzo di piattaforme di simulazione energetica (come MESS – <https://github.com/pielube/MESSpy>) per lo studio degli impatti di differenti politiche di decarbonizzazione, la progettazione di community rinnovabili, il cosiddetto sector coupling e l'analisi dell'ottimizzazione delle reti,
- studio delle traiettorie di decarbonizzazione a breve e medio termine, in relazione ai modelli usati nell'aggiornamento del PNIEC (Piano Nazionale Integrato Energia e Clima), con valutazione di impatti, criticità e opportunità rispetto agli obiettivi UE al 2030 e 2050,
- simulazione di configurazioni multi-energia, analisi della penetrazione di nuovi vettori energetici e studio delle sinergie tra generazione distribuita, accumulo e domanda flessibile,

³ Questo paragrafo è stato scritto da Carlo Carcasci.

- supporto all'elaborazione di strategie di sviluppo sostenibile (SDG-ONU), in cui l'approccio interdisciplinare adottato da DIEF, combinando modellazione tecnica, valutazione ambientale e ottimizzazione economica, diventa un valore aggiunto.

Gruppo di ricerca comunità energetiche rinnovabili e tecnologie emergenti di stoccaggio energetico

Il DIEF promuove la nascita e lo sviluppo di comunità energetiche rinnovabili (CER), un pilastro fondamentale per la transizione energetica italiana. Il coinvolgimento del dipartimento prevede la ricerca applicata sull'ottimizzazione delle comunità energetiche, tramite simulazioni e modellazione dei flussi energetici, definizione delle migliori strategie di autoconsumo e gestione collettiva dell'energia condivisa.

Notevole è infine il contributo in termini di formazione di figure professionali ad alta specializzazione come il «Tecnico superiore per le CER» e le attività di disseminazione e strumenti di valutazione economica dedicati alle CER nel territorio italiano e in contesto europeo.

Tecnologie emergenti di stoccaggio energetico

Lo stoccaggio dell'energia è uno dei campi più dinamici nella ricerca DIEF, essenziale per l'integrazione massiccia delle fonti rinnovabili non programmabili (eolico, solare, ecc.) nel sistema energetico nazionale, studiando l'accoppiamento sistemi rinnovabili-accumulo per la gestione del surplus, la stabilizzazione della rete e la fornitura di servizi di flessibilità.

Il DIEF contribuisce inoltre allo sviluppo di modelli di business innovativi per la diffusione su larga scala degli ESS, in relazione agli scenari di penetrazione del «prosuming» e alle esigenze delle comunità energetiche e dei distretti industriali.

Il DIEF opera anche sui sistemi di stoccaggio di energia termica, sviluppando in primo STES (stoccaggio termico stagionale) nazionale e un interessante PED (Positive Energy District) dove l'energia termica ottenuta da sistemi solari termici a concentrazione a servizio di poco meno di 100 appartamenti alimentano in cascata un ORC e uno storage termico posto in serie a Pompe di calore. L'ibridizzazione con soluzioni fotovoltaiche sia orizzontali che verticali (in facciata) contribuisce a realizzare l'elevato «solar-fraction».



Figura 131 – PED – Impianto Pilota di FIRENZE Torre degli AGLI.



Figura 132 – PED – STORAGE TERMICO (TES) interno ed esterno per Torre degli AGLI.

Utilizzo della CO₂ e sostenibilità dei sistemi energetici⁴

L'uso della CO₂ come fluido termovettore nasce da lontano, da oltre 25 anni DIEF porta avanti ricerche di rilievo sull'utilizzo e la gestione della CO₂ nei sistemi energetici. Le prime ricerche, dalla seconda metà degli anni '90, hanno riguardato il sequestro in impianti di potenza mediante i cicli turbogas semichiusi (Semi Closed Gas Turbine SCGT) con ricircolo parziale dei gas di scarico per aumentarne la concentrazione della CO₂, favorendone la cattura e la successiva rimozione. Successivamente sono stati studiati cicli ibridizzati, come il semichiuso accoppiato al ciclo HAT, SC-HAT), cicli innovativi con cattura della CO₂ a monte della combustione e rigenerazione chimica mediante Reforming ed Auto Thermal Reforming (R-REF, R-ATR), anche integrati con membrane per la separazione dell'aria (Air Membrane AM-ATR, Figura 132). Sono state analizzate diverse opzioni di cattura della CO₂,

⁴ Questo paragrafo è stato scritto da Carlo Carcasci, Maurizio De Lucia, Daniele Fiaschi e Giampaolo Manfrida.



Figura 134 – Pompa di calore a CO₂ (sottocassa per applicazioni ferroviarie).



Figura 135 – Banco prova per sistemi e componenti a CO₂.

Sistemi energetici per sistemi integrati con l'utilizzo di energie rinnovabili

Parallelamente, presso il DIEF, sono stati portati avanti studi per l'utilizzo della CO₂ in condizioni supercritiche (sCO₂) in sistemi efficienti, ecosostenibili ed economici per lo stoccaggio di energia che utilizzano il concetto di Power-to-Heat-to-Power, potenzialmente integrato con l'energia solare a concentrazione (CSP) e il recupero del calore residuo (WHR). Sono stati proposti cicli sCO₂ di piccole/medie dimensioni, nella fascia 1-10 MWe, adattando soluzioni adeguate di turbomacchine radiali e affrontando concetti innovativi per l'applicazione su piccola scala (<1 MW). In questo ambi-

to sono studiate, sia a livello teorico che sperimentale, turbomacchine senza pale che utilizzano l'effetto motore dello strato limite per la trasmissione della coppia (turbine Tesla). Il banco prova CO₂Hub, disponibile presso DIEF, offre la possibilità di testare microturbine, eiettori e altri componenti operanti con sCO₂. Un prototipo di turbina Tesla a CO₂, sviluppato nell'ambito del progetto PRIN 2022 ECOSEARCHER e testato presso il CO₂Hub, è mostrato in figura SE2.

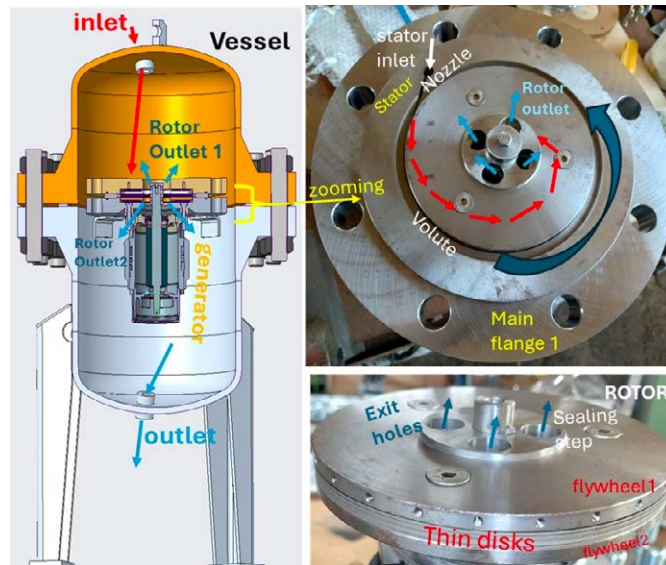


Figura 136 – Prototipo di turbina Tesla a CO₂.

Sostenibilità dei sistemi energetici

DIEF si occupa da molti anni di ottimizzazione dei sistemi energetici convenzionali e ad energie rinnovabili, in un'ottica generale di sviluppare strumenti di conservazione e corretto utilizzo delle risorse naturali. La sostenibilità dei sistemi energetici è oggi un requisito imprescindibile, anche quando si propongono soluzioni innovative e rinnovabili. Da oltre quindici anni DIEF applica metodologie Life Cycle Assessment (LCA) per l'analisi degli impatti ambientali dei sistemi energetici, con particolare riferimento a quelli alimentati da fonti rinnovabili. La LCA è una tecnica per valutare gli impatti ambientali associati a tutte le fasi della vita di un prodotto, dall'estrazione delle materie prime alla lavorazione dei materiali, alla produzione, alla distribuzione, all'uso, alla riparazione e alla manutenzione, fino allo smaltimento o al riciclaggio. Applicata ai sistemi energetici, consente di valutare numericamente gli impatti su varie categorie (cambiamento climatico, salute umana, consumo di risorse ecc.) per unità di prodotto utile in uscita, generalmente identificato come l'unità energetica prodotta (kWh). Abbinata all'analisi termoeconomica, consente di valutarne analiticamente la sostenibilità economico – ambientale. Combinando queste metodologie con l'analisi energetica, DIEF ha guadagnato negli anni una rappresentanza internazionale di primo livello nell'analisi exergo economica (ExEca) ed exergoambientale (ExEnvA) dei sistemi energetici, con particolare riferimento alle energie rinnovabili. L'analisi exergo-economica combina l'analisi exergica e quella economica per determinare il processo di accumulo dei costi lungo le trasformazioni dell'energia e il suo deprezzamento, descrit-

to dalla progressiva diminuzione dell'exergia. Queste informazioni sono molto utili, poiché consentono di valutare le fasi più rilevanti del processo energetico, aprendo la strada al miglioramento e all'ottimizzazione economica dei sistemi energetici, mediante bilanci istantanei [€/s] e fornendo in uscita i costi per unità di prodotto [€/kWh]. L'analisi exergoambientale segue un approccio parallelo alla termoeconomia, combinando l'impatto ambientale determinato mediante LCA (al posto dei costi economici) all'analisi exergetica. I bilanci istantanei [pts/s] forniscono in uscita gli impatti per unità di prodotto [pts/kWh]. DIEF è responsabile dell'analisi di sostenibilità (LCA) nel progetto Horizon Manurefinery (2024 – 2028), dove si propongono reattori modulari innovativi di dimensioni contenute per la conversione degli scarti animali (bovini, suini, ovini) in prodotti utili energetici, mangimi e cosmetici.