



LA FLESSIBILITÀ NEI PROCESSI INTENSIFICATI

A seguito degli obiettivi ambientali europei e del crescente costo dell'energia, è rinata di recente una forte attrattività nei confronti dell'intensificazione di processo. Sebbene questa pratica fosse già nota negli anni Novanta, i vincoli operativi sono sempre stati il suo principale limite applicativo. Tuttavia, negli ultimi anni, lo sviluppo di nuove soluzioni potrebbe renderla possibile senza dover rinunciare alla flessibilità degli impianti.

Il ritorno di un'opportunità mancata

Che se ne condividano *in toto* le modalità o meno, le direttive dell'Unione Europea [1] in materia di mitigazione e, auspicabilmente, azzeramento delle emissioni totali di anidride carbonica costituiscono al contempo una sfida inaggirabile e un'opportunità imperdibile per tutto il panorama industriale, che ne rappresenta l'attore principale. A rallentare questa transizione da un punto di vista di implementazione industriale vi è *in primis* l'antagonismo tra l'andamento dell'impatto ambientale e quello dei costi necessari per portarne a compimento l'abbattimento su scala sistemica. Tenendo conto della distribuzione delle emissioni per settore di attività [2], appare evidente come a fare da fulcro di questo equilibrio sia il settore dell'energia. Infatti, a parità di produttività annua, l'efficientamento energetico dei sistemi di produzione comporterebbe una riduzione simultanea dei costi operativi e di anidride carbonica emessa.

Sebbene l'integrazione energetica e l'intensificazione di processo costituiscano delle pratiche già note nell'ambito ingegneristico sin da fine Novecento, esse sono tuttavia messe in opera in campo industriale meno spesso di quanto si possa credere. Alla base di questa incongruenza si può trovare da un lato l'impossibilità del settore chimico, continuamente chiamato a una produttività massima e costante, di realizzare cambiamenti sostanziali da un punto di vista strutturale entro tempistiche inferiori a decenni e, dall'altro, gli inconvenienti in cui un sistema altamente integrato può incorrere in termini operativi. Infatti, se da un lato l'utilizzo di tecnologie e di configurazioni intensificate riesce a portare in media dei benefici dell'ordine del 30% [3], dall'altro il prezzo da pagare per metterle in pratica è la perdita di alcuni gradi di libertà dovuta all'accoppiamento termico e termodinamico. In aggiunta a questa prima limitazione, che verrà approfondita di seguito, vi è la necessità di assicurare il corretto avviamento a freddo dell'impianto quando non vi circola ancora alcuna corrente di processo da poter integrare.

Tuttavia, malgrado i suddetti aspetti operativi abbiano rappresentato gli ostacoli principali per la diffusione capillare

di questa soluzione ingegneristica estremamente efficiente, il mutamento strutturale dell'industria chimica ed energetica che ha preso piede negli ultimi anni sembrerebbe capace di avviare una riabilitazione di tali metodologie con una presa persino superiore a quella che avrebbero potuto avere all'inizio degli anni duemila. Difatti, l'interesse verso l'elettificazione (totale o parziale) delle apparecchiature e dei processi [4] accompagnata dall'utilizzo di unità atte alla messa a punto del livello exergetico delle correnti circolanti in impianto potrebbero restituire quei margini di flessibilità persi tramite l'intensificazione degli stessi. Per avere un'idea più concreta di tale prospettiva, si possono analizzare un paio di esempi particolarmente significativi.

La pompa di calore nelle reti di scambio

Una strategia per l'efficientamento energetico degli impianti di certa efficacia termodinamica ma spesso soggetta a particolare scetticismo è l'integrazione delle reti di scambio. Se è assodato che l'emissione più sostenibile è quella evitata, allora il recupero del calore di scarto è indubbiamente la soluzione migliore possibile non solo in termini di emissioni ma anche di costi operativi. La metodologia che si occupa dello studio dei possibili accoppiamenti tra correnti di processo prende il nome di analisi di pinch e richiede un'accurata classificazione di tutte le correnti del processo da riscaldare o raffreddare. Una volta recensiti tutti i flussi, diventa quindi possibile tracciare le curve composite, ovvero i grafici rappresentanti le quantità di calore rispettivamente disponibile e necessario in funzione delle temperature. Come indicato nel semplice esempio proposto in Fig. 1a, il limite di calore recuperabile è sostanzialmente vincolato dal punto di massima vicinanza dei due grafici, che devono mantenere una differenza minima di temperatura necessaria allo scambio. Ulteriori limiti dell'approccio convenzionale sono inoltre legati alla necessità di investire in un nuovo scambiatore ogniqualvolta si accoppino due correnti di processo e alla realizzazione di una nuova rete di tubazioni, che potrebbe rivelarsi abbastanza complessa nel caso in cui le correnti coinvolte

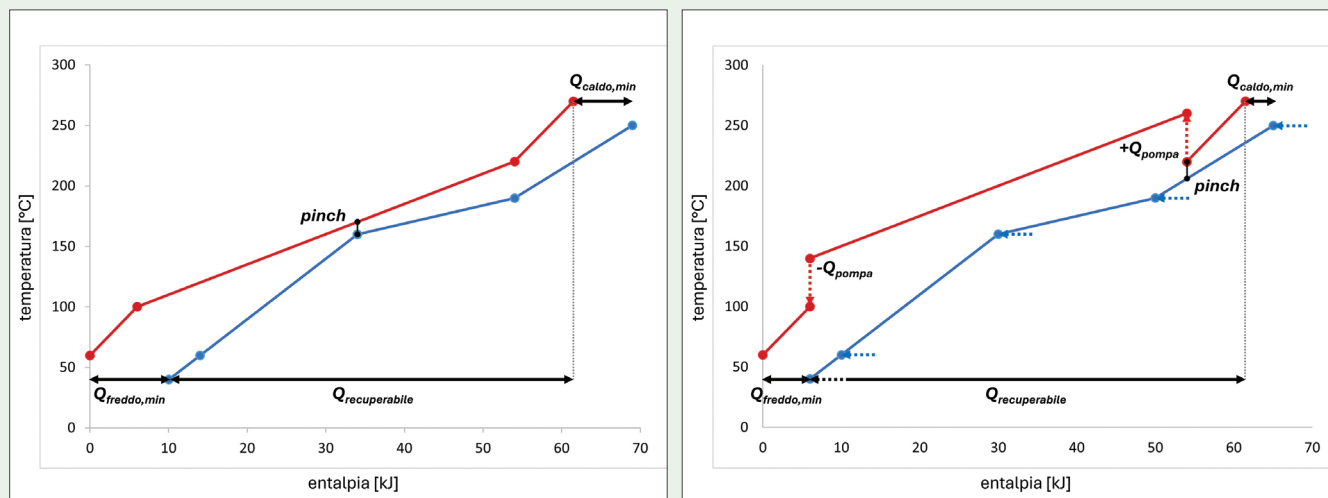


Fig. 1 - a) Esempio di curva composta convenzionale; b) impatto della pompa di calore sul recupero termico

nel livello termico di interesse si trovino in sezioni distanti dell'impianto. Di conseguenza, anche laddove si scegliesse di procedere con l'implementazione del recupero di calore di scarto, la rigidità dei profili termici e l'impossibilità di scegliere gli accoppiamenti delle correnti in maniera indipendente porterebbero alla realizzazione di un'integrazione termica di compromesso, ovvero a recuperi di gran lunga ridotti rispetto alla condizione ideale.

Tuttavia, laddove si riuscisse a rettificare il profilo termico di una delle due curve, si potrebbe raggiungere un aumento notevole della quantità di calore recuperabile. Inoltre, in tal caso, la possibilità di modulare almeno una parte di tali profili renderebbe di gran lunga più flessibile l'integrazione energetica al variare delle condizioni termiche della rete e delle dispersioni dovute alle temperature esterne. Sulla base di tali osservazioni, è sorta di recente l'idea di integrare una pompa di calore all'interno del circuito di scambiatori. Tale scelta tecnologica è nata dalla capacità del dispositivo di movimentare energia di basso livello exergetico con un consumo energetico piuttosto ridotto rispetto alla quantità di calore recuperato [5]. Il compito della pompa di calore non è infatti quello di produrre l'energia necessaria per l'utilizzo bensì quello di aumentare il livello exergetico, ovvero la temperatura, dell'energia già disponibile nelle correnti di processo. Di conseguenza, il ciclo risultante è in grado di raggiungere coefficienti di prestazione solitamente compresi tra 2 e 4 [6], ovvero un consumo elettrico di gran lunga inferiore rispetto al consumo termico di un sistema a combustione a gas.

A latere di questo beneficio primario, ma non di minore importanza, vi è la ricaduta di tale installazione sulla flessibilità della rete. Infatti, come mostrato in Fig. 1b, l'aggiunta della pompa di calore permette di discostare le due curve composite in uno o più punti di applicazione, ovvero di liberarsi dal

vincolo del pinch a seconda del bisogno specifico dell'impianto. Inoltre, in caso di perturbazioni esterne o di condizioni operative non stazionarie, come ad esempio la fase di avvio dell'impianto o il variare delle dispersioni termiche con la temperatura esterna, la semplicità della modulazione di potenza di un dispositivo alimentato da rete elettrica come il compressore renderebbe il sistema di recupero termico facilmente adattabile in tempi di reazione molto ridotti.

La ricompressione di vapore

Un secondo caso in cui l'aggiunta di un dispositivo di incremento del livello exergetico delle correnti di processo può dotare un sistema intensificato di un'intrinseca flessibilità è rappresentato dalla ricompressione di vapore. Per meglio spiegare il concetto, si può prendere come esempio dimostrativo una cascata di evaporatori, anche detta a effetto multiplo o multistadio. Il vincolo principale nel recupero entalpico delle correnti di vapore in sistemi di concentrazione è dato dalla necessità di ridurre la pressione all'interno dell'apparecchiatura ricevente al fine di ristabilire la differenza di temperatura di approccio necessaria allo scambio. Poiché la soluzione contenente solidi bolle a una temperatura superiore rispetto a quella di condensazione del solo solvente, le unità connesse tra loro risultano inevitabilmente vincolate in termini di gradiente termico. Che si tratti di accoppiamento equicorrente o controcorrente, oltre al dover lavorare sotto vuoto, tali sistemi di concentrazione a effetto multiplo risultano quindi poco flessibili in termini di condizioni operative. A tal proposito, con il fine di migliorarne l'efficienza, è stata recentemente studiata l'integrazione di sistemi di ricompressione del vapore tra un effetto e l'altro [7]. Un esempio di tale strategia è rappresentato in Fig. 2a per un classico accoppiamento in controcorrente.

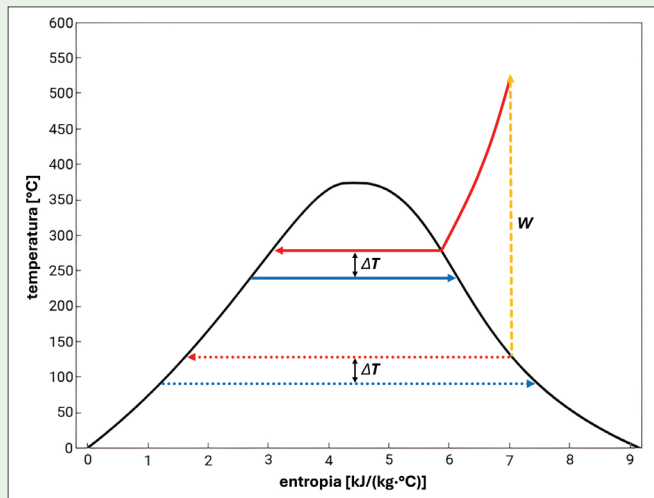
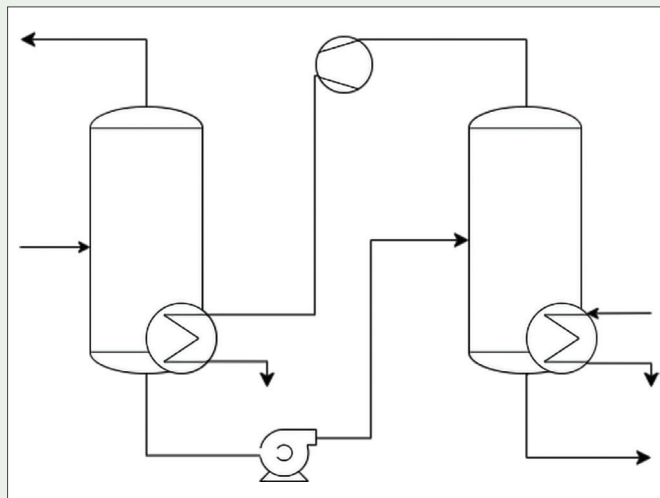


Fig. 2 - a) Accoppiamento in controcorrente con ricompressione di vapore, b) incremento del livello exergetico del recupero termico

Lo scioglimento del vincolo tra la pressione di un effetto e la temperatura dell'effetto precedente (o successivo) permetterebbe così di selezionare le condizioni operative desiderate in ogni singola unità e di evitare potenzialmente la laminazione volta all'aumento del grado di vuoto col progredire della concentrazione. Il beneficio di tale configurazione è inoltre evidente anche in caso di soluzioni termosensibili per cui una maggiore diluizione permetterebbe il raggiungimento di temperature, e quindi pressioni, più elevate in modo da mitigare il grado di vuoto necessario a parità di solvente vaporizzato [8]. Inoltre, la possibilità di controllare individualmente ogni singola apparecchiatura eviterebbe il propagarsi di eventuali perturbazioni tra i vari effetti, oltre a consentire il controllo indipendente in caso di fasi transitorie e condotte di tipo non ordinario.

Come mostrato in Fig. 2b, per una differenza di temperatura di scambio prefissata, legata alla tecnologia del dispositivo, l'incremento della pressione del vapore da condensare comporta l'aumento della temperatura interna all'effetto interessato. Questo implica la potenziale perdita di senso della distinzione tra accoppiamento equicorrente e controcorrente, dal momento che ogni unità diverrebbe così soggetta a un esercizio del tutto indipendente. In studi recenti, per semplificare ulteriormente il funzionamento del sistema, è stata proposta la ricongiunzione di tutte le correnti di vapore generate e la ricompressione unica del flusso risultante. Se da una parte questa soluzione può ridurre i consumi energetici al compressore, dall'altra comporterebbe minore flessibilità. Infatti, con questo approccio, la totalità del vapore ricompresso si troverebbe nelle medesime condizioni termiche senza possibilità di scelta ottimale in relazione all'effetto a cui è destinata.

Come per l'esempio precedente, anche nel caso della ricompressione di vapore la reattività del sistema si ritrova a beneficiare dell'aggiunta di un'apparecchiatura alimentata elettricamente, ovvero il compressore. Da un punto di vista di analisi energetica, nell'ottica di impianti chimici in cui la produzione di energia rinnovabile sarà presto integrata dal lato delle utenze, si può quindi sostenere che un piccolo contributo di elettricità da fonte non-fossile (e.g. fotovoltaico) è potenzialmente in grado di abilitare la condotta di un processo intensificato, ovvero a ridotto consumo energetico, in maniera flessibile e senza particolari vincoli operativi. Inoltre, in presenza di un sistema di stoccaggio in grado di accumulare energia sufficiente per l'avviamento a freddo, questa soluzione permetterebbe anche di risolvere il problema legato allo start-up di un'unità di processo intensificata prima che le condizioni delle correnti integrate si portino a regime di funzionamento.

Orizzonti di sviluppo

In seguito a quanto mostrato da questi due esempi, appare quindi evidente come l'integrazione di una semplice unità atta all'incremento dei livelli energetici in gioco possa al contempo agevolare il recupero termico da correnti che dispongono di calore di bassa qualità e restituire uno o più gradi di libertà al sistema. Più nello specifico, quest'ultimo aspetto comporterebbe un notevole incremento della flessibilità del sistema stesso fornendo la possibilità di modulare i livelli termici in risposta a perturbazioni esterne o con il fine di permettere al processo di seguire una traiettoria operativa ottimale in caso di cambi di consegna che necessitino di particolare reattività. Il controllo svincolato dei sistemi intensificati vede quindi ad oggi una strada tecnologicamente

percorribile per l'implementazione concreta di quelle soluzioni processistiche che per più di un decennio sono state considerate di difficile realizzazione.

Per concludere, non rimane dunque che ribadire il ruolo fondamentale della sinergia tra ricerca e industria nell'ottica della decarbonizzazione, o meglio defossilizzazione, del settore chimico. In particolare, visto il duplice beneficio economico-ambientale dell'intensificazione di processo, non vi è ad oggi alcuna motivazione per tirarsi indietro di fronte a questa opportunità con la consapevolezza che chi saprà coglierla per primo avrà un vantaggio competitivo sostanziale sul breve termine rispetto agli attori esitanti o reticenti del panorama industriale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - The European Green Deal, 2019.
- [2] G. Mawassi, A. Di Pretoro, L. Montastruc, *J. CO₂ Util.*, 2025, **102**, 103251.
- [3] A. Di Pretoro, M. Fedeli *et al.*, *Comput. Chem. Eng.*, 2022, **159**, 107663.
- [4] D.S. Mallapragada, Y. Dvorkin *et al.*, *Joule*, 2023, **7**(1), 23.
- [5] R. Padullés, T.G. Walmsley *et al.*, *Appl. Therm. Eng.*, 2025, **280**(5), 128506.
- [6] R. Bergamini, J.K. Jensen, B. Elmegaard, *Energy*, 2019, **182**, 110.
- [7] H. Kariman, M. Khiadani *et al.*, *Desalination*, 2024, **582**, 117601.
- [8] A. Di Pretoro, F. Manenti, *Non-conventional Unit Operations*, Springer, Cham, 2020.

NUOVA
ENERGIA PER LA
TUA AZIENDA

 **AGICOM** S.r.l.
CONCESSIONARIA DI PUBBLICITÀ PER QUESTA RIVISTA
www.agicom.it

