



DIGITALIZZAZIONE NELL'INDUSTRIA CHIMICA E DI PROCESSO

L'industria chimica e di processo è al centro di una profonda trasformazione digitale, trainata da AI, big data e digital twin. Questa "digitalizzazione" rivoluziona progettazione, gestione e controllo degli impianti, accrescendo efficienza, sostenibilità e sicurezza. L'articolo presenta le tecnologie digitali industriali, illustrando i progressi già fatti e le sfide che restano da affrontare.

L'industria chimica e di processo è impegnata in una trasformazione verso modelli operativi digitalizzati, con l'adozione di tecnologie avanzate come l'intelligenza artificiale (AI), l'analisi dei big data, i digital twin e i sistemi di controllo predittivo. Questa trasformazione sta cambiando radicalmente il modo in cui gli impianti vengono progettati, gestiti e controllati, con effetti positivi su efficienza operativa, sostenibilità e sicurezza. Questo articolo presenta una panoramica delle tecnologie digitali applicate all'industria, illustrando come tali innovazioni stiano già producendo risultati concreti e quali siano le sfide che restano da affrontare.

Introduzione

La digitalizzazione in ambito industriale non si limita all'adozione di strumenti informatici per l'automazione dei processi, ma implica una revisione sistematica di come i dati vengono raccolti, analizzati e utilizzati. Nell'industria chimica, dove la complessità dei processi e la variabilità dei parametri rendono cruciale un controllo rigoroso, l'uso efficace dei dati consente di migliorare la resa, ridurre i consumi energetici e gli scarti e garantire prodotti di qualità. Uno degli aspetti che caratterizza questa transizione è l'impiego del machine learning (ML) e di AI, che integrano i tradizionali modelli deterministici e offrono soluzioni di ottimizzazione precedentemente impensabili [1].

L'AI diventa quindi uno strumento abilitante per la gestione

automatica dei processi e per la manutenzione predittiva, contribuendo a ridurre gli errori umani e a incrementare la tempestività degli interventi correttivi.

Evoluzione del contesto tecnologico e competitivo

Negli ultimi anni, la globalizzazione e la crescente domanda di prodotti chimici specializzati hanno esercitato una forte pressione sui modelli produttivi tradizionali, che hanno dovuto rispondere con rapidità ai mutamenti del mercato. Contestualmente, i progressi informatici hanno abbassato sensibilmente il costo dei dispositivi di calcolo e dei sistemi di trasmissione dati. Inoltre, sono stati sviluppati dei sensori wireless a basso costo, consentendo la diffusione del cosiddetto Internet of Things (IoT) in ambito industriale [2]. Questi ingredienti stanno agendo sull'architettura standard di trasmissione dati. Come si può vedere dalla Fig. 1, la classica struttura monolitica sta passando sempre più verso una soluzione flessibile.

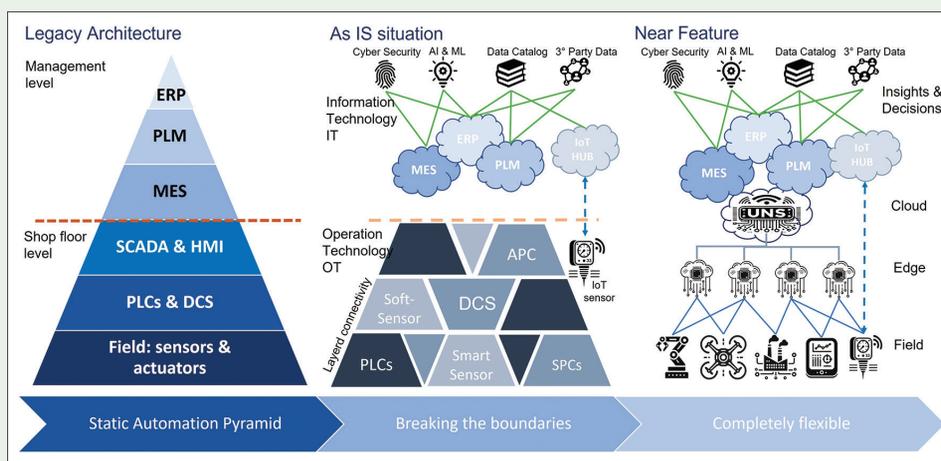


Fig. 1 - Evoluzione dell'architettura informatica per effetto della transizione digitale

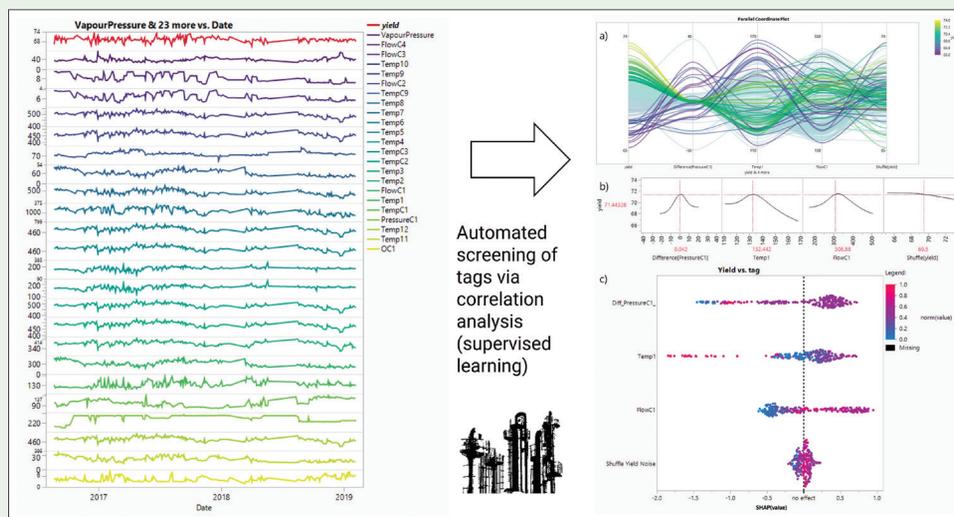


Fig. 2 - Analisi con ML di dati di processo di una colonna di distillazione. Per più informazioni <https://www.chemistryworld.com/webinars/industrial-data-science-for-chemical-process-perfection/4011242.article>

Per il settore chimico e di processo, questo significa poter disporre di una rete capillare in grado di raccogliere parametri operativi (e.g., pressione, temperatura) in tempo reale e di trasmetterli a infrastrutture dedicate per l'analisi e il controllo. Una delle più recenti innovazioni è il concetto di Unified Name Space (UNS), dove tutti i dati vengono aggregati, consolidati e contestualizzati in modo da avere una singola fonte di dati validati. L'abbondanza di dati, tuttavia, rappresenta sia una grande opportunità che una sfida considerevole, in quanto richiede metodologie avanzate per poterli gestire ed analizzare, un'adeguata potenza di calcolo e competenze multidisciplinari che spaziano dalla chimica all'ingegneria del software.

Principi e strumenti chiave della digitalizzazione

Una strategia di digitalizzazione di successo si basa su alcuni elementi tecnologici fondamentali. In primo luogo, i sistemi SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e MES (Manufacturing Execution Systems) costituiscono il cuore dell'acquisizione e dell'organizzazione dei dati provenienti dai reparti produttivi. Questi dati vengono successivamente elaborati da algoritmi di ML, che possono individuare pattern complessi o correlazioni difficili da cogliere con metodi tradizionali [3]. In Fig. 2 è riportato il risultato di un'analisi con metodo di ML dei dati di una colonna di distillazione. Questo metodo consente di individuare in maniera chiara i parametri che impattano sulla purezza di testa, il loro effetto e i setpoint ottimali. Il risultato è visualizzato tramite tre metodi di interpretazione di modelli ML: a) parallel coordinates, b) simulatore della risposta e c) SHAP plot [4].

Un'ulteriore componente chiave è l'Advanced Process Control (APC), che permette di anticipare deviazioni dalle condizioni operative ottimali, Fig. 3 [5-7]. L'AI si è fatto strada anche qui, tramite l'applicazione di algoritmi di Reinforcement Learning (RL). In questo paradigma il controllore APC, continua a "imparare" dai nuovi dati raccolti, mantenendo il modello il più aderente possibile alla realtà dell'impianto. Queste soluzioni consentono di ottimizzare parametri di processo in modo continuo, bilanciando gli obiettivi di resa, qualità e costi energetici.

Infine, l'adozione di piattaforme cloud o ibride consente di centralizzare la gestione e l'analisi dei dati, con vantaggi in termini di scalabilità e sicurezza. Questa soluzione permette alle imprese di accedere alle informazioni in qualsiasi momento e da qualunque posizione, favorendo forme di collaborazione e condivisione dei risultati sia tra i diversi stabilimenti interni sia con fornitori e clienti selezionati [8].

Digital Twin: la rivoluzione della simulazione continua

Un concetto sempre più affermato nell'industria chimica e di processo è il "digital twin", ovvero la creazione di una copia virtuale di un impianto, costantemente aggiornata con

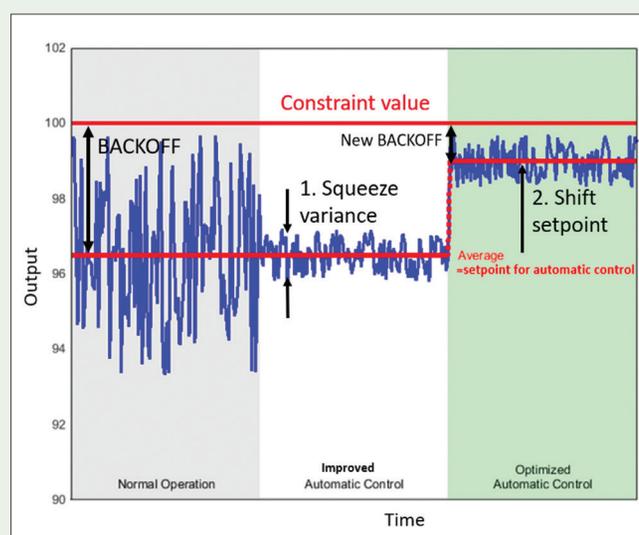


Fig. 3 - Effetto dell'introduzione di un controllore avanzato su una variabile di processo [6]

dati reali provenienti dai sensori [3]. Il digital twin consente di effettuare simulazioni approfondite, verificare scenari alternativi e identificare azioni correttive prima che eventuali anomalie possano incidere sulla produzione.

Le potenzialità di questa tecnologia sono particolarmente interessanti nella progettazione di nuovi impianti, dove il rischio di avviare linee produttive non ottimali può tradursi in perdite economiche considerevoli. L'impiego di digital twin favorisce una fase di testing virtuale che riduce gli errori di start-up e velocizza le modifiche ingegneristiche, garantendo un migliore ritorno sugli investimenti [9].

Una volta realizzato e validato, il gemello digitale costituisce anche uno strumento di formazione e addestramento del personale, per gestire procedure di emergenza, scenari critici o testare nuovi parametri operativi. Questo approccio favorisce la diffusione di una cultura della sicurezza a tutti i livelli organizzativi e stimola l'apprendimento continuo. Un esempio di digital twin completo di modello dinamico e realtà virtuale di una raffineria di crude oil, può essere visto e testato al Politecnico di Milano nella apposita aula per la realtà virtuale [10].

Manutenzione predittiva e Data-Driven Diagnostic

La manutenzione predittiva si basa su algoritmi che analizzano dati storici e in tempo reale per individuare segnali di degrado o potenziali anomalie nelle apparecchiature. Nell'industria chimica, una diagnostica precoce dei problemi può prevenire guasti improvvisi e fermi impianto non programmati, riducendo i costi di manutenzione e i tempi di inattività [5]. Grazie a sensori sempre più economici e a piattaforme IoT, è possibile monitorare grandezze fisiche e chimiche (e.g., vibrazioni, temperature, pH) in modo continuo, inviando allarmi mirati al personale in caso di deviazioni significative.

L'uso del ML per classificare gli stati di salute dei macchinari consente di correlare gli eventi di guasto con specifici trend rilevati nei segnali registrati. Quando questo si verifica il sistema può indicare un malfunzionamento nell'apparecchiatura, consentendo di pianificare un intervento di manutenzione prima che si verifichi un danno più grave [11].

Sfide della digitalizzazione: dati, cybersecurity e cambiamento culturale

Nonostante i benefici, il percorso verso la digitalizzazione presenta varie criticità. La gestione di immense moli di dati richiede un'infrastruttura informatica adeguata, sia in termini di capacità di archiviazione sia di potenza di calcolo. È necessario implementare politiche di data governance che

definiscano standard di qualità, procedure di backup e protocolli di accesso, in modo da evitare che l'accumulo di informazioni possa generare confusione anziché valore [12]. La maggiore esposizione dei sistemi industriali alle reti di comunicazione esterne accresce il rischio di attacchi informatici. L'industria chimica, per la natura sensibile delle sue produzioni, è particolarmente esposta a minacce di sabotaggio, spionaggio industriale o furto di dati. Pertanto, diventa cruciale dotarsi di strategie solide di cybersecurity, che includano protocolli di autenticazione, crittografia delle comunicazioni e regolari verifiche di vulnerabilità [13].

Un ostacolo spesso sottovalutato è di tipo culturale. L'introduzione di tecnologie digitali può suscitare resistenze nel personale, specie se vissuto come un sostituto (o un surrogato) del lavoro umano. È fondamentale promuovere una visione in cui la digitalizzazione affianchi l'operatore, migliorandone le capacità decisionali e alleggerendone i compiti ripetitivi o logoranti. La formazione e la condivisione dei risultati ottenuti sono strategie efficaci per ridurre le barriere al cambiamento [14]. Gli investimenti sul capitale umano e l'aggiornamento di competenze come l'analisi dei big data e la supervisione di sistemi di controllo avanzati sono imprescindibili. Per fare ciò le aziende devono promuovere la formazione interna, collaborare con università e favorire l'open innovation. Inoltre, la creazione di spazi sicuri dove sperimentare e imparare queste tecnologie, "learning factories", è un aspetto cruciale che può velocizzare l'acquisizione di competenze.

Opportunità e impatti sulla sostenibilità

La digitalizzazione non porta solo vantaggi nell'efficienza produttiva, ma offre anche opportunità per rendere i processi più sostenibili dal punto di vista ambientale. L'ottimizzazione dei parametri di processo, la riduzione degli sprechi e il monitoraggio costante dei consumi energetici permettono di contenere le emissioni di gas serra e di sostanze inquinanti. L'AI può aiutare a riconfigurare i processi per sfruttare risorse alternative o ridurre la dipendenza da materie prime critiche. I modelli data-driven, integrati con tecniche di simulazione basate su principi chimico-fisici, consentono di sperimentare in ambito virtuale percorsi di sintesi più "verdi" o con un impatto ambientale ridotto [15].

La possibilità di tracciare in tempo reale i flussi di materia e di energia lungo tutta la filiera produttiva apre la strada a modelli di economia circolare, in cui sottoprodotti e scarti vengono reintrodotti nel ciclo di lavorazione. Ciò richiede un'accurata pianificazione e gestione dei parametri operativi, processi che la digitalizzazione può agevolare.

Prospettive future e tendenze emergenti

La digitalizzazione dell'industria chimica e di processo è destinata a evolversi ulteriormente nei prossimi anni, delineando scenari sempre più interconnessi e automatizzati. L'adozione dell'AI di tipo generativo, la convergenza tra tecnologie di ottimizzazione stocastica e modelli di simulazione termodinamica, e lo sviluppo di reti di sensori basate su protocolli 5G e oltre, sono alcuni esempi di tendenze emergenti [2].

Le piattaforme software integrate, Industrial Operating Systems, mirano a offrire un layer di astrazione che semplifichi la gestione dei dispositivi IoT, degli algoritmi e dei sistemi di controllo. Queste piattaforme potrebbero favorire un ulteriore salto di qualità, rendendo più agile la programmazione dei processi e la scalabilità delle soluzioni digitali [16].

Un'ulteriore prospettiva riguarda l'uso della realtà aumentata (AR) e della realtà virtuale (VR) per la gestione di operazioni complesse e la manutenzione remota. Operatori specializzati, dotati di visori AR, possono ricevere istruzioni e visualizzare in sovrapposizione dati di processo critici, con un conseguente miglioramento nella rapidità e nell'accuratezza degli interventi [10, 17].

Conclusioni

La digitalizzazione sta già trasformando l'industria chimica e di processo, introducendo strumenti e metodologie che ridefiniscono l'architettura stessa degli impianti produttivi. L'adozione dell'AI, il ML e i digital twin favorisce un processo decisionale più informato e tempestivo, accresce la stabilità dei processi e innalza la sicurezza operativa. Inoltre, l'opportunità di migliorare la sostenibilità ambientale e di implementare modelli di economia circolare ne fa un elemento chiave per il futuro di questo settore.

Le sfide, tuttavia, sono consistenti: dalla necessità di formare adeguatamente il personale e di gestire enormi volumi di dati, fino alla protezione dalle minacce cibernetiche. Una strategia di digitalizzazione efficace richiede una visione di lungo periodo, in cui la componente tecnologica si integri con una trasformazione culturale e organizzativa coerente.

L'obiettivo è quello di impianti "intelligenti", capaci di operare in tempo reale sulla base di feedback provenienti dall'ambiente esterno, dai mercati e dai sistemi di simulazione interna. In tale scenario, la cooperazione tra imprese, enti di ricerca e fornitori di tecnologia giocherà un ruolo determinante per favorire la diffusione di standard comuni, garantire l'interoperabilità dei sistemi e promuovere la condivisione delle migliori pratiche. Solo attraverso questo sforzo coordinato la digitalizzazione potrà esprimere appieno il suo potenziale, trasformando l'industria chimica in un settore ancor più competitivo, resiliente e orientato alla sostenibilità.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E.N. Pistikopoulos, A. Barbosa-Povoa *et al.*, *Computers & Chemical Engineering*, 2021, **147**, 107252, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107252>
- [2] C. Shang, F. You, *Engineering*, 2019, **5**(6), 1010, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.019>
- [3] C.K. Lo, C.H. Chen, R.Y. Zhong, *Advanced Engineering Informatics*, 2021, **48**, 101297, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>
- [4] M. Mowbray, M. Vallerio *et al.*, *Reaction Chemistry and Engineering*, 2022, **7**, 1471, <https://doi.org/10.1039/d1re00541c>
- [5] Q. Jiang, X. Yan, B. Huang, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, **58**(29), 12899, DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02391>
- [6] S. Skogestad, *Annual Reviews in Control*, 2023, **56**, 100903, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.100903>
- [7] F. Manenti, *Computers & Chemical Engineering*, 2011, **35**(11), 2491, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.04.009>
- [8] A. Kusiak, *International Journal of Production Research*, 2018, **56**(1-2), 508, DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- [9] S. Thiede, M. Juraschek, C. Herrmann, *Procedia CIRP*, 2016, **54**, 7, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.098>
- [10] A. Galeazzi, P. Marengi *et al.*, *Computer Aided Chemical Engineering*, 2024, **53**, 3535, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-28824-1.50590-1>
- [11] S.A.A. Taqvi, H. Zabiri *et al.*, *ChemBioEng Rew.*, 2021, **8**, 239, DOI: <https://doi.org/10.1002/cben.202000027>
- [12] J. Lee, B. Bagheri, H.A. Kao, *Manufacturing Letters*, 2015, **3**, 18, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- [13] W. Knowles, D. Prince *et al.*, *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2015, **9**, 52, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2015.02.002>
- [14] O. Kohnke, T. Nieland *et al.*, *Journal of Management & Organization*, 2024, **30**(5), 1564, DOI: <https://doi.org/10.1017/jmo.2023.59>
- [15] A. Nikolopoulou, M.G. Ierapetritou, *Computers & Chemical Engineering*, 2012, **44**, 94, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.05.006>
- [16] J. Nagy, J. Oláh *et al.*, *Sustainability*, 2018, **10**(10), 3491, DOI: <https://doi.org/10.3390/su10103491>
- [17] Y.K. Dwivedi, D.L. Hughes *et al.*, *International Journal of Information Management*, 2022, **66**, 105242, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2022.102542>