INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

N. 3/2018

COLORSHADE
SOLUZIONI GRAFICHE EDITORIALI

EVAPORATORI SOTTOVUOTO MONO E MULTIPLO EFFETTO A CIRCOLAZIONE FORZATA

Ing. Mirko Tremani
Eco-Techno srl, Busnago (MB).

La tecnologia dell'evaporazione sottovuoto con fonte energetica termica (vapore o acqua calda), che abbiamo sviluppato, mira a valorizzare questo calore, definibile come "pregiato", allo scopo di concentrare soluzioni che possono rivelarsi più o meno problematiche per la loro natura chimico-fisica. L'obiettivo finale e fondamentale è ottenere, attraverso lo sviluppo di un processo in più stadi di evaporazione, la concentrazione di una soluzione per sottrazione del solvente principale (solitamente acqua) ottenendo approssimativamente un chilo di evaporato da ogni stadio dell'impianto, a fronte di un chilo di vapore speso come energia termica, o di un equivalente quantitativo in metri cubi di acqua calda (a titolo di esempio, si vogliono ottenere, da un evaporatore a tre stadi, tre chili di evaporato a fronte di un chilo di vapore speso).
Le tecnologie e le tipologie di evaporatori sviluppati dalla nostra azienda sono molteplici. In questo articolo ci focalizzeremo maggiormente sugli evaporatori a circolazione forzata con scambio di calore esterno alla caldaia principale. Essi sono l'applicazione predominante con cui vengono trattate le soluzioni più problematiche cui accennato precedentemente e quando i volumi di evaporato giornalieri richiesti diventano ingenti (Fig. 1 a pagina seguente).
Parlando di evaporatori a circolazione forzata con scambio termico, il nucleo della ricerca e dell'ottimizzazione di processo che stiamo protrando è definire le caratteristiche "tipo" che un sistema multistadio di evaporazione deve possedere in ragione delle caratteristiche specifiche del fluido che dovrà trattare: in altre parole delineare quale sia l'assetto migliore (flusso in contro corrente, equicorrente, alimentazioni in parallelo, velocità di circolazione nei sistemi a scambio di calore forzato, pretrattamenti ecc.) affinché il dato prodotto riesca ad essere processato con il migliore dei rendimenti.
Una debita premessa da farsi, riguarda la tipologia di liquidi che possono essere alimentati in questo genere di evaporatori.

I sistemi a ricircolazione forzata sono nati per processare fluidi "problematici" dal punto di vista dello sporcamento, di possibili sedimenti, di presenza di solidi o sali non disciolti nella matrice solvente. Possiamo distinguere questi fluidi tra: reflui da neutralizzazione e lavaggi, acque ad elevato contenuto salino, generici reflui da trattamento acque, miscele oleose/viscose e miscele con composti volatili organici (e non).
Le prime due categorie di prodotti si distinguono per l'avere una elevata concentrazione di ioni destinati a formare, in fase di concentrazione, sali con una solubilità variabile nella soluzione acquosa a seconda della tipologia di composto disciolto e degli effetti della concentrazione di ioni comuni.
Le miscele di reflui, per definizione stessa di refluo, sono spesso mutevoli e caratterizzate dall'avere molteplici aspetti, come l'aggregazione dei composti ionici anch'essi presenti nel refluo o la presenza di una matrice fangosa organica che tende stratificare e complicare la germinazione salina; la scarsa costanza nelle caratteristiche di questi composti rende molto difficile la loro gestione, sia in termini di ripetitività del rendimento di evaporazione, sia in termini predittivi circa il loro comportamento.
Le miscele oleose e di prodotti viscosi hanno la caratteristica di essere problematiche da trattare ad elevato grado di concentrazione a causa della natura "densa" del fluido stesso, che porta ad intrappolare le bolle di acqua in evaporazione e peggiorare lo scambio termico.
Le soluzioni saline, infine, per quanto più "semplici" dal punto di vista della composizione, spesso risultano problematiche per fenomeni di aggregazione e incrostazioni dovuti ad hot spot nelle apparecchiature, nonché soggette a differenze di temperature di ebollizione più significative. A fronte di ciò, il recupero salino da questa tipologia di reflui è spesso utile poiché è disponibile un mercato di vendita del sale così recuperato, associando all'evaporazione ulteriori trattamenti successivi sul concentrato, come, ad esempio, l'utilizzo di centrifughe, decanter o sistemi di filtrazione (Fig. 2).

Per informazioni: Eco-Techno Srl, Via del Lavoro 42 20874 Busnago (MB) Tel. 039.6095958 e-mail: info@eco-techno.it

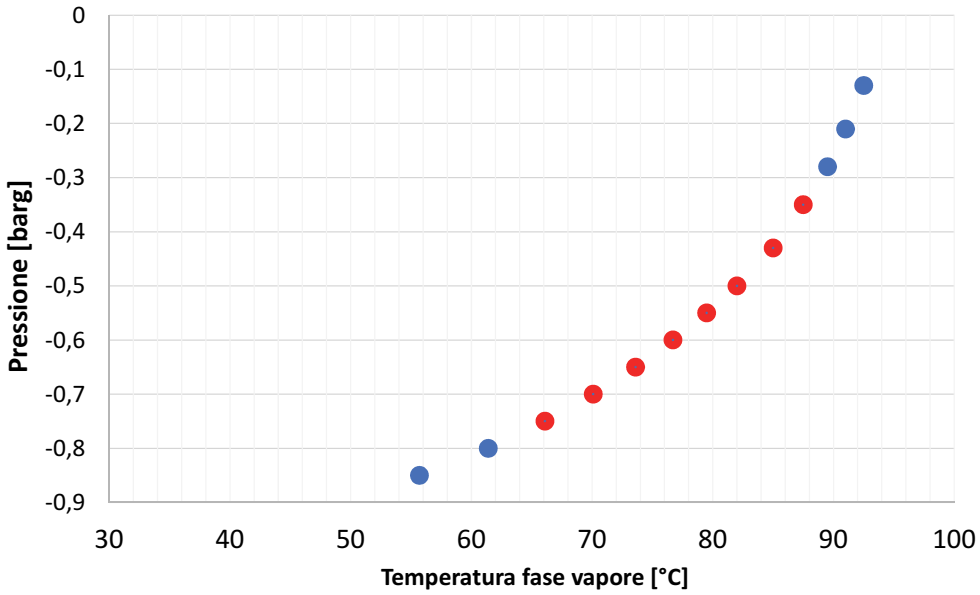

Figura 1 – Evidenziato in rosso il range di funzionamento degli impianti termici mono / multiplo effetto

Più sale la concentrazione più la resa diminuisce. Quando il volume di acqua, o in generale di solvente che possiamo evaporare, diminuisce fino a scomparire, la resa scenderà fino ad annullarsi. Inoltre, nel caso di reflui contenenti solventi bassobollenti (volatili), la resa è superiore a quella nominale con acqua (che costituisce il riferimento in Figura 2) perché le sostanze che hanno un punto di ebollizione inferiore a quello dell'acqua generano una portata superiore a quella dell'acqua.

Fatte queste dovute premesse sulle tipologie di applicazione possibili per gli evaporatori a circolazione esterna forzata, possiamo inoltrarci ora ad analizzare diverse problematiche e soluzioni apportabili sugli impianti per ottimizzarli. Il fine è di ottenere i maggiori benefici sia in termini di stabilità impiantistica che di redditività del processo. La prima decisione da prendere, riguardo l'assetto dell'impianto di evaporazione, è il numero di stadi di cui sarà composto. Per effettuare tale decisione si deve procedere da un lato ad una disanima di tipo economico sui costi gestionali, dall'altro ad uno screening delle proprietà del fluido trattato in relazioni alle dettate condizioni di processo che la nostra scelta inequivocabilmente comporterà.
Lo studio economico da protrarre dovrà bilanciare quindi due principali fattori. Il costo dell'energia utilizzata in termini di evaporazione, definibile costo di gestione, sommato al capitale investito inizialmente per l'acquisto e l'installazione dell'apparecchiatura, dovrà essere relazionato al vantaggio

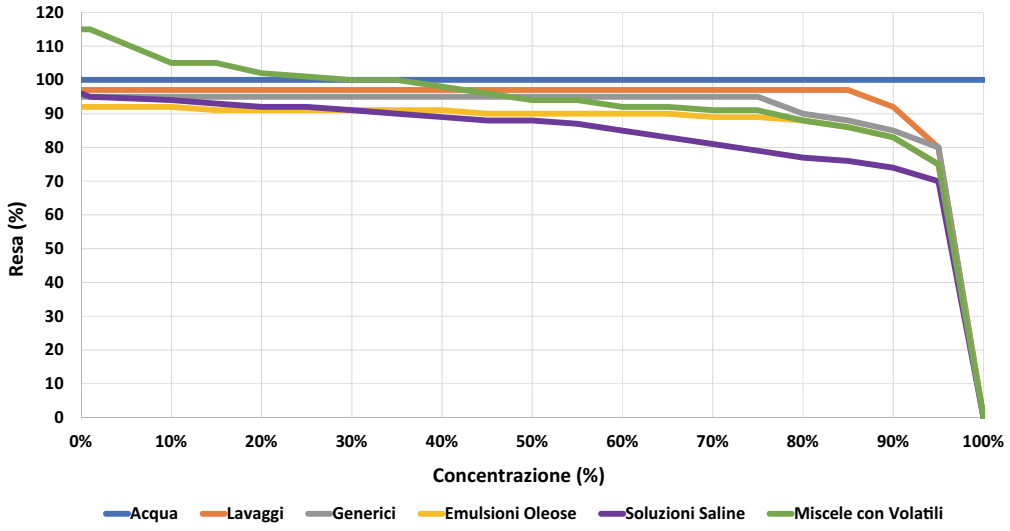

Figura 2 – Resa % comparata con acqua per diversi liquidi in funzione della % di concentrazione

Figura 3 – Evaporatore mono stadio ECO 130.000 DPM1 SE

Figura 4 – Evaporatore doppio stadio ECO 20.000 DPM2 SE

economico annuo derivante dalla differenza tra il risparmio da riutilizzo del distillato e il costo legato allo smaltimento dei volumi di concentrato, i quali risulteranno inferiori rispetto al precedente volume di reflui (senza l'installazione dell'evaporatore) e possibilmente caratterizzati da un incremento del potere calorifico dei reflui stessi (fattore positivo nel caso di smaltimento tramite inceneritore).
Relativamente ai consumi nominali per impianti a mono, doppio o triplo effetto possiamo considerare questi parametri: per un singolo effetto sono necessarie mediamente 600 Kcal/kg che scendono a 320 Kcal/kg e a 245 Kcal/kg rispettivamente in un doppio e triplo effetto. Al contrario del fabbisogno energetico che scende all'aumentare del numero di effetti, il consumo elettrico aumenta, dovendo alimentare il doppio o il triplo delle utilities (pompe valvole ecc). Per questo aspetto, possiamo considerare una potenza elettrica assorbita di circa 15 W/kg per un mono effetto, 22 W/kg per un doppio e 30 W/kg per un triplo effetto. In base alle tariffe di mercato dell'energia in Italia, si hanno dei costi

Figura 5 – Evaporatore triplo stadio ECO 100.000 DPM3 SE

complessivi di evaporazione variabili dai 9 ai 25 €/Ton. Va altresì specificato che questi impianti risultano particolarmente interessanti nel caso si vadano a integrare con sistemi di cogenerazione, dato il costante fabbisogno termico molto utile nel caso di una produzione lineare di energia elettrica. Sempre riguardo al dimensionamento, a fronte del numero di stadi economicamente conveniente, si deve poi procedere a valutare se tale configurazione risulta essere applicabile alla tipologia di refluo che si intende trattare.
Un numero di stadi crescente richiede la necessità di avere diversi "step" a grado di vuoto più spinto, nei quali sfruttare la differenza di temperatura di ebollizione del fluido dovuta alla variazione della pressione. Tali step dovranno essere calibrati in modo da equilibrare l'apporto di evaporato da ciascuno stadio, dimensionando adeguatamente gli scambiatori di calore dell'impianto.
La scelta delle pressioni di ciascuno stadio, tuttavia, determina univocamente la temperatura di esercizio dello stesso e questa ha inevitabili ripercussioni sulle proprietà del fluido trattato, la sua termodinamica e la sua fluidodinamica. Il range di funzionamento di questi impianti è variabile tra una pressione relativa minima di -0.9 Bar e una massima di -0.5 Bar. Ovviamente un impianto mono effetto avrà una maggior flessibilità di un triplo effetto.
Consideriamo ora i diversi fluidi citati in precedenza e vediamo come incidono nelle scelte ingegneristiche della migliore tecnologia.

Reflui da neutralizzazione e lavaggi (Fig. 6)

A seconda della temperatura di trattamento, questi reflui possono presentare smiscelazione di una o più fasi organiche e non. La presenza di una emulsione interfasica in fase di evaporazione/ebollizione può comportare difficoltà e cali di rendimenti e, soprattutto, determinare l'insorgenza di fenomeni quali schiume e formazione di bolle che minano il controllo di livello nelle caldaie di trattamento e possono trasformarsi in trascinamenti o nebbie: questi ultimi tendono a inquinare e peggiorare la qualità del distillato.
Sempre a seconda della temperatura di trattamento, i reflui da neutralizzazione e lavaggio possono dare origine a cristallizzazioni di sali o ancora al miglioramento/peggioramento della velocità di sedimentazione di corpi solidi presenti.
Le acque di lavaggio presentano frequentemente composti quali acidi forti o basi forti molto diluiti, cui si contrappone una frazione salina spesso originata da una base o da un acido deboli, che tende a dare idrolisi. La definizione della temperatura di lavoro per questi fluidi è molto importante, così come l'identificazione di un adeguato sistema di pretrattamento: dalle condizioni scelte si definirà un profilo di pH variabile negli stadi a causa dell'idrolisi associata ai composti elencati e un eventuale presenza di composti acidi o basici nel distillato. Da tutti questi parametri, a loro volta, dipenderà la scelta dei materiali di costruzione dell'impianto.

Figura 6 – Reflui da lavaggi esausti

Generico refluo di trattamento (Fig. 7)

Quando un impianto si vede "costretto" a trattare un refluo piuttosto generico e mutevole nel tempo, le condizioni di processo e di trattamento definite devono essere elastiche e cercare di tenere conto di eventuali "macro famiglie" di sottoclassificazione dei reflui. Si potrà così assestare l'impianto su dei parametri "standard" che possono poi essere calibrati con una serie di piccole modifiche in relazione alla singola campagna di smaltimento che si sta per intraprendere.

Figura 7 – Refluo generico con cloruri e grassi

Miscele oleose/viscose (Fig. 8)

Anche in questo caso è importante definire la presenza o meno di più fasi all'interno della miscela da trattare a seconda della temperatura di processo. Definito un eventuale sistema di pretrattamento, volto all'eliminazione di fasi organiche surna-

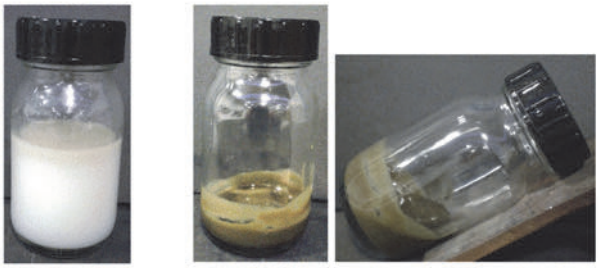

Figura 8 – Miscele oleose/viscose

tanti e già presenti in alimentazione all'impianto, è possibile che una parte della frazione organica oleosa tenda a separarsi solo in stadi successivi a quello di alimento, fino ad arrivare a livelli di concentrazioni tali per cui la presenza di acqua è praticamente assente. In queste condizioni la temperatura raggiunta risulta essere di fondamentale importanza, così come il tempo di concentrazione e permanenza del refluo trattato nell'impianto. Alla temperatura, infatti, si correlano densità e viscosità del fluido, con evidenti ripercussioni sul design e le potenze elettriche assorbite dalle pompe di ricircolazione. Oltretutto, maggiore sarà la viscosità del sistema e maggior sarà la difficoltà con cui il calore verrà scambiato.
In scarsa presenza di acqua, matrici organiche concentrate possono anche generare degradazione termica dovuta alle alte temperature con formazione di fouling e incrostazioni.

Soluzioni saline (Fig. 9)

La temperatura svolge un ruolo cruciale all'interno dei sistemi salini, nei quali si intenda inserire anche un sistema di recupero del sale stesso. Alla temperatura è infatti associata la solubilità del sale all'interno dei diversi stadi a seconda del grado di concentrazione raggiunto. Definire questi parametri è importantissimo: un errore di valutazione può portare ad avere eccessiva precipitazione in stadi precedenti a quello di scarico, con conseguente intasamento di tubazioni e blocco dell'impianto; altresì giungere allo scarico con una concentrazione poco spinta in condizioni di alta temperatura (e solubilità) può determinare uno scarso recupero di sale in termini massivi (fatto salvo di effettuare raffreddamenti per recuperare il sale successivamente in un cristallizzatore) poiché solamente la frazione di sale oltre la soglia di saturazione è recuperabile, con un termine di efficienza legato al sistema preposto a tale recupero che influenzerà e tenderà a diminuire ulteriormente tale rendimento di separazione.

Miscele con composti volatili (Fig. 10)

Un capitolo a sé e molto importante è quello delle miscele di reflui che presentino al loro interno una frazione di composti "leggeri", definiti tali per la loro temperatura di ebollizione alle pressioni di lavoro di impianto molto bassa rispetto a quella dell'acqua. La tensione di vapore di questi composti svolge un ruolo chiave nel bilanciamento e nella resa evaporativa di ciascuno stadio. Questi componenti, per loro natura, tendono a liberarsi molto più facilmente quando si presenta un salto di pressione come quello tra stadio e stadio di un evaporatore a multiplo effetto.
A fronte di una maggior facilità a migrare nella fase gassosa, si avrà che queste miscele, alimentate all'impianto di evaporazione, tenderanno a fornire maggiore produzione di vapori nel primo/nei primi stadi, elemento solo parzialmente positivo: le condizioni termodinamiche instaurate possono richiedere temperature più basse per la ricondensazione di tali composti "flashati" in ingresso all'impianto.
Per quanto si ottenga quindi una quantità di vapore maggiore, l'impianto potrebbe essere sbilanciato per incapacità di questi gas stessi a ricondensa-

Figura 9 – Reflui di soluzioni saline

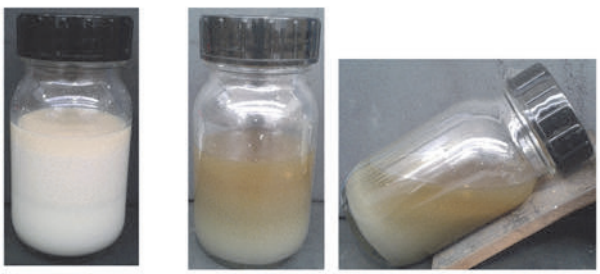

Figura 10 – Reflui con sostanze volatili

re a temperature troppo elevate, determinando il trasferimento a stadi successivi di solo calore sensibile anziché del calore latente di condensazione. Questo si traduce in un mancato apporto termico necessario all'evaporazione del fluido nello stadio successivo. L'instabilità così generata da questo genere di composti può determinare sbilanciamenti nel carico termico dei singoli stadi con conseguenti surriscaldamenti o anomalie del sistema di gestione del vuoto, il quale si vede coinvolto nell'aspirazione di gas non condensati in una ragione maggiore rispetto a quanto stabilito in fase di design.

Avendo analizzato quanti e quali parametri sono da tenere in considerazione per la definizione del numero di stadi di un impianto di evaporazione, possiamo giungere all'aspetto impiantistico cui abbiamo accennato precedentemente: la tipologia del flusso attraverso l'impianto.
Si definiscono due principali assetti di impianto di evaporazione, in serie o in parallelo, i quali poi si differenziano in ulteriori sotto classificazioni dovute al flusso in equicorrente o in controcorrente di prodotto e di vapore generato.
Negli impianti in serie a più effetti il prodotto viene alimentato ad un singolo stadio (esempio il primo) e il concentrato scaricato solo dall'ultimo stadio (esempio il terzo), mentre il semilavorato liquido procede di stadio in stadio senza ulteriori scarichi di concentrato intermedi (continuando l'esempio, il prodotto alimentato al primo stadio passa al secondo e quindi al terzo da cui viene scaricato come concentrato).
Negli impianti in parallelo, il prodotto è alimentato e scaricato singolarmente in ogni stadio, in modo tale che ogni camera lavori come un'unità a se stante e collabori con le altre per il solo recupero del calore di condensazione dei precedenti effetti (il prodotto alimentato al primo stadio raggiungerà un certa soglia di concentrazione nel primo stadio e da esso verrà scaricato, senza trasferimento di liquido tra stadi).
Entrambe le tipologie di impianto (serie o parallelo), come accennato, si differenziano per l'iter che la fonte termica e il flusso di evaporato/ricondensato/cascame termico seguono lungo l'impianto, differenziandosi in equicorrente e controcorrente.
In un impianto in equicorrente, prodotto liquido alimentato e vapori generati seguono lo stesso percorso, passando da uno stadio a quello successivo: al progredire della fase semilavorata, il refluo scambia termicamente con i vapori generati in precedenza dallo stadio che ha lasciato, e così via lungo il cascame termico (liquido e vapori del primo stadio sono alimentati al secondo e quelli generati dal secondo, al terzo e così via).
In un impianto in controcorrente, il prodotto alimentato e i vapori generati seguono due percorsi opposti, procedendo l'uno dal primo all'ultimo stadio, dal quale verrà scaricato il prodotto concentrato, gli altri dall'ultimo al primo stadio, effettuando il riscaldamento e lo scambio termico con lo stadio precedente a quello di generazione.
Nell'impianto in equicorrente abbiamo il trasferimento dallo stadio a più alta pressione a quello a più bassa pressione, da cui il prodotto lascia l'impianto. Questo genere di configurazione è utile qualora si trattino delle soluzioni che siano termicamente instabili e per le quali, ad elevato tenore di concentrazione, si sia riscontrata una problematica di degenerazione del prodotto liquido con formazione di sporcamento o irrimediabile deterioramento delle proprietà del concentrato. Questa è la configurazione più facile dal punto di vista realizzativo e utilizzabile qualora non si abbia una approfondita conoscenza del refluo trattato, sia per penuria di dati termodinamici riguardo lo stesso, sia per variabilità del prodotto in ingresso. Una configurazione di questo tipo è quindi da preferirsi quando si abbiano reflui da trattamenti incostanti a monte.
Qualora il refluo trattato presenti un elevato carico di tensioattivi e formazione di schiume, l'alimentazione allo stadio di alta pressione del prodotto può essere un ulteriore vantaggio: l'effetto di flash iniziale risulta essere meno marcato e, quindi, si avrà una formazione di bolle più contenuta in fase di liberazione dei vapori e minore formazione di schiume. Allo stesso modo eventuali composti gassosi disciolti verranno liberati successivamente e per gradi ottenendo lo stesso risultato al crescere del valore del vuoto raggiunto.
Nell'impianto in equicorrente si hanno due ulteriori fattori: alimentando il prodotto allo stadio a più alta pressione e temperatura, tutto l'apporto termico necessario al preriscaldo dell'intera corrente trattata deve essere fornito dalla fonte energetica esterna; al contempo il raggiungimento di un grado di vuoto ulteriore di stadio in stadio determina un apporto di evaporato dovuto all'effetto flash che si somma a quanto determinato dallo scambio di calore. Questi due fattori tendono a bilanciarsi.
Gli impianti in controcorrente si distinguono, invece, per avere il prodotto alimentato allo stadio a più bassa pressione e temperatura. Questo permette di avere il concentrato nello stadio a più alta tem-

peratura dove la sua viscosità sarà quindi più bassa e lo scambio termico migliore grazie ai parametri chimico fisici più favorevoli.
Oltre a questo, il principale vantaggio derivante dalla configurazione controcorrente è che lo stadio concentrato, più soggetto a incrostazioni e problemi di fouling, è termicamente alimentato dalla utility esterna, sia essa vapore o acqua calda, ed è conseguentemente più gestibile sia in termini di processo che di automazione e controllo.
Consideriamo a tal proposito il comportamento di un impianto in equicorrente: qualora la soluzione concentrata non sia più in grado di evaporare per incrostazioni o altri fattori, si ha il crollo del coefficiente di scambio dell'ultimo stadio. A fronte di questo decremento si avrà una diminuzione del calore scambiato e quindi un aumento dei vapori incondensati nello stadio precedente, con corrispondente aumento di pressione e temperatura. Questo determina, a sua volta, una diminuzione della differenza di temperatura per lo scambio con l'effetto precedente ancora. Quest'ultimo diminuirà anch'esso lo scambio termico e la quantità di evaporato: in sequenza l'effetto si ripercuoterà sugli enne stadi precedenti.
L'unico modo per ovviare a questa situazione è modificare la temperatura del primo stadio nel quale viene alimentato il flusso termico esterno, ma questa azione avviene solo dopo che tutto il sistema è andato in "crisi" per il surriscaldamento e l'aumento della pressione.
Contrariamente, in un impianto in controcorrente la risposta ad un decremento di scambio all'ultimo stadio risulta immediata e permette una azione correttiva repentina, poiché la gestione di calore, utility esterna e temperatura è legata alla fase concentrata stessa.
Gli impianti in parallelo, giusto per completare il panorama, si utilizzano per concentrare soluzioni che richiedano un breve tempo di residenza nell'impianto o per operare con due fluidi distinti tra camere effettuando un recupero termico, quando i tempi di concentrazione tra i diversi fluidi risultino coerenti tra loro.
Avendo compreso le diverse tipologie di impianto, possiamo provare ora ad associare le caratteristiche dei fluidi precedentemente analizzati con gli assetti che abbiamo evidenziato.
Qualora non si conoscano sufficienti informazioni o il refluo risulti essere incostante e mutevole, la configurazione in equicorrente è la soluzione più indicata, per la maggior semplicità impiantistica e per la stabilità rappresentata dall'appaiamento dei flussi, nonché per il raggiungimento di un grado di concentrazione garantito da un riscaldamento della miscela iniziale.
Nel caso in cui si identifichino gas incondensabili disciolti (esempio CO_2) o altri composti leggeri, bisognerà effettuare una importante scelta in base alla quantità degli stessi e optare, nel caso di presenza di tensioattivi per una equicorrente e formazione di poche schiume o, in caso opposto, ad una configurazione in controcorrente, la quale permetterà di alimentare il prodotto allo stadio con condensazione derivante da frigorie esterne all'impianto e, quindi, dimensionabile a se stante sia per temperature di scambio che per carico termico, cercando di garantire la condensazione dei composti leggeri o, al più, facilitando lo sfiato degli incondensabili senza determinare bolle di sovrappressione nelle caldaie.
Nel caso di soluzioni oleose si potrà optare per operatività in parallelo oppure in serie in controcorrente: nel primo caso si predilige un breve tempo di permanenza nell'impianto, mentre nel secondo si cercherà di mantenere alto il coefficiente di scambio di queste soluzioni viscose e filmanti, operando direttamente sul calore del terzo stadio.
Per le soluzioni saline dalle quali si voglia recuperare successivamente del sale, si tenderà ad operare in contro corrente qualora allo scarico sia presente un successivo sistema di raffreddamento e cristallizzazione: operando a più alta temperatura nello stadio concentrato otterremo sì maggiore scambio termico, ma anche una solubilità maggiore del sale e, quindi, una maggiore difficoltà al raggiungimento di condizioni di sovra saturazione. Il mantenimento di alte temperature è ottimale anche per i sistemi salini che prevedono una maggiore solubilità in acqua calda rispetto all'acqua fredda, per evitare la formazione di addensamenti di sale nei punti freddi del sistema. Qualora il recupero del sale sia fatto direttamente dal concentrato dell'evaporatore, al contrario, si preferirà optare per avere lo stadio del concentrato come il più "freddo" del sistema ed operare quindi in equicorrente.

Ovviamente, quanto esposto è molto sintetico e ogni sistema, per avere la migliore soluzione, deve essere studiato a sé ogni singolo fattore è da valutarsi e studiarsi opportunamente. Le linee guida evidenziate, tuttavia, sono le principali discriminanti che possono definire l'iter di questo studio del prodotto da trattare ed indicare gli step successivi volti alla definizione della migliore tipologia impiantistica da implementare.